



Literatuuronderzoek
laagfrequent geluid windturbines

Datum September 2013
Status Definitief

LBP|SIGHT BV
in opdracht van Agentschap NL

Colofon

Projectnaam	Literatuuronderzoek laagfrequent geluid windturbines
Projectnummer	DENB 138006
Versienummer	1.0
Publicatienummer	
Locatie	Utrecht
Projectleider	Johannes van Steenis, Agentschap NL
Contactpersoon	Johannes van Steenis, Agentschap NL

Aantal bijlagen	3
Auteurs	ing. Hans Geleijns, ir. Mike Dijkstra

Dit rapport is tot stand gekomen door:	LBP SIGHT BV
--	--------------

Hoewel dit rapport met de grootst mogelijke zorg is samengesteld kan Agentschap NL geen enkele aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele fouten.

Notitie

In opdracht van Agentschap NL te Utrecht, contactpersonen de heer van Steenis en mevrouw Vlot, heeft LBP|SIGHT een uitgebreid literatuuronderzoek verricht naar het laagfrequent geluid van windturbines. Doel van het onderzoek is te bepalen of er aanwijzingen zijn dat laagfrequent geluid van windturbines negatieve effecten heeft op de gezondheid van omwonenden.

1. Inleiding en samenvatting

In 2011 is de Nederlandse geluidnorm voor windturbines aangepast [ref 1: Staatsblad 210 749]. Deze aanpassing was onder andere gebaseerd op een studie van TNO uit 2008 naar de dosis-effectrelatie van windturbinegeluid [ref 2: TNO 2008]. Deze studie is gebaseerd op onderzoeken die zijn uitgevoerd in Zweden in 2000 en 2005 [ref 3: Pedersen 2007] en in Nederland in 2007 [ref 4: Windfarm 2008]. Bij het onderzoek in 2007 in Nederland hadden de grootste turbines een maximaal elektrisch vermogen van 2,5 MW. De meeste turbines waren van de klasse tussen 0,5 en 1 MW. Inmiddels zijn de grootste turbines in Nederland van de klasse 6 à 7 MW, alhoewel het aantal hiervan heel klein is. Het aantal turbines in de klasse 2 à 3 MW is sindsdien wel groter geworden. In tabel 1 zijn de gebruikelijke afmetingen opgenomen die horen bij de verschillende klassen.

Tabel 1

Gebruikelijke afmetingen turbines

Klasse	Ashoogte [m]	Rotordiameter [m]
0,5 à 1 MW	Ca. 40	Ca. 50
2 à 3 MW	60 à 100	70 à 100
6 à 7 MW	120 à 135	120 à 130

Door de grotere afmetingen van de windturbines kan ook de geluidemissie toenemen. Deze toename wordt wel beperkt door de lagere toerentallen van grotere turbines. Per kW zijn grotere turbines daardoor stiller dan kleinere turbines. De grotere afmetingen leiden tot een relatief grotere bijdrage van laagfrequent geluid. Dit heeft geleid tot de vraag of de geluidnorm zoals is vastgesteld op basis van onderzoeken in 2008 wel voldoende bescherming biedt tegen deze laagfrequente bijdrage. Deze notitie gaat in op bovenstaande vraag.

Daarnaast is, op verzoek van de opdrachtgever, ingegaan op het volgende:

- Vergelijking van de Nederlandse geluidnorm met de Duitse en Deense norm.
- Vergelijking met andere bronnen van laagfrequent geluid.

De huidige Nederlandse geluidnorm is bedoeld om geluidhinder en slaapverstoring te beperken. Geconcludeerd wordt dat in de onderzochte literatuur geen aanwijzingen zijn dat windturbinegeluid tot andere gezondheidseffecten leidt. Er zijn geen aanwijzingen dat het aandeel laagfrequent geluid hier een bijzondere dan wel belangrijke rol in speelt. Vooral nog kan dan met de huidige A-gewogen geluidnormering worden volstaan in de normstelling. De *bijdrage* van laagfrequent geluid in nieuw te ontwikkelen turbines (groter dan 6 à 7 MW) zal naar verwachting wel in geringe mate toenemen. Het betreft hier echter relatief beperkte verschillen in de orde van 1 à 3 dB.

Ook betreft dit dan alleen eventueel binnenshuis ondervonden hinder, die mogelijk kan worden voorkomen door het treffen van maatregelen¹ aan woningen.

2. Laagfrequent geluid

Deze notitie geeft geen algemene achtergrondinformatie over geluid of laagfrequent geluid. Wel wordt ingegaan op de wijze van waarneming. Diverse bronnen (zoals bijvoorbeeld de NSG-richtlijn geluid, ref 6: NSG 1999) geven aan dat laagfrequent geluid niet alleen met het gehoor kan worden waargenomen, maar ook kan worden waargenomen als druk op het hoofd of als trillingen in andere lichaamsdelen. Hierdoor is (ook bij menig akoesticus) de indruk ontstaan dat bepaalde lage frequenties niet met het gehoor worden waargenomen, maar op andere wijze. Dit is een misverstand. Geluid, en dus ook laagfrequent geluid en zelfs infrageluid² [ref 7: Leventhall 2006], wordt altijd ook met het gehoor waargenomen. Het gehoor is de belangrijkste wijze van waarneming [ref 8: Møller 2004]. Bij lage niveaus van laagfrequent geluid of infrageluid zal het gehoor ook de enige wijze van waarneming zijn.

3. Vergelijking met Duitse en Deense norm voor 'gewoon' windturbinegeluid

De Nederlandse norm betreft een jaargemiddeld geluidniveau van 47 dB³ ter plaatse van de gevels van woningen als gevolg van een windturbine of windpark. De Deense norm [zie bijvoorbeeld ref 9: EPA] maakt onderscheid tussen woningen in 'open landschap' en woningen in een woongebied. Bij 6 en 8 m/s windsnelheid, die gemeten/bepaald wordt op 10 m hoogte, is de geluidnorm respectievelijk 37 en 39 dB(A) voor een woongebied en respectievelijk 42 en 44 dB(A) voor het open landschap. Deze laatste waarden van 42 en 44 dB(A) zijn ongeveer gelijk aan de vóór 2011 in Nederland geldende, aan de windsnelheid en achtergrondgeluidniveau gekoppelde WNC40 [zie bijvoorbeeld ref 10: Staatsblad 2001 487].

Naast de Deense norm voor 'gewoon' geluid kent Denemarken een wettelijke norm [ref 11: EPA] voor het laagfrequent geluid van windturbines. Nederland en Duitsland hebben een dergelijke norm niet.

De Duitse norm [TA Lärm, zie informatie ref 12] is niet specifiek voor windturbines opgesteld, maar betreft een algemene geluidnorm voor industrie- en bedrijfslawaaai. Deelstaten kunnen hier van afwijken. Een nachtelijk geluidniveau van 35 dB(A) tot 50 dB(A) is toelaatbaar, afhankelijk van de woonomgeving. Naar verwachting zal een geluidnorm van 35 of 40 dB(A) gebruikelijk zijn. Deze normering lijkt op de Nederlandse situatie vóór 1 januari 2011 zoals die van toepassing was voor vergunningplichtige windparken (die niet onder de meldingsplicht met de bijbehorende WNC40 vielen). Toen konden gemeenten zelf de geluidnorm vaststellen op basis van streefwaarden van 30 tot 40 dB(A) voor het nachtelijke geluidniveau. In de praktijk werden regelmatig hogere geluidwaarden vergund bij hogere windsnelheden.

1 Dit moeten dan wel maatregelen zijn, afgestemd op lage frequenties.

2 Infrageluid is geluid met frequenties lager dan 20 Hz.

3 De L_{den} wordt genoteerd in 'dB', maar het is wel een (jaargemiddelde) A-gewogen dB. Deze waarde mag en kan vanwege de jaarmiddeling en periodeweging getalsmatig NIET vergeleken worden met een dagperiodegemiddelde waarde of met de eerder in Nederland geldende (WNC-) geluidnormen/-waarden.

Bij de onderlinge vergelijking van geluidnormen of geluidniveaus moet men bedacht zijn op de grootte waarin de norm of het niveau is gesteld. De L_{den} -waarde van 47 dB kan niet rechtstreeks worden vergeleken met de Deense normwaarde. Eerst moet de L_{den} -waarde omgerekend worden naar dezelfde grootte. Dit is ook van belang bij de Deense norm voor laagfrequent geluid. De waarde hiervoor van 20 dB(A) geldt alleen voor het frequentiegebied van 10 tot en met 160 Hz. Dit betekent dat de getalwaarde niet zomaar vergeleken kan worden met andere geluidniveaus.

In tabel 2 is een vergelijking gemaakt van de verschillende normen waarbij de Deense grootheden als uitgangspunt zijn gebruikt. De Nederlandse norm en de Deense norm komen nagenoeg overeen.

Tabel 2

Vergelijking nachtelijke geluidnormen (zie bijlage II voor een toelichting inzake WNC40 en L_{den})

Land	Waarde bij $V_{10} = 6$ m/s	Waarde bij $V_{10} = 8$ m/s
Nederland, vóór 2011 vergunningplichtige turbines	Streefwaarde 30 à 40 dB(A), hoger op basis van bestuurlijke afweging	
Duitsland	Streef- of grenswaarde 35 à 40 dB(A), mogelijk eigen beleid deelstaten [zie ook ref 19]	
Nederland, vóór 2011 meldingplichtige turbines (WNC40)	42 dB(A)	44 dB(A)
Nederland, vanaf 2011 (L_{den} 47 / L_{night} 41)	41 à 43 dB(A)	44 à 45 dB(A)
Denemarken (open landschap ⁴)	42 dB(A)	44 dB(A)

4. Massachusetts

Het Massachusetts Department of Public Health heeft in januari 2012 het Report of Independent Expert Panel over Wind Turbine Health Impact Study laten opstellen [ref 5]. Dit betreft een uitgebreide literatuurstudie die is uitgevoerd door een groep van onafhankelijke deskundigen. In dit rapport wordt het volgende geconcludeerd:

- Het geluid van windturbines wordt soms gekenmerkt door een zovend karakter ('wooshing' of 'swishing') en soms door een stampend karakter ('thumping'⁵). Het laatste geluid wordt met name waargenomen in nachten met stabiele atmosferische omstandigheden.
- Er is geen bewijs dat infrageluid van belang is bij windturbines. Er is geen wetenschappelijk bewijs dat infrageluid de gezondheid beïnvloedt.
- Er is beperkt epidemiologisch bewijs voor een verband tussen windturbinegeluid en hinder.
- Er is beperkt epidemiologisch bewijs voor een verband tussen windturbinegeluid en slaapverstoring.
- Hinder en slaapverstoring kan indirect leiden tot gezondheidsschade. Er is echter onvoldoende bewijs dat windturbinegeluid op een andere wijze tot gezondheidsschade kan leiden.
- Er is geen bewijs voor gezondheidseffecten die gekarakteriseerd kunnen worden als het 'Wind Turbine Syndrome'.

4 In de tabel wordt alleen de Deense norm voor open landschap opgenomen en niet die voor woonwijken. In de Nederlandse praktijk worden tot op heden woonwijken niet of nauwelijks geluidbelast door de normwaarde van windparken.

5 De Engelse taal kent mogelijk betere onomatopoeën dan de Nederlandse taal. Met het uitspreken van de genoemde Engelse term wordt de klank van het geluid nagebootst.

- Er is geen bewijs voor een relatie tussen windturbinegeluid en pijn of stijfheid, diabetes, hoge bloeddruk, tinnitus, gehoorverlies, hart- en vaatziekten, hoofdpijn of migraine.

In het rapport wordt onderscheid gemaakt tussen gewoon geluid en infrageluid. Infrageluid kan gedefinieerd worden als geluid met een frequentie lager dan 20 Hz. Laagfrequent geluid wordt in het algemeen gedefinieerd als geluid met een frequentie tussen 20 à 100 Hz (de bovengrens wordt ook wel eens hoger gekozen, bijvoorbeeld 200 Hz in plaats van 100 Hz). In het rapport worden conclusies gegeven ten aanzien van infrageluid en gewoon geluid. Voor laagfrequent geluid worden geen aparte conclusies gesteld. Het laagfrequent geluid wordt in dit rapport behandeld als gewoon geluid.

5. Ontario

HGC Engineering heeft in opdracht van het Ontario Ministry of the Environment een rapport opgesteld [ref 13: HGC 2010] op basis van literatuuronderzoek. In tegenstelling tot het rapport van Massachusetts is dit rapport wel specifiek bedoeld voor laagfrequent geluid in plaats van voor gewoon geluid. Het rapport heeft betrekking op turbines met een elektrisch vermogen groter dan 1 MW. Dit betreft dus relatief grote turbines. De conclusies bevestigen en/of komen overeen met die van Massachusetts. In dit rapport worden enkele aanvullende conclusies getrokken:

- Het geluid van moderne turbines is breedbandig en niet bijzonder laagfrequent. Wel kunnen tonen hoorbaar zijn in het laagfrequente gebied (vaak afkomstig van de tandwielkast⁶). In het algemeen is de dominante frequentie niet in het laagfrequente gebied.
- De afstand tussen blad en mast speelt een rol in de laagfrequente geluidemissie van turbines.
- Downwind turbines hebben een groter aandeel laagfrequent geluid. Praktisch alle moderne turbines zijn upwind⁷.
- In het algemeen gaat het bij hinder van laagfrequent geluid om geluid *in* een woning. Hierbij heeft de woning (gevelisolatie, kamerafmetingen, kamerinrichting) invloed op het geluid. De hinderervaring is persoonsafhankelijk.
- Een A-gewogen geluidnorm kan nog steeds worden gebruikt om windturbinegeluid te beoordelen.

De laatste conclusie betekent dat een aparte norm voor laagfrequent geluid niet nodig wordt geacht door de auteur. Wel beveelt de auteur een richtlijn aan om specifieke hindersituaties van laagfrequent geluid in woningen te beoordelen. De conclusie en de aanbeveling lijken niet op elkaar aan te sluiten. Mogelijk bedoelt de auteur dat geen omgevingswetgeving nodig is voor laagfrequent geluid, maar dat bij specifieke hindersituaties wel maatregelen aan woningen kunnen worden getroffen (bijvoorbeeld via een civiele procedure).

De laatste conclusie is ook van toepassing op de Nederlandse situatie. De huidige L_{den} -norm stelt een grens aan een A-gewogen waarde.

6 De ervaring van LBP|SIGHT is dat tonen ook afkomstig kunnen zijn van de elektrische componenten.

7 Upwind betekent dat de rotor zich ten opzichte van de wind voor de mast bevindt. De bladen bevinden zich dus niet in de windschaduw van de mast.

6. Denemarken I

Zowel de rapporten Massachusetts als Ontario behandelen relatief moderne turbines, maar gaan niet in op verschillen tussen kleine en grote turbines. In het Deense rapport [ref 14: Delta 2010] wordt wel ingegaan op dit verschil. Het rapport is tussen 2008 en 2010 geactualiseerd op basis van metingen aan 14 nieuw geplaatste grotere windturbines. Het rapport betreft een literatuurstudie, diverse metingen aan turbines en woninggevels en een luistertest. De vraagstelling in dit rapport komt overeen met de vraagstelling voor deze notitie: De aanleiding voor het rapport was de toenemende zorg over de stijgende invloed van nieuwe grote windturbines op de omgeving, doordat het aandeel laagfrequent geluid mogelijk significant hoger is dan dat van kleinere turbines. In het rapport wordt het volgende geconcludeerd:

- Het verschil in het binnenshuis waargenomen laagfrequente geluid tussen kleine en grote turbines is klein.
- Grote windturbines leiden niet tot bijzondere problemen met betrekking tot laagfrequent geluid bij woningen in de nabije omgeving van deze turbines.
- Het geluid buitenshuis wordt gedomineerd door frequenties tussen 200 en 2000 Hz voor zowel kleine als grote turbines. Hinder zal derhalve niet het gevolg zijn van laagfrequent geluid. De bijdrage van laagfrequent geluid binnenshuis is circa 1 dB hoger bij grotere windturbines ten opzichte van het aandeel laagfrequent geluid van kleine windturbines. Dit verschil zou mogelijk kunnen worden waargenomen, maar is niet essentieel.

7. Denemarken II

Het verschil tussen grote en kleine windturbines wordt ook onderzocht in het artikel [ref 15: Møller 2011]. Dit onderzoek maakt gebruik van de meetdata van het bovengenoemde rapport van Delta. De conclusies van Delta worden hierin gedeeltelijk tegengesproken. In het artikel wordt het volgende geconcludeerd:

- Het verschil in laagfrequent geluid is statistisch significant tussen kleine (< 2 MW) en grote (2,3 à 3,6 MW) turbines. Dit betekent dat de geluidenergie van een grote turbine gemiddeld een lagere frequentie heeft dan een kleine turbine (20 % lager, overeenkomend met één tertstband). Voor toekomstige turbines in de 10 MW-klasse wordt nog eenzelfde verlaging van frequentie verwacht.
- Het laagfrequente deel speelt een belangrijke rol in het geluid bij woningen in de nabijheid van windturbines.

Waar bij Denemarken I het verschil klein, niet bijzonder en mogelijk wel waarneembaar, maar niet essentieel wordt genoemd, wordt bij Denemarken II het verschil statistisch significant en belangrijk genoemd. Mogelijk is dit het gevolg van de nauwkeurigheid waarmee een wetenschapper (Denemarken II) en waarmee een ingenieur (Denemarken I) in de dagelijkse praktijk te maken heeft. Zowel bij metingen als berekeningen is een nauwkeurigheid van 1 dB een nobel streven voor een ingenieur, maar zal hij of zij in de regel met onnauwkeurigheden van 2 à 3 dB te maken hebben. Voor een wetenschapper is een onnauwkeurigheid van 1 dB de norm. Een ingenieur zal een verschil van 1 à 2 dB daarom als klein of niet bijzonder benoemen, terwijl een wetenschapper dit verschil wel relevant vindt.

LBP|SIGHT is van mening dat de door Denemarken II geconstateerde verschuiving van de energie naar lagere frequenties kan worden vertaald naar een toename van circa 1 à 2 dB in het laag-frequente gebied. Dit heeft bij een voor het A-gewogen geluidniveau gestelde geluidnorm bij woningen geen effect⁸ op het A-gewogen geluidniveau. Wel kan dit leiden tot een hooguit 1 à 2 dB hoger geluidniveau in de woning, doordat in het algemeen de geluidisolatie van een woninggevel bij lagere frequenties wat lager is.

8. Van den Berg

In [ref 16: F. van den Berg 2011] geeft Van den Berg (GGD Amsterdam) een overzicht van de stand van zaken omtrent gezondheidseffecten bij windturbinegeluid. Hierin wordt het volgende gesteld:

- Windturbines zijn een geluidbron met een relatief laag geluidniveau (in vergelijking met een verkeersweg of vliegveld). Gezondheidseffecten die gerelateerd zijn aan ondervonden hinder; gehoorverlies en hart- en vaatziekten, zijn niet te verwachten. Slaapverstoring zou een gevolg kunnen zijn van windturbinegeluid, maar hier is weinig informatie over bekend.
- Het A-gewogen geluidniveau zou een correcte voorspeller van de luidheid van windturbinegeluid moeten zijn. De A-weging is immers bedoeld voor lage tot matige luidheid en het geluid van windturbines kan bij omwonenden als laag tot matig worden gekenmerkt.
- Voor toekomstige turbines kan de bijdrage van laagfrequent geluid belangrijker worden en met meer dan 3 dB toenemen.

Deze laatste conclusie is gebaseerd op het werk van ref. 15 (Denemarken II). LBP|SIGHT concludeert uit Denemarken II echter dat het verschil hooguit 3 dB is tussen de klasse 2,5 MW (overeenkomend met grote turbines in 2008) en de klasse 10 MW (overeenkomend met toekomstige turbines).

9. Andere geluidbronnen

Bekende veroorzakers van laagfrequent geluid zijn wegverkeer, luchtverkeer, scheepvaart, industrie en bedrijven. Voor industrie en bedrijven is dit niet algemeen, maar het betreft bedrijven met bepaalde typen schudzeven, compressoren, turbines, ketels of luchtbehandelingsinstallaties. Deze bronnen zijn relatief sporadisch of beperkt in reikwijdte, net als scheepvaart. Luchtverkeer is gezien in tijd een geheel ander soort geluid dan windturbinegeluid, doordat luchtverkeer bestaat uit meerdere kortdurende passages terwijl windturbinegeluid langer aanhoudt. Derhalve is een vergelijking met wegverkeer (met name op grote afstand zoals snelwegen) het meest voor de hand liggend. In het artikel [ref 17: RIVM 2008] wordt het laagfrequent geluid in woningen als gevolg van snelwegen berekend en vergeleken met de richtlijn voor laagfrequent geluid van het NSG (Nederlandse Stichting Geluidhinder). Het volgende wordt geconcludeerd:

- In meer dan 80 % van de Nederlandse woningen wordt de NSG-richtlijn overschreden door het laagfrequent geluid van snelwegen. Dit wordt veroorzaakt door de bijdrage in de 125 Hz octaafband. Indien de 63 Hz octaafband wordt beschouwd, betreft het ruim 40 % van de woningen.

Bovenstaande conclusie is enerzijds opmerkelijk: bij praktisch *alle* woningen in de buurt van een weg wordt de NSG-richtlijn overschreden. Anderzijds kan gesteld worden dat de NSG-richtlijn relatief streng is. Het betreft een hoorbaarheidsgrens en niet een hindergrens.

8 Een toename van laagfrequent geluid zal bij de huidige geluidnormering mee worden genomen in de metingen en berekeningen waardoor de A-gewogen L_{den} -norm van 47 dB nog steeds wordt gerespecteerd.

Alhoewel de NSG-richtlijn lastig te vergelijken is met de Deense norm voor laagfrequent geluid, kan globaal gesteld worden dat de NSG-richtlijn 10 dB strenger is dan de Deense norm voor laagfrequent geluid. Toch wordt verwacht dat de beoordeling van het laagfrequent geluid van het Nederlandse wegennet aan de Deense norm, zal leiden tot aanzienlijke percentages van overschrijdingen. Dit zal met name de vele situaties betreffen waarbij geluiddempende maatregelen zijn getroffen (schermen, wegdek) die vooral midden- en hoogfrequent reduceren, maar laagfrequent geluid in mindere mate. Bij het bepalen van maatregelen in de gevels van woningen wordt niet gerekend met een laagfrequent spectrum als gevolg van deze maatregelen, maar met een standaard spectrum (conform de wettelijk voorgeschreven methode). LBP|SIGHT verwacht derhalve dat veel woningen in de omgeving van wegen met geluidschermen een gevelisolatie hebben die niet goed is afgestemd op het laagfrequente deel van het wegverkeersgeluid.

10. Conclusie en aanbeveling

In de onderzochte literatuur zijn geen aanwijzingen te vinden dat windturbinegeluid tot andere gezondheidseffecten kan leiden dan hinder en mogelijk slaapverstoring. Alleen indirect (via onderzonden hinder en mogelijk via slaapverstoring) kan effect op de gezondheid optreden. Er zijn geen aanwijzingen dat laagfrequent geluid hier een belangrijke rol in speelt. Vooralsnog lijkt met de huidige A-gewogen geluidnormering te kunnen worden volstaan. Wel is de verwachting dat het aandeel van laagfrequent geluid in nieuw te ontwikkelen turbines (groter dan 6 à 7 MW) zal toenemen. Het betreft hier relatief beperkte verschillen in de orde van 1 à 3 dB. Ook betreft dit alleen eventueel binnenshuis ondervonden hinder, die mogelijk kan worden voorkomen door het treffen van maatregelen⁹ aan de betreffende woningen.

Een nadere bestudering van laagfrequent geluid bij snelwegen zou inzicht kunnen bieden in de hinderlijkheid van laagfrequent geluid. Ondanks de door het RIVM geconstateerde hoge percentages van overschrijding, is het laagfrequente geluidkarakter bij wegverkeer niet of nauwelijks een issue.

9 Dit dienen dan wel maatregelen te zijn afgestemd op lage frequenties.

Bijlage I: Literatuurlijst

- 1: Staatsblad 2010 749 Besluit algemene regels voor inrichtingen milieubeheer.
zoek.officielebekendmakingen.nl
- 2: TNO 2008-D-R1051/B Hinder door geluid van windturbines. Dosis-effectrelaties op basis van Nederlandse en Zweedse gegevens.
- 3: Human response to wind turbines noise. E. Pederson, Göteborg University, 2007.
gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/4431/1/gupea_2077_4431_1.pdf
- 4: Windfarmperception, visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents, final report, juni 2008, FP6-2005-Science-and-society-20, University of Groningen, Göteborg University, University Medical Centre Groningen.
<http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/124729401EN6.pdf>
- 5: Wind turbine health impact study: report of independent expert panel, January 2012, Massachusetts Department of Environmental Protection.
http://www.mass.gov/dep/energy/wind/turbine_impact_study.pdf
- 6: NSG-richtlijn laagfrequent geluid 1999. <http://www.nsg.nl/pdf/NSG-Richtlijn-rlfg.pdf>
- 7: Infrasound from wind turbines, G. Leventhall, Canadian Acoustics 29 – vol.34 no.2 – 2006.
- 8: Hearing at low and infrasonic frequencies, H. Møller and C.S. Pederson, Aalborg University, Noise & Health 2004.
- 9: http://www.mst.dk/English/Noise/wind_turbine_noise/wind_turbine_regulations/wind_turbine_regulations.htm
- 10: Staatsblad 2001 487: Besluit voorzieningen en installaties milieubeheer.
zoek.officielebekendmakingen.nl
- 11: http://www.mst.dk/English/Noise/wind_turbine_noise/low_frequency_noise_from_wind_turbines/low_frequency_noise_from_wind_turbines.htm
- 12: http://www.repowering-kommunal.de/uploads/tx_tcdownloadmgr/RIB_Schallimissionen_11-08-30.pdf
- 13: Low frequency noise and infrasound associated with wind turbine generator systems a literature review, Ontario Ministry of the Environment RFP No. OSS-078696, Howe Gastmeier Chapnik Limited, December 2010.
http://www.ene.gov.on.ca/stdprodconsume/groups/lr/@ene/@resources/documents/resource/tdprod_092086.pdf
- 14: EFP-06 project Low frequency noise from large wind turbines, AV 1272/10 project A401929, November 2010, Delta.
<http://www.madebydelta.com/imported/images/A401929-Danish-Energy-Authority-EFP-06-project-Final-report-for-LF-noise-from-large-wind-turbines-av127210.pdf>
- 15: Low-frequency noise from large wind turbines, H. Møller and C.S. Pederson, Aalborg University, J. Acoust. Soc. Am. 129 960 June 2011.
- 16: An overview of residential health effects in relation to wind turbine noise, F. van den Berg, GGD Amsterdam, Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, Rome, April 2011.
- 17: Low frequency noise impact of road traffic in the Netherlands, RIVM, Acoustics 2008 Paris.
<http://webistem.com/acoustics2008/acoustics2008/cd1/data/articles/000025.pdf>
- 18: <http://www.laagfrequentgeluid.nl/html/informatie/info.html>
- 19: <http://www.windunie.nl/Documents/Nederlandse%20normen%20vs%20buitenlandse%2020130212.pdf>

Overige literatuur en links:

- <http://www.ehjournal.net/content/pdf/1476-069x-10-78.pdf>
http://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0017/43316/E92845.pdf

Bijlage II: L_{den}

Huidige norm

In 2010 is de Nederlandse geluidnorm voor windturbines gewijzigd. De geluidnorm is nu gesteld in de dosismaat L_{den} . Dit betreft een jaargemiddeld geluidniveau. Het jaargemiddelde geluidniveau L_{den} wordt vastgesteld volgens de formule:

$$L_{den} = 10 \cdot 10 \log \frac{12 \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}}}{24}$$

waarbij L_{day} het tijdgemiddeld geluidniveau over de dagperiode is, $L_{evening}$ over de avondperiode en L_{night} over de nachtperiode. Het L_{den} is dus een energetisch gemiddelde van deze drie waarden gewogen naar de tijdsduur van de etmaalperioden en met een toeslag van 5 en 10 dB voor de niveaus in respectievelijk de avond- en nachtperiode. Simpel gezegd is de L_{den} -waarde een middeling van een geluidniveau over een heel jaar waarbij alle niveaus in de avond- en nachtperiode extra zwaar meetellen. Indien een geluidniveau gemiddeld in de dag-, avond en nachtperiode gelijk is, is de L_{den} -waarde ruim 6 dB hoger. Een constant geluidniveau van 40 à 41 dB(A) komt dus overeen met een L_{den} van 47 dB. Het is gebruikelijk om achter de getalswaarde van een L_{den} -waarde de eenheid 'dB' in plaats van 'dB(A)' te plaatsen.

Oude norm

Vóór 2010 was de geluidnorm voor veel windturbines gesteld in de vorm van een windnorm-curve-40 (WNC40). De norm is dan afhankelijk van de actuele windsnelheid en geldt voor het tijdgemiddelde geluidniveau over de afzonderlijke etmaalperiode (dag, avond en nacht). Voor een windsnelheid van 6 en 8 m/s (op 10 m hoogte – ook met V_{10} aangeduid) geldt bijvoorbeeld een geluidnorm van 42 respectievelijk 44 dB(A).

Vergelijking huidige en oude norm

Doordat de L_{den} een jaargemiddelde waarde is en de WNC40 een periodegemiddelde norm is afhankelijk van de windsnelheid, kunnen de waarden niet eenvoudig met elkaar worden vergeleken. De volgende variabelen spelen hierbij een rol:

- de locatie: de windsnelheden gedurende het jaar;
- de ashoogte: de verhouding tussen windsnelheid op 10 m hoogte en op ashoogte;
- de turbine: de variatie per windsnelheid in geluidemissie van de turbine.

Een exacte vergelijking is daardoor niet te maken. Afhankelijk per locatie, ashoogte en turbintype komt een L_{den} -waarde van 47 dB overeen met een geluidniveau van 41 à 43 dB(A) bij een windsnelheid van 6 m/s en een geluidniveau van 44 à 45 dB(A) bij een windsnelheid van 8 m/s.

Bijlage III: Effect Deense LF-norm

De Deense norm voor laagfrequent geluid van windturbines heeft een waarde van 20 dB(A) voor het A-gewogen geluidniveau binnen in een woning in het frequentiegebied van 10 tot 160 Hz. Deze waarde geldt voor het tijdgemiddeld geluidniveau bij een windsnelheid (10 m hoogte) van 6 en 8 m/s. Deze norm heeft dus een **27 dB** lagere getalswaarde dan de Nederlandse norm van 47 dB L_{den} (voor zowel het laagfrequente als 'normale' geluid van windturbines). De normen kunnen met elkaar vergeleken worden door rekening te houden met de volgende effecten:

- De Deense norm beoordeelt alleen het laagfrequente deel van het geluid terwijl de Nederlandse norm alle frequenties beoordeelt. Het laagfrequente deel is **8 à 9 dB** lager dan het totale geluidniveau.
- De geluidoverdracht van het laagfrequente deel is wel groter dan het totale geluidniveau. Hier speelt zowel bodemreflectie als luchtabsorptie een rol. Gemiddeld genomen is de overdrachtsreductie voor het totale geluid **3 dB** hoger dan voor het laagfrequente deel.
- De Deense norm betreft een binnenwaarde terwijl de Nederlandse norm het geluidniveau op de gevel betreft. Het verschil tussen deze waarden is ca. **19 dB** voor het laagfrequente deel van het spectrum ter plaatse van de woning. Over deze waarde bestaat veel discussie aangezien deze isolatiewaarde van veel factoren afhankelijk is. Overigens is voor de toetsing ook het hogere deel van het laagfrequente geluid van belang (100 à 160 Hz).
- De Deense norm hanteert het geluidniveau bij een windsnelheid van 6 en 8 m/s terwijl de Nederlandse norm alle windsnelheden in de beoordeling betreft en voor de avond- en nachturen een toeslag in rekening brengt. Deze toeslag betekent een ca. **1 à 3 dB** hogere beoordelingswaarde dan het geluidniveau bij een windsnelheid van 8 m/s. Deze waarde is afhankelijk van het type turbine en de windverdeling.

Globaal bekeken komt de Deense norm hiermee overeen met de Nederlandse situatie. Afhankelijk van type turbine, windverdeling en woningisolatie zal de Deense norm hooguit ca. 2 dB strenger zijn ($27 - 8 + 3 - 19 - 1$), maar kan de Deense norm ook 1 dB ruimer zijn ($27 - 9 + 3 - 19 - 3$).