

The Corten Wind Turbine: Unexpected Advantages of Five or Seven Rotor Blades

Dr. ir. Gustave P. Corten, Msc Nuclear Physics, PhD in Wind Turbine Aerodynamics

This document is, apart from the patent applications and several videos, the first publication of the physical foundations, technical concepts, hypotheses, and preliminary analyses underlying the Corten Wind Turbine. It is intended to stimulate independent technical validation and discussion.

Executive Summary

The Corten Wind Turbine is a new wind turbine design with the potential to reduce the five largest environmental disadvantages of wind energy: shadow flicker, landscape impact, noise, bird fatalities, and composite waste. At the same time, several technical advantages arise. If these advantages are indeed achieved, initial analyses and scenarios indicate an increase in onshore wind capacity of 20% and offshore wind capacity of 15% by 2045 in the Netherlands and Europe. The Corten Wind Turbine could therefore play a key role in accelerating the energy transition.

The advantages largely follow from known optical, aerodynamic, acoustic, and structural principles that are applied in a new combination. The Corten Wind Turbine is therefore not a fundamentally new form of wind energy and is not based on a new physical principle.

The author's key finding is that a configuration with five or seven slender blades provides significant environmental benefits. In addition, a truss structure in the rotor centre provides additional advantages and prevents the much more slender blades from deflecting beyond acceptable limits.

Onshore Application

Wind energy is a crucial technology for the energy transition, but particularly the expansion of onshore wind is stagnating [1]. Causes include public resistance [2, 3], spatial limitations, grid congestion, and the technical limits of increasingly larger rotor blades.

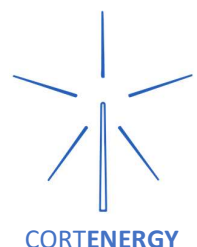
The Corten Wind Turbine aims to reduce the impact of wind turbines without reducing efficiency. Initial analyses appear to indicate that this objective can be achieved through two design changes:

- Increasing the number of blades from three to five or seven more slender blades; and
- Replacing the first 30% of the blades with a truss structure.

The table below briefly shows how the new design simultaneously improves the five societal problems associated with wind energy.

The design also offers several additional technical advantages:

Transport, production, and installation or replacement of the smaller blades become simpler. Furthermore, scalability improves because larger rotor swept areas can be achieved



without the blades themselves having to become increasingly longer. The rotor has lower solidity, reducing survival wind speed loads on the tower and foundation. There is greater design freedom due to a larger separation between the primary excitations (normally 1P–3P and, for the Corten rotor, 1P–5P or 1P–7P).

Problem	Solution through the Corten Wind Turbine
1. Shadow flicker	Shorter, more slender blades reduce shadow flicker effects by approximately 50%.
2. Landscape impact	More and much smaller blades disappear from view earlier, create a visually more continuous rotor, and are less likely to trigger visual disturbance, thereby reducing visual impact.
3. Noise	Higher frequencies (due to shorter blade chord) reduce audible peak noise by 3–5 dB. The increased number of blades largely eliminates amplitude modulation ("whooshing"), and lower load variations on the rotor reduce infrasound.
4. Bird fatalities	Twice as many blades generate twice as many, but half as strong, tip vortices, reducing the hazardous airspace for birds. The lower solidity reduces collision probability, and the hypothesis, which requires field validation, is that the smaller gaps between the blades cause birds to avoid the rotor more often.
5. Composite waste	The truss structure replaces approximately 50% of the composite material in the inner blade section. This reduces costs and waste.

The improved societal acceptance increases the implementation of onshore wind for four reasons:

1. Lower project development risk;
2. More locations becoming available;
3. Improved repowering opportunities; and
4. Shorter project development times.

Offshore Application

For offshore application of the Corten Wind Turbine, only the second design modification is required: the truss structure in the centre while maintaining three blades. This results in five advantages:

1. Lower loads due to lower solidity, enabling a larger rotor and therefore higher energy yield;
2. Halving of the amount of composite material;
3. Lower probability of rotor failure in the 0–30% radius region;
4. Easier blade replacement (the blade weighs half as much); and
5. Greater scalability (25% larger diameter with the same blade length).

Conclusion and Future Outlook

Future scenarios, based on the assumption that the Corten Wind Turbine indeed achieves the improvements described above, suggest that the new design could lead to:

- 20% more onshore wind capacity in Europe by 2045.
- 15% more offshore wind capacity in Europe by 2045.

A new rotor concept has now been developed for which several known physical effects predict that it can reduce the main societal barriers to wind energy and thereby accelerate the deployment of wind power.

De Corten-windturbine: onverwacht voordeel van vijf of zeven rotorbladen

Dr. ir. Gustave P. Corten, kernfysicus gepromoveerd op windturbineaerodynamica

Dit document is, afgezien van de patentaanvragen en enkele video's, de eerste publicatie van de fysische onderbouwing, technische concepten, hypotheses en voorlopige analyses die ten grondslag liggen aan de Corten-windturbine. Het is bedoeld om onafhankelijke technische validatie en discussie te stimuleren.

Executive Summary

De Corten-windturbine is een nieuw windturbine ontwerp met het potentieel om de vijf grootste milieunadelen van windenergie te verminderen: slagschaduw, landschapsaantasting, geluid, vogelsterfte en composietafval. Tegelijkertijd ontstaan diverse technische voordelen. Als deze voordelen inderdaad gerealiseerd worden, dan wijzen eerste analyses en scenario's op een toename van het onshore winvermogen met 20% en het offshore-vermogen met 15% in 2045 in Nederland en in Europa. De Corten-windturbine zou daarmee een sleutelrol kunnen spelen in het versnellen van de energietransitie.

De voordelen volgen grotendeels uit bekende optische, aerodynamische, akoestische en constructieve principes die in een nieuwe combinatie worden toegepast. De Corten-windturbine is dus geen fundamenteel nieuwe vorm van windenergie en berust niet op een nieuw fysisch principe.

De nieuwe bevinding van de auteur is dat een configuratie met vijf of zeven slanke bladen aanzienlijke milieuvoordelen oplevert. En dat een vakwerkconstructie in het rotorcentrum extra voordeel oplevert en voorkomt dat de veel slankere bladen ontoelaatbaar doorbuigen.

Onshore-toepassing

Windenergie is een cruciale technologie voor de energietransitie, maar met name de toename op land stagneert [1]. Oorzaken zijn maatschappelijke weerstand [2, 3], ruimtelijke beperkingen, netcongestie en de technische grenzen van steeds grotere rotorbladen.

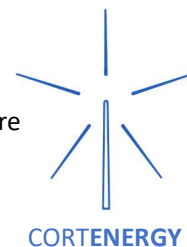
De Corten-Windturbine doelt op het reduceren van de hinder die windturbines veroorzaken zonder het rendement te verlagen. De eerste analyses lijken aan te geven dat dit doel bereikt kan worden door twee ontwerpwijzigingen:

- Toename van het aantal bladen van drie naar vijf of zeven slankere bladen en
- Vervanging van de eerste 30% van de bladen door een vakwerkconstructie.

De onderstaande tabel geeft kort weer hoe het nieuwe ontwerp de vijf maatschappelijke problemen van windenergie tegelijk verbetert.

Het ontwerp biedt daarnaast enkele technische voordelen:

Het transport, de productie en de installatie of vervanging van de kleinere bladen eenvoudiger. Bovendien is de opschaalbaarheid beter omdat grotere rotoroppervlakken mogelijk zonder dat de bladen zelf steeds langer hoeven te worden. De rotor krijgt een lagere



soliditeit wat de overlevingswindsnelheid belastingen verlaagt voor de toren en het fundament. Er is meer ontwerpvrijheid door een groter verschil tussen de primaire excitaties (normaal van 1P - 3P en bij de Corten-rotor 1P - 5P of 1P - 7P).

Probleem	Oplossing door Corten-windturbine
1. Slagschaduw	Kortere, slankere bladen verminderen slagschaduw effect met $\pm 50\%$.
2. Landschapsaantasting	Meer veel kleinere bladen verdwijnen eerder uit het zicht, creëren een visueel continuere rotor, en triggeren minder snel onrust, wat de visuele impact vermindert.
3. Geluid	Hogere frequenties (door kortere bladkoorden) reduceren hoorbaar piekgeluid met 3-5 dB, door het grotere aantal bladen verdwijnt amplitudemodulatie ("whooshing") grotendeels en zijn belastingswisselingen op de rotor lager waardoor infrageluid daalt.
4. Vogelsterfte	Twee keer zoveel bladen genereren twee keer zoveel, maar half zo sterke tipvortices, wat de gevaarlijke ruimte voor vogels verkleint. De lagere soliditeit vermindert de botsingskans en de hypothese (die veldvalidatie nodig heeft) is dat de kleinere opening tussen de bladen vogels vaker laat uitwijken.
5. Composietafval	De vakwerkconstructie vervangt ongeveer 50% van het composietmateriaal in het binnenste bladdeel. Dit bespaart kosten en reduceert afval.

De betere maatschappelijke acceptatie vergroot de implementatie van onshore wind om vier redenen:

5. minder afbreukrisico bij parkontwikkeling;
6. meer locaties beschikbaar;
7. betere repowering; en
8. kortere projectontwikkeltijd.

Offshore-toepassing

Voor offshore toepassing van de Corten-windturbine volstaat de tweede ontwerpwijziging: de vakwerkconstructie in het centrum en onveranderd drie bladen. Dan zijn er vijf voordelen:

6. Lagere belastingen door lagere soliditeit, dus grotere rotor mogelijk, dus meer opbrengst,
7. Halvering hoeveelheid composiet,
8. Kleinere kans op rotor falen in gebied van 0-30% radius,
9. Bladvervanging eenvoudiger (blad weegt de helft) en
10. Grotere opschaalbaarheid (25% meer diameter met dezelfde bladlengte).

Conclusie & Toekomst

Toekomstscenario's, gebaseerd op de aanname dat de Corten-windturbine de genoemde verbeteringen inderdaad waarmaakt, suggereren dat het nieuwe ontwerp zou kunnen leiden tot:

- 20% meer onshore windvermogen in 2045 in Europa.
- 15% meer offshore windvermogen in 2045 in Europa.

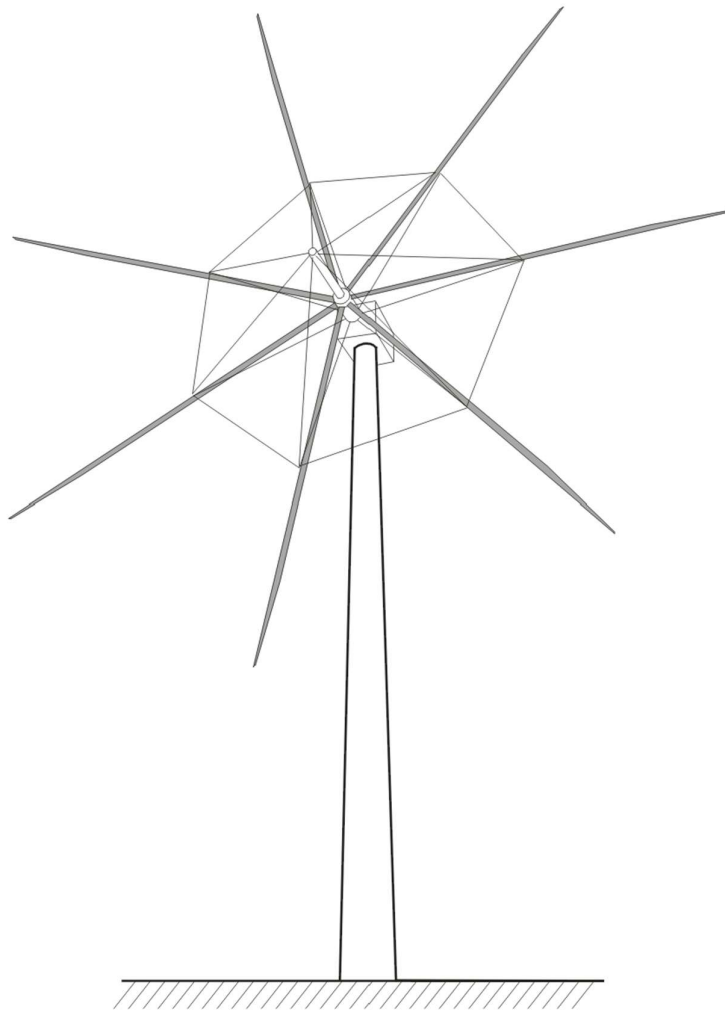
Er bestaat nu een nieuw rotorconcept waarvan meerdere bekende fysische effecten voorspellen dat het de belangrijkste maatschappelijke barrières van windenergie kan verminderen en daarmee de implementatie van windenergie kan versnellen.

1. Inleiding

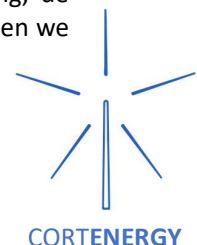
Windturbines leveren tegenwoordig ongeveer 25% [4] van de Nederlandse elektriciteitsconsumptie. De Nederlandse overheid streeft naar 50% in 2030 en maar liefst 70% in 2050 [5]. Op land zou het geïnstalleerd vermogen dan toenemen van 8GW nu naar 10 GW in 2030 en 14GW in 2050. Met de huidige generatie windturbines is dat landdoel echter moeilijk haalbaar. Veel projecten stuiten naast netcongestie op hevige weerstand van omwonenden, waardoor procedures jarenlang vertraging oplopen. Deze problematiek speelt niet alleen in Nederland; overal in Europa kampen nieuwe windparken op land met vergelijkbare vertragingen. In China, de koploper in de windenergie, speelt het probleem nu nog minder, maar gezien de daar geplande enorme vermogens op land (290 GW extra in 2030 en, 1140 GW extra in 2050) zal hinder ook daar waarschijnlijk een grote rol gaan spelen. De hinder van grote, commerciële windturbines wordt door de maatschappij steeds minder geaccepteerd. Het gaat hierbij vooral om

slagschaduw, landschapsvervuiling, geluidshinder, vogelslachtoffers en de moeilijke recyclebaarheid van de huidige bladen. De heersende opvatting in de windenergiewereld is dat deze nadelen inherent zijn aan de enorme draaiende wieken die nodig zijn om voldoende energie op te wekken. Hoewel een lichte geluidsreductie mogelijk is en sommige nieuwe composietmaterialen beter recyclebaar zijn, dacht men dat er in de kern weinig aan de hinder te doen was.

De auteur kwam in de afgelopen jaren tot de conclusie dat twee ontwerpwijzigingen die hinder in belangrijke mate kunnen reduceren, zonder dat dit ten koste gaat van het rendement. Zo ontstond de Corten-windturbine die voor het eerst is gepubliceerd in patent aanvragen [6, 7, 8]. Het is een conventionele windturbine met een ander rotorontwerp: de Corten-rotor. In de volgende vijf hoofdstukken behandelen we de maatschappelijke hindernissen en hoe het nieuwe ontwerp verbetering. Daarna gaan we in op efficiëntie, schaalbaarheid, dynamica, efficiëntere parkontwikkeling, de grootste winst: meer implementatie op land. Dan behandelen we nog de mogelijkheden van het concept voor offshore toepassing, financiële gevolgen, toename beschikbare locaties, offshore-toepassing, de effecten voor de Europese windturbine industrie, de nadelen die we nu voorzien en slot wijden we wat woorden aan validatie.

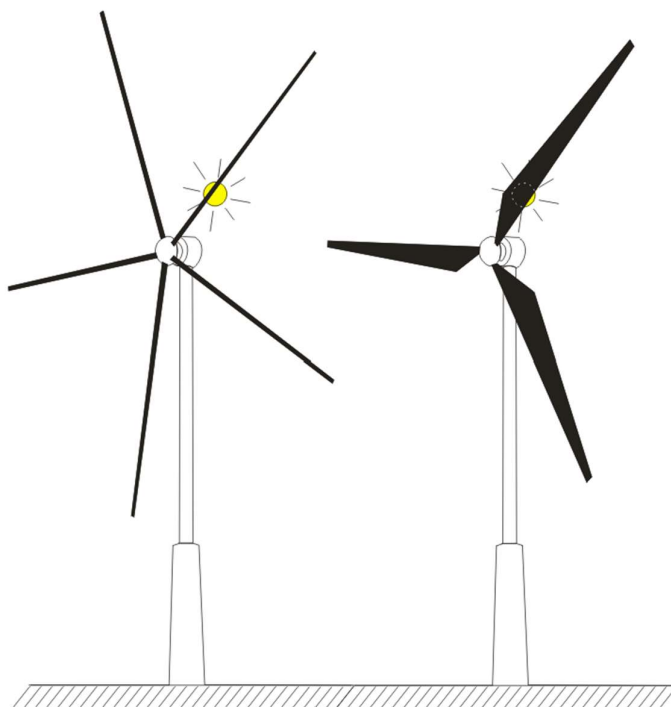


Figuur 1: De Corten-windturbine met zeven slanke bladen en een vakwerkconstructie in het rotorcentrum.



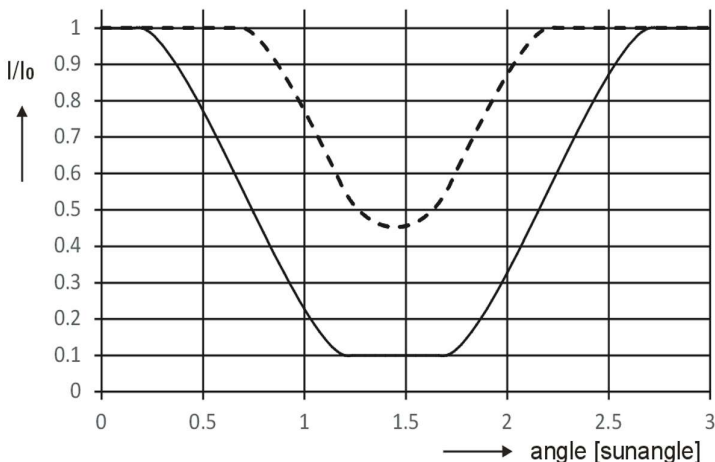
2. Slagschaduw

Slagschaduw wordt in de sector vaak als een onoplosbaar probleem gezien. De gangbare opvatting is: zolang er een blad tussen de zon en een woning beweegt, knippert het licht daar. De auteur realiseerde zich dat er wellicht toch een deeloplossing is: De zon is zichtbaar onder een hoek van 0,5 graden. Als je een turbineblad ziet onder een kleinere hoek dan die 0,5 graden, dan schijnt de zon er simpelweg 'omheen', zie figuur 2. Dus als we windturbinebladen veel slanker ontwerpen dan neemt de schaduw sterk af, zie figuur 3. Als uitvinder van het *slender blades*-concept [9] kende de auteur de ontwerpprincipes voor een slank blad, namelijk door profielen te kiezen met hoge aerodynamische lift, door het aantal bladen te vergroten en door de ontwerpwaarde van zogenaamde axiale inductiefactor lager te kiezen dan de waarde voor maximale energie-extractie, de tipsnelheid kan ook aangepast worden, maar die is gelijk gehouden om een goede vergelijking met een conventionele windturbine te kunnen maken. Zo ontstond de gedachte dat slagschaduw fors afneemt door van de gebruikelijke drie wieken over te stappen op bijvoorbeeld vijf of zeven wieken. Slagschaduw kan overigens uitermate hinderlijk zijn, maar is een relatief zeldzaam fenomeen: het treedt alleen op bij direct zonlicht en als de zon, de wieken en de persoon die hinder ervaart zich precies op één lijn bevinden en dan nog alleen als de windturbine draait.



Figuur 2: De slanke bladen van een vijf blads Corten-windturbine dekken de zon slechts partieel af terwijl een conventionele windturbine volledige afdekking geeft en dus een diepere slagschaduw.

De reductie van slagschaduw is een voordeel voor mensen en dieren maar kan ook de productie van zonnepanelen vergroten. Bij zonnepanelen kan het deel van het paneel dat de laagste instraling heeft de opbrengst van het hele paneel begrenzen. Soms begrenst één paneel met lagere instraling ook de opbrengst van andere in serie geschakelde panelen. Omdat bij de Corten-windturbine de core shadow (volledige afdekking van de zon) bijna niet meer voorkomt en de gemiddelde beschaduwing ook afneemt, zal de opbrengst van zonnepanelen minder dalen dan bij een conventionele windturbine. Het voordeel hangt verder sterk af van het type zonnepanelen, de wijze van schakeling en van de inverters.



Figuur 3: Voorbeeld van het verloop van de licht-intensiteit door de schaduw van een passerend rotorblad van een conventionele windturbine (doorgetrokken lijn) en van een blad van een even grote Corten-windturbine met zeven bladen (stippellijn).

3. Landschapsaantasting

Frequentie van voorkomen

Hoewel de visuele aantasting van het landschap door omwonenden meestal als minder intens wordt ervaren dan slagschaduw, treedt het probleem ruwweg 1000 keer zo vaak op.

In eerste orde benadering nemen we even aan dat slagschaduw een oppervlakte aantast ter grootte van de rotor, dus $\frac{1}{4}\pi D^2$, bij lage zonnestand neemt het oppervlak van de projectie van de rotor op de grond flink toe, bijvoorbeeld met een factor $(\tan 10^\circ)^{-1} = 5,7$. In Nederland is het percentage van de tijd dat er direct zonlicht is ongeveer 19%, ongeveer $\frac{1}{5}$. Deze twee effecten strepen we tegen elkaar weg en concluderen dat het hinderoppervlakte ongeveer gelijk is aan de rotoroppervlakte van $\frac{1}{4}\pi D^2$.

Bij landschapsaantasting speelt dat windturbines bij heldere lucht tot wel 10km en soms zelfs 20km afstand zichtbaar kunnen zijn. Gaan we even uit van 10km en een rotordiameter van 200m, dan is de turbine dus zichtbaar tot 50D. De oppervlakte rondom de turbine met een straal van 50D is $\frac{1}{4}\pi (2 \times 50D)^2 = 10.000 \times \frac{1}{4}\pi D^2$, dus 10.000 keer het slagschaduwoppervlak. In de praktijk verdwijnt een windturbine echter vaak uit het zicht doordat er bebouwing of begroeiing tussen de waarnemer en de windturbine staat. Dit is erg afhankelijk van de situatie. Aan zee, in een open veld of in een hoog gebouw speelt dit nauwelijks en is de factor 10.000 een redelijke schatting. In een bos op de grond speelt het sterk en is een factor 10 soms een betere schatting. Heel globaal nemen we aan dat landschapsaantasting gemiddeld 1000 keer vaker voorkomt, hoewel het sterk afhangt van de situatie.

Zichtsafstand gehalveerd / near shore

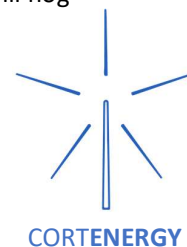
Het grote voordeel van de Corten-windturbine is dat de vijf of zeven superslanke bladen met ongeveer de helft van de conventionele bladbreedte, op halve afstand al uit het zicht verdwijnen. Dit komt omdat de hoek waaronder ze zichtbaar zijn halveert. Wanneer bladen op halve afstand onzichtbaar worden, is het totale 'storingsoppervlak' rondom de turbine maar liefst vier keer zo klein. Dit geldt alleen bij vrij zicht, bijvoorbeeld op zee, maar daar zijn weer weinig mensen. Voor near shore wind of gezien vanaf hoge gebouwen kan dit wel een relevante schatting zijn. Op kleinere afstanden waarbij de bladen van zowel de Corten turbine en een conventionele windturbine beide zichtbaar zijn, geldt natuurlijk ook dat de Corten-windturbine minder verstoort, omdat de oppervlaktes meer dan een factor twee kleiner zijn.

Beweging meer continue

Voor al in je ooghoeken is een mens erg gevoelig voor beweging van grote objecten en triggert het onrust. Dat is wellicht evolutionair ontstaan als waarschuwing voor naderend gevaar. Het is bekend dat dit effect sterker is bij twee blads windturbines en minder bij drie blads windturbines: *"The decisive factor in eliminating the one-blade rotor design from the commercial market, and in almost eliminating two-bladed design, has been visual impact. The apparently unsteady passage of the blade(s) through a cycle of rotation has often been found to be objectionable."* [10]. De auteur verwacht dat als het aantal bladen toeneemt en het oppervlak per blad sterk afneemt, dat het effect verder afneemt. Wat bij twee bladers een onrustige slagbeweging is (het silhouet van de windturbine wisselt repeterend van een I in een T), ontstaat bij de Corten-windturbine juist een meer continue draaiende beweging. Eerste testen van ons bevestigen dat mensen de 7-blads modelrotor ongeveer half zo storend ervaren als de 3-blads modelrotor.

Achtergrond: uniforme lucht of wisselend wolkenpatroon

Als een mens recht naar een windturbine kijkt, bij een uniforme lucht op afstanden tot enkele kms zijn zowel de Corten-rotor als een conventionele rotor duidelijk zichtbaar. Toch is er ook dan een groot verschil: de Corten-rotor is een meer continue transparante schijf, terwijl een 3-blader een sterk wisselend beeld geeft. Is de lucht bewolkt, wat in Nederland vaak voorkomt, dan is het verschil nog groter: de Corten-rotor valt minder op dan een conventionele rotor, zie figuur 4.



Concluderend is landschapsaantasting divers en deels subjectief. Er zijn fysische en fysiologische effecten waardoor de Corten-rotor minder hinder geeft en in veel gevallen lijkt de verbetering een factor 2 of meer.



Figuur 4: De zeven kleiner bladen van de Corten-windturbine vallen meer weg in de achtergrond dan de drie grote bladen van een conventionele windturbine. Foto-editing door Paul Susan.

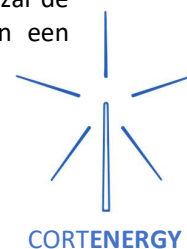
4. Geluid

Bij de Corten-windturbine volgt uit de aeroakoestische wetten en het fysische effect van overlappend geluid van de bladen, dat er meerdere grote geluidsvoordelen zijn van een groter aantal bladen: zowel voor hoorbaar geluid als voor infrageluid als voor amplitude-modulatie.

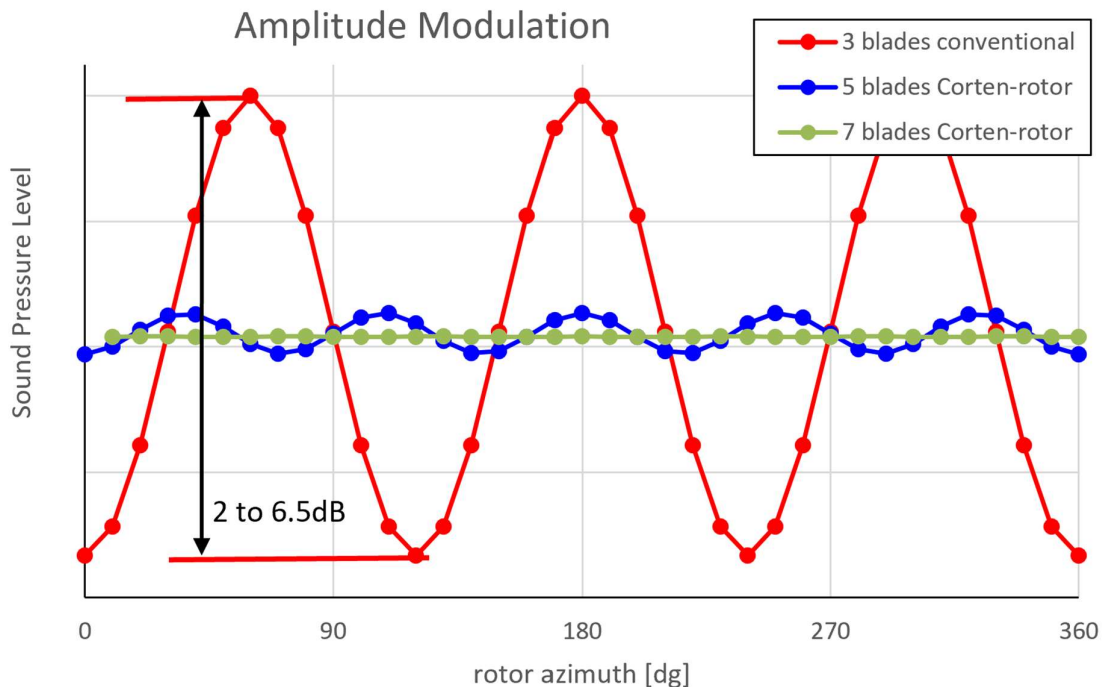
4.1 whooshing (Amplitude modulatie)

De passerende bladen van een traditionele turbine met twee of drie bladen veroorzaken een repeterend 'whooshing'-effect, ook wel Amplitude Modulatie (AM-geluid) genoemd. Dit variërende geluid wordt soms als zeer hinderlijk ervaren en heeft een amplitude variatie van 2-6,5dB [8] afhankelijk van de positie van de waarnemer ten opzichte van de windturbine.

De auteur realiseerde zich dat wanneer een windturbine ongeveer dubbel zo veel bladen heeft, de geluiden van de verschillende bladen meer in elkaar overvloeien. Omdat de koorde (de afstand van voorrand tot achterrand van een aerodynamisch profiel in een windturbineblad) halveert, zal de geluidsproductie per blad ook ongeveer halveren. We hebben uit geluidsmetingen van een windturbine met drie bladen het geluidsdeel van één blad geschat. We verkregen zo een geluidssterkte van één blad als functie van het rotorazimut. Vervolgens hebben we vijf of



zeven van deze curves opgeteld steeds met de bijbehorende faseverschuiving (72° bij 5 bladen en $51,4^\circ$ bij 7 bladen). Dan blijkt dat minder dan 1dB variatie resteert bij 5 bladen en bij 7 bladen zelfs minder dan 0,1dB, zie figuur 5. Daarom verwachten we dat de Corten-windturbine amplitude-modulatie sterk vermindert, wellicht tot onhoorbaar niveau.



Figuur 5: Amplitude-Modulatie of “whooshing-effect” reduceert sterk bij meer bladen door de overlap van de geluidspatronen. De curves voor 5 bladen en 7 bladen zijn berekend door uit een gemeten geluidspatroon van een drie blads-windturbine, het geluid van een enkel blad te destilleren en dat te gebruiken voor de constructie van de curves voor 5 en 7 bladen.

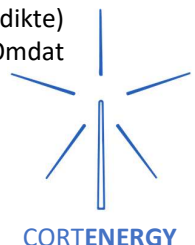
4.2 10 minuten middeling

Bij windturbinegeluid kijkt men vaak alleen naar 10 minuten gemiddeld geluidsdruk (dB) bij een woning. Voor omwonenden is dat gemiddelde misleidend; een wisselend geluid van 43 dB gemiddeld wordt als veel hinderlijker ervaren dan een constant geluid van 43 dB.

Door de middeling vallen de pieken weg tegen de dalen. Als men bij een windturbine rekent met bijvoorbeeld 39,5dB, dan is kan dat het gemiddelde zijn van 42dB en 36dB (door het logaritmische karakter van de decibelschaal is de afwijking naar boven 2,5dB en naar beneden 3,5dB). Bij de Corten-windturbine betekent 39,5dB dat het geluid ook echt 39,5dB is. Doordat bij de Corten-windturbine de amplitude-modulatie grotendeels verdwijnt, liggen de geluidspieken zo’n 2,5dB lager.

4.3 Hogere frequenties en atmosferische absorptie

Het tweede akoestische voordeel van de Corten-Windturbine ontstaat doordat de bladen halve breedte hebben: de koorde is ongeveer de helft en dat betekent dat het geproduceerde geluid een hogere toon heeft. Volgens de basiswetten van de akoestiek is de voornaamste geluidsproductie (achterranggeluid) namelijk evenredig met de grenslaagdikte [11]. Een blad van halve breedte heeft een grenslaagdikte van ongeveer 55% en dus daalt de bronsterkte ook tot ongeveer 55% van de oorspronkelijke waarde. Tegelijkertijd verschuift het frequentiespectrum naar ongeveer dubbele frequenties op basis van het Strouhal-getal $St = fL/V$: als bij een gegeven snelheid V de karakteristieke lengte L (de grenslaagdikte) halveert dient de frequentie f te verdubbelen om hetzelfde stromingspatroon te behouden. Omdat het aantal bladen ongeveer een factor 2 toeneemt, zal de bronsterkte van alle bladen samen toenemen met $2 \times 55\% = 110\%$. En 10% meer bronsterkte geeft 0,4dB meer brongeluid.



In totaliteit zijn de effecten van de hogere frequentie gunstig om drie redenen:

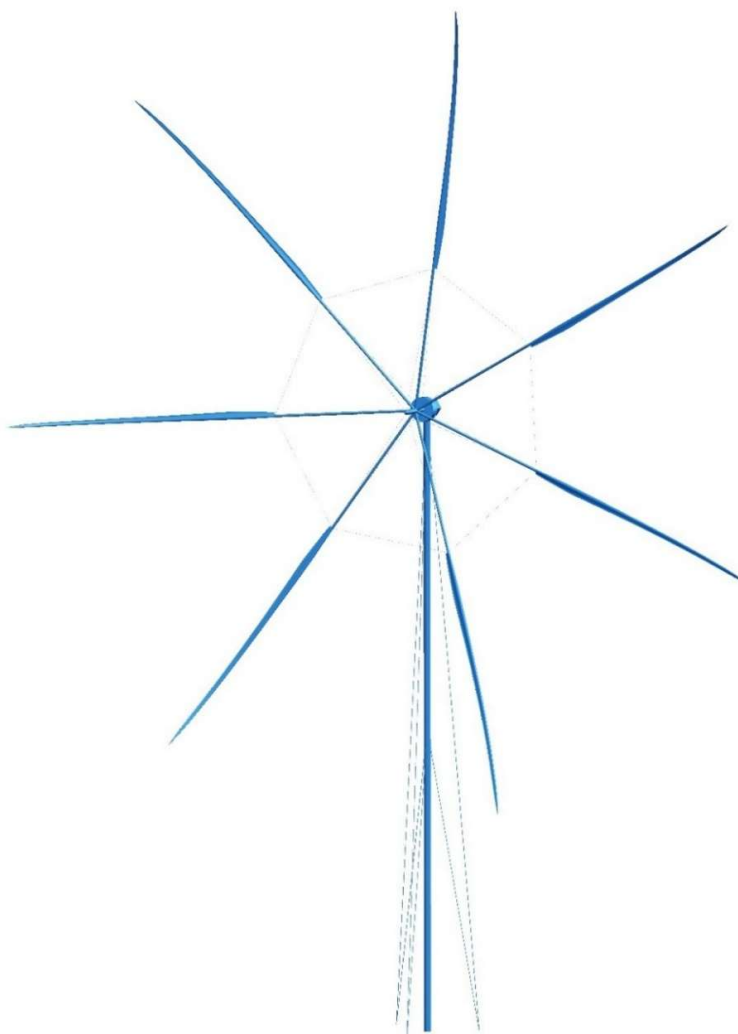
1. De frequentie met de hoogste energie bijvoorbeeld van 500Hz naar 1000Hz (geschat met [11]). Dankzij atmosferische absorptie draagt hoog geluid minder ver dan laag geluid. Over 500m afstand van een windturbine daalt geluid van 1000Hz met ongeveer 1,85dB en geluid van 500Hz ongeveer 0,95dB [Appendix A, tabel A.1] door absorptie. De Corten-windturbine profiteert dus van 0,9dB meer damping op 500m en 1,8dB op 1000m afstand.
2. De hogere frequentie van het nieuwe ontwerp zijn makkelijker te isoleren met bijvoorbeeld dubbel glas. De hogere frequenties hebben een damping van ongeveer 4dB [Appendix A, tabel A.2] meer in de frequentie range van 63Hz tot 1000Hz.
3. Ten derde ervaren mensen hoge tonen over het algemeen als minder storend dan lage tonen.

4.4 Infrageluid

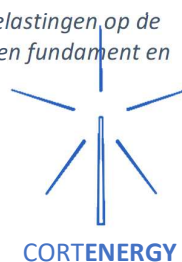
Het blijkt dat toename van het aantal bladen zeer effectief is voor het reduceren van infrageluid, zie figuur 6. Infrageluid bij windturbines ontstaat door veranderende drukbelastingen tijdens de rotatie, veroorzaakt door torenpassage, turbulentie en windschering. Bij de gangbare twee of drie grote bladen leiden deze effecten telkens tot een abrupte krachtwisseling op de lucht en de constructie.

Bij een verdubbeling van het aantal bladen in combinatie met een halvering van de koorde verandert deze dynamiek drastisch:

- Hogere frequentie en lagere amplitude: De basisfrequentie (passing-frequentie) verdubbelt. Tegelijkertijd halveren de krachtwisselingen per passage door de halvering van de koorde, wat direct zorgt voor een afname van -6 dB per klap (Bij infrageluid gaat het om variaties van volumekrachten op de lucht met een schaal ter grootte van de rotor. Omdat de akoestische geluidsdruk p in eerste orde dipoolbenadering evenredig is met dF/dt wat halveert (-3dB) en het geluidsvermogen I evenredig is met de geluidsdruk in het kwadraat volgt dat het geluidsvermogen daalt tot een kwart (-6dB). Omdat er twee keer zoveel bladen zijn blijft er netto -3dB over.
- Vloeendere overgang: Omdat de bladen dichter op elkaar staan, vloeit de belasting soepeler over van het ene naar het volgende



Figuur 6: Doordat de Corten-windturbine meer bladen heeft die per blad veel kleiner zijn, reduceren de wisselende krachten op een blad sterk. Doordat de variaties in belastingen ook soepeler overgaan van blad op blad door de kleinere afstand tussen de bladen verlagen de wisselende belastingen op de rotor nog meer. Dit reduceert krachten op de gondel, toren en fundament en leidt tot minder infrageluid, zowel akoestisch als seismisch.



blad. Dit vlak de veranderingen in het aerodynamische drukveld af, wat de productie van akoestisch infrageluid extra reduceert.

- Minder constructietrillingen: Door de veel gelijkmatiger verdeelde belasting nemen ook de wisselende krachten op de mast en fundering sterk af, wat het structurele geluid via de grond (seismisch infrageluid) minimaliseert.
- Als de uniforme windsnelheid verandert op de rotor als geheel, dan gedraagt de Corten-rotor zich niet anders dan een conventionele 3-blads windturbine. Dit soort veranderingen zijn zeer laagfrequent, typisch kleiner dan 0,1Hz. Voor zover bekend is het menselijk lichaam hier nauwelijks of niet gevoelig voor.

Hoewel een exact aeroakoestisch model nodig is om het precieze effect te kwantificeren, zien we dat door het eerste effect al een daling van ongeveer 3 dB ontstaat, zodat het fysisch plausibel dat het totale infrageluid met minstens 3 dB reduceert.

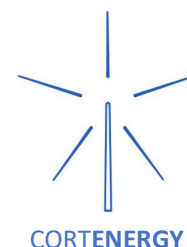
4.5 Conclusies over geluid

Situatie	Toelichting	Verbetering
Peakamplitude buiten op 500m afstand.	+0,4dB (hogere bronsterkte) – 2,5dB (lagere peaken) -0,95dB (absorptie 500m atmosfeer)	-3 dB
Peakamplitude binnen	-3dB (reductie buiten) - 4dB (betere demping hogere tonen)	-7 dB
Amplitude modulatie	conventioneel 2 tot 6,5dB, corten-windturbine 0,1-1dB	-2 tot -6,5 dB
Infrageluid	Krachtswisselingen op rotor halveren: Bij 2 of 3 ondergaat de rotor continue wisselende belastingen als één blad een zone met een zone met andere windsnelheid doorloopt. Bij 5 of 7 bladen die dicht bij elkaar staan, nemen de bladen de wisselende belastingen van elkaar over zodat er netto voor de hele rotor minder wisselingen zijn. En vooral krachtswisselingen op de rotor als geheel veroorzaken infrageluid.	ruim -3dB
Zeer laagfrequent infrageluid < 0,1Hz	Krachtswisselingen door uniforme windsnelheidsveranderingen op de hele rotor.	0 dB (gelijk)

Tabel 1: Geluidsreductie van Corten-windturbine tov. conventionele 3 blads-windturbine

5. Vogelaanvaringen: een veiliger luchtruim

Het aantal vogelslachtoffers door windturbines in Nederland bedraagt momenteel circa 50.000 per jaar. Hoewel andere menselijke factoren veel grotere slachtoffers maken — zoals katten (18 miljoen), het wegverkeer (2 miljoen), de jacht (1,5 miljoen) en hoogspanningsleidingen (900.000) — blijft elk vogelslachtoffer er één te veel. Er zijn vier mechanismes bekend waarbij windturbines tot vogelslachtoffers leiden. We denken dat de Corten-windturbine vrijwel zeker verbetering geeft betreffende de eerste twee mechanismes, onze hypothese is dat er ook verbetering is betreffende het derde mechanisme en dat het vierde mechanisme, wat voor vogel niet relevant lijkt te zijn, maar wel voor vleermuizen) gelijk blijft. Omdat we niet weten voor welk percentage slachtoffers elk mechanisme verantwoordelijk is, en door het hypothetische karakter van de verbetering bij het derde mechanisme is veldonderzoek nodig om uiteindelijk vast te stellen of en hoeveel de netto verbetering er is.



5.1 Minder sterke gevaarlijke tipvortices

Vogels raken niet alleen gewond door een directe botsing met een turbineblad (wat vooral bij slecht zicht gebeurt). Een deel van de slachtoffers valt bij helder weer doordat de vogel in de onzichtbare tipvortex (een sterke draaikolk) vliegt die van elke bladtip afkomt. De plotselinge, extreme variaties in windsnelheid en -richting binnen zo'n vortex kunnen vogelslachtoffers maken. De wetten van de aerodynamica schrijven voor dat een windturbine van een bepaalde diameter bij een gegeven windsnelheid en een bepaald toerental een vaste, totale tipvortexsterkte afgeeft. Die totale sterkte wordt verdeeld over het aantal tippen. Bij de Corten-windturbine wordt de totale sterkte dus verdeeld over méér bladen (5 of 7 in plaats van 3). Dit betekent dat de vortexsterkte per bladtip ongeveer de helft is. Als we het gevaarlijke volume van een vortex definiëren als de ruimte waarin de vortex tenminste een bepaalde grenssnelheid induceert, dan neemt dit volume af in de breedte-, de hoogte- en in de lengterichting van de vortex, dus met de derde macht van de sterkte. Bij halve vortexsterkte is de gevaarlijke ruimte per tipvortex dus acht keer zo klein. Omdat er twee keer zo veel bladen zijn, is de netto winst een vier keer kleinere gevaarlijke ruimte. We schatten de kans dat een vogel slachtoffer wordt van de onzichtbare tipvortices daarom op ongeveer een kwart bij de Corten-windturbine.

5.2 Kleiner trefoppervlak

Met name bij slecht zicht kunnen vogels direct tegen een blad botsen. Bij de Corten-windturbine is het totale bladoppervlak zo'n 25% kleiner dan vergeleken met conventionele turbines. Dit komt met name omdat Corten in zijn ontwerp de eerste 30% van het blad weglaat (precies de zone waarin een conventioneel blad de grootste breedte heeft). De constructie die hiervoor in de plaats komt heeft minder oppervlakte en dus is de kans dat een vogel tegen de rotor aanvliegt kleiner.

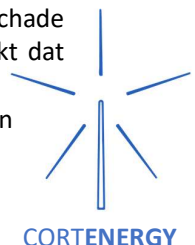
5.3 Kleinere open ruimte tussen de bladen

Het derde mechanisme is dat een vogel door een snelbewegend rotorblad geraakt wordt. Dat het aantal vogelslachtoffers door dit mechanisme daalt, is een hypothese van de auteur: Vogels zijn intelligent en evolutionair getraind in het ontwijken van natuurlijke objecten die zelden een snelheid hebben van meer dan 100 km/u en ongeveer in een rechte lijn bewegen, zoals andere vogels of boomtakken (relatieve snelheid minder dan 100km/u). De bladtippen van de grote moderne windturbines bewegen echter volstrekt onnatuurlijk: de snelheid ligt op ongeveer 250 km/u en ze maken door de middelpuntvliedende kracht een voor vogels onverwachte draaiing met een versnelling van meestal meer dan 5G (in de natuur komen versnellingen van meer dan 1G zelden voor). De hypothese luidt verder dat vogels die snelle draaiende bladtippen wel degelijk zien, maar niet goed inschatten hoe snel en in welke baan ze bewegen. Bovendien zitten er grote open ruimtes van ruim 100 meter breedte tussen de bladen van grote conventionele windturbines. Vogels kunnen daar normaal gezien makkelijk tussendoor vliegen, maar door de onverwachte draaibeweging gaat dat soms toch mis. De Corten-windturbine dicht letterlijk de grote open ruimtes met extra wieken. De open ruimtes halveren ongeveer. De auteur verwacht dat vogels daarom minder snel gokken dat ze er tussendoor kunnen. Het is enigszins vergelijkbaar met stickers op grote glazen ruiten tegen vogelbotsingen.

Om de hypothese nog inzichtelijker te maken geven we een voorbeeld waaruit volgens de auteur blijkt dat het probleem niet is dat een vogel de windturbinebladen niet ziet maar dat hij het gevaar niet ziet: stel dat een vogel 70m van een tip verwijderd is en dat die tip in een richting gaat die absoluut niet kruist met de baan van de vogel, dan duiden zowel de afstand als de richting in een natuurlijke situatie niet op een gevaarlijke situatie. Echter omdat de onnatuurlijke bladtip draait en 250km/u = 70m/s gaat, kan hij de vogel, die zich veilig waande, al na 1 sec raken. Het probleem is volgens de auteur dat de situatie in de natuurlijke situatie tot op 1 sec voor de klap, geen reden voor de vogel was om uit te wijken. Er zijn vogelstudies of veldonderzoek nodig om deze hypothese te valideren.

5.4 Barotrauma

Barotrauma is dat een vogel vlak langs een windturbineblad vliegt zonder het te raken en toch schade oploopt door de aerodynamische luchtdrukverandering van het passerende blad. Men denkt dat vogels hier vrij ongevoelig voor zijn, maar dat vleermuizen hier wel slachtoffer van worden [12]. Op het eerste gezicht schatten wij de ruimte waarin grote drukveranderingen optreden



gelijk bij de Corten-rotor en een conventionele rotor. Per blad is de doorsnede met grote drukveranderingen de helft, maar door het dubbele aantal bladen blijft het netto gelijk. Dat het binnendeel van de rotorbladen bij de Corten-rotor is weggelaten helpt ook niet, want in dit deel zijn de drukveranderingen die de bladen opwekken te gering om barotrauma te veroorzaken door de geringe lokale snelheid van het binnendeel van de bladen.

5.5 Conclusies over Vogelslachtoffers

Situatie	Toelichting	Verbetering
Tipvortices	Vogel vliegt in een onzichtbare tipvortex	-75% (factor 4)
Botsing bij slecht zicht	Wordt door soliditeit bepaald en die is bij de Corten-windturbine 25% minder.	-25%
Klap van een blad	Hypothese dat kleinere open ruimtes tussen de wieken een vogel eerder doet uitwijken.	-50% (hypothese)
Barotrauma	Veroorzaakt geen trauma bij vogels, wel bij vleermuizen	0% gelijk

Tabel 2: Reductie vogelslachtoffers Corten-windturbine tov. conventionele 3 blads-windturbine.

6. Composietgebruik en afval

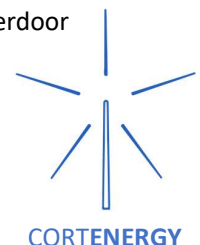
Het vijfde grote milieuprobleem van de huidige windindustrie is de enorme aantallen niet-recyclebare bladen van composiet die vrijkomen aan het einde van hun levensduur van vaak 20 jaar. De auteur stelt een rigoureuze ontwerpverandering voor, die de hoeveelheid composiet halveert. Hij redeneert dat de eerste 30% van een turbineblad (het deel het dichtst bij de as) ongeveer 3.5% van de energie levert, maar wel zo'n 60% van al het composiet bevat. Het buitendeel (de overige 70% van de lengte) bevat slechts 40% van het composiet, maar is verantwoordelijk voor ongeveer 96.5% van de opbrengst. Als we het rendement van een stuk rotorblad definiëren als de hoeveelheid energie die het produceert per hoeveelheid composiet die het bevat, dan blijkt het rendement van het buitendeel 40 keer hoger dan dat van het binnendeel. Dat verklaart de rigoureuze maatregel om het inefficiënte, massieve binnendeel van de bladen weg te laten en te vervangen door een vakwerkconstructie. Deze vakwerkconstructie kan bestaan uit recyclebaar staal en extreem sterke tuien (kabels). Dit biedt volgens Corten direct vijf extra voordelen:

- Ongeveer een halvering van de het composietgebruik en dus ook van de hoeveelheid composietafval,
- Minder slagschaduw en visuele landschapsvervuiling, omdat het blad ook korter is,
- Minder trefoppervlak voor vogels en dus minder vogelslachtoffers,
- Kortere bladen wat voordelig is bij de productie en het transport, vooral bij de allergrootste bladen.
- Reductie van belastingen op de toren en het fundament.

Het laatste punt lichten we toe in de volgende paragraaf toe.

6.1 Lagere rotorsoliditeit en afname dimensionerende belastingen

Bij de Corten-rotor beginnen de rotorbladen op ongeveer 30% radius en verbindt een vakwerkconstructie de hoofdas met de bladwortels. Naast de composietreductie reduceren hierdoor de dimensionerende belastingen. We gaan in op twee vaak dimensionerende situaties:



Turbinebedrijf bij zware storm

In deze situatie wekken het binnenste en middelste deel van het rotorblad veel meer vermogen op dan het maximum van de windturbine. Het buitenste deel van de rotorbladen, de tippen, hebben dan negatieve invalshoeken en negatieve lift en werken als rem om te voorkomen dat het maximale vermogen wordt overschreden. Deze situatie veroorzaakt zeer hoge belastingen op het rotorblad.

Overlevingswindsnelheid

Het tweede voorbeeld betreft een nog veel hogere windsnelheid: de overlevingswindsnelheid. Onder deze omstandigheden staat de windturbine stil (geparkeerd) en moet de constructie de extreme windbelasting kunnen weerstaan.

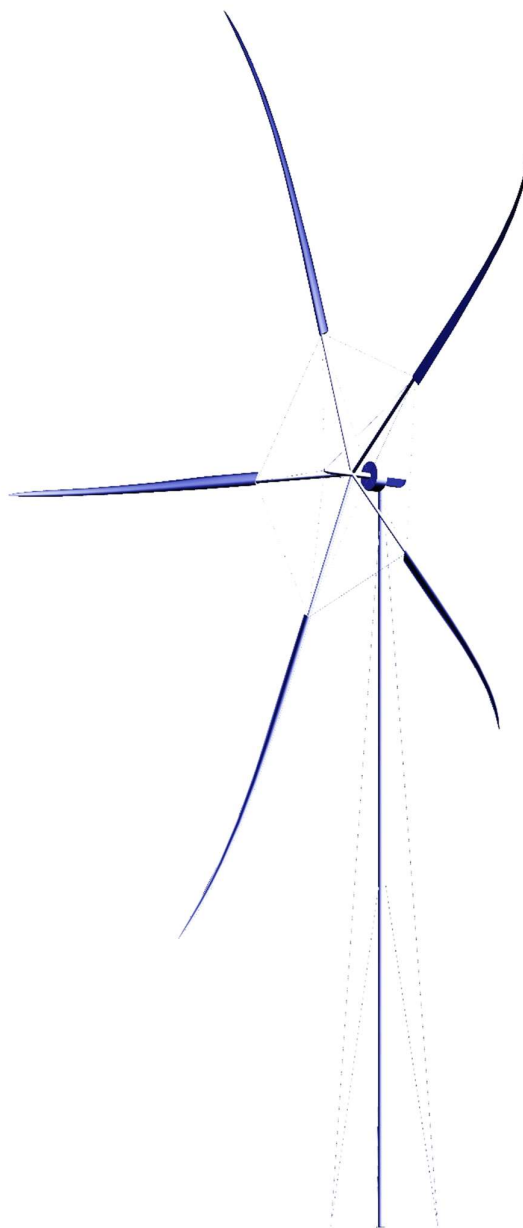
Bij deze windsnelheid wordt het oppervlak van het rotormateriaal bepalend. Bij conventionele windturbines bedraagt dit doorgaans ongeveer 4% van het totale rotoroppervlak. Dit wordt de rotorsoliditeit genoemd. Bij de Corten-windturbine kan de soliditeit tientallen procenten lager zijn doordat het binnendeel van de rotorbladen is verwijderd. De belastingen zijn dan ook lager en deze belastingen werken door op de toren en het fundament, vaak de duurste onderdelen. Bij de Corten-windturbine kan men daarom een grotere diameter rotor (dus meer opbrengst) toepassen op dezelfde toren en fundament.

7. Opbrengst en schaalvergroting

Windturbines leveren goedkope en schone energie en die op land produceren de energie die nodig was voor hun productie in enkele maanden tot maximaal een jaar. Een milieuvriendelijker ontwerp mag deze economische kracht slechts weinig aantasten.

7.1 Opbrengst Corten-windturbine

Analyse heeft uitgewezen dat er nauwelijks netto impact is op de efficiëntie van de Corten-windturbine ten opzichte van conventionele windturbines, we schatten ongeveer dezelfde AEP (Annual Energy Production), zie figuur 7. We kijken dan alleen naar de technische efficiëntie van de windturbine zelf, niet naar maatschappelijke effecten. Er zijn enkele positieve effecten en enkele negatieve die ongeveer uitmiddelen. Positief is bijvoorbeeld dat de algemeen aanvaarde rotor aerodynamica voorschrijft dat het grotere aantal slanke bladen door minder tipverliezen een opbrengstwinst van ongeveer 0.75% oplevert door van drie naar vijf bladen te gaan en 1.0% van drie naar zeven bladen. Een nieuw effect is dat men de



Figuur 7: Afbeelding van een Corten-windturbine met vijf bladen en een vakwerkconstructie in het centrum. De opbrengst en de kosten van de windturbine zullen ongeveer gelijk zijn. De essentiële verschillen met een conventionele windturbine zijn in de verwachte verbetering van de maatschappelijke acceptatie en de opschaalbaarheid.

Corten-windturbine minder vaak terug moet regelen om geluidsoverlast te voorkomen of dat de turbine zelfs stilgezet dient te worden om slagschaduw of vogelslachtoffers te voorkomen. In de onderstaande tabel staan alle effecten opgesomd. Als we voor alle effecten het gemiddelde nemen en aannemen dat de Corten-windturbine een kwart van het verlies houdt door terugregelen wegens hinder dan blijkt dat de verwachting voor de opbrengst gelijk is aan die van een conventionele windturbine.

De Corten-rotor heeft een lagere soliditeit wat tot minder belastingen leidt en het grotere aantal bladen leidt ook tot minder belastingsvariaties op de gondel, toeren en fundament. Door al deze belastingsreducties kan men een grotere diameter rotor toepassen op dezelfde windturbine. Dat geeft weer extra opbrengst. We schatten dit op 1%-5% en werken aan nadere kwantificering. We rekenen conservatief met +1% winst door 1% extra diameter door dit effect.

Dan de efficiëntie nadelen: Omdat we de bladen pas beginnen op ongeveer 30% radius verliezen we ongeveer 3.5% opbrengst. Als we de vakwerkconstructie in het rotorcentrum een goed aerodynamische vorm geven zodat dit deel meewerkt aan de opbrengst dan daalt dit verlies tot de helft: 1.75%. Verder hebben de slankere bladen een iets minder goede verhouding tussen lift en weerstand door het lagere Reynoldsgetal. Bovendien is er bij zeer slanke bladen een voorkeur voor dikkere profielen met ook een iets lager rendement. Deze twee effecten kosten samen bijv. 1% aan opbrengst. Het bladhoeklager bevindt zich nu veel meer naar buiten, op ongeveer 30% radius en dat geeft extra aerodynamische weerstand door de dikte. Ook de tuikabels die tot 30% radiale positie lopen geven extra weerstand. Niet is meegenomen dat die kabels een mooi profiel hebben zodat ze juist meehelpen aan de opbrengst. Voor de extra weerstand door het lager en de kabels rekenen we nog eens 1% opbrengstverlies.

Als we alle effecten optellen gebeurt er met de opbrengst/kosten verhouding heel weinig: het valt enkele procenten slechter of beter uit.

Situatie	Toelichting / bron	opbrengsttoename Corten
A. Vervanging binnendeel door vakwerk	Weglaten van het binnendeel kost ongeveer 3,5% van de jaarproductie, de vakwerk-constructie kan echter tenminste de helft van het verlies voorkomen. Bron: eigen berekening	1,75% tot 3,5% negatief
B. Minder tipverlies	Standard rotoraerodynamica	0,75% positief (5 bladen) 1% positief (7 bladen)
C. Reynolds effect en profieldikte	Aerodynamische simulatie	1% negatief
D. Pitchinrichting op 30% en tuikabels	Aerodynamische schatting	1% negatief
E. Diametervergroting door belastingsafname	Doordat de Corten-rotor lagere belastingen geeft kan men een grotere diameter toepassen zonder de windturbine te overbelasten.	1%-5% (nader te kwantificeren) doorgerekend met 1%
F. Geluidsterugregeling	Uit mer's en specificaties fabrikant	2 tot 3% positief
G. Stilstand tgv. slagschaduw	uit mer's en vergunningen	0,2 tot 0,3% positief
H. Stilstand tgv vogels/vleermuizen	Internationale veldstudies	0,5 tot 1,0% positief
Totaal	$A+B+C+D+E-0.75*(E+F+G)$	0,1% AEP negatief

Tabel 3: de opbrengst van de Corten-windturbine is ongeveer gelijk, we schatten een opbrengst daling van ongeveer 0,1% met een onzekerheid van enkele procenten.

7.2 Schaalvergroting

De opbrengst van een Corten-windturbine zelf is dus vrijwel gelijk aan een conventionele windturbine, maar wat wel en doorbraak is, is de potentiële schaalvergroting. De windenergiesector loopt momenteel onshore en offshore tegen de logistieke en productiegrenzen van bladlengtes aan. Omdat de bladen van de Corten-windturbine op een vakwerkconstructie staan (op 20% tot 50% van de straal), kan men met dezelfde bladlengte grotere windturbines bouwen met veel hogere opbrengst. En nog steeds lijkt het zo te zijn dat grotere windturbines een betere verhouding hebben tussen opbrengst en kosten en de oorzaak zijn de hoge vaste kosten per locatie.

Op land (Onshore): De grootste conventionele windturbines hebben nu een diameter van 175 meter en een bladlengte van 85 meter. Met diezelfde bladlengte van 85 meter maakt het Corten-ontwerp een turbine mogelijk met een diameter van 240 meter als we aannemen dat het blad op 30% radius begint. Dit maakt een windturbine mogelijk met bijv. 70% hogere energieopbrengst terwijl de bladlengtes gelijk zijn gebleven. De opbrengsttoename komt door de grotere rotoroppervlakte en in mindere mate door de grotere hoogte.

Op zee (Offshore): De grootste conventionele offshore windturbine heeft een diameter van 310 meter en een bladlengte van zo'n 153 meter. Met diezelfde bladlengte van 153 meter kan een Corten-windturbine groeien naar een diameter van 435 meter, wat eveneens een meeropbrengst van ongeveer 70% betekent.

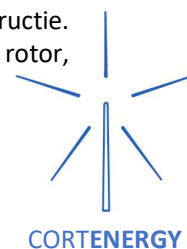
De conclusie is even verrassend als hoopgevend: de eerste analyses van deze maatschappelijk vriendelijke Corten-windturbine wijzen erop dat de maatschappelijke voordelen mogelijk samengaan met vergelijkbare of zelfs betere economische prestaties.

7.3 Dynamica en keuze voor 5 of 7 windturbinebladen

Binnen de windenergiewereld zijn vele artikelen geschreven over het ideale aantal bladen voor een windturbine. Twee bladen brengen meerdere grote technische uitdagingen door sterkere excitatie van trillingen en tegelijkertijd een kleiner resonantievrij frequentiebereik. De sterkere excitatie ontstaat doordat de rotor gedurende een omwenteling twee keer krachtig achterovergedrukt wordt: als de rotor verticaal staat vangt het blad dat naar boven wijst extra veel wind vangt door windschering en tegelijkertijd heeft het blad dat naar beneden staat minder wind door de toren. Een tweede effect is dat als de rotor horizontaal staat dat de bladen naar beneden hangen en het zwaartepunt zich wel 10 of 20 cm onder het rotatiecentrum kan bevinden. Als de rotor verticaal staat ontstaat alleen rek in het materiaal en ligt het zwaartepunt ms enkele millimeters onder het draaipunt. Door dit 'hangooreffect' gaat er tijdens de rotatie van grote windturbine steeds ruim 100 ton op en neer. Beide effecten veroorzaken allerlei dynamische problemen. De keuze voor drie bladen lost de problemen grotendeels op en het levert ook nog een beetje extra energie door geringere tipverliezen. Dit verklaart dat vrijwel alle moderne windturbines voorzien zijn van drie bladen. Ook de auteur was lange tijd een fervent voorstander van dit driebladige ontwerp. Dat is veranderd: "Ik heb ontdekt dat een windturbine met meer dan drie bladen, bijvoorbeeld vijf of zeven, veel milieuvriendelijker is en een cascade aan andere voordelen biedt".

Bij windturbines spelen dynamische effecten — zoals eigenfrequenties, resonanties en aero-elastische instabiliteiten — een cruciale rol. Om deze effecten voor de Corten-windturbine volledig te doorgronden, zijn uitgebreide aero-elastische, structurele en regeltechnische simulaties nodig. Er wordt aan gewerkt. Eén belangrijk dynamisch voordeel van het Corten-windturbine noemen we alvast: een groter ontwerprijheid betreffende eigenfrequenties.

Het draaien van de rotor veroorzaakt periodieke excitatiekrachten (trillingen) op de constructie. Wanneer de eigenfrequentie van de toren samenvalt met een excitatiefrequentie van de rotor,



ontstaat er resonantie. De toren kan dan hevig gaan oscilleren, met potentieel destructieve gevolgen. Om dit te voorkomen, wordt een windturbine zo ontworpen dat de eigenfrequenties van de toren buiten de excitatiegebieden van de rotor vallen.

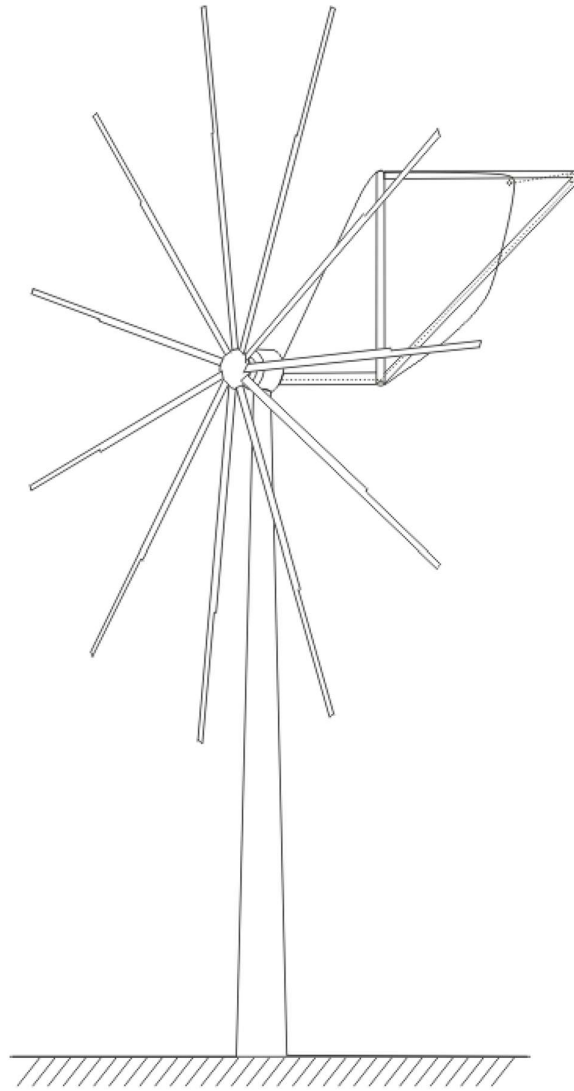
Bij moderne windturbines met een variabel toerental is dit niet eenvoudige. Het laagste en hoogste toerental verschillen vaak met een factor 1,5 door het gebruik van variabel toerental. Voor een grote windturbine varieert de rotatiefrequentie van de rotor (we noemen dit 1P) bijvoorbeeld van circa 0,10 Hz tot 0,15 Hz en dit is de sterkste excitatiebron. Een tweede grote excitatiebron is de bladpasseerfrequentie. Bij een conventionele driebladige turbine ligt deze op driemaal de rotorfrequentie (3P), oftewel van ongeveer 0,30 Hz tot 0,45 Hz. Hierdoor blijft er slechts een frequentieband tussen circa 0,15 Hz en 0,30 Hz over voor een veilige eigenfrequentie van de toren.

Bij tweebladige turbines wordt deze ontwerpruimte nog veel kleiner: De 1P range is dan onveranderd van 0,1-0,15Hz, maar de bladpasseerfrequentie loopt van 0,2-0,3Hz, dus alleen de ruimte van 0,15Hz tot 0,20Hz blijft over en men dient natuurlijk enige frequentieafstand tot de resonantiefrequenties in dit bereik te houden. Dit dwingt fabrikanten tot zwaardere, duurdere torens of tot het beperken van het toerentalbereik, wat de aerodynamische efficiëntie weer verlaagt. Ook even aantallen bladen, zoals vier of zes, zijn dynamisch ongunstig. Dan ontstaat steeds na een halve omwenteling dezelfde situatie en dat geeft ook een excitatiefrequentie. Met bijv. zes bladen exciteer je tegelijkertijd 1P, 2P, 3P en 6P.

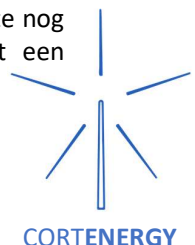
Priemgetallen zijn vanuit dynamisch oogpunt veel gunstiger. Dat is een van de hoofdredenen waarom de Corten-windturbine uitkomt op vijf of zeven bladen (en misschien 11 zoals in figuur 8), en niet op vier of zes:

Bij vijf bladen blijft de rotorfrequentie (1P) gelijk op circa 0,10–0,15 Hz, maar verschuift de bladpasseerfrequentie (5P) naar maar liefst 0,50–0,25 Hz. Hierdoor ontstaat een veel bredere, veilige zone tussen ongeveer 0,15 Hz en 0,50 Hz waarin de toren eigenfrequentie geplaatst kan worden. Dit vergroot de ontwerpvrijheid aanzienlijk.

Bij zeven bladen verschuift de 7P-frequentie nog verder omhoog, waardoor de ontwerpruimte nog minder beperkt wordt. Juist voor de gigantische windturbines van de toekomst is dit een sleutelvoordeel en komen we tot een extra reden voor meer dan drie bladen op hele grote windturbines.



Figuur 8: Ter illustratie een Corten-windturbine met 11 bladen. We verachten echter dat met vijf of zeven bladen de voordelen al maximaal zijn en dat bij hogere aantallen weer minder gunstig wordt. Bij voorkeur is het aantal bladen steeds een priemgetal.



7.4 Installatie voordeel

Meestal wordt een blad van een grote windturbine in horizontale stand van het blad geïnstalleerd. Nadat het eerste blad aan de rotor zit, is er dus een grote onbalans. Met laat het blad omlaag draaien en trekt het iets voorbij het laagste punt zodat een tweede blad ook horizontaal plaatsbaar is. Daarna ontstaat het grootste installatieprobleem. Men dient de twee bladen volledig naar één kant te draaien zodat het derde bevestigingspunt in positie komt om het derde blad ook horizontaal te plaatsen. Heeft de windturbine een tandwielkast dan kan men dit bereiken door aan de snelle as te draaien. Maar bij een direct drive windturbine vereist dit speciale dure apparatuur. Bij de Corten-windturbine is dit probleem veel minder. Elk blad weegt hooguit de helft, dus nadat één blad geplaatst is, is de onbalans minder dan 50%. Vervolgens draait men de rotor twee blad posities door en dan plaatst met het tweede blad, dus met een lege positie ertussen. Zodra het tweede blad vastzit is de onbalans nog kleiner. Nog steeds is dit geen eenvoudig proces, maar het benodigde koppel is tenminste gehalveerd.

Het moge duidelijk zijn dat er bij de Corten-rotor méér weliswaar kortere en lichtere bladen geïnstalleerd moeten worden, dat zou ook meer tijd of geld kunnen kosten, tenzij de rotor als geheel wordt gehesen.

8. Efficiëntere Parkontwikkeling

Hierboven is toegelicht dat de technische efficiëntie van de Corten-windturbine ongeveer gelijk blijft aan die van een conventionele windturbine, waarbij de Corten-windturbine wel makkelijker opschaalbaar is naar grotere diameters. We gaan nu in op de totale projectkosten voor een windpark. Dan blijkt dat het nieuwe concept een belangrijk economisch voordeel behaalt in de ontwikkelfase. In Nederland duurt het traject van de eerste plannen tot de daadwerkelijke bouw van een windpark 6 tot 9 jaar. Dankzij de voorziene reductie van alle vijf de grote hinderfactoren (slagschaduw, landschapsaantasting, geluid, vogels en composietafval), waardoor de maatschappelijke weerstand en juridische procedures minimaliseren — zal deze doorlooptijd naar schatting dalen. Hoeveel is vooraf moeilijk te zeggen. Hoeveel sneller het echt gaat moet de praktijk uitwijzen, maar het is duidelijk dat een belangrijk verbeterde vriendelijkheid voor mens en natuur gunstig doorwerkt.

Als we aannemen dat de ontwikkeltijd met één derde dan geven conservatieve schattingen aan dat dit de ROI een half procent kan verbeteren (chatgpt schat 0,5%-2%).

Daarnaast verlaagt de Corten-windturbine het zogeheten afbreukrisico. De kosten van windparkprojecten die halverwege strandden, moeten normaliter worden gecompenseerd door de projecten die de eindstreep wél halen. Ook de reductie van het afbreukrisico kan de ROI met een procent verbeteren (chatgpt schat 2%-8% als het afbreukrisico daalt van 50% naar 30%).

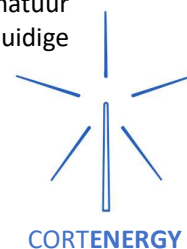
We werken aan nauwkeurigere kwantificering van de effecten op de ROI van een windturbinepark. Voorlopig gaan we uit van een verbetering van 1,5%.

Effect	Onze aanname	Chatgpt
Ontwikkeltijd reduceert 30%	0,5%	0,5% - 2%
Afbreukrisico van 50% naar 30%	1,0%	2% - 8%

Tabel 4: Effect op ROI-windturbinepark: voorlopig +1,5%, nader te kwantificeren

9. Grootste winst: veel meer windenergie op land

De grootste winst zit niet in een eventuele procent meeropbrengst of een marginaal betere ROI, de echte winst zit in de hogere acceptatie. Omdat de Corten-windturbine de hinder voor mens en natuur minimaliseert, kan men meer windenergie realiseren in dichtbevolkte gebieden. De huidige bottleneck is immers niet de techniek, maar de maatschappelijke en ruimtelijke beperking, evenals de actuele netcongestie. Veel projecten lopen vast op lokale weerstand, strenge



afstandseisen en natuurbependingen. Een turbine met een significant lagere impact kan op veel meer locaties worden vergund. Denk aan plaatsing dicht bij infrastructuur, industriegebieden en bebouwing. Ook politiek of ecologisch gevoelige randgebieden komen hiermee weer in aanmerking. Al-scenario's laten zien wat dit betekent voor het realiseerbare windvermogen in Nederland en in Europa:

Jaar	Zonder Corten	Extra door minder afbreukrisico (laag / hoog)	Extra door meer locaties (laag / hoog)	Extra door repowering (laag / hoog)	Extra door kortere ontwikkeling (laag / hoog)	Totaal met Corten laag	Totaal met Corten hoog
2025	6	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	6	6
2030	8	+0,2 / +0,5	+0,2 / +0,7	+0,2 / +0,5	+0,1 / +0,2	8,7	9,9
2035	10	+0,5 / +1,2	+0,7 / +1,8	+0,5 / +1,3	+0,2 / +0,5	11,9	15,0
2040	12	+0,8 / +2,0	+1,2 / +3,0	+0,8 / +2,2	+0,3 / +0,8	15,1	20,0
2045	14	+1,0 / +3,0	+1,5 / +4,0	+1,0 / +3,0	+0,5 / +1,0	18/ +29%	25/ +79%

Tabel 5: Nederland – onshore windvermogen (GW)

Jaar	Zonder Corten	Extra door minder afbreukrisico (laag / hoog)	Extra door meer locaties (laag / hoog)	Extra door repowering (laag / hoog)	Extra door kortere ontwikkeling (laag / hoog)	Totaal met Corten laag	Totaal met Corten hoog
2025	265	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	265	265
2030	365	+5 / +10	+5 / +12	+4 / +8	+2 / +3	381	398
2035	440	+15 / +30	+20 / +40	+15 / +30	+5 / +10	495	550
2040	515	+25 / +55	+35 / +75	+25 / +55	+10 / +20	610	720
2045	565	+40 / +100	+60 / +150	+50 / +120	+20 / +40	695/ +23%	885/ +57%

Tabel 6: Europa – onshore windvermogen (GW)

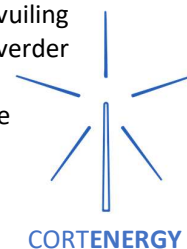
Door vier effecten leidt de Corten-Windturbine tot meer onshore windvermogen:

1. minder afbreukrisico;
2. meer locaties beschikbaar;
3. betere repowering; en
4. kortere projectontwikkeltijd.

Vanzelfsprekend is de toekomst niet te voorspellen. Desondanks is het logisch om te verwachten dat aanzienlijk meer windvermogen plaatsbaar is als de hinder van windenergie sterk vermindert. Samenvattend is de schatting dat in de komende 20 jr met de Corten-windturbine misschien wel 20% extra windvermogen op land plaatsbaar is. We gaan bewust nog onder het laagste scenario zitten omdat we dit percentage liever naar boven bijstellen dan naar beneden.

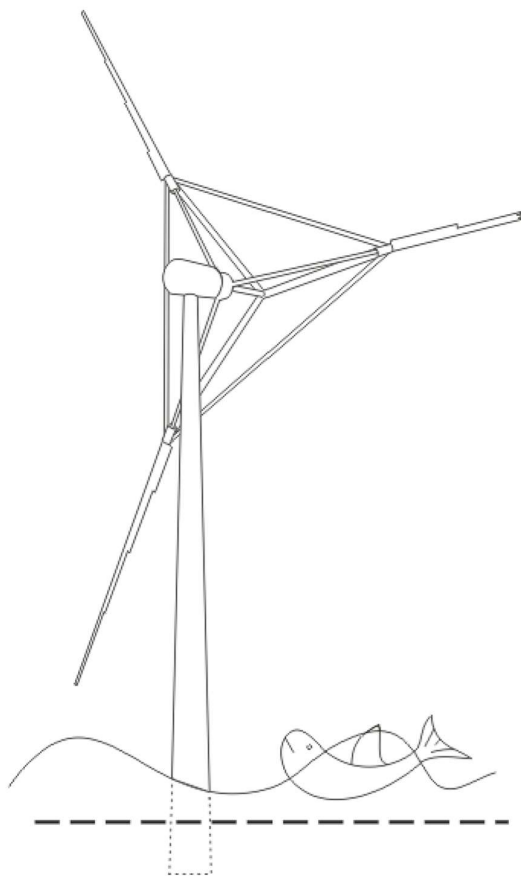
10. Offshore: maximale opbrengst bij extreme stormen

Op open zee spelen maatschappelijke nadelen zoals slagschaduw, geluid en landschapsvervuiling nauwelijks een rol. Aan de kust nog enigszins, als de turbines vanaf land zichtbaar zijn, maar verder op zee gaat het vooral om efficiëntie, robuustheid en grootte. Voor zee locaties zijn de vaste kosten hoog en veel minder dan lineair met het turbineformaat, daarom zijn vooral grote



windturbines lonend. De huidige recordhouder is de Chinese fabrikant DongFang, met een turbine van 310 meter diameter en bladen van 153m. Nog groter bouwen met conventionele methoden is nagenoeg onmogelijk, omdat bladen langer dan 153 meter al buitengewoon moeilijk te produceren, te transporteren en te installeren zijn. Maar langer hoeft ook niet bij een ontwerp volgens de Corten-windturbine dat speciaal voor offshore is bedoeld: in dit geval blijven we bij drie bladen die we op de vakwerkconstructie verder naar buiten plaatsen, zie figuren 9 en 10. Daardoor groeit de rotor zonder dat de bladen zelf langer worden. Bovendien verlaagt dit ontwerp de stormbelasting op zee.

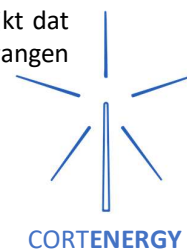
De kosten van een offshore turbine zitten voor ongeveer 20% in het fundament, 15% in de installatie en ook de toren behoort met 10% tot de duurste elementen. Ze zijn ontworpen op de allerheftigste stormen. Wanneer een turbine bij storm wordt stilgezet, bepaalt de 'soliditeit' (het percentage van het rotoroppervlak dat daadwerkelijk uit materiaal bestaat) hoeveel wind het systeem nog vangt. Die soliditeit dient laag te zijn: als het stormt en de windturbine stilstaat dan blijft dit windvangend oppervlak over en daarop zijn de toren en het fundament ontworpen. Dit is één van de ijzersterke eigenschappen van de moderne windturbine: als hij energie opwekt doet hij dat uit het hele oppervlak dat de bladen doorlopen, maar als hij moet overleven blijft alleen het echte wiekoppervlak over en dat is bij conventionele windturbine ongeveer 4%: dit reduceert stormbelasting met een factor 25. Omdat de Corten-windturbine het massieve binnendeel vervangt door een transparante vakwerkconstructie, ligt de soliditeit eerder onder de 3%, daardoor daalt de stormbelasting met ongeveer een factor 33. Dit betekent tientallen procenten lagere stormbelastingen én minder composietkosten. Het geeft de mogelijkheid om een grotere rotor op hetzelfde fundament te plaatsen voor een hogere energieopbrengst.



Figuur 9: Offshore variant van de Corten-windturbine. Alleen de vakwerkconstructie in het centrum volstaat omdat milieuargumenten, afgezien van composiet-besparing, minder spelen.

Concluderend: De Corten-windturbine is in eerste instantie bedoeld als low impact onshore windturbine, maar blijkt ook geschikt voor offshore toepassing. Dan volstaan 3 bladen op een vakwerkconstructie, zie figuur 9. Ook vijf bladen is te overwegen omdat dat wellicht gunstiger is voor vogels en het extra voordeel ontstaat van meer evenwichtige belastingen van de rotor als geheel; dit kan belangrijk zijn als de rotor van een offshore windturbine partieel in het zog staat van een andere windturbine aan loef. Bij offshore toepassing heeft de Corten-Windturbine vijf voordelen:

1. Lagere belastingen wat een grotere rotor mogelijk maakt op hetzelfde platform en enkele procenten meeropbrengst levert.
2. De hoeveelheid composiet halveert wat ook een procent kosten bespaart op de hele windturbine.
3. Uit enkele recente gevallen van bladwortelbreuk bij grote offshore windturbines blijkt dat deze bladwortels een risico zijn. Bij de Corten-windturbine zijn die bladwortels vervangen door staal, dus verwachten we daar minder problemen. Omdat de bladen van de



Corten-windturbine veel kleiner zijn verwachten we daarvan ook dat minder bladvervangingen nodig zijn en dat dit ook tot minder turbinestilstand leidt.

4. Als een bladvervanging toch nodig is, gaat dat om een kleiner, lichter en goedkoper onderdeel dat door het halve gewicht door een kleinere goedkopere offshore kraan te vervangen is.
5. Met dezelfde bladlengte kan een rotor worden opgebouwd met ongeveer 25% meer diameter en met ongeveer 50% meer oppervlakte. Daarmee worden windturbines beter opschaalbaar.

We hebben ook scenario's geschat voor de toekomst offshore wind in Nederland en in Europa met en zonder de Corten-windturbine. De resultaten staan in de onderstaande tabellen.

Jaar	Conventioneel	Extra door +25% diam.	Extra door voordelen 1 t/m 4	Met Corten
2025 4	0 / 0	0 / 0	4 / 4	
2030 8	+0,2 / +0,8	+0,3 / +0,7	8,5 / 9.5	
2035 12	+0,8 / +2,5	+0,7 / +1.5	13,5 / 16	
2040 16	+2,0 / +5,5	+1,0 / +2,5	19 / 24	
2045 20	+3,5 / +8,0	+1,5 / +4,0	25 / 32 (+25% / +60%)	

Tabel 7: Nederland – offshore wind (GW) laag en hoog scenario

Jaar	Conventioneel	Extra door +25% diam.	Extra door voordelen 1 t/m 4	Met Corten
2025 35	0 / 0	0 / 0	35 / 35	
2030 70	+1 / +5	+2 / +3	73 / 78	
2035 100	+5 / +15	+5 / +10	110 / 125	
2040 130	+12 / +35	+8 / +15	150 / 180	
2045 150	+20 / +55	+15 / +25	185 / 230 (+23% / +53%)	

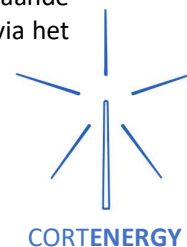
Tabel 8: Europa – offshore wind (GW) laag en hoog scenario

Opnieuw stellen we dat dit soort toekomstverwachtingen onzeker zijn. Maar we verwachten wel dat de vijf genoemde voordelen de implementatie van offshore wind bevorderen. Samenvattend is de schatting dat in de komende 20 jaar mogelijk 15% extra windvermogen op zee plaatsbaar is. Opnieuw gaan we bewust onder het laagste scenario zitten uit.

11. Europese industrie

De Europese windturbine industrie verkeert in zwaar weer. De windturbines van de gevestigde westerse fabrikanten zijn kwalitatief hoogwaardige producten, maar ontlopen elkaar nauwelijks in prijs en prestaties, wat leidt tot pure prijscompetitie. Net als bij zonnepanelen en elektrische auto's dreigt de markt naar Azië te gaan, omdat Azië goedkoper aanbiedt en in kwaliteit snel verbetert. De grootste windturbines komen inmiddels uit China, zijn soms tientallen procenten goedkoper en zijn uiterst intelligent ontworpen. Een voorbeeld is bijvoorbeeld de OceanX, een slimme Duitse innovatie van Sönke Siegfriedsen [13], die door MingYang is herkend en op indrukwekkende wijze is gerealiseerd.

De Corten-windturbine biedt de westerse industrie een unieke kans om, met name op land, aan de leiding te blijven. Het concept kan onshore aanbestedingen winnen dankzij de grote milieuvoordelen en creëert bovendien een grotere afzetmarkt. De turbine kan immers worden geplaatst op locaties waar traditionele windturbines wegens overlast wettelijk of maatschappelijk ondenkbaar zijn. Een bestaande windturbine fabrikant kan de Corten-windturbine snel op de markt brengen en distribueren via het dealernetwerk, dat zou de snelste weg zijn om de voordelen van een windturbine met minder hinder te benutten.



12. De nadelen: psychologisch en commercieel, niet technisch

Het grootste technische nadeel is dat slankere bladen meer doorbuigen onder de zware windbelasting. Er zou veel extra composiet nodig zijn om dat te voorkomen. Daarom heeft de auteur besloten om het deel van de rotorbladen dat dicht bij de as ligt te vervangen door de stijve vakwerkconstructie. Dat eerste deel bevat dan geen composiet en buigt vrijwel niet door de grote bouwhoogte. Het overgebleven bladdeel mag dus wat extra doorbuigen. Op deze wijze loste de auteur het probleem op. En die oplossing bespaart dus composiet en daarmee kosten, voorkomt veel niet recyclebaar materiaal, reduceert optische hinder, reduceert vogelaanvaringen, reduceert soliditeit en dus stormbelastingen, maakt productie en transport eenvoudiger. Het grootste nadeel werd wonderlijk genoeg een voordeel, zie figuur 10. De extra bladen lijken op het eerste gezicht een nadeel, maar omdat het totale massa aan bladen voor de hele rotor ongeveer halveert en de lengte en breedte van elk blad vermindert denken we dat dit nadeel netto vervalt.

De overgebleven nadelen zijn niet-technisch van aard:

Grote fabrikanten hebben miljarden geïnvesteerd in hun huidige productielijnen en willen deze zo lang mogelijk uitbaten. Omschakelen is commercieel ongewenst. Toch valt de drempel mee: de toren, het fundament en de gondel blijven gelijk. De ontwikkeling van een nieuwe rotor kost relatief weinig in verhouding tot de miljardenomzet van windmultinationals. Het concept past perfect bij de huidige fabrikanten: hun bestaande ontwerp kennis volstaat.

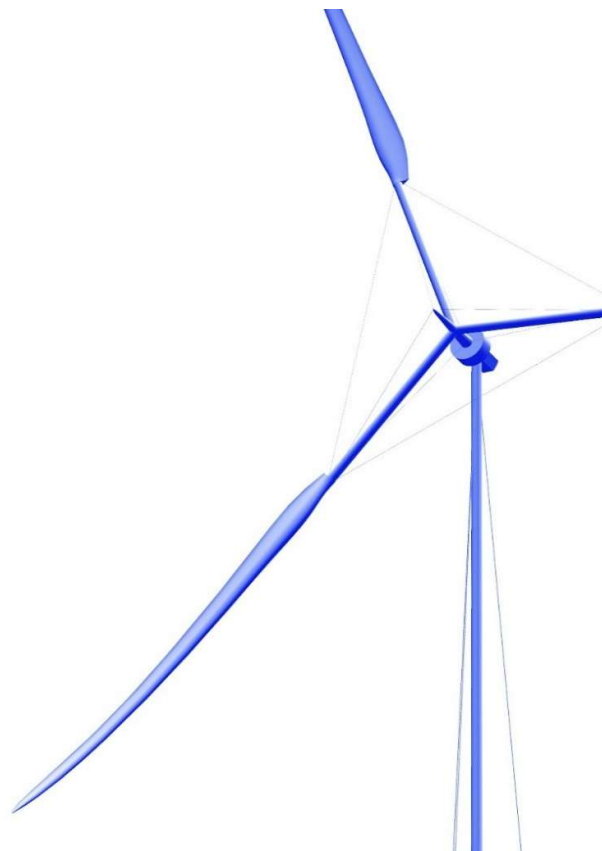
Het ontwerpen van een rotor met 5 of 7 bladen is basis windenergie aerodynamica kennis en het is bekend dat zo'n rotor met hoog rendement kan werken. En ook de vakwerkconstructie in het rotorcentrum is in principe bekend terrein ook al vergt het zeker hoogkwalitatieve engineering.

13. Validatie

Bij een baanbrekende windturbine-innovatie is de belangrijkste vraag niet of iedere parameter al met wetenschappelijke precisie is gemeten, maar of het concept in totaliteit voldoende potentie heeft om een commerciële demonstratie te rechtvaardigen.

Voor de Corten-rotor is de snelste route om uitsluitend de rotor van een bestaande, commercieel succesvolle windturbine te vervangen. Generator, omvormer, toren, fundering en besturing zijn al bewezen, waardoor de innovatie beperkt blijft tot de rotor.

Een demonstratie op ware grootte test direct de aspecten die voor de industrie van belang zijn: energieopbrengst, constructieve belastingen, geluid, betrouwbaarheid, onderhoud en maatschappelijke acceptatie. Bij succes kan de rotor bovendien direct commercieel worden toegepast.



Figuur 10: Het toepassen van een vakwerkconstructie in het rotorcentrum was min of meer noodzakelijk bij vijf of zeven bladen om te veel doorbuiging te voorkomen. Achteraf blijkt het sowieso een voordelige ontwerpwijziging, ook bij een drieblads rotor.

Nawoord

Ik heb ervoor gekozen het concept de Corten-windturbine te noemen, omdat een herkenbare naam belangrijk is voor een nieuwe ontwerpbenadering. In het verleden heb ik ervaren dat innovatieve ideeën soms worden overgenomen zonder voldoende erkenning van de oorspronkelijke bedenker. Door het concept duidelijk te benoemen, blijft de oorsprong en ontwikkeling ervan traceerbaar.

Dan wil ik mijn studievriend Paul Susan bedanken voor het regelmatig sparren over dit nieuwe ontwerp. Daarbij gaat het zeker niet alleen om de vele technische aspecten, maar ook om zakelijke en menselijke. Tot slot bedank ik ook mijn vier kinderen Veerle, Emile, Ghislain en Xavier voor het meedenken en sparren en voor het tolereren van een vader die te veel praat over windenergie.

Referenties:

1. Volkskrant, Pepijn de Lange, mei 11, 2026, "Toename windmolens stagneert door onduidelijke regels en bezwaren omwonenden".
2. Solar Storage Magazine, 2 jul 2026, "Energieregio's melden vertraging bij uitrol windmolens en zonnepanelen".
3. Energy Research and Social Science, April 2025, "Understanding local opposition to renewable energy projects in the Nordic countries: A systematic literature overview".
4. ourworldindata.org: NL eind 2025 Gas 35%, wind 25%, zon 21%, coal 7%, Bio 5%, Oil 4%, Nuclear 3%.
5. Publicatie/2026 Zenodo/Global Wind Report 2026: page 102: Europa onshore 24GW/jr (2027-2030) China onshore 105GW/jr (2027-2030) world offshore 30GW/yr (2027-2030).
6. NL1044563, 10 maart 2023, Gustave P. Corten, "Wind Turbine Amiable".
7. PCT/NL2024/000001, Mar 10, 2024, Gustave P. Corten, "Wind Turbine Amiable".
8. PCT/NL2025/000004, Sept 19, 2025, Gustave P. Corten, "Low Solidity Wind Turbine Amiable".
9. Patent US8,182,231 B2, Gustave P. Corten, Oct 2, 2008, "Wind Turbine with Slender Blade".
10. EWEA (European Wind Energy Association). (2009). Wind Energy – The Facts: A Guide to the Technology, Economics and Future of Wind Power. Earthscan, London. Hoofdstuk "Design Styles".
11. NLR - ODE Windsectie bijeenkomst, Stefan Oerlemans, 28 nov 2009, "Geluid van windturbines".
12. Baerwald, E. F., D'Amours, G. H., Klug, B. J., & Barclay, R. M. (2008). Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines. Current Biology, 18(16), R695-R696.
13. Patent US11,028,832 B2, Sönke Siegfriedsen, April 28, 2017, "Floating Wind Turbine having a Plurality of Energy Conversion Units".

Appendix A:

Frequentie (Hz)	Dampingcoëfficiënt (α) in dB/km	LuchtabSORptie over 500m (dB)	Waarneembaar effect
63 Hz	0,1	0,05 dB	Onmerkbaar (windturbinebrom reist ongestoord door)
125 Hz	0,4	0,20 dB	Verwaarloosbaar
250 Hz	1,0	0,50 dB	Nauwelijks meetbaar
500 Hz	1,9	0,95 dB	Licht hoorbaar
1000 Hz	3,7	1,85 dB	Duidelijk hoorbaar
2000 Hz	9,7	4,85 dB	Geluid wordt merkbaar 'doffer'
4000 Hz	32,8	16,40 dB	Sterke filtering (sissende klanken verdwijnen)
8000 Hz	117,0	58,50 dB	Extreme damping (hoge tonen sterven volledig uit)

Tabel A.1 Atmospheric absorption (Gemini 23 juni 2026)

Type constructie	Damping Lage tonen (63 Hz)	Damping Middenfrequenties (500 Hz)	Damping Hoge tonen (2000 Hz)	Hoofdoorzaak van falen/succes
Enkel glas (4mm)	± 10 dB	± 22 dB	± 30 dB	Te licht voor laag, coincidentie bij hoog.
Standaard glas HR++	± 18 dB	± 32 dB	± 38 dB	Symmetrische ruiten versterken elkaar soms.
Geluidsisolerend gelaagd glas	± 22 dB	± 40 dB	± 48 dB	Folie absorbeert de hoge trillingen perfect.
Lichte gipswand (ongevuld)	± 5 dB	± 25 dB	± 35 dB	Werkt als een klankkast zonder isolatiewol.
Zware betonmuur (20cm)	± 38 dB	± 55 dB	± 65 dB	Perfect voor laag door pure massa.

Table A.2 Sound damping of some building materials (Gemini 23 juni 2026)