

Beoordeling van laagfrequent geluid van windturbines in Maastricht¹

Door Henrik Møller, Steffen Pedersen*, Jan Kloster Staunstrup** en
Christian Sejer Pedersen**

**Sectie akoestiek, **Vakgroep ruimtelijke ontwikkeling en ordening,
Universiteit van Aalborg, Denemarken*

1 Voorwoord

Het geluid van het geplande Windpark Lanakerveld in Maastricht is in verschillende rapporten onderzocht. Boukich en Koppen¹ onderzochten alternatieve projecten en Koppen² voerde aanvullende analyses uit, waaronder analyses van laagfrequent geluid. Koppen³ analyseerde het geoptimaliseerde en geselecteerde project, dat vier Vestas V112-3.0 MW turbines omvat met een ashoogte van 119 meter. Een speciale analyse inzake laagfrequent geluid in het geselecteerde project werd uitgevoerd door Koppen⁴. Op verzoek van omwonenden werd een aanvullende analyse van laagfrequent geluid gemaakt door Koppen⁵, waarbij gegevens uit een artikel van Møller en Pedersen⁶ en nieuwe regelgeving voor laagfrequent geluid van windturbines in Denemarken⁷ in aanmerking werden genomen. De gemeente Maastricht verzocht vervolgens om in dit rapport bepaalde vragen nader aan de orde te laten komen. Helaas was alleen het laatste Nederlandse rapport⁵ in het Engels beschikbaar, maar medewerkers van de gemeente en van Arcadis Nederland BV zijn uiterst behulpzaam geweest in het beantwoorden van vragen. Bovendien hebben wij gebruikgemaakt van de oorspronkelijke geluidsmetingen⁸ en technische informatiebladen^{9,10}.

Het verslag is openbaar en mag in zijn geheel worden verspreid.

2 Inleiding

Het is wellicht zinnig om te beginnen met een korte inleiding in laagfrequent geluid.

Geluid en lawaai kunnen worden gekarakteriseerd door de frequentie ervan. Doorgaans geldt het gebied van 20 Hz tot 20 kHz (van 20 trillingen per seconde tot 20.000 trillingen per seconde) als het normale gehoorbereik of het audiofrequentiebereik. Geluid met frequenties van meer dan 20 kHz wordt ultrasoon geluid of ultrageluid genoemd en is voor mensen niet hoorbaar.

Geluid met frequenties van minder dan 20 Hz wordt infrason geluid of infrageluid genoemd. Ten onrechte wordt er veelal van uitgegaan dat ook infrason geluid onhoorbaar is. Infrageluid is echter wel degelijk

¹ Opgesteld voor de gemeente Maastricht, ISBN 978-87-92328-82-3, Universiteit van Aalborg, 10 april 2012.

hoorbaar, ten minste tot 1 of 2 Hz, mits het geluidsniveau hoog genoeg is. Het geluid wordt met de oren waargenomen, meestal in de vorm van een drukgevoel op de trommelvliezen.

Geluid in het gebied van 20 tot 200 Hz wordt laagfrequent geluid genoemd. Soms worden iets andere grenzen aangehouden, bv. 10-160 Hz.

Iedereen kent de waarneming van geluid in lage en infrasone frequenties uit zijn dagelijkse omgeving. Typische bronnen van laagfrequent geluid zijn ventilatiesystemen, compressoren, stationair draaiende vrachtwagenmotoren en de stereo van de burens. Met infrason geluid krijg je doorgaans te maken op het autodek van een veerboot en bij het autorijden met open raam. Meestal gaat infrageluid echter gepaard met geluid in andere frequenties en het horen van louter infrageluid is dan ook geen gebruikelijke ervaring.

Voor een grondig overzicht van het menselijk gehoor bij lage en infrasone frequenties, zie Møller en Pedersen¹¹.

De sterkte van het infrageluid dat geproduceerd wordt door moderne windturbines is zo gering dat het geluid zelfs dichtbij de turbines niet door mensen waarneembaar is⁶. In onze dagelijkse omgeving komen elders veel hogere geluidsniveaus voor, bv. bij vervoer.

Het laagfrequente geluid van windturbines wordt doorgaans omschreven als zoemen of brommen. Het kan een min of meer uitgesproken tonaal karakter hebben, bv. in de vorm van tonen die fluctueren en variëren in geluidsniveau en/of toonhoogte, of van al dan niet regelmatige toonpulsen. Ook zijn er meldingen van een drukgevoel op de trommelvliezen. Kenmerkend is dat het geluid sterk varieert in de tijd en met de wind en andere atmosferische omstandigheden.

De modulatiesnelheid van het laagfrequente geluid van windturbines (evenals van hogere frequenties) ligt dikwijls in het infrasone frequentiegebied, bv. de frequentie waarmee de wieken passeren, en daardoor kan het geluid ten onrechte voor infrageluid worden gehouden, ook al is er geen of nauwelijks infrageluid aanwezig.

3 Specifieke vragen

De vragen van de gemeenteraad worden elk in een aparte subsectie behandeld. De volledige lijst is opgenomen in bijlage A.

3.1 Naar de effecten van laagfrequent geluid is veel onderzoek gedaan. Waarin verschilt de studie(aanpak) van Møller en Pedersen van die van andere onderzoekers?

Weliswaar is in veel onderzoeken gekeken naar de effecten van laagfrequent geluid in het algemeen, maar slechts weinig studies betroffen specifiek het laagfrequente geluid van windturbines.

Møller en Pedersen⁶ onderzochten niet de effecten van laagfrequent geluid maar richtten zich op het fysieke geluid van windturbines, zoals het geëmitteerde geluidsvermogen, de frequentieverdeling, de propagatie naar omwonenden en de mate waarin het in de woningen van omwonenden doordringt.

De aanpak van Møller en Pedersen verschilt niet van die van andere onderzoekers. De meeste metingen werden gedaan volgens internationale normen en bij de analyses werden conventionele statistische methoden gehanteerd. De mogelijke hinder van laagfrequent geluid werd beoordeeld aan de hand van de hoorbaarheid ervan en de bijdrage aan het totale geluid, alsmede standaardcriteria die voor andere

geluidsbronnen worden gebruikt.

Voor zover wij weten betrof het rapport van Møller en Pedersen het eerste onderzoek waarin specifiek gekeken werd naar het verband tussen laagfrequent geluid en de afmetingen van de turbine. De metingen werden gedaan door adviesbureau Delta, dat de gegevens publiceerde in ongereviewde projectrapporten van Søndergaard en Madsen^{12,13,14} en Hoffmeyer en Søndergaard¹⁵. Madsen en Pedersen¹⁶ voegden emissiegegevens toe van 17 nieuwe turbines van 1,8 tot 3,6 MW. De toegevoegde gegevens werden opgenomen in een bijgewerkt verslag van Møller et al.¹⁷ waarvan de resultaten en conclusies grotendeels overeenkwamen met die van Møller en Pedersen⁶, maar dan gebaseerd op breder gegevensmateriaal.

Er zijn wel verschillen tussen de resultaten van Delta de onze, maar deze zijn merendeels niet groot. Sommige van de bevindingen van Delta komen evenwel niet duidelijk terug in hun conclusies. De verschillen zijn groter tussen de resultaten en de interpretaties die worden gegeven in de persberichten van Delta, het Deense milieuagentschap en de windindustrie, die ervan verdacht zou kunnen worden sommige bevindingen en mogelijke nadelige effecten van het geluid van windturbines te onderschatten.

Hierbij is het relevant te vermelden dat Møller en Pedersen ook Nederlandse metingen van windturbinegeluid, oorspronkelijk gepubliceerd door Van den Berg et al.¹⁸, hebben geanalyseerd. De geluidsniveaus en de verschillen tussen kleine en grote turbines waren nagenoeg dezelfde als in de Deense metingen.

Wij bevelen lezers aan om kennis te nemen van onze oorspronkelijke publicaties^{6,17}.

3.2 Wat zijn de voornaamste effecten van laagfrequent geluid op mensen en wanneer treden deze effecten specifiek op?

Geluid met aanzienlijke laagfrequente componenten heeft mogelijk meer effect op de gezondheid en het welzijn van de mens dan geluid waarin dergelijke componenten ontbreken.

Bij lage frequenties neemt de luidheid sterker toe boven de gehoordrempel dan bij hogere frequenties (zie bv. Whittle et al.¹⁹, Møller en Andresen²⁰, Bellmann et al.²¹, ISO 226²²). Daardoor kan een geluid dat de gehoordrempel niet ver overstijgt, toch als luid worden ervaren en zelfs als hinderlijk (Andresen en Møller²³, Møller²⁴, Inukai et al.²⁵, Subedi et al.²⁶). Vanwege de natuurlijke spreiding in gehoordrempels van persoon tot persoon, kan een laagfrequent geluid dat voor sommigen onhoorbaar of zacht is, voor anderen luid en hinderlijk zijn.

Laagfrequent geluid is vooral hinderlijk wanneer het afzonderlijk voorkomt of met weinig geluid in hogere frequenties. Dit betekent dat het meestal binnen hinderlijker is dan buiten, aangezien de geluidsisolatie van een huis hoge frequenties sterker dempt dan lage. Ook is het 's avonds of 's nachts vaak hinderlijker, omdat het dan verder stil is.

Langdurige blootstelling aan hoorbaar laagfrequent geluid kan vermoeidheid, hoofdpijn, concentratieverlies, verstoorde nachtrust en fysiologische stress, meetbaar door een verhoogd cortisolgehalte in het speeksel, veroorzaken (zie bv. Berglund et al.²⁷, Bengtsson et al.²⁸, Wayne et al.²⁹, Wayne et al.³⁰).

Er is geen betrouwbaar bewijs voor fysiologische of psychologische effecten van infrason of laagfrequent geluid onder de gehoordrempel (zie bv. Berglund en Lindvall³¹).

(Bovenstaande alinea's zijn gedeeltelijk overgenomen uit Bolin et al.³² en Møller en Pedersen¹¹).

3.3 Naar aanleiding van de resultaten van uw onderzoek heeft de Deense regering de regelgeving voor het plaatsen van windturbines veranderd. Klopt dat? En zo ja, wat is er dan veranderd?

De Deense regelgeving is vervat in een wetsbesluit inzake geluid van windturbines⁷. In 2011 werden er regels voor de laagfrequente component van het geluid aan toegevoegd (van kracht per 1 januari 2012).

3.3.1 Achtergrond

Bij de voorgaande herziening van het wetsbesluit inzake het geluid van windturbines, in 2006, verklaarde het Deense milieuagentschap dat de regelgeving inzake laagfrequent geluid van windturbines niet nodig zou zijn, omdat aan de algemene drempel van 20 dB binnenshuis die voor andere bronnen wordt toegepast, automatisch zou worden voldaan als de normale geluidsgrenzen voor buiten werden nageleefd.

Uit de gegevens van het milieuagentschap zelf bleek echter dat dit niet zo was³³, en de jaren daarna voerden omwonenden die klaagden over laagfrequent geluid van windturbines, de druk op het milieuagentschap op. Bovendien werd de behoefte aan regelgeving ondersteund door wetenschappelijke bevindingen, waaronder de recentste in publicaties van Delta¹⁶ en de Universiteit van Aalborg^{6,17}.

In oktober 2010 bracht een rapport van de Universiteit van Aalborg ernstige fouten aan het licht in de gedeelten over geluid van de milieueffectbeoordeling (MEB) voor een prestigieus Deens testcentrum voor grote windturbines³⁴. De wet ter oprichting van het centrum moest worden herzien en de benadering van geluid van windturbines in de MEB kwam op de politieke agenda te staan in het parlement. De minister van Milieu beloofde daarop grenzen voor laagfrequent windturbinegeluid in te zullen voeren.

3.3.2 Grens voor laagfrequent geluid

De algemene (d.w.z. niet speciaal voor windturbines) Deense grens voor laagfrequent geluid in woningen is een A-gewogen geluidsniveau van 20 dB ('s avonds en 's nachts) en 25 dB (overdag) binnenshuis. Het gaat hierbij uitsluitend om het frequentiegebied 10-160 Hz (tertsbanden). Het geluidsniveau wordt gemeten als het gemiddelde vermogen op drie posities, waarvan er twee zich bevinden in de leefruimte van het vertrek waar de klager het geluid bij uitstek als luid ervaart. De derde positie bevindt zich bij een hoek van het vertrek (op 1-1,5 m hoogte en op 0,5-1 m van de muren). Door uit te gaan van het gemiddelde vermogen ligt het eindresultaat dichtbij het niveau in de aangewezen luide posities.

Met het herziene besluit is de 20 dB-grens ook van toepassing op windturbines bij windsnelheden van 6 en 8 m/s (windturbines die dag en nacht draaien).

In tegenstelling tot andere geluidsbronnen wordt het laagfrequente geluid niet gemeten maar berekend op grond van metingen vlakbij de turbine waar het geluid vandaan komt.

Het geluidsniveau binnen L_{pA} wordt berekend aan de hand van de volgende formule:

$$L_{pA} = L_{WA, \text{ref}} - 20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{1 \text{ m}} \right) - 11 \text{ dB} + \Delta L_g - \Delta L_a - \Delta L_\sigma$$

$L_{WA, \text{ref}}$ is het A-gewogen bronvermogen in de referentierichting, volgens de standaardmeetmethode IEC 61400-11³⁵, d de afstand van de gondel tot de omwonende, L_g de terreincorrectie (bodembrelectie), L_a de

luchtabSORPTIE, gelijk aan $\alpha \cdot d$, waarbij α_a de luchtabSORPTIECOEFFICIENT is, en L_σ de geluidsisolatie. L_g , α_a en L_σ worden gegeven in een tabel die hier wordt overgenomen als tabel 1.

Tabel 1. Constanten gebruikt in de Deense regelgeving voor de berekening van laagfrequent geluid binnen $L_{pA,LF}$.

Frequentie (Hz)	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
L_g (land) (dB)	6,0	6,0	5,8	5,6	5,4	5,2	5,0	4,7	4,3	3,7	3,0	1,8	0,0
L_g (zee) (dB)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,9	5,9	5,8	5,7	5,5	5,2	4,7	4,0
L_σ (dB)	4,9	5,9	4,6	6,6	8,4	10,8	11,4	13,0	16,6	19,7	21,2	20,2	21,2
α (dB/km)	0	0	0	0	0,02	0,03	0,05	0,07	0,11	0,17	0,26	0,38	0,55

De berekeningen worden uitgevoerd voor de tertsbanden 10-160 Hz en de geluidsniveaus worden samengenomen als A-gewogen laagfrequent geluidsniveau $L_{pA,LF}$.

3.3.3 Opmerkingen bij de regelgeving inzake laagfrequent geluid

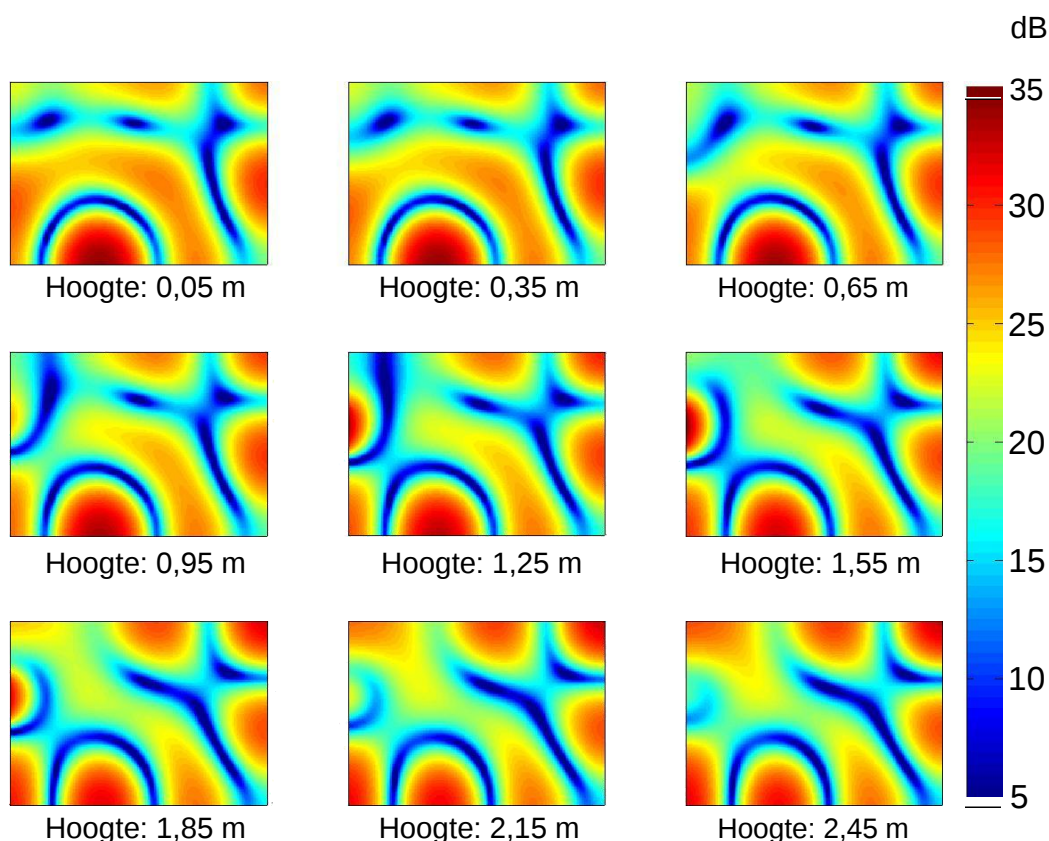
Op basis van de bestaande kennis van de effecten van laagfrequent geluid op mensen beschouwen wij de gekozen grens van 20 dB voor het A-gewogen geluidsniveau van het frequentiegebied 10-160 Hz als een redelijke grens.

In het nieuwe Deense wetsbesluit voor windturbines wordt het geluid niet gemeten maar berekend. Dit hoeft geen probleem te zijn als de berekeningen kloppen. Maar dat is niet het geval.

Het voornaamste probleem is de geluidsisolatie die in het wetsbesluit is opgenomen. Deze waarden zijn gebaseerd op metingen in 26 Deense huizen, gepubliceerd door Hoffmeyer en Jakobsen³⁶. Helaas bleken deze metingen niet te kloppen.

Het probleem is dat geluid bij lage frequenties binnen een kamer varieert – doorgaans met vele decibels – en zoals vermeld in sectie 3.3.2 moet het geluidsniveau, kort gezegd, gemeten worden waar de persoon die hinder ondervindt, het geluid het luidste vindt. Om bruikbaar te zijn voor het berekenen van de relevante geluidsniveaus binnen op grond van de geluidsniveaus buiten moet de geluidsisolatie op dezelfde manier worden gemeten. Dat is niet gebeurd. De binnenmetingen werden zomaar op willekeurige posities verricht, die niet geselecteerd waren op grond van een hoog geluidsniveau. Daardoor zijn de verkregen waarden voor de geluidsisolatie te hoog.

In figuur 1 is een voorbeeld weergegeven van de geluidsverdeling in een vertrek. In elk diagram is de geluidsverdeling op een bepaalde hoogte weergegeven met een kleurschaal voor het geluidsniveau (schaal rechts).



Figuur 1. Voorbeeld van de gesimuleerde geluidsverdeling in een vertrek (5,0 m x 3,6 m x 2,5 m; L x B x H). Het geluid is een zuivere toon van 112 Hz. Het geluid komt binnen door een opening van 90 cm x 90 cm (venster) in de linkerwand. Het zal velen waarschijnlijk verbazen dat daar niet de hoogste geluidsniveaus worden aangetroffen maar onderaan de zijwand.

Te zien is dat er grote gebieden zijn waar het geluidsniveau hoger is dan 25 dB, terwijl op andere plaatsen minder dan 10 dB gemeten kan worden. De figuur betreft een extreme situatie met een zuivere toon in een lege ruimte, maar in bestaande, gemeubileerde vertrekken zijn variaties van 30 dB met zuivere tonen en 20 dB met geluid in één tertsbands geen uitzondering.

Samen met een Zweedse collega hebben wij gewezen op de fout in de gegevens van Hoffmeyer en Jakobsen³⁶ in een ingezonden brief³⁷ in het wetenschappelijke tijdschrift waarin de metingen gepubliceerd waren.

In zijn reactie³⁸ op deze brief lijkt medewerker Jakobsen van het Deense milieuagentschap van mening te zijn dat het geen verschil maakt of de metingen op de luidste plaatsen worden verricht of niet. Het moge duidelijk zijn dat dit onjuist is. De reactie werd niet ondertekend door eerste auteur van de oorspronkelijke publicatie Hoffmeyer, en ondanks herhaald verzoek is het niet gelukt om duidelijkheid te krijgen over de vraag of hij de mening in de reactie van Jakobsen deelt.

Op grond van hun metingen stelden Hoffmeyer en Jakobsen³⁶ geluidsisolatiegegevens voor voor de berekening van laagfrequent geluid binnenshuis afkomstig van windturbines. Door de meetfout zijn deze waarden te hoog. Voor de Deense regelgeving werden de waarden zelfs nog verder verhoogd met 2,2 tot 4,1 dB, afhankelijk van de frequentie.

Daardoor geven berekeningen op grond van de Deense regelgeving te lage waarden voor het laagfrequente geluid dat in nabijgelegen woningen gemeten zou worden.

De fout wordt geschat op zo'n 5 dB, zie bijlage B.

Een fout van 5 dB lijkt weliswaar gering, maar is allesbehalve verwaarloosbaar. Zoals vermeld in sectie 3.2 nemen luidheid en hinder sneller toe boven de gehoordrempel dan bij hogere frequenties. Dit betekent dat een overschrijding van de drempel van 20 dB met een paar decibels meer uitmaakt dan als een grens bij hogere frequenties met eenzelfde aantal decibels wordt overschreden. Bij 20 dB zullen de meeste mensen een geluid horen en zullen sommigen het als hinderlijk ervaren. Een geluid van 25 dB 's nachts in huis zal voor weinig mensen aanvaardbaar zijn en een geluid van 30 dB voor bijna niemand.

In de motivering van de nieuwe regelgeving schrijft het milieuagentschap: *“Het Deense milieuagentschap beschouwt het als aanmerkelijke geluidshinder, indien het laagfrequente geluidsniveau binnenshuis 's avonds en 's nachts hoger is dan 20 dB. De hinder die wordt ondervonden van laagfrequent geluid neemt sterk toe wanneer het geluid de 20 dB overschrijdt”*.³⁹

(Onze vertaling).

3.3.4 Algemene geluidsgrenzen

Voor een volledige beschrijving van de Deense regelgeving dienen de berekeningen en grenzen voor het totale geluid kort genoemd te worden.

De grenzen voor het totale windturbinegeluid werden in de herziening niet gewijzigd. De grenzen liggen bij A-gewogen geluidsniveaus buiten van 39 dB in woongebieden, behalve voor woningen buiten de bebouwde kom, waar de grens 44 dB is. Deze grenzen gelden bij een windsnelheid van 8 m/s op een hoogte van 10 m. Bij een windsnelheid van 6 m/s zijn de grenzen respectievelijk 37 dB en 42 dB. De lagere grenzen gelden ook voor recreatiegebieden en gebieden voor uiteenlopende instellingen.

In tegenstelling tot bij andere geluidsbronnen wordt het geluid niet gemeten bij nabijgelegen woningen, maar worden geluidsmetingen vlakbij de turbines gebruikt om de theoretische geluidsniveaus bij omwonenden te berekenen.

Het geluidsniveau wordt berekend aan de hand van dezelfde formule als voor laagfrequent geluid binnenshuis, maar dan zonder de geluidsisolatie L_G mee te rekenen. Voor de bodemreflectie L_G wordt 1,5 dB aangehouden (3,0 dB boven zee), en de absorptiecoëfficiënten α_a voor het gehele frequentiegebied staan in een tabel die hier wordt overgenomen als tabel 2.

Tabel 2. In de Deense regelgeving gebruikte absorptiecoëfficiënten voor de berekening van het totale geluidsniveau buiten L_{pA} .

Frequentie (Hz)	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
α_a (dB/km)	0,07	0,11	0,17	0,26	0,38	0,55	0,77	1,02	1,3	1,6	2,0	2,4
Frequentie (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
α_a (dB/km)	2,9	3,6	4,6	6,3	8,8	12,6	18,8	29,0	43,7	67,2	105	157

3.4 Zijn de berekeningen en de beoordeling van laagfrequent geluid in het rapport van Arcadis op de juiste manier uitgevoerd volgens de Deense methode en normen? Zo niet, waarin zitten de verschillen? Zal herberekening aanmerkelijk andere uitkomsten opleveren?

Wij hebben de volgende opmerkingen bij het rapport van Arcadis⁵.

In tabel 2 van dit rapport staat een gegevenspunt voor het relatieve spectrum bij 20 Hz met als bronvermelding het artikel van Møller en Pedersen⁶ (tabel III). Ons artikel bevat echter helemaal geen gegevens bij deze frequentie. Aan het andere uiteinde van het laagfrequente gebied zijn om de een of andere reden de frequenties 125 en 160 Hz niet in tabel 2 opgenomen.

Ook in de berekeningen heeft Arcadis gegevenspunten gebruikt bij 10; 12,5; 16 en 20 Hz die afkomstig zouden zijn uit ons artikel, terwijl dit helemaal geen gegevenspunten bij deze frequenties bevat. Bovendien is het gegevenspunt bij 20 Hz in de berekeningen niet hetzelfde als in tabel 2.

De waarden bij de extra gegevenspunten zijn echter wel plausibel, en aangezien het geluid bij de laagste frequenties slechts een geringe bijdrage levert aan het totale laagfrequente geluidsniveau, is de invloed van de precieze waarden ervan op het eindresultaat slechts marginaal. Dit neemt niet weg dat de toevoeging van gegevenspunten aan de Møller en Pedersen-gegevens natuurlijk in het rapport van Arcadis toegelicht en besproken had moeten worden.

Afgezien daarvan zijn de Møller en Pedersen-gegevens correct geïnterpreteerd en gebruikt.

Ook de interpretatie en het gebruik van de Deense regelgeving voor laagfrequent geluid zijn correct. We hebben de berekeningen van het laagfrequente geluid op vier geselecteerde nabijgelegen posities gecontroleerd en kregen daarbij dezelfde uitkomsten.

Er zij op gewezen dat de grens van 20 dB in alle scenario's op drie van de vier berekende posities overschreden werd en in één scenario op alle vier de posities, hetgeen niet helemaal zichtbaar is in tabel 3, waarin de cijfers zijn afgerond op hele decibels. In Denemarken is de grens een absolute grens, die niet mag worden overschreden.

Arcadis lijkt zich niet bewust van de meetfout in de isolatiemetingen waarop de gegevens in het Deense wetsbesluit zijn gebaseerd. Hoewel hierop gewezen is in de wetenschappelijke literatuur, kan dit als begrijpelijk worden beschouwd, aangezien het besluit zelf niet vermeldt hoe de gegevens tot stand zijn gekomen.

3.5 Is naar uw mening het geluidsspectrum zoals vermeld in het akoestisch onderzoek van Arcadis in de tabellen 1 en 2 een reëel worstcasescenario voor berekening van laagfrequent geluid van de 3 MW-windturbines? Zo niet, waarom niet en kunt u de juiste waarden aangeven? Zal dit leiden tot substantieel afwijkende resultaten?

Nee, het spectrum van het originele Arcadis-onderzoek in deze tabellen (Koppen⁵, eerste rijen van tabel 1 en 2, vormt geen worstcasescenario. Dat geldt misschien wel voor het relatieve bronniveau bij bepaalde frequenties, maar niet voor alle frequenties, en niet voor het uiteindelijke resultaat, het geluid bij de omwonenden.

We weten niet hoe het relatieve spectrum van Arcadis precies is afgeleid van de eerdere niet-vertaalde Nederlandse rapporten (Koppen^{2,4}), maar bij het bepalen van de twee andere relatieve spectra is geen rekening gehouden met worstcaseaspecten en de eindresultaten van het gebruik van de drie gegevenssets komen sterk overeen (Koppen⁵, tabel 3).

De gegevens van Møller en Pedersen⁶ zijn schattingen op basis van metingen van turbines van verschillende grootte en meerdere modellen. Het model bevat enkel de werkelijk gemeten gegevens zonder ruimte in te bouwen voor onzekerheden en variaties tussen modellen.

Verder wordt bij bepaling van het gemiddelde door Møller en Pedersen uitgegaan van tonen of semitonale componenten die voor een bepaald model typisch voorkomen in één bepaalde frequentieband, maar bij andere modellen in andere frequentiebanden. Door het optreden van kamerresonantie kunnen dergelijke tonale of semitonale geluidscomponenten opvallend luid en hinderlijk zijn binnen bepaalde huizen en/of kamers.

Er treden onvermijdelijk variaties op in geluidsemissies tussen turbines, zelfs als deze van hetzelfde model zijn. De kans dat een bepaalde geleverde turbine meer geluid veroorzaakt dan een gemiddelde turbine – of enige andere willekeurig gekozen turbine – van hetzelfde model, bedraagt in principe 50%.

Voor planningsdoeleinden moet de geluidsemissie daarom worden gespecificeerd volgens IEC TS 11400-14⁴⁰. In dit document worden metingen gehanteerd voor verschillende soortgelijke turbines, waarbij rekening wordt gehouden met de variatie tussen turbines, om voor het model het *opgegeven bronvermogen* L_{Wd} te bepalen. Dit is het bronvermogen dat slechts door 5% van de productie wordt overschreden. Met dergelijke waarden zou men kunnen komen tot een redelijk worstcasescenario.

Het “Vestas V112”-scenario van tabel 3 is inderdaad gebaseerd op metingen met één turbine⁸. Zelfs als de niveaus enigszins zijn aangepast met het oog op de gespecificeerde totale geluidsemissie conform het gegevensblad van Vestas⁹, vormen ze geen worstcasescenario. Vestas verwijst niet naar IEC TS 11400-14 en heeft niet geclaimd of gedocumenteerd dat hun waarden het maximale bronvermogen zouden zijn voor productiesamples. Wanneer men de gemeten windsnelheden beziet, liggen de waarden in het gegevensblad in feite dicht bij de gemeten niveaus voor de enkele turbine. (zie ook hoofdstuk 4.1).

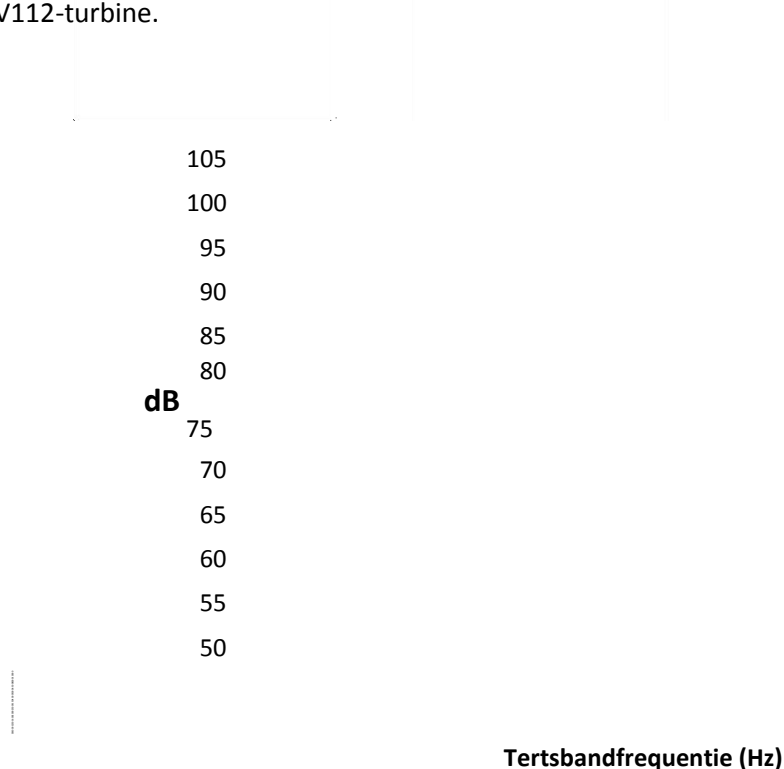
Hoeveel hoger de waarden in een worstcasescenario uitvallen, hangt af van de mate waarin turbines onderling afwijken en aangezien dat voor het desbetreffende model niet bekend is, kunnen we alleen algemene informatie geven. Møller et al.¹⁷ stelt dat naar schatting 2,6-4,8 dB moet worden opgeteld bij de gemiddelde waarde van turbines om de niveaus volgens IEC TS 11400-14 te bepalen. Deze variatie kan ten dele het gevolg zijn van verschillen tussen soortgelijke turbines die in verschillende modi draaien, maar hierover wordt geen volledige duidelijkheid verschaft in de gegevens die ons ter beschikking staan. Alleen de producenten van turbines beschikken over de complete informatie over de turbine-instellingen en zij zouden de informatie moeten verstrekken, bijv. uitgaande van IEC TS 11400-14. De genoemde waarden betreffen de totale geluidsemissie en niet het laagfrequente geluid in het bijzonder.

Bij een recent project in Denemarken met acht Vestas V90-3.0 MW-turbines bleek dat het gemeten bronvermogen⁴¹ hoger was dan werd verwacht in de voorafgaande milieueffectbeoordeling (MEB)⁴²; inmiddels draaien meerdere turbines in stillere modi om aan de geluidseisen te voldoen. De turbines waren gebouwd voordat de nieuwe Deense regelgeving van kracht werd, maar uit de metingen blijkt dat

ze voldoen aan de nieuwe laagfrequentie-eisen⁴³. Toch hebben omwonenden ernstige klachten kenbaar gemaakt en het is onze indruk dat de 50-Hz tertsband hierbij een belangrijke rol speelt. De dichtstbijzijnde omwonende bevindt zich op 545 meter van de nabijgelegen turbine. De in het gegevensblad vermelde geluidsspecificaties van de V90-3 MW-turbine⁴⁴ komen sterk overeen met die van de V112-3 MW, zij het dat ze iets lager zijn voor de meeste windsnelheden. Benadrukt moet worden dat we geen reden hebben om aan te nemen dat dergelijke problemen specifiek voor turbines van Vestas gelden.

De brongegevens die Arcadis voor het “Vestas V112”-scenario (Koppen⁵, tabel 3 derde rij) heeft gebruikt, d.w.z. relatieve spectrumniveaus op basis van de metingen van de V112-3.0-turbine die zijn toegepast op gegevensbladwaarden voor het totale geluid van de V112- en V80-turbines, kunnen als realistisch en waarschijnlijk worden beschouwd.

Deze gegevens zullen dan ook worden gebruikt bij berekeningen in de rest van dit rapport. Aangezien in het Arcadis-rapport alleen waarden tot 160 Hz zijn opgenomen, zijn de waarden voor het volledige frequentiebereik in bijlage 3 vermeld. Zie ook figuur 2 voor een grafische weergave van de gegevens voor de V112-turbine.



Figuur 2. Tertsbandfrequenties voor Vestas V112-3.0 MW-turbines als grondslag voor de berekeningen.

Er zijn pieken te zien van 63 en 100 Hz, wat kan duiden op tonen en tonaal geluid in deze frequentiebanden.

Benadrukt moet worden dat alle berekeningen van het geluid bij de omwonenden in dit rapport niet alleen het geluid van de voorgestelde nieuwe turbines, maar ook dat van de bestaande Belgische turbines omvat.

3.6 Is het mogelijk een indicatie te geven van het te verwachten laagfrequente geluid van de geplande vier windturbines van het type Vestas V112 3MW, ashoogte 119 m?

Is het mogelijk een reële en waarschijnlijke inschatting (niet worstcasescenario) te geven van de mate waarin omwonenden aan laagfrequent geluid zullen worden blootgesteld?

Daarvoor wordt gebruik gemaakt van de brongegevens zoals uiteengezet in hoofdstuk 3.5 en weergegeven in figuur 2 en bijlage C. Voor de geluidstransmissie wordt de Deense regelgeving⁷ (hoofdstuk 3.3.2) gebruikt en in de resultaten wordt de eerder genoemde fout van naar schatting 5 dB vanwege de onjuiste geluidsisolatiemeting gecorrigeerd (hoofdstuk 3.3.3 en bijlage B).

Gezien de verschillen in geluidsisolatie zal het gemeten geluidsniveau niet in alle woningen gelijk zijn, en in sommige woningen moet rekening worden gehouden met hogere geluidsniveaus dan was berekend. In de Deense regelgeving is als duidelijke doelstelling opgenomen om in 33% van de woningen met hogere niveaus rekening te houden³⁹. Hoffmeyer en Jakobsen³⁶ gaan uit van overschrijding van het berekende niveau in niet meer dan 10-20% van de woningen. Bij de onderstaande berekeningen zijn ook de voorgestelde geluidsisolatiegegevens meegenomen (in het resultaat is de geschatte fout van 5 dB weer gecorrigeerd).

Deze berekeningen vormen een geloofwaardige schatting van het te overschrijden laagfrequente geluid in de 33% respectievelijk 10-20% woningen met de slechtste geluidsisolatie. In de berekeningen is geen rekening gehouden met afwijkingen in het geluid dat door de turbines daadwerkelijk wordt geproduceerd (hoofdstuk 3.6) (waaronder ook het richtingpatroon, het zogeheten 'directional pattern'), afwijkingen in het geëmitteerde geluid door de bestaande Belgische turbines (rekening houdend met het 'directional pattern'), verschillen in bouwstijl en geluidsisolatie tussen de Nederlandse en Deense woningen, eventueel opstaande ramen en verschillende atmosferische omstandigheden.

In tabel 3 zijn de berekende niveaus voor buiten en binnen weergegeven op de vier door Arcadis gekozen locaties van omwonenden⁵.

Tabel 3. Berekende geluidsniveaus binnen en buiten op geselecteerde locaties van omwonenden. De gegevens voor binnen zijn de niveaus die worden overschreden in de 33% respectievelijk 10-20% woningen met de slechtste geluidsisolatie. Windsnelheid 8 m/s.

Locatie omwonenden	Buiten L_{pA} (dB)	Binnen L_{pALF} (dB)	
		Deense regelgeving	Hoffmeyer en Jakobsen†
7: nieuwbouw Malberg	45,1	25,3	28,1
7B: Toustruwe, Malberg	44,0	24,4	27,2
17: Kantoorweg	45,2	25,2	27,9
18: Europark, België	46,2	26,1	28,9

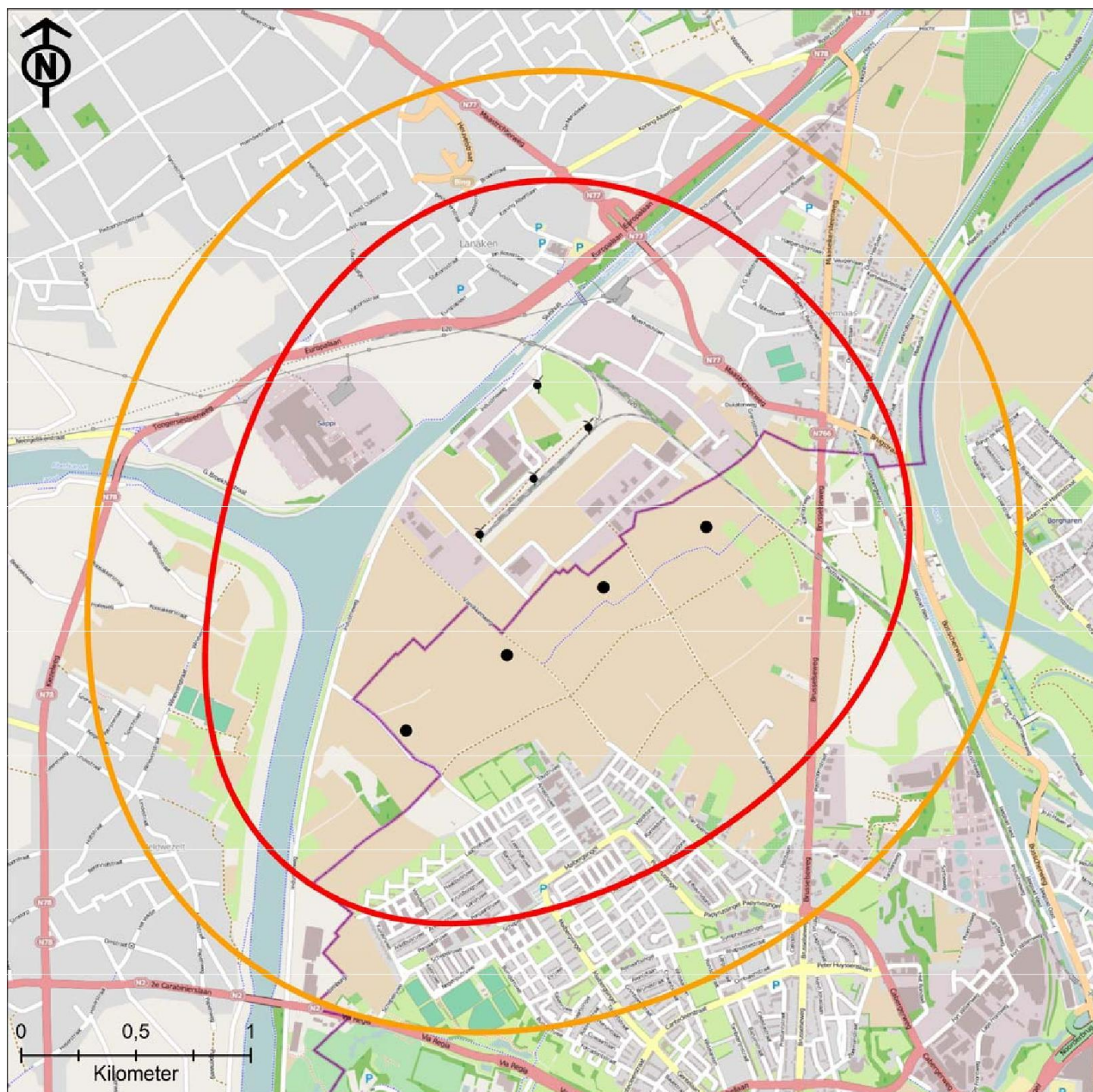
† in de niveaus is de fout van naar schatting 5 dB vanwege de onjuiste geluidsisolatiemeting gecorrigeerd (hoofdstuk 3.3.3 en bijlage B)

Afhankelijk van de locatie liggen de te verwachten niveaus buiten tussen 44,0 en 46,2 dB. Voor het laagfrequente geluid binnenshuis ligt de verwachting tussen 24,4 en 26,1 dB of hoger in 33% van de woningen (kolom Deense regelgeving) en tussen 27,2 en 28,9 dB of hoger in 10-20% van de woningen (kolom Hoffmeyer en Jakobsen).

Om aan te geven op welke afstand de grens van 20 dB binnenshuis wordt overschreden, zijn de contouren van het bereik van 20 dB voor het laagfrequente geluid binnenshuis berekend. De contouren zijn in kaart gebracht op een normale plattegrond (figuur 3) en een orthofoto (figuur 4) (Microsoft Bing Aerial).

De contouren kunnen ook online worden bekeken, waar kan worden geschakeld tussen de kaart- en de orthoweergave, en kan worden ingezoomd en met cursor kan worden genavigeerd. Er is ook een 'street view' beschikbaar waar bijvoorbeeld de Belgische turbines vanuit verschillende perspectieven kunnen worden bekeken. Internetadres: <http://tinyurl.com/d7ht7xh>.

De grens van 20 dB wordt overschreden in een zeer groot gebied met een groot aantal woningen en niet alleen de direct omwonenden. Het is van belang te benadrukken dat de luidheid sterker toeneemt boven de gehoordrempel dan bij hogere frequenties, zoals vermeld in hoofdstuk 3.2, en dat *“De waargenomen hinder van laagfrequent geluid sterk toeneemt wanneer het geluid de 20 dB overschrijdt”* (citaat van Deense EPA³⁹ zoals vermeld in hoofdstuk 3.3.3).



Figuur 3. Contouren van het bereik waar de grens van 20 dB laagfrequent geluid binnenshuis wordt overschreden in de 33% of 10-20% woningen met de slechtste geluidsisolatie (respectievelijk de rode en oranje lijn). Windsnelheid 8 m/s. Zie de tekst voor details over de berekening.



Figuur 4. Contouren van het bereik waar de grens van 20 dB laagfrequent geluid binnenshuis wordt overschreden in de 33% of 10-20% woningen met de slechtste geluidsisolatie (respectievelijk de rode en oranje lijn). Windsnelheid 8 m/s. Zie de tekst voor details over de berekening.

4 Algemene opmerkingen over het project

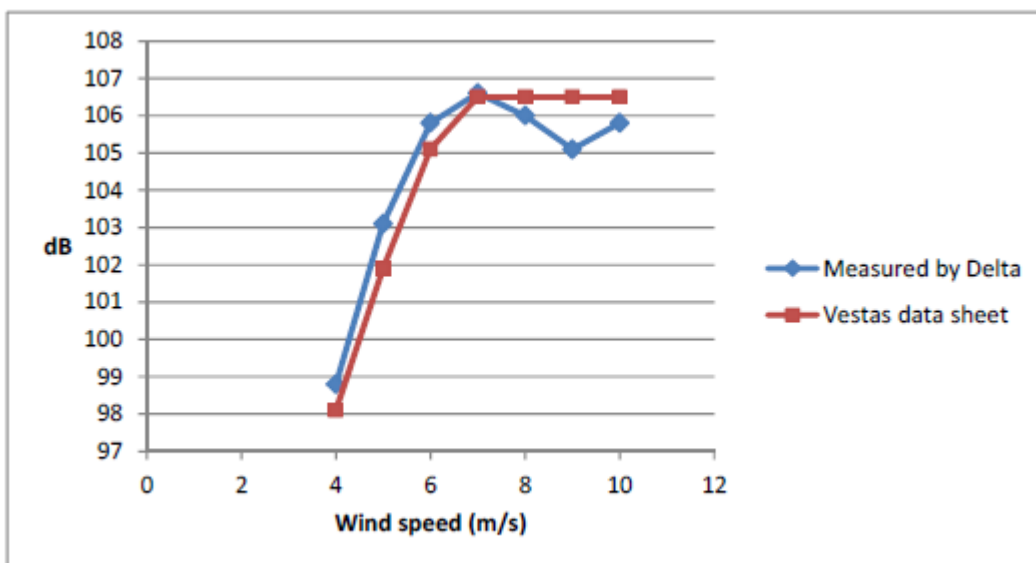
Alle gestelde vragen (bijlage A) en de voorgaande hoofdstukken waren gewijd aan laagfrequent geluid. We willen echter graag ook enkele algemene opmerkingen maken.

4.1 Totale geluid buiten

De in Nederland geldende geluidsgrenzen voor windturbines^{45,46} zijn gebaseerd op de dag-avond-nacht-methode, L_{den} , het jaargemiddelde equivalente geluidsniveau, waarbij geluid in de avond wordt verhoogd met 5 dB en geluid in de nacht met 10 dB. Deze methode is ontwikkeld om het verkeersgeluid met een typisch 24-uurspatroon, in één cijfer te vatten. Een dergelijk equivalent patroon bestaat echter niet voor windturbines, aangezien windturbines dag en nacht draaien, en we achten L_{den} dan ook ongeschikt om het windturbinegeluid weer te geven. Pedersen⁴⁷ maakt eveneens bezwaar tegen het gebruik van L_{den} voor windturbinegeluid.

Aangezien de meeste klachten betrekking hebben op het windturbinegeluid in de avond en nacht, staan we positief tegenover de aanvullende Nederlandse grens voor het niveau in de nacht L_{night} . Deze grens refereert echter ook aan een jaargemiddelde, waarbij in sommige nachten meer geluid mag worden geproduceerd indien in andere nachten het geluidsniveau weer lager ligt. Zo werkt het menselijk lichaam echter niet. Als je 's nachts door geluid wordt gewekt, heb je er niets aan wanneer later (morgen, na enkele dagen, wellicht pas na een week) nachten zullen volgen met weinig of geen geluidsoverlast. Naar onze overtuiging moeten grenzen gelden voor het werkelijke geluid dat in regelmatig voorkomende situaties optreedt.

In Denemarken en Zweden zijn geluidsgrenzen van toepassing op een berekende windsnelheid van 8 m/s (10 m hoogte). (In Denemarken gelden lagere grenzen voor een snelheid van 6 m/s). Een windsnelheid van 8 m/s komt in het desbetreffende gebied rond Maastricht minder vaak voor dan in Denemarken, wat pleit voor het hanteren van de geluidsgrenzen die gelden voor een lagere windsnelheid, zoals 6 m/s. Voor de voorgestelde turbines (grote rotor, hoge toren) is het verschil echter marginaal. Het is zelfs zo dat het gemeten geluid bij 7 m/s hoger was dan bij 8 m/s⁸. Figuur 5 toont het geproduceerde geluid als een functie van windsnelheid zoals gemeten door Delta⁸ en zoals vermeld in het gegevensblad⁹. Bij lagere windsnelheden kwam de gemeten waarde tot 1,2 dB hoger uit dan het gegevensblad, bij hoge windsnelheden was de gemeten waarde 1,4 dB lager.



Windspeed (m/s): Windsnelheid (m/s)

Measured by Delta: Gemeten door Delta

Vestas data sheet: Gegevensblad Vestas

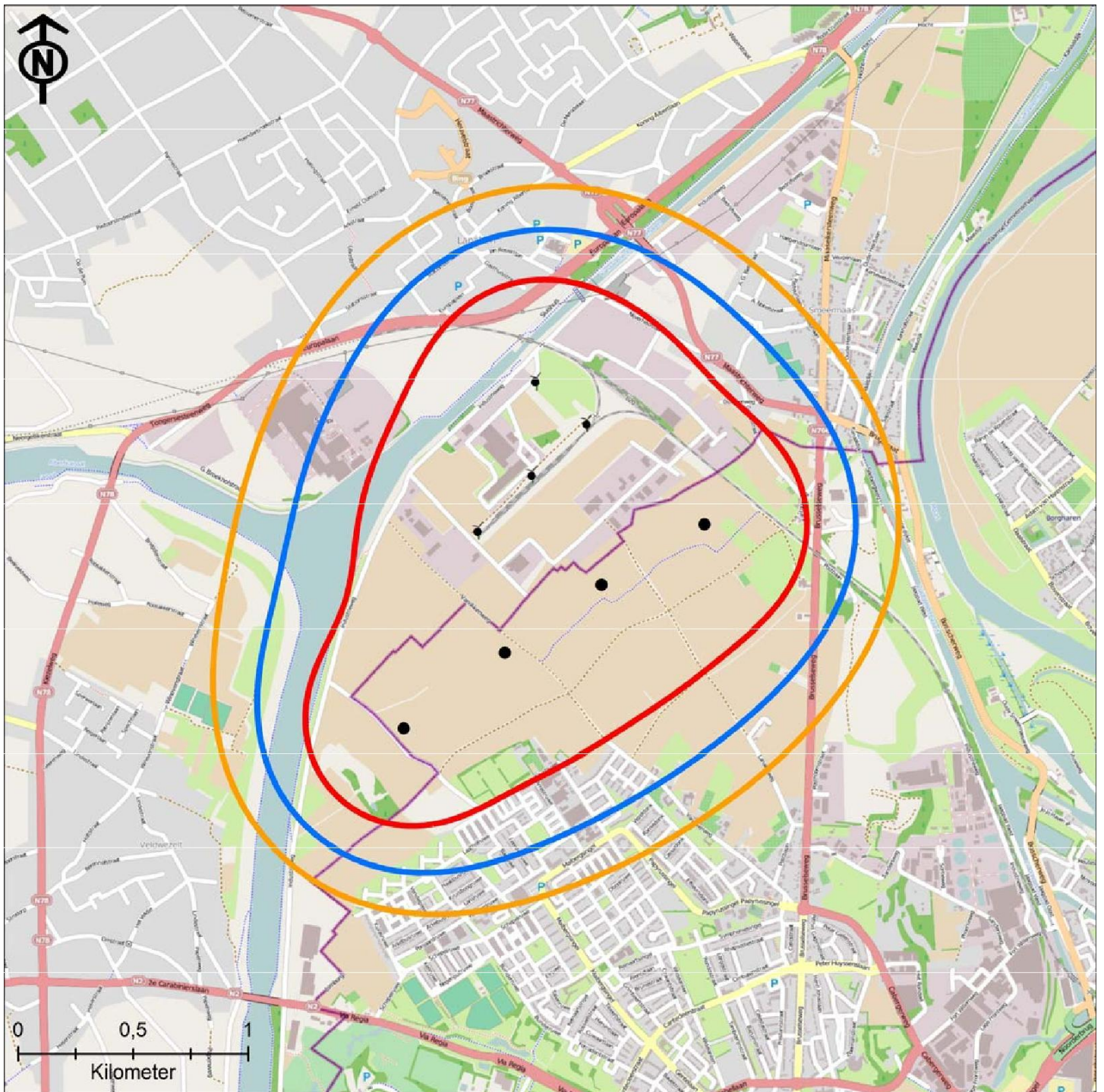
Figuur 5. Bronvermogen L_{WA} als een functie van windsnelheid zoals gemeten door Delta⁸ en zoals vermeld in het gegevensblad van Vestas⁹.

Verder zijn de drie meest erkende dosis-responscurves, waaronder de Nederlandse curven, bepaald bij een windsnelheid van 8 m/s op 10 m hoogte als de onafhankelijke variabele (Pedersen en Waye⁴⁸; Pedersen en Waye⁴⁹; van den Berg et al.¹⁸ en Pedersen et al.⁵⁰). We hebben er daarom voor gekozen het geluid te berekenen bij een windsnelheid van 8 m/s.

Zoals vermeld in hoofdstuk 3.3.4, bedragen de grenzen in Denemarken bij 8 m/s 39 dB in woongebieden en 44 dB op open terrein. In Zweden zijn de algemene grenzen 40 dB in woongebieden, maar 35 dB in gebieden met weinig achtergrondgeluid⁵¹. Het projectgebied heeft naar verluidt al een industrieel karakter, wat pleit voor het gebruik van de licht hogere Nederlandse nachtgrens van 41 dB met berekende niveaus voor 8 m/s. Uit de dosis-responscurves blijkt dat 23-24% enige/behoorlijke of grote hinder ondervindt bij een berekend niveau van 41 dB bij 8 m/s (geïnterpoleerd van Pedersen et al.⁵⁰, figuur 2).

De contouren van het bereik van 39, 41 en 44 dB bij een windsnelheid van 8 m/s zijn berekend middels de geluidvoortplantingsberekening volgens de Deense regelgeving. De resultaten zijn in kaart gebracht op een normale plattegrond (figuur 6) en op een orthofoto (figuur 7) (Microsoft Bing Aerial). (Bronspectra zoals vermeld in hoofdstuk 3.5 en bijlage C).

Deze contouren zijn ook online beschikbaar. Internetadres: <http://tinyurl.com/cwv76ke>.



Figuur 6. Contouren voor A-gewogen geluidsniveaus buiten van 39 dB (oranje lijn), 41 dB (blauwe lijn) en 44 dB (rode lijn) op basis van de geluidvoortplantingsberekening volgens de Deense regelgeving. Windsnelheid 8 m/s.



Figuur 7. Contouren voor A-gewogen geluidsniveaus buiten van 39 dB (oranje lijn), 41 dB (blauwe lijn) en 44 dB (rode lijn) op basis van de geluidvoortplantingsberekening volgens de Deense regelgeving. Windsnelheid 8 m/s.

Geluidsspectra op de vier door Arcadis gekozen locaties⁵ zijn weergegeven in figuur 8.

Een grote variatie van windsnelheid ter hoogte van de rotor verhoogt de modulatie van het turbinegeluid, waardoor het normale “zoevende” geluid verandert in een hinderlijk “dreunend” impulsief geluid zoals geregistreerd door bijv. van den Berg^{56,57} en Palmer⁵⁸. Het effect is prominenter bij turbines met grote rotoren, waarbij de windsnelheid tussen de boven- en onderzijde van de rotor aanzienlijk kan verschillen. Dit effect wordt in geluidsmetingen vaak niet meegenomen, aangezien deze veelal overdag plaatsvinden, wanneer het logaritmisch profiel meer algemeen is.

Een ander punt wat betreft atmosferische omstandigheden is dat vaak wordt beweerd dat er sprake is van een worstcasesituatie wanneer wordt uitgegaan van geluidsvoortplanting bij meewind om het geluid bij omwonenden te berekenen. Daarvan is echter nauwelijks sprake. Het klopt weliswaar dat geluid vaak meer wordt gedempt bij tegenwind, wat de meeste mensen dagelijks ervaren. Dat effect ontstaat doordat de geluidsgolven afbuigen in de atmosfeer (refractie), wat resulteert in zogeheten schaduwzones. Voor geluidsbronnen op de hoogte van grote windturbines liggen schaduwzones normaliter echter verder weg dan bij gemiddelde geluidscontouren, waaronder ook die in dit rapport.

Wij hebben ook gemerkt dat klagende omwonenden meewindomstandigheden niet expliciet noemen als de slechtste situatie. Er wordt soms meer hinder ervaren bij andere windrichtingen, wat kan worden verklaard door het richtingpatroon ('directional pattern') van de turbine in combinatie met de oriëntatie ten opzichte van de omwonenden.

Het is verder van belang te melden dat er in Denemarken een absolute minimumafstand tot woningen geldt – ongeacht het geluid – van vier keer de totale hoogte van de turbine om te voorkomen dat de turbines voor omwonenden te omvangrijk en opvallend zijn. Aangezien de totale hoogte van de voorgestelde turbines 175 meter bedraagt, zou de absolute minimumafstand in Denemarken op 700 meter uitkomen.

5 Afsluitende opmerkingen

De wijze waarop Arcadis onze gegevens heeft geïnterpreteerd en gebruikt is op enkele kleine kwestie na correct. Ook hun interpretatie en toepassing van de nieuwe Deense regelgeving inzake laagfrequent geluid is correct.

Bij de berekening volgens de nieuwe Deense regelgeving wordt het laagfrequent geluid binnenshuis echter onderschat. In gevallen waar de grens van 20 dB maar net wordt gehaald, zullen metingen in de praktijk resulteren in waarden die de grenzen in veel woningen met meerdere decibels overschrijden.

Een reële berekening van het voorgestelde project wijst uit dat het laagfrequent geluid in veel woningen in een groot geografisch gebied boven 20 dB zal uitkomen.

Dit is belangrijk omdat de hinder die wordt ondervonden van laagfrequent geluid sterk toeneemt wanneer het geluid de 20 dB overschrijdt.

Langdurige blootstelling aan hoorbaar laagfrequent geluid kan vermoeidheid, hoofdpijn, concentratieverlies, verstoorde nachtrust en fysiologische stress veroorzaken.

Bij de berekeningen wordt van de meest waarschijnlijke geluidsniveaus uitgegaan, die geen worstcasescenario vormen. Er is geen marge voor onzekerheden en/of een toename van het geluid als gevolg van veroudering van de turbines.

Naar onze inschatting zijn geluidsgrenzen (zoals die in Nederland) op basis van een jaargemiddelde niet geschikt voor windturbinegeluid. In normale praktijksituaties worden de Nederlandse en Deense grenzen voor het totale geluid buiten op veel plaatsen overschreden.

In Denemarken geldt voor turbines een minimale afstand – ongeacht het geluid – van vier keer de turbinehoogte, in dit geval dus 700 meter voor de voorgestelde turbines.

Referenties:

- ¹ A. Boukich, H.D. Koppen, *Akoestisch onderzoek Windpark Lanakerveld te Maastricht*, Arcadis Nederland BV, reference 075734629:A, 30. September 2011.
- ² H.D. Koppen, *Aanvullend akoestisch onderzoek Windpark Lanakerveld to Maastricht*, Arcadis Nederland BV, reference 075723545:B, 30. September 2011.
- ³ H.D. Koppen, *Geluids- en slagschaduwonderzoek optimalisatie alternatief Windpark Lanakerveld te Maastricht*, Arcadis Nederland BV, reference 075828351:B, 7. November 2011.
- ⁴ H.D. Koppen, *Windpark Lanakerveld, kans op laagfrequent geluid vanwege optimalisatie alternatief*, Arcadis Nederland BV, reference 075898401:0.3, 27. November 2011.
- ⁵ H.D. Koppen, *Laagfrequent geluid vanwege het Windpark Lanakerveld (Low-frequency noise from Windpark Lanakerveld)*, Arcadis Nederland BV, reference 076249008:A, 13. February 2012.
- ⁶ H. Møller, C.S. Pedersen, *Low-frequency noise from large wind turbines*, Journal of the Acoustical Society of America, **129** (6), 3727-3744 (2011).
- ⁷ *Bekendtgørelse om støj fra vindmøller (Statutory order on noise from wind turbines)*, nr. 1284, Miljøministeriet (Ministry of the Environment), 15. december 2011.
- ⁸ S. Nielsen, K.D. Madsen, *Measurement of noise emission from a Vestas V112-3.0 MW mode 0 wind turbine*, Delta report AV 161/11, performed for Vestas, revised version 20. September 2011.
- ⁹ *General specification; V112-3.0 MW*, Vestas Wind Systems, Document 0011-9181 V05, 18. August 2011.
- ¹⁰ *General specification; V80-2.0 MW*, Vestas Wind Systems, Document 944406 V19, 22. July 2010.
- ¹¹ H. Møller, C.S. Pedersen, *Human hearing at low frequencies*, Noise & Health, **6** (23), 37-57, 2004.
- ¹² B. Sønndergaard, K.D. Madsen, *Low frequency noise from large wind turbines – Results from previous sound power measurements*, Report AV 137/08, Delta, 30. April 2008.
- ¹³ B. Sønndergaard, K.D. Madsen, *Low frequency noise from large wind turbines – Results from sound power measurements*, Report AV 136/08, Delta, revised version 19. December 2008.
- ¹⁴ B. Sønndergaard, K.D. Madsen, *Low frequency noise from large wind turbines – Summary and conclusions on measurements and methods*, Report AV 140/08, Delta, revised version 19. December 2008.
- ¹⁵ D. Hoffmeyer, B. Sønndergaard, *Low frequency noise from large wind turbines – Measurements of sound insulation of facades*, Report AV 1097/08, Delta, 30. April 2008.
- ¹⁶ K.D. Madsen and T.H. Pedersen, *Low frequency noise from large wind turbines – Final report*, Report AV 1272/10, Delta, 21. November 2010.
- ¹⁷ H. Møller, C.S. Pedersen, S. Pedersen, *Lavfrekvent støj fra store vindmøller – opdateret 2011 (Low-frequency noise from large wind turbines – updated 2011)*, Aalborg University, ISBN 978-87-92328-63-2, 26. May 2011.
- ¹⁸ F. van den Berg, E. Pedersen, J. Bouma, R. Bakker, *WINDFARMperception—Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents*, Final Report, University of Groningen, University of Gothenburg, June 2008.
- ¹⁹ L.D. Whittle, S.J. Collins, D.W. Robinson, *The audibility of low frequency sounds*, Journal of Sound and Vibration, **21** (4), 431-448 (1972).
- ²⁰ H. Møller, J. Andresen, *Loudness of pure tones at low and infrasonic frequencies*, Journal of Low Frequency Noise and Vibration, **3** (2), 78-87 (1984).
- ²¹ M.A. Bellmann, V. Mellert, C. Reckhardt, H. Remmers, *Perception of sound and vibration at low frequencies*, collected papers from the Joint Meeting “Berlin 99” of ASA, EAA and DAGA, Berlin, Germany, 1999, ISBN 3-9804568-5-4. Abstract in Journal of the Acoustical Society of America, **105**, 1297.
- ²² ISO 226 *Acoustics – Normal equal-loudness-level contours*, International Organization for Standardization, Geneva, 2003.
- ²³ J. Andresen, H. Møller, *Equal annoyance contours for infrasonic frequencies*, Journal of Low Frequency Noise and Vibration, **3** (3), 1-9 (1984).
- ²⁴ H. Møller, *Annoyance of audible infrasound*, Journal of Low Frequency Noise and Vibration, **6** (1), 1-17 (1987).
- ²⁵ Y. Inukai, N. Nakamura, H. Taya, *Unpleasantness and acceptable limits of low frequency sound*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **19** (3), pp.135-140 (2000).
- ²⁶ J.K. Subedi, H. Yamaguchi, Y. Matsumoto, M. Ishiharati, *Annoyance of low frequency tones and objective evaluation methods*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **24** (2), 81-96 (2005).

- ²⁷ B. Berglund, P. Hassmén, S.R.F. Job, *Sources and effects of low-frequency noise*, Journal of the Acoustical Society of America, **99**, 2985-3002 (1996).
- ²⁸ J. Bengtsson, K.P. Waye, A. Kjellberg, *Evaluations of effects due to low-frequency noise in a low demanding work situation*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 278, 83-99 (2004).
- ²⁹ K.P. Waye, J. Bengtsson, A. Kjellberg, S. Benton, *Low frequency noise "pollution" interferes with performance*, Noise & Health, **4** (13), 33-49 (2001).
- ³⁰ K.P. Waye, A. Clow, S. Edwards, F. Hucklebridge, R. Rylander, *Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality*, Life Sciences, **72**, 863-875 (2003).
- ³¹ B. Berglund, T. Lindvall (Editors), *Community noise*, Archives of the Center for Sensory Research, **2** (1), Stockholm University and Karolinska Institute, 1995, prepared for the World Health Organization.
- ³² K. Bolin, G. Bluhm, G. Eriksson, M.E. Nilsson, *Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects*, Environmental Research Letters, **6**, 1-6 (2011).
- ³³ *Lavfrekvent støj fra vindmøller (Low frequency noise from wind turbines)*, Memorandum, Danish Environmental Protection Agency, 31. May 2006.
- ³⁴ H. Møller, S. Pedersen, J.K. Staunstrup, *Støj fra testcenter for vindmøller ved Østerild (Noise from test centre for wind turbines at Østerild)*, Aalborg University, ISBN 978-87-92328-38-0 (October 2011).
- ³⁵ IEC 61400-11, *Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques*, Second edition 2002 plus Amendment 1 2006, International Technical Commission, Geneva.
- ³⁶ D. Hoffmeyer, J. Jakobsen, *Sound insulation of dwellings at low frequencies*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **29**(1), 15-23 (2010).
- ³⁷ H. Møller, S. Pedersen, K.P. Waye, C.S. Pedersen, *Comments to the article "Sound insulation of dwellings at low frequencies"*, Letter to the Editor, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **30** (3), 229-231 (2011).
- ³⁸ J. Jakobsen, *Reply to "Letter to the Editor" by Professor Henrik Møller et al.*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **30** (3), 233-234 (2011).
- ³⁹ *Revision af vindmøllebekendtgørelsen for fastsættelse af grænser for lavfrekvent støj (Revision of the statutory order with the aim of setting limits for low-frequency noise)*, reference 001-05863 JJ/ALG, 23. September 2011.
- ⁴⁰ IEC TS 61400-14, *Wind turbines—Part 14: Declaration of Apparent Sound Power Level and Tonality Values*, International Technical Commission, Geneva, 2005).
- ⁴¹ S.M. Nielsen, L.S. Søndergaard, *Dokumentation af støj fra vindmøller ved Bindsbøl (Documentation of noise from wind park at Bindsbøl)*, Delta, Report AV 173/11, carried out for JKP Local Energy, 11. oktober 2011.
- ⁴² *Miljørapport, Vindmøller Bindsbøl (Environmental report, Wind turbines Bindsbøl)*, Ringkøbing Skjern Kommune, revised version May 2010.
- ⁴³ H. Møller, S. Pedersen, unpublished calculations, March 2012.
- ⁴⁴ *General specification: V90-3 MW*, Vestas Wind systems, Document 0000-5450 V04, 30. June 2009.
- ⁴⁵ *In werking hebben van een windturbine*, Clause 3.2.3, Article 3.14a, Besluit algemene regels voor inrichtingen milieubeheer, Besluit van de Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer van 19 oktober 2007, houdende algemene regels voor inrichtingen as valid on 23. March 2012.
- ⁴⁶ *Reken- en meetvoorschrift windturbines*, Bijlage 4. bij de Regeling algemene regels voor inrichtingen milieubeheer, Regeling van de Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer van 9 november 2007, nr. DJZ2007104180, houdende algemene regels voor inrichtingen as valid on 23. March 2012.
- ⁴⁷ E. Pedersen, *Human response to wind turbine noise – Perception, annoyance and moderating factors*, Doctoral thesis, Occupational and Environmental Medicine, Gothenburg University, 2007.
- ⁴⁸ E. Pedersen, K.P. Waye, *Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose-response relationship*, Journal of the Acoustical Society of America, **116**, 3460–3470 (2004).
- ⁴⁹ E. Pedersen, K.P. Waye, *Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments*, Occupational and Environmental Medicine, **64**, 480–486 (2007).
- ⁵⁰ E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, J. Bouma, *Response to noise from modern wind farms in The Netherlands*, Journal of the Acoustical Society of America, **126**, 634–643 (2009).
- ⁵¹ *Riktvärden för ljud från vindkraft (Guideline values for noise from wind turbines)*, Naturvårdsverket, Swedish Environmental Protection Agency, 23. June 2011, <http://www.naturvardsverket.se/sv/Start/Verksamheter-med-miljopaverkan/Buller/Vindkraft/Riktvarde-for-ljud-fran-vindkraft/>
- ⁵² G.P. van den Berg, *Wind gradient statistics up to 200 m altitude over flat ground*, Proceedings of First International Meeting on Wind Turbine Noise, Berlin, Germany (2005).
- ⁵³ P. Botha, *The use of 10 m wind speed measurements in the assessment of wind farm developments*, in Proceedings of First International Meeting on Wind Turbine Noise, Berlin, Germany (2005).
- ⁵⁴ W.K.G. Palmer, *Uncloaking the nature of wind turbines—Using the science of meteorology*, Proceedings of

Second International Meeting on Wind Turbine Noise, Lyon, France (2007).

⁵⁵ D. Bowdler, *Wind shear and its effect on noise assessment*," Proceedings of Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, Denmark (2009).

⁵⁶ G.P. van den Berg, *Effects of the wind profile at night on wind turbine sound*, Journal of Sound and Vibration, **277**, 955–970 (2004).

⁵⁷ G.P. van den Berg, *The beat is getting stronger: The effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **24** (1), 1–24 (2005).

⁵⁸ W.K.G. Palmer, *A new explanation for wind turbine whoosh—wind shear*, Proceedings of Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, Denmark (2009).

Bijlage A. Vragen van de gemeente Maastricht

1. Naar de effecten van laagfrequent geluid is veel onderzoek gedaan. Waarin verschilt de studie(aanpak) van Møller en Pedersen van die van andere onderzoekers?
2. Wat zijn de voornaamste effecten van laagfrequent geluid op mensen en wanneer treden deze effecten specifiek op?
3. Naar aanleiding van de resultaten van uw onderzoek heeft de Deense regering de regelgeving voor het plaatsen van windturbines veranderd. Klopt dat? En zo ja, wat is er dan veranderd?
4. Zijn de berekeningen en de beoordeling van laagfrequent geluid in het rapport van Arcadis op de juiste manier uitgevoerd volgens de Deense methode en normen? Zo niet, waarin zitten de verschillen? Zal herberekening aanmerkelijk andere uitkomsten opleveren?
5. Is naar uw mening het geluidsspectrum zoals vermeld in het akoestisch onderzoek van Arcadis in de tabellen 1 en 2 een reëel worstcasescenario voor berekening van laagfrequent geluid van de 3 MW-windturbines? Zo niet, waarom niet en kunt u de juiste waarden aangeven? Zal dit leiden tot substantieel afwijkende resultaten?
6. Is het mogelijk een indicatie te geven van het te verwachten laagfrequente geluid van de geplande vier windturbines van het type Vestas V112 3MW, ashoogte 119 m?

Zo ja, gelieve het volgende in uw antwoord te verwerken:

- a. Toepasselijke Nederlandse en Belgische wet- en regelgeving en recente jurisprudentie;
- b. De geluidsnormen (L_{den} en L_{night}) in België en Nederland, hoe deze normen tot stand zijn gekomen (juridische geschiedenis) en hoe het begrip 'bijzondere omstandigheden' waarnaar in het Activiteitenbesluit wordt verwezen, in de praktijk wordt toegepast;
- c. Laagfrequent en hoogfrequent geluid en de toepasselijke normen;
- d. Het geluidsspectrum van de windturbine, tonaal en pulserend geluid;
- e. Aspecten met betrekking tot cumulatie met bestaande bedrijven en windturbines in België;
- f. De (voorlopige) resultaten van de geluidsmeting van de huidige situatie in Lanakerveld¹;
- g. De betrouwbaarheid van de metingen vergeleken met berekeningen op basis van computermodellen;
- h. Het verband tussen de windsnelheid en de geluidsproductie van de vier turbines;
- i. Het akoestisch onderzoek betreffende laagfrequent geluid en de Deense norm;
- j. De staat van onderhoud van de windturbines en de geluidsproductie.
- k. De meerjarige windstatistieken van het KNMI, de masthoogte van de windturbine en de geluidsproductie (bronniveau);
- l. De windsnelheid 's avonds/'s nachts op grote hoogte en de geluidsproductie (bronniveau);
- m. De autonome ontwikkeling van Albertknoop en Lanakerveld en het effect daarvan op de totale geluidsproductie;
- n. De bepaling van het maximale bronniveau door de leverancier en de door hem gegeven garanties voor het maximale bronniveau;
- o. Het verband tussen de masthoogte van de windturbines en laagfrequent geluid;

¹ Deze metingen waren niet beschikbaar bij het opstellen van dit rapport

Bijlage B. Schatting van de fout door het gebruik van isolatiegegevens van Hoffmeyer en Jakobsen

Volgens Pedersen et al.⁵⁹ kunnen met een 3D-hoekmeting niveaus worden vastgesteld die rond de maximale niveaus voor laagfrequent geluid liggen waaraan mensen in ruimtes worden blootgesteld. Dit wordt ondersteund door gegevens van Brunskog en Jakobsen⁶⁰ die het geluidveld simuleerden in 100 ruimte/frequentiecombinaties; zij constateerden dat de 3D-hoekmethode een vrij adequate berekening vormt van de maximumniveaus waaraan bewoners in open ruimtes in de kamer worden blootgesteld (zie tabellen 3 en 4 in hun rapport, gemiddelde fout lager dan 1 dB).

In parallelmetingen in negen kamers werden afhankelijk van de frequentie gemiddelde verschillen tussen 0,3 - 9,6 dB waargenomen tussen de 3D-hoekmethode en de door Hoffmeyer en Jakobsen toegepaste methode³⁶ (metingen respectievelijk van Hoffmeyer en Søndergaard¹⁵ en Hoffmeyer⁶¹).

Daarom wordt voorgesteld om voor het totale laagfrequente geluid uit te gaan van een foutwaarde die in het midden van dit bereik ligt, te weten 5 dB. Dit is een conservatieve schatting aangezien de voornaamste bijdragen afkomstig zijn van frequenties van 50 Hz of meer, en op deze frequenties de verschillen ca. 5 dB of hoger zijn.

Een vergelijkbaar verschil wordt ondersteund door metingen in drie kamers van Pedersen et al. (zie figuur 20 in hun rapport).

Tot slot constateerden Moorhouse en Ramadorai⁶² dat het gemiddelde vermogen van metingen op een klein aantal willekeurige posities volgens de ISO 140-reeks⁶³ minimaal 2-3 dB lager ligt dan het werkelijke gemiddelde vermogen in de kamer bij frequenties onder de 125-160 Hz. ISO 140 hanteert vijf posities, Hoffmeyer en Jakobsen slechts drie. Pedersen et al. constateerden dat de gebieden met hoge niveaus 3-4 dB hoger liggen dan het werkelijke gemiddelde vermogen in de kamer. Ook dit levert een conservatieve schatting op van 5 dB voor de fout door gebruik van de gegevens van Hoffmeyer en Jakobsen.

Referenties:

⁵⁹ S. Pedersen, H. Møller, K.P. Waye, *Indoor measurements of noise at low frequencies - Problems and solutions*, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **26** (4), 249-270, 2007.

⁶⁰ J. Brunskog and F. Jacobsen, *Measurements of low-frequency noise in rooms*, Memorandum (Danish Environmental Protection Agency, 2008).

⁶¹ D. Hoffmeyer, *Supplerende databehandling af resultater af lydisolationsmålinger gennemført i projektet "Lavfrekvent støj fra store vindmøller"* (Supplementary data processing of sound insulation measurements carried out in the project "Low-frequency noise from large wind turbines"), Report RL 20/08, Delta, 29. September 2008.

⁶² A. Moorhouse, R. Ramadorai, *Measurement of the average sound pressure level in a room at low frequencies*, The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, Vienna, 2006.

⁶³ ISO 140, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements*, International Organization for Standardization, Geneva, 1998.

Bijlage C. Geluidsspectra gebruikt in berekeningen

De producent heeft geen frequentieverdelingen voor het geproduceerde geluid beschikbaar gesteld. Daarom zijn de relatieve spectrumwaarden op basis van metingen van de V112-3.0 MW⁸-turbine toegepast op de gegevensbladwaarden voor het totale geluid van de V80-2.0 MW¹⁰- en V112-3.0 MW⁹-turbines. Dit is dezelfde procedure die door Arcadis is toegepast⁵. Zie ook hoofdstuk 3.5.

Tabel 4. Bronspectra gebruikt voor de V80-2.0 MW- en V112-3.0 MW-turbines en de achtergrondgegevens. Alle gegevens zijn A-gewogen bronvermogens in decibels.

	Gemeten voor V112 bij 8 m/s		Gegevensblad 8 m/s	
			V80	V112
Totaal L_{WA}	106,0		105,2	106,5
Frequentie		Relatief	Gebruikt in berekeningen	
10	45,2	-60,8	44,4	45,7
12,5	49,9	-56,1	49,1	50,4
16	56,3	-49,7	55,5	56,8
20	65,9	-40,1	65,1	66,4
25	70,4	-35,6	69,6	70,9
31,5	70,3	-35,7	69,5	70,8
40	74,9	-31,1	74,1	75,4
50	77,9	-28,1	77,1	78,4
63	87,0	-19,0	86,2	87,5
80	86,2	-19,8	85,4	86,7
100	92,1	-13,9	91,3	92,6
125	89,3	-16,7	88,5	89,8
160	90,0	-16,0	89,2	90,5
200	91,4	-14,6	90,6	91,9
250	90,4	-15,6	89,6	90,9
315	91,9	-14,1	91,1	92,4
400	92,0	-14,0	91,2	92,5
500	92,6	-13,4	91,8	93,1
630	95,6	-10,4	94,8	96,1
800	95,5	-10,5	94,7	96,0
1000	96,9	-9,1	96,1	97,4
1250	96,9	-9,1	96,1	97,4
1600	95,0	-11,0	94,2	95,5
2000	95,2	-10,8	94,4	95,7
2500	92,8	-13,2	92,0	93,3
3150	91,6	-14,4	90,8	92,1
4000	89,9	-16,1	89,1	90,4
5000	84,1	-21,9	83,3	84,6
6300	80,8	-25,2	80,0	81,3
8000	78,8	-27,2	78,0	79,3
10000	77,8	-28,2	77,0	78,3