

## University of Groningen

### The sound of high winds

van den Berg, G.P.

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2006

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

van den Berg, G. P. (2006). *The sound of high winds: The effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise*. s.n.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

**Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.*

# SAMENVATTING

Bobby vraagt: 'Hooft u de windmolens wel eens?'

'Wat voor geluid maken ze?'

'Net als op elkaar slaand metaal, maar als er een echt harde wind staat worden de wieken vager en begint de lucht te schreeuwen van pijn.' Hij siddert.

'Waar zijn de windmolens voor?'

'Ze zorgen dat alles 't doet. Als je je oor tegen de grond houdt kun je ze horen.'

'Wat bedoel je met alles?'

'De lichten, de fabrieken, de spoorwegen. Zonder de windmolens staat alles stil.' <sup>1</sup>

H. I

Dit onderzoek is tot stand gekomen na klachten van bewoners dat het geluid van een windpark luider en hinderlijker was dan voorspeld, vooral als er 's avonds of 's nachts weinig wind was. De verklaring hiervoor bleek het optreden van een ander windprofiel dan werd gehanteerd bij de voorspelling van de geluidsbelasting (het windprofiel beschrijft hoe de windsnelheid toeneemt met de hoogte). Dat dit niet eerder is gevonden heeft waarschijnlijk meerdere redenen: 1) doordat windturbines hoger en groter worden is er een groeiende kloof tussen voorspelling en praktijk; 2) er wordt normaliter overdag gemeten wanneer het windprofiel meer lijkt op het gewoonlijk gebruikte standaardprofiel; 3) men kan zich, op grond van het overdag optredende geluid, moeilijk voorstellen dat het 's nachts zo anders kan zijn; 4) "er zijn altijd wel mensen die klagen", dus klachten zijn niet altijd een reden tot grondig onderzoek; 5) tenminste een aantal voorstanders van windenergie bagatelliseert liever de nadelen dan ze op te lossen.

H. II

Volgens de Nederlandse wetgeving en internationale richtlijnen kan de geluidsproductie van een windpark alleen door metingen gecontroleerd worden als de exploitant meewerkt. Het gevolg is een impliciete partijdigheid ten gunste van de exploitant en ten nadele van onafhankelijke

---

<sup>1</sup> 'The suspect', door Michael Robotham, Time Warner Paperbacks, 2003 (p. 151), vertaling G.P. van den Berg

controle. Ook door de gedetailleerdheid van voorschriften worden metingen en beoordelingen bemoeilijkt en is er geen ruimte meer voor de eigen deskundigheid van een onderzoeker. De burger kan het jargon al helemaal niet meer volgen en moet een dure deskundige inhuren om zijn zaak te beargumenteren.

Bij dit onderzoek kan men constateren dat deskundigen door het gebruik van een beperkt model van de werkelijkheid, namelijk een eeuwig neutrale atmosfeer, (tijdelijk) het zicht hebben verloren op de echte werkelijkheid waarin die neutrale atmosfeer niet zo vaak voorkomt. Juist klachten kunnen helpen om dergelijke dwalingen aan te wijzen.

H. III

Het geluid van moderne windturbines wordt vooral opgewekt door de stroming van de wind langs de wieken. Daarbij ontwikkelt zich een turbulente grenslaag aan de achterkant van de wiek waarin relatief hoogfrequent achterraandgeluid ('trailing edge sound') ontstaat dat wordt uitgestraald naar de omgeving. Deze turbulente grenslaag wordt dikker en produceert meer geluid als de wind onder een grotere hoek instroomt.

De instromende wind is zelf ook turbulent. De wiek snijdt door deze turbulente bewegingen heen waarbij weer geluid ontstaat: instromings-turbulentiegeluid ('in-flow turbulent sound'). Hierin domineren lagere frequenties. Tenslotte straalt een wiek ook geluid af als de krachten op de wiek veranderen doordat de windsnelheid lokaal varieert. Dit gebeurt telkens als de wiek de mast passeert omdat daar de wind is afgeremd door de mast. Enerzijds ontstaat daarbij meer achterraandgeluid omdat de instromingshoek verandert, anderzijds ontstaat er ook infrageluid door de plotselinge zijwaartse beweging in het tempo van de wiekpasserfrequentie.

Bij al deze geluiden neemt de sterkte ervan toe naarmate de snelheid groter is. Omdat de tip de hoogste snelheid heeft is het geluid van een windturbine vooral van de wiektips afkomstig. Voor het menselijk gehoor is bovendien het achterraandgeluid het belangrijkste omdat dat in een frequentiegebied ligt dat wij goed kunnen waarnemen.

Vaak wordt aangenomen dat er een vaste relatie is tussen de wind op ashoogte en op een referentiehoogte van 10 meter. Dit is de relatie die geldig is in een neutrale of ‘standaard’ atmosfeer. Er worden geen andere relaties gegeven in de wetgeving en in internationale richtlijnen die gelden bij andere toestanden van de atmosfeer, namelijk de stabiele en instabiele toestand.

De atmosfeer wordt *instabiel* als overdag de lucht nabij de grond relatief warm is door contact met het door zoninstraling verwarmde aardoppervlak. Er ontstaan dan verticale luchtbewegingen en het windprofiel is niet meer gelijk aan dat in een neutrale atmosfeer, maar wijkt daar niet sterk vanaf. Een *stabiele* atmosfeer kent echter een duidelijk afwijkend windprofiel. De atmosfeer is stabiel als de lucht nabij de grond relatief koud is door contact met het door warmte-uitstraling afkoelende aardoppervlak 's nachts. Een stabiele atmosfeer treedt vooral op tijdens niet gedeeltelijk of geheel onbewolkte nachten met niet teveel wind (aan de grond). In een stabiele atmosfeer is de turbulentie sterk verminderd met als gevolg dat luchtlagen minder sterk gekoppeld zijn. De onderste luchtlag wordt daardoor minder meegenomen door de wind die op grotere hoogte gewoon blijft doorwaaien, waardoor er grotere verschillen zijn tussen windsnelheden op verschillende hoogten.

Het hier beschreven onderzoek is grotendeels uitgevoerd bij windpark Rhede vlakbij de Duits-Nederlandse grens. Het park telt 17 1,8 MW turbines met een ashoogte van 98 m en drie wieken van 35 m lengte. Op een aantal punten is het niveau van het invallende geluid langdurig gemeten. Het geluid kon tot op 2 km afstand worden gemeten. Bij een zwakke wind (op 10 m hoogte) bleken de turbines, anders dan voorspeld, al op vrijwel topsnelheid te kunnen draaien en dientengevolge veel geluid te produceren.

Een windprofiel dat bij stabiele omstandigheden past bleek de gemeten geluidsniveaus uitstekend te kunnen verklaren. Bij een gelijke windsnelheid op een referentiehoogte van 10 meter, produceren windturbines in een stabiele atmosfeer meer geluid dan in een neutrale atmosfeer, terwijl dan tegelijkertijd de windsnelheid nabij de grond zo laag is dat het natuurlijke omgevingsgeluid van ruisende vegetatie zwakker is.

Het contrast tussen windturbinegeluid en natuurlijk omgevingsgeluid is daardoor bij stabiele omstandigheden groter dan bij instabiele.

H.V

Als het windprofiel na zonsondergang verandert door een stabielere wordende atmosfeer, wordt het verschil in windsnelheid over de rotor groter. Dit veroorzaakt een verandering in de sterkte van het achterranggeluid. Bij de lage tip wordt dit nog versterkt doordat de instromingshoek al ongunstiger was vanwege de door de mast verlaagde windsnelheid. De verschillen in windsnelheid leiden tot variaties in het door de tips afgestraalde geluid die het grootst zijn als een tip de mast passeert. Voor een moderne, hoge windturbine bedraagt de berekende variatie ongeveer 5 dB 's nachts, terwijl dit overdag ca. 2 dB is. Dit wordt ervaren als een duidelijker fluctuatie van het geluid.

Een stabielere atmosferische grenslaag betekent bovendien dat er minder atmosferische turbulentie is waardoor windturbines in een park een meer gelijke en meer constante wind ervaren. In een stabiele atmosfeer kunnen windturbines daardoor, méér dan overdag, een tijd nagenoeg gelijk lopen en weer langzaam uiteenlopen. Bij meerdere turbines kunnen de fluctuaties in het geluid elkaar versterken als ze het gehoor van een waarnemer gelijktijdig bereiken. Bij twee turbines (op gelijke afstand) leidt dit tot een 3 dB hoger niveau van de fluctuaties, bij drie turbines tot een 5 dB hoger niveau.

Bij metingen bleek dit beredeneerde effect daadwerkelijk voor te komen. Bij een enkele windturbine van 45 m ashoogte werden op een afstand van 280 m 's nachts variaties gevonden van 6 dB. Bij het windpark bedroegen de variaties meestal 5 dB, maar ze konden oplopen tot ongeveer 9 dB, zoals verwacht wordt bij het samenvallen van de fluctuaties van meerdere turbines.

Uit onderzoek elders en uit beschrijvingen van omwonenden kan men constateren dat het geluid van een windturbine of windpark vooral na zonsondergang hinderlijker wordt door het 'zoeven' of 'klotsen', 'klappen', 'slaan' of 'bonken'. De omschrijvingen vermelden steeds een periodieke variatie bovenop een constant ruisachtig geluid. Dit correspondeert met de berekende en gemeten modulatie van het achterranggeluid. Uit psycho-akoestisch onderzoek is veel eerder al

gebleken dat de menselijke gevoeligheid voor geluidsfluctuaties hoog is bij frequenties die juist voorkomen in het nachtelijke geluid van moderne turbines. Als dit fluctuerende geluid voldoende luid doordringt in een slaapkamer kan het tot slaapverstoring leiden.

H. VI

In de gematigde klimaatzone kan men tussen zonsondergang en zonsopgang boven land een stabiele atmosfeer verwachten als er een -gedeeltelijk- onbewolkte hemel is (bewolking verhindert de warmte-uitstraling) en een niet te harde wind (veel wind bevordert de verticale warmtevereffening). Uit een analyse van metingen van het KNMI bij Cabauw, in het midden van Nederland, tot op 200 m hoogte blijkt dat er een dagelijkse en jaarlijkse gang is in het windprofiel die samenhangt met de dagelijkse en seizoensvariatie in de warmte-uitwisseling tussen aardoppervlak en atmosfeer. Dat bij zonsondergang de wind vaak gaat liggen is een gevolg van de toenemende atmosferische stabiliteit, en deze windsnelheidsafname nabij de grond gaat gepaard met een toename van de windsnelheid op grotere hoogte.

Dit heeft belangrijke gevolgen voor de energieproductie van een windturbine, waarbij bovendien de rotorhoogte een rol speelt. Als wordt uitgegaan van de gemeten windsnelheden bij Cabauw op 10 m hoogte en een altijd neutrale atmosfeer, dan zou het over een jaar gemiddelde opgewekte elektrische vermogen van een 80 m hoge 2 MW windturbine bijna 500 kW bedragen. Gebaseerd op de werkelijke, gemeten windsnelheid op 80 m hoogte bedraagt het over een jaar gemiddelde vermogen echter 600 kW. Door atmosferische stabiliteit is er dus, ten opzichte van een neutrale atmosfeer, een aanmerkelijk hogere opbrengst in de nachturen, waardoor zelfs de lagere opbrengst overdag ruim wordt gecompenseerd.

De hogere windsnelheid 's nachts op de rotor veroorzaakt echter ook een hogere geluidsproductie. Als weer wordt uitgegaan van windsnelheden op 10 m hoogte en een neutraal veronderstelde atmosfeer, dan bedraagt het geluidsvermogen van de turbine 's nachts gemiddeld ca. 102 dB(A). In werkelijkheid is het ruim 2 dB hoger. Ook dit is een gemiddelde over een heel jaar; in afzonderlijke nachten kan het verschil veel groter zijn,

bijvoorbeeld als een windturbine op (vrijwel) topsnelheid draait, terwijl verwacht was dat deze, gezien de lage windsnelheid op 10 m hoogte, helemaal niet zou produceren. Dit gebeurt vooral in het zomerhalfjaar.

De mate waarin atmosferische stabiliteit optreedt bij Cabauw blijkt nauwelijks te verschillen van wat bij windpark Rhede is waargenomen. Op andere locaties in landen in de gematigde zone blijkt stabiliteit in vergelijkbare mate voor te komen. De beschreven gevolgen van atmosferische stabiliteit zullen dus bij veel windparken optreden die in de gematigde zone staan of nog gebouwd worden. Echter, boven grote wateroppervlakken is stabiliteit eerder een seizoens- dan een dagelijks verschijnsel, en in bergachtig gebied kunnen de gevolgen van stabiliteit op het windprofiel zowel versterkt als verzwakt worden door veranderingen tengevolge van hoogteverschillen in het gebied.

Geluid van een windturbine of windpark wordt dus om twee redenen na zonsondergang hinderlijker: het wordt luider en het geluid vertoont sterkere fluctuaties. Bij een gegeven rotordiameter kan een wiek alleen stiller worden door een ander ontwerp of door de snelheid te verlagen. Snelheidsverlaging gaat echter ten koste van het opgewekte elektrische vermogen en moet daarom liefst alleen worden toegepast wanneer dat nodig is. Daartoe kan een regeling worden toegepast die de snelheid verlaagt wanneer een geluidslimiet wordt overschreden, en deze weer verhoogt wanneer de limiet dat toelaat. De regeling zou kunnen ingrijpen op de generator en/of de vaanstand van de wieken.

Door de vaanstand tijdens de rotatie van de wieken te variëren kan op elke positie de wind onder een optimale hoek de rotor instromen, waardoor enerzijds het energetisch rendement toeneemt en anderzijds de fluctuatiersterkte van het geluid afneemt en de fluctuaties zelfs onhoorbaar kunnen worden. Het totale geluidsvermogen zal afnemen, zelfs ten opzichte van een neutrale atmosfeer, omdat het instromingsturbulentie-geluid zal verminderen door de relatieve afwezigheid van atmosferische turbulentie. Het kantelen van de rotor waardoor tijdens een rotatie de vaanstand verandert lijkt geen vruchtbare strategie: de kanteling moet zo groot zijn dat de nadelen overheersen.

Bij een windpark kunnen de fluctuaties sterker zijn door interferentie van de fluctuaties van meerdere turbines. Dit kan worden voorkomen door de turbines te desynchroniseren, zoals dat overdag gebeurt door grootschalige atmosferische turbulentie, door kleine en ongecorreleerde variaties in de belasting van de rotors of in de vaanstand van de wieken van de afzonderlijke turbines.

Het beheersen van de geluidsproductie vergt derhalve een nieuwe strategie bij de regeling van windturbines: overdag is er vaak meer geluidsruimte beschikbaar dan 's nachts en die ruimte kan overdag gebruikt worden als er 's nachts beperkingen worden opgelegd.

Als laatste is nog een geheel ander probleem onderzocht: de invloed van wind op een microfoon, al of niet in een windbol. Bij voldoende wind bevat het microfoonsignaal een laagfrequent, rommelend geluid waardoor de meting van omgevingsgeluid wordt verstoord. Deze 'rumble' is geen geluid uit de omgeving, maar ontstaat door drukvariaties tengevolge van turbulente windsnelheidsvariaties. Met een drukgevoelige microfoon zijn deze drukvariaties niet te onderscheiden van akoestische drukvariaties. Het blijkt dat een windbol alleen effectief is doordat de bijdragen van kleine turbulente wervels worden gedempt. Een windbol heeft geen effect bij wervels die groter zijn dan de windbol.

De sterkte van atmosferische turbulentie hangt niet alleen af van de (gemiddelde) wind snelheid, maar ook van de lokale ruwheid van het aardoppervlak en de stabiliteit van de atmosfeer. De twee laatste factoren veroorzaken respectievelijk wrijvingsturbulentie en thermische turbulentie. De turbulentiesterkte is in de literatuur goed bekend bij een vrije aanstroming van wind over vlak land. De turbulentie is zwakker in een stabiele, sterker in een instabiele atmosfeer.

Het op atmosferische turbulentie gebaseerde 'geluids'drukniveau blijkt goed overeen te komen met gemeten en gepubliceerde niveaus van door wind geïnduceerde drukkenniveaus. De invloed van wind op een geluidsmeting in wind kan dus worden berekend. Omgekeerd levert het rekenmodel een nieuwe methode om de sterkte van de atmosferische turbulentie te meten.



Tot slot kunnen we concluderen dat er bij het geluid van windturbines een belangrijk fenomeen over het hoofd is gezien: de verandering van de wind na zonsondergang. Dit fenomeen zal belangrijker worden voor moderne, hoge windturbines en met het oog op de vele windparken die worden gepland. Als dit probleem niet wordt onderkend en opgelost zal het de uitbreiding van windenergie bemoeilijken.