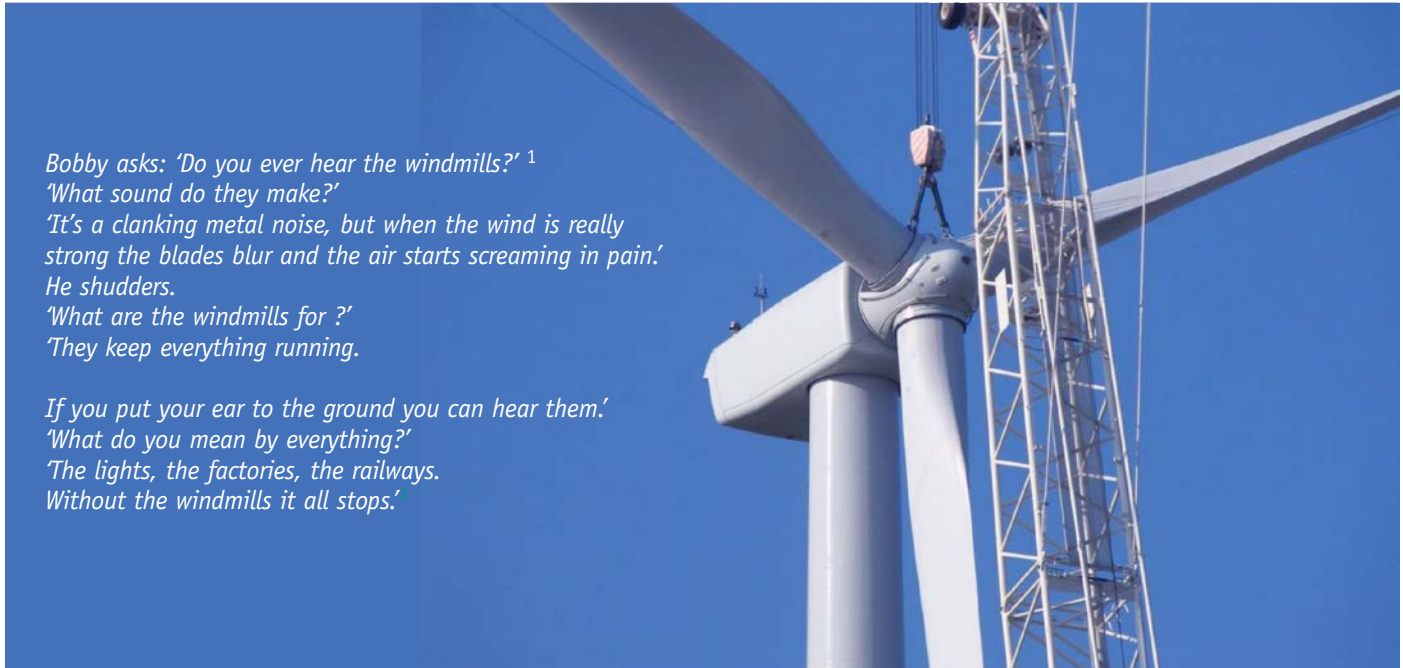


Geluidproductie windturbines op land

Een nieuwe analyse inclusief types tot 7 MW

Een analyse die de grootste hedendaagse windturbines omvat, laat zien dat het geluidniveau minder snel toeneemt en welk effect 'uilenveren' hebben.

Door: Frits van den Berg, Erik Koppen, Jaap Boon en Madelon Ekelschot-Smink



*Bobby asks: 'Do you ever hear the windmills?'¹
'What sound do they make?'
'It's a clanking metal noise, but when the wind is really strong the blades blur and the air starts screaming in pain.'
He shudders.
'What are the windmills for?'
'They keep everything running.*

*If you put your ear to the ground you can hear them.'
'What do you mean by everything?'
'The lights, the factories, the railways.
Without the windmills it all stops.'*

Over de auteurs:

dr ir G.P. van den Berg werkt als zelfstandig adviseur en onderzoeker. ir. H.D. Koppen, J.C. Boon MSc en M.M.E. Ekelschot-Smink MSc houden zich bij Arcadis over de volle breedte met windturbinegeluid bezig, van prognosestudies tot metingen in het veld en van de app geluidsverwachting.nl tot beleidsmatige studies.

Inleiding

Windturbines hebben de afgelopen decennia een forse ontwikkeling meegemaakt. Eind 1990 stonden er in Nederland (NL) volgens het CBS 323 windturbines op land (en nog niks op zee) met een totale capaciteit van 50 MW. De grootste onshore windturbine produceert nu in zijn eentje 7,5 MW, offshore windturbines zijn nog krachtiger: het grootste prototype produceert 18 MW [1]. In totaal staan er in NL nu bijna 2600 turbines van totaal bijna 6300 MW (cijfers CBS eind 2022). Het gemiddelde vermogen per turbine is daarmee toegenomen van 155 kW naar 2400 kW. Ook de rotordiameter is flink toegenomen van enkele tientallen meters tot ruim 200 m, waardoor de tiphoogte (mast + blad) al de 250 m haalt. Een belangrijk punt bij deze groei is de vraag of ze dan ook meer geluid produceren. Volgens eerdere overzichten uit 2008, 2011 en

2015 wel: gemiddeld was de toename daar 3 dB met elke verdubbeling van het elektrisch vermogen. Is dat nog steeds zo?

Er worden bijvoorbeeld steeds meer 'uilenveren' toegepast: de karteling of vertanding die je aan de achterrand van een wiek kunt zien en bedoeld is om de geluidproductie te verminderen. Hebben deze geen matigend effect? Deze vragen hebben we kunnen beantwoorden dankzij de gegevens die in WindPro, een Deense database met meer dan 1000 types windturbines, zijn verzameld.

Wij hebben daarvan in begin 2023 de toen aanwezige data van 238 types gebruikt, namelijk van alle in Nederland voorkomende types en van alle types van meer dan 2 MW (inclusief die in NL) waarvan bovendien geluiddata beschikbaar waren. Een uitgebreide analyse is gegeven in een artikel dat wordt gepubliceerd in het tijdschrift Wind [2]. Hierin worden ook kentallen (gemiddelde nominale geluidproductie, ook per octaafband) gegeven van drie grootteklassen van windturbines: 1-3 MW, 3-5 MW en 5-7 MW. In het onderhavige artikel geven we van dat artikel een korte samenvatting. We gaan daarna vooral in op twee in de Nederlandse context belangrijke geluidmaten: de maximale geluidproductie $L_{WA,max}$ en de jaargemiddelde geluidproductie $L_{E,den}$ waarbij rekening is gehouden met de gedurende een jaar voorkomende windsnelheden. Voor details en referenties verwijzen we naar het wetenschappelijke, Engelstalige artikel [2] (waarin ech-

¹ Uit "The suspect" van Michael Robotham, Time Warner Paperbacks, 2003 (p. 151)

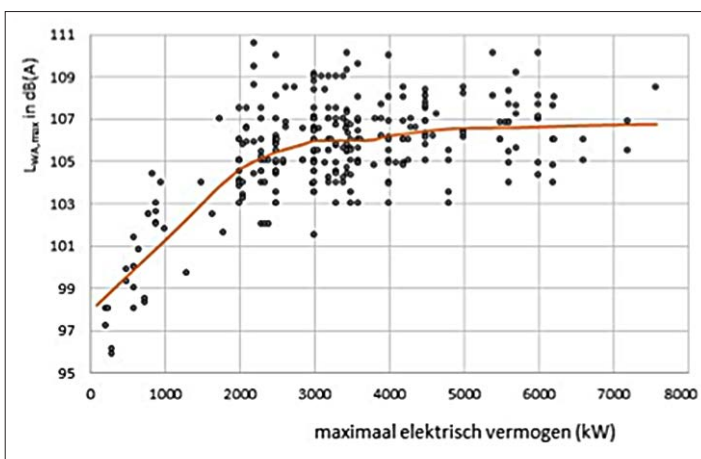
ter het NL jaargemiddelde niet voorkomt). In het artikel is alleen gekeken naar de totale geluidproductie, niet naar het ritmische of eventuele tonale karakter van het geluid.

Maximale geluidproductie

Bij de tegenwoordige windturbines wordt het geluid vooral geproduceerd door de luchtstroming langs de wieken. Aan de voorkant van een wiek ontstaat geluid door zowel de luchtstroming langs het oppervlak als door de atmosferische turbulentie die op het oppervlak valt, terwijl zich naar de achterkant van een wiek een in dikte groeiende laag turbulente stroming ontwikkelt. In beide gevallen ontstaat geluid dat vooral bepaald wordt door de snelheid van de stroming.

Daarom produceert het uiteinde van een wiek het meeste geluid omdat die het snelst beweegt; de tipsnelheid bepaalt daardoor in hoge mate de geluidproductie van een wiek. Het geluid heeft een breed frequentiebereik, waarbij het geluid van de achterrand wat hogere frequenties is dan het geluid van de voorrand. Het geluid van de achterrand is voor ons gehoor ook wat luider, maar op grotere afstand, waar hoge frequenties meer worden afgezwakt dan lage frequenties, wordt het geluid van de voorrand dominant. Soms ontstaan er ook tonale geluiden die verband lijken te houden met de machinerie in een windturbine. Dat tonale geluid kan, net als het ritmische karakter van windturbinegeluid, voor extra hinder zorgen.

De maximale geluidproductie $L_{WA,max}$ van alle typen windturbines is in figuur 1 uitgezet tegen het elektrisch vermogen. De oranje lijn geeft weer hoe de gemiddelde geluidproductie zich heeft ontwikkeld. Daaruit blijkt dat er tussen 2 en 3 MW een trendbreuk is: daarvoor stijgt $L_{WA,max}$ sneller dan daarna. Van 50 kW tot 3 MW bedraagt die stijging 8 dB, van 3 tot 7,5 MW nog maar 1 dB. Uit de analyse blijkt dat bij een toename van 3 naar 6.3 MW de tipsnelheid gemiddeld toeneemt met 4,5% en dat verklaart precies de toename van $L_{WA,max}$ met 1 dB.² Zoals de puntenwolk vanaf 3 MW in figuur 1 al illustreert is er nauwelijks een samenhang tussen elektrisch vermogen en geluid-productie. De geluidproductie wordt vooral bepaald door het type windturbine, veel minder door de grootte van de turbine.

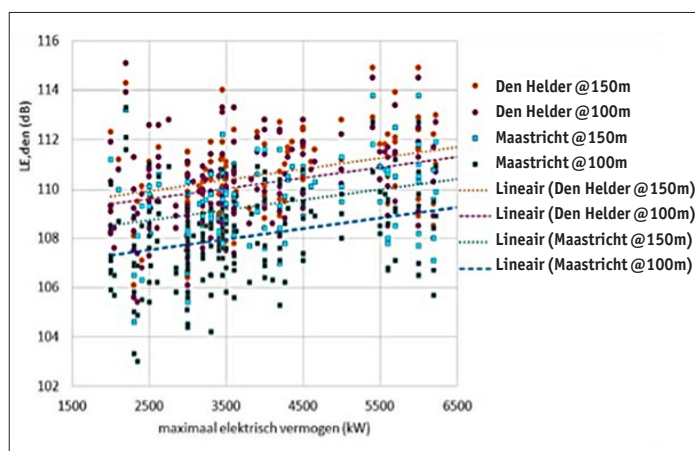


Figuur 1. Maximale geluidproductie van windturbines als functie van hun elektrische capaciteit

2 Het niveau van het aerodynamische geluid van de bladen is evenredig met $50 \cdot \log(Vin)$, waarin Vin de snelheid van de instromende lucht is. Een toename van 4,5% komt dan overeen met $50 \cdot \log(1,045) = 0,96$ dB

Jaargemiddelde geluidproductie

In de Nederlandse regelgeving wordt uitgegaan van de gemiddelde geluidproductie per etmaalperiode (dag, avond, nacht) over een heel jaar. Daarbij wordt rekening gehouden met het windaanbod, omdat dat aanbod over het land verschilt: in het algemeen is er verder van zee minder wind en op grotere hoogte meer wind. Met behulp van de door het KNMI vastgestelde jaarlijkse windsnelheidsverdeling per etmaalperiode op een bepaalde hoogte en locatie kan worden berekend hoeveel geluid een gegeven windturbine daar per periode gemiddeld zal produceren. Hier duiden we dat aan met de jaargemiddelde geluidemissie $L_{E,dag}$, $L_{E,avond}$ en $L_{E,nacht}$ (met de E van Emissie). Voor de over een heel etmaal gemiddelde geluid-emissie wordt bij $L_{E,avond}$ 5 dB opgeteld en bij $L_{E,nacht}$ 10 dB en deze vervolgens met $L_{E,dag}$ samengenomen tot de jaargemiddelde emissie $L_{E,den}$ (day-evening-night). Daarmee kunnen het nachtgemiddelde en het etmaalgemiddelde geluidniveau bij omwonenden worden berekend; voor beide niveaus gelden aparte geluidgrenzen.

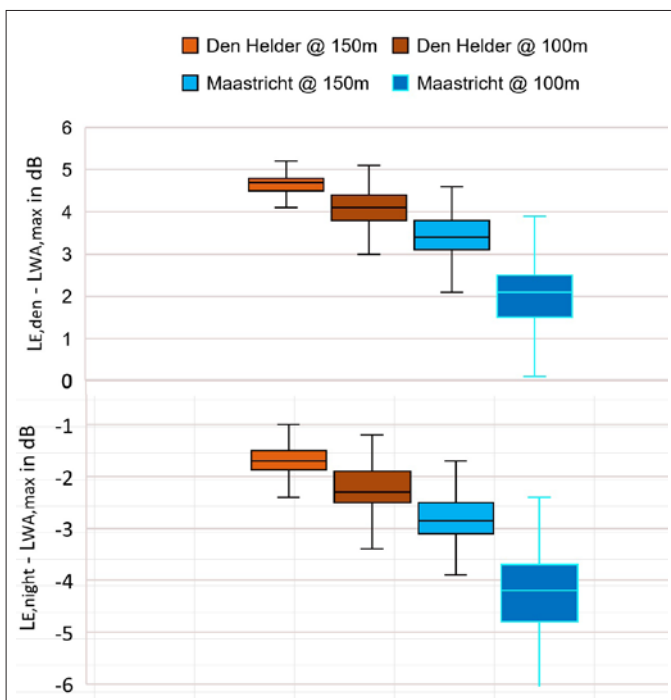


Figuur 2. Jaargemiddelde geluidproductie $L_{E,den}$ van windturbines als functie van hun elektrische capaciteit op twee locaties in twee klassen van ashoogte

Voor de berekeningen van $L_{E,nacht}$ en $L_{E,den}$ zijn we van twee locaties en twee ashoogtes uitgegaan. De gekozen locaties zijn Den Helder (aan zee) en Maastricht (meest landinwaarts). De hoogtes zijn verdeeld naar 'groot' (ashoogte 125 tot 175 m) en 'klein' (75 tot 125 m). Veel turbintypes worden in meerdere ashoogtes geleverd. Hoewel de maximale geluidproductie dan hetzelfde is, zullen de verschillende hoogtes toch andere jaargemiddelde geluidproducties opleveren. Voor de analyse was het noodzakelijk dat de geluidproductie bekend was bij windsnelheden tot nominale windsnelheid (= snelheid waarbij maximum vermogen en geluidproductie wordt bereikt; meestal rond 10 m/s).³ Uiteindelijk waren data van 155 turbintypen bruikbaar, waarvan 41 zowel met als zonder 'uilenveren', dus in totaal 196 verschillende typen. In de grootteklasse van 75-125 m waren 146 typen, van 125-175 m 185 typen. Het resultaat is weergegeven in figuur 2 als vier puntenwolken die voor een groot deel overlappen met vier lijnen die voor elke locatie/ashoogte de gemiddelde (lineaire) trend geven. Daaruit blijkt dat bij de hogere ashoogte in Den Helder de hoogste gemiddelde etmaalproductie wordt gehaald en bij de lagere ashoogte in Maastricht de laagste; het verschil tussen beide bedraagt 2,4 dB.

3 Als gegevens ontbraken, is tussen 3 en 5 m/s geëxtrapoleerd en van nominale windsnelheid tot 25 m/s $L_{WA,max}$ aangehouden.

In figuur 3 zijn de jaargemiddelden $L_{E,nacht}$ en $L_{E,den}$ weergegeven ten opzichte van de maximale geluidproductie $L_{WA,max}$ in een zogeheten 'boxplot'. In elke 'doos'/box vallen de data van de helft van de 196 beschikbare typen windturbines en geeft de horizontale lijn de middelste waarde (mediaan) aan. De verticale lijnen buiten de doos komen overeen met het hoogste en laagste kwart van de data en reiken tot de maximale en minimale waarden van $L_{E,den}$ of $L_{E,nacht}$. Uit figuur 3 blijkt dat de jaarlijkse geluidproductie kleiner en de spreiding ervan juist groter is bij zowel lagere hoogte als meer landinwaarts. Dat komt doordat een hoge windturbine dichter bij zee vaker op maximale productie werkt. De horizontale nullijn in figuur 3 komt overeen met $L_{WA,max}$: individuele $L_{E,den}$ -waarden blijken daar ongeveer 0 tot 5 dB boven te liggen en $L_{E,nacht}$ -waarden 1 tot 6 dB er onder. Het verschil tussen de gemiddelden $L_{E,den}$ en $L_{E,nacht}$ bedraagt 6,3 tot 6,4 dB. 6,4 dB is het verschil dat men verwacht bij een bron die permanent in elke etmaalperiode gemiddeld evenveel geluid produceert [3].



Figuur 3. Verschil tussen jaarlijks etmaalgemiddelde ($L_{E,den}$) en maximale ($L_{WA,max}$) geluidproductie van windturbines (boven) en tussen jaarlijkse nacht-gemiddelde ($L_{E,nacht}$) en maximale geluidproductie (onder) op twee locaties in twee klassen van ashoogte.

Effect van geluiddempende maatregelen

Bij grotere turbines is de verdeling van het geluid over het frequentiegebied - het spectrum - niet anders dan bij de eerdere, kleinere windturbines. Dat is ook te verwachten omdat de wijze van opwekking van dat geluid hetzelfde is gebleven. Wel zijn er tussen verschillende turbintypen, net als bij de grootte van de geluidproductie, ook verschillen in spectrum. Als gevolg hiervan is ook het aandeel laagfrequent geluid in het totale windturbine-geluid gemiddeld niet veranderd. Dat blijkt uit vergelijking van grotere (> 2 MW) en kleinere windturbines en uit vergelijking met eerdere overzichtsstudies.

Bij windturbines vanaf 2 MW worden in toenemende mate veranderingen achter de wiek ('uilenveren'; Engels: trailing edge serrations) gebruikt. Uit een nauwkeurige vergelijking van typen windturbines die zowel met als zonder veranderingen worden

geleverd, blijkt de gemiddelde geluidreductie 2,3 dB te bedragen. Deze reductie is vooral het gevolg van een afname van de hogere frequenties (400 – 1600 Hz) die aan de achterrand worden opgewekt. Op lagere frequenties hebben ze – gemiddeld - geen invloed, maar die invloed kan wel verschillen tussen typen windturbines.



Figuur 4. Geluidreducerende vertanding (zaagtanden of 'serrations') aan de 'trailing edge' of achterzijde van een windturbineblad

Het geluid kan ook worden verminderd door een windturbine in een lagere 'noise mode' te zetten. In feite wordt de wijsnelheid dan verlaagd waardoor er minder geluid wordt geproduceerd. Dit blijkt geen invloed te hebben op de spectrale verdeling van het geluid: naar verhouding blijft de verdeling over lagere en hogere frequenties gelijk. Uit de beschikbare data blijkt dat voor elke dB geluidvermindering de maximale energie-productie gemiddeld met 5% afneemt. Dat geldt uiteraard alleen gedurende de tijd dat de noise mode is ingesteld.

Geluidniveau bij omwonenden

Howel het geluidniveau bij omwonenden van windturbines sterk wordt bepaald door de geluidproductie, hebben ook andere factoren nog invloed. Het kan bijvoorbeeld zijn dat het geluid wordt gereflecteerd of afgeschermd, de windrichting heeft invloed en de bodem in het gebied kan geluid meer of minder absorberen of reflecteren. Dit wordt echter door de omgeving bepaald, niet door de windturbine. Een factor die nog wel van de turbine afhangt, is de spectrale verdeling van het geluid: bij een groter aandeel laagfrequent (LF) geluid zal het geluidniveau op afstand minder snel afnemen. De oorzaak daarvan is de lagere absorptie van geluid door atmosfeer en bodem, en de lagere gevelisolatie bij lagere frequenties. In zijn algemeenheid zal een windturbine met naar verhouding meer laagfrequent geluid daardoor een hoger geluidniveau bij omwonenden veroorzaken (in de praktijk tot circa 1 dB op 1 km en tot 2 dB op 2 km afstand). We hebben bij vijf typen windturbines bekeken wat het effect is van het aanbrengen van de vertanding. Daarbij keken we naar typen die zowel met als zonder vertanding geleverd werden en naar het aandeel laagfrequent geluid van de 'kale' turbine (zonder vertanding). Het aanbrengen van een vertanding bleek verschillend uit te pakken vanwege het effect op de spectrale samenstelling. Het effect van de vertanding nam - zoals men zou verwachten - op grotere afstand van de windturbine af, maar die afname was vrij klein: de geluidreductie op 1 km afstand was 0,1 tot 0,4 dB lager dan bij de bron. Op 2 km afstand was dit 0,1 tot 0,9 dB.

Conclusie

De tegenwoordige, steeds krachtiger windturbines op land vertonen een geringere toename van het geluidniveau dan tot pakweg 10 jaar geleden het geval was. Dat komt vooral door een steeds geringere toename van de tipsnelheid. Het geluidsspectrum is, gemiddeld genomen, onveranderd. De elektrische capaciteit van een turbine heeft daarom nauwelijks nog invloed op het geproduceerde geluid. Wel zijn er duidelijke verschillen tussen typen turbines, zowel wat betreft de hoeveelheid geproduceerd geluid als de spectrale samenstelling. De over een jaar gemiddelde hoeveelheid geluid wordt in Nederland vooral door locatie en ashoogte bepaald. Er wordt over het jaar meer geluid geproduceerd bij gemiddeld hogere windsnelheden en dat is dicht bij zee en op grotere hoogte. Daarom is nabij zee het verschil tussen maximaal en jaargemiddeld nachtniveau kleiner (gemiddeld 1,5 - 2 dB) dan ver landinwaarts (3 - 4 dB). In alle gevallen geldt overigens dezelfde geluidnorm. Dat betekent dat nabij zee en voor hogere windturbines een grotere afstand tot woningen moet worden aangehouden.

Er worden steeds vaker bij de windturbine zelf maatregelen (zoals vertandingen) gebruikt die het geluid reduceren. Gemiddeld blijken vertandingen het geluid bij een windturbine met 2,3 dB te reduceren. Omdat vertandingen vooral effect hebben op de hogere frequenties van het achterrand geluid, hebben deze wel invloed op het geluidsspectrum: dat wordt naar verhouding wat laagfrequentier. Ze kunnen daardoor op afstand - bij omwonenden - een ander effect hebben dan wanneer dichtbij een windturbine wordt gemeten. Het blijkt dat het gunstige (geluidreducerende) effect op afstanden tot 2 km nauwelijks minder hoeft te zijn dan bij de

bron, maar het kan ook afnemen. In twee van vijf onderzochte gevallen met een relatief groot effect van de vertanding (2,8 dB) nam dat effect op 2 km slechts met 0,3 dB af. In twee andere gevallen met een matiger effect aan de bron (2,0 en 1,4 dB) nam het effect op 2 km echter met 0,9 dB af.

Geluidreductie bij windturbines kan de geluidniveaus - en daardoor mogelijk de geluidhinder - bij omwonenden verminderen of het plaatsingspotentieel voor windturbines vergroten. Dit laatste kan voor omwonenden een nadelig effect hebben. Als namelijk de geluidnorm hetzelfde blijft, kunnen relatief stille, maar steeds grotere turbines dicht bij woningen worden geplaatst. Het geluidniveau bij de omwonenden kan daardoor gelijk blijven, maar de visuele invloed wordt groter. Het voornemen van de overheid om ook een afstandgrens (2 maal tiphoogte) in te voeren, kan dit nadeel wegnemen. Er is echter een risico dat dan windturbines met een grote rotordiameter en relatief lage ashoogte worden geplaatst wat juist als meer indringend kan worden ervaren.

Referenties

- [1] Bron: List of most powerful wind turbines. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_powerful_wind_turbines
- [2] Frits van den Berg, Erik Koppen, Jaap Boon en Madelon Ekelschot-Smink. Development of sound power of onshore wind turbines including its spectral distribution. Als preprint gepubliceerd: www.preprints.org/manuscript/202404.1773/v1
- [3] F. van den Berg. Criteria for wind farm noise: Lmax and Lden. Proc. Acoustics'08, Paris, 29 June-4 July 2008

