



Onderzoek naar laagfrequent geluid ten gevolge van windturbines

*Onderzoek in het kader van het planMER
Windturbinebepalingen Leefomgeving*



Onderzoek naar laagfrequent geluid ten gevolge van windturbines

*Onderzoek in het kader van het planMER
Windturbinebepalingen Leefomgeving*

opdrachtgever Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
rapportnummer F 22656-2-RA-001
datum 20 januari 2023
referentie EdB/EdB//F 22656-2-RA-001
verantwoordelijke ing. E.H.A. de Beer
opsteller ing. E.H.A. de Beer / ing. W. van der Maarl
 +31 85 8228723
 e.debeer@peutz.nl

peutz bv, postbus 696, 2700 ar zoetermeer, +31 85 822 87 00, zoetermeer@peutz.nl, www.peutz.nl
kvk 12028033, opdrachten volgens DNR 2011, lid NLingenieurs, btw NL.004933837B01, ISO-9001:2015

mook – zoetermeer – groningen – eindhoven – düsseldorf – dortmund – berlijn – nürnberg – leuven – parijs – lyon

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
2	Normen of richtlijnen voor laagfrequent geluid	7
2.1	Nederland	7
2.2	Buitenland	8
3	Geluidsspectrum windturbines	10
3.1	Ontstaansmechanisme van windturbinegeluid	10
3.2	Spectrum windturbinegeluid	11
3.3	Vergelijking met spectra overige geluidbronnen	13
4	Karakteristieke geluidwering woningen	16
4.1	Achtergrondinformatie	16
4.2	In praktijk vastgestelde laagfrequente geluidisolatie gevels	17
4.3	Conclusies inzake laagfrequente geluidisolatie gevels	21
5	Berekeningen	23
5.1	Uitgangspunten	23
5.2	Rekenresultaten	25
5.2.1	Windturbines zonder serrations	25
5.2.2	Windturbines met serrations	27
5.2.3	Binnenniveau bij beperkte laagfrequente geluidisolatie	30
5.3	Beoordeling aan Deense norm en concept Ierse richtlijn	32
6	Conclusies	35

1 Inleiding

In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat – Directie Duurzame Leefomgeving en Circulaire Economie (hierna te noemen: ministerie I&W) is een onderzoek uitgevoerd naar binnenniveaus van laagfrequent geluid van windturbines in woningen. Dit onderzoek vindt plaats in aanvulling op het planMER Windturbinebepalingen Leefomgeving.

In de uitspraak van 30 juni 2021 oordeelde de Raad van State dat de algemene normen voor geluid en slagschaduw van windturbines niet zonder meer gebruikt mogen worden bij windparken. Gevolg van deze uitspraak is dat voor de windturbinebepalingen een milieubeoordeling dient te worden opgesteld waarin onderbouwd wordt welke milieunormen omwonenden voldoende bescherming bieden tegen de (milieu-)effecten van windturbines. Hiervoor wordt door het ministerie I&W thans een milieueffectrapportage (planMER) opgesteld. Onderdeel van het planMER betreft de onderbouwing van de mate waarin de te hanteren geluidnormen de relevante (hinder)effecten limiteren. Eén van de vragen hierbij is in welke mate laagfrequent geluid, hetgeen meermalen door omwonenden in verband is gebracht met hinder vanwege windturbines, wordt begrensd door een geluidnormstelling in dB(A) op de gevel. In aanvulling op het planMER, waarin een inschatting is gemaakt van te verwachten binnenniveaus in dB(A) bij verschillende geluidnormen, worden in dit onderzoek berekeningen uitgevoerd om de bijbehorende laagfrequente geluidniveaus in woningen in de omgeving van windturbineparken te bepalen. Hiertoe dient het optredende (laagfrequente) geluidniveau in woningen in de omgeving van windturbineparken te worden vastgesteld.

Door het ministerie I&W zijn de volgende vragen geformuleerd :

1. *Hoe verhoudt het spectrum van windturbines zich ten opzichte van de standaard spectra van weg- en railverkeer, luchtvaart en industrie en dan voornamelijk in het LFG gebied.*
2. *Vanaf welke afstand tot de bron is het LFG component van windturbines bepalend voor het L_{eq} .*
3. *In de reactienota zienswijze¹ van de NRD planMer² is aangegeven dat er gekeken wordt naar L_{den} niveaus van 37, 40, 43, 45, 47 en 50 dB op de gevel. De vraag is welke afstand tot de windturbine behoort bij de betreffende gevelwaardes uitgaande van een vrije veld situatie.*
4. *Wat is de gemiddelde spectrale gevelwering voor een jaren 70 woning en een woning die gebouwd is conform het huidige geldende bouwbesluit (2012).*
5. *Wat worden dan de (spectrale) binnenniveaus uitgaande van de gevelwaarde van vraag 3 in combinatie met de gemiddelde gevelweringen van vraag 4. Zowel voor de L_{den} als de L_{night} (-6 dB t.o.v. L_{den} uitgaande van de tot voor kort geldende geluidsnormen voor windparken opgenomen in het Activiteitenbesluit milieubeheer).*
6. *Wordt er bij het resultaat van vraag 5 voldaan aan de Deense norm voor LFG en mogelijke andere (internationale) normen of richtlijnen voor LFG?*

De resultaten van dit onderzoek geven de antwoorden op bovengenoemde vragen. De resultaten kunnen als volgt kort worden samengevat:

- 1 <https://www.infomil.nl/onderwerpen/integrale/activiteitenbesluit/submenu/nieuws/reactienota-zienswijzen-nrd-milieuregels/>
- 2 <https://platformparticipatie.nl/windturbinebepalingen/voornemen+windturbinebepalingen/handlerdownloadfiles.ashx?idnv=2121756>

- Er is een standaard (laagfrequent) geluidsspectrum vastgesteld van een referentie windturbine van 5 en 8 MW. De windturbines zijn representatief voor de huidige en de toekomstig te plaatsen windturbines. Deze referentie windturbines zijn ook gebruikt in het akoestisch onderzoek van het planMER.
- Het relatieve laagfrequente spectrum van een 5 en 8 MW windturbine verschilt maar heel beperkt van elkaar. Het toepassen van serrations (een geluidreducerende maatregel bij windturbine middels een vertanding die wordt aangebracht op de rotorbladen) bij een windturbine heeft een groter effect op het relatieve laag frequente geluidsspectrum van een windturbine dan het verschil tussen 5 en 8 MW turbine. Derhalve zijn in dit onderzoek de laagfrequente geluideffecten beschouwd van zowel een 8 MW windturbine zonder serrations als met serrations.
- Het relatieve laagfrequente spectrum wijkt niet wezenlijk af van het spectrum van andere geluidbronnen met een enigszins laagfrequent karakter, zoals (zwaar) wegverkeer, industrielawaai en dergelijke (hiervoor wordt normaliter het standaard spectrum 2 NEN_EN_ISO 717-1:2021 gebruikt).
- Er zijn relatief gezien weinig geluidweringmetingen bij woningen uitgevoerd betrekking hebbend op het laagfrequente geluidsspectrum. De geluidweringmetingen die wel zijn uitgevoerd in het laagfrequente geluidsspectrum laten geen duidelijk onderscheid zien tussen een jaren 70 woning en woningen die voldoen aan het Bouwbesluit 2012. De laagfrequente geluidwering is voor groot deel afhankelijk van de dimensies van de ruimte die wordt beschouwd.
- Er is een gemiddelde laagfrequente geluidwering vastgesteld op basis van alle beschikbare metingen (19 woningen, 36 beschouwde ruimten) die in Nederland zijn uitgevoerd. Tevens is een laagfrequente geluidwering vastgesteld waaraan 67% van alle ruimten kan voldoen, deze geluidwering kan gezien worden als "worst case" laagfrequente geluidwering.
- Uitgaande van de gemiddelde laagfrequente geluidwering zijn de laagfrequente geluidniveaus binnen een woning berekend voor de volgende situaties:
 - een 8 MW solitaire windturbine;
 - een lijnopstelling van 5 windturbines van 8 MW;
 - een matrixopstelling van 15 windturbines van 8 MW.
- Bij deze berekening is ervan uitgegaan dat de geluidbelasting op de gevel van de woning ten gevolge van de windturbine(s) voldoet aan een grenswaarde van 31, 34, 37, 39, 41 en 44 dB L_{night} (dit komt overeen met een grenswaarden van 37, 41, 43, 45, 47 en 50 dB L_{den}).
- In alle beschouwde situaties is er sprake van overschrijding de NSG referentiecurve. Er zal naar verwachting dus sprake zijn van hoorbaar laagfrequent geluid voor een deel van de groep personen die gevoelig is voor laagfrequent geluid.
- In alle beschouwde situaties wordt er wel voldaan aan de Vercammen-curve. Op basis hiervan mag verwacht worden dat er in het algemeen geen relevante hinder ten gevolge van laagfrequent geluid zal optreden.
- Dezelfde berekeningen zijn uitgevoerd voor één of meerdere 8 MW windturbines waarbij serrations zijn toegepast. Windturbines met serrations hebben relatief gezien een grotere laagfrequent geluidemissie. Ook voor de windturbines met serrations is er in alle beschouwde situatie sprake van enige overschrijding van de NSG referentiecurve, maar wordt er voldaan aan de Vercammen-curve.

- Uitgaande van een beperkte laagfrequent geluidwering van een woning wordt ook in alle beschouwde situaties met een windturbine zonder serrations voldaan aan de Vercammen-curve.
- Uitsluitend in de situatie van een windturbine met serrations waarbij wordt voldaan aan een grenswaarde van 44 dB L_{night} (50 dB L_{den}) is er sprake van een beperkte overschrijding van de Vercammen-curve. De overige situaties waarbij wordt voldaan aan een grenswaarde van 41 dB L_{night} (47 dB L_{den}) of strenger wordt wel voldaan aan de Vercammen-curve.
- De Deense norm wordt uitsluitend overschreden in een situatie met windturbines met serrations waarbij voldaan wordt aan een grenswaarde van 44 dB L_{night} (50 dB L_{den}). In alle overige beschouwde situaties wordt voldaan aan de Deense norm.

2 Normen of richtlijnen voor laagfrequent geluid

2.1 Nederland

Voor laagfrequent geluid gelden er in Nederland geen wettelijke grenswaarden. In diverse hindersituaties en juridische procedures wordt voor de beoordeling van laagfrequent geluid veelal gebruikgemaakt van de NSG-richtlijn laagfrequent geluid³ en de zogenaamde Vercammen-curve⁴.

NSG-richtlijn

In de NSG-richtlijn laagfrequent geluid is een referentiecurve opgenomen. Deze curve is gebaseerd op de 90%-gehoordrempel van een doorsnee groep oudere personen (50 tot 60 jaar). Deze groep oudere personen zijn over het algemeen extra gevoelig voor laagfrequent geluid. Een gehoordrempel van 90% houdt in dat 90% van een groep personen dit geluidniveau (net) niet meer waarneemt en dus 10% van de mensen dit geluidniveau nog wel kunnen waarnemen. In tabel 2.1 is deze referentiecurve gegeven. De gegeven waarden per tertsbands betreffen ongewogen, lineaire geluiddrukkniveaus.

t2.1 NSG-referentie-curve

L _{eq} in dB voor de tertsbands met middenfrequentie in Hz							
20	25	31,5	40	50	63	80	100
74	62	55	46	39	33	27	22

De NSG-referentiecurve betreft aldus een hoorbaarheids criterium voor een groep personen die relatief gezien gevoelig is voor laagfrequent geluid. Indien geen van de tertsbands waarden de NSG-referentiecurve overschrijden is er geen laagfrequent geluid hoorbaar en kan er geen hinder zijn. De NSG referentiecurve wordt gebruikt om een klacht te objectiveren, waarbij impliciet bij overschrijding van de referentiecurve hoorbaarheid kan optreden. Bij overschrijding van één of meerdere tertsbands waarden van de NSG-referentiecurve is in principe laagfrequent geluid hoorbaar.

Vercammen-curve

De wijze van beoordeling van laagfrequent geluid aan de Vercammen-curve is qua principe gelijk aan de beoordeling aan de NSG-curve. De Vercammen-curve beschrijft echter binnen het laagfrequente geluidgebied (van 20 tot en met 125 Hz) de geluidniveaus waarbij hinder kan optreden (in tegenstelling tot de NSG-curve waarbij hoorbaarheid het criterium is). In tabel 2.2 zijn de waarden van de Vercammen-curve gegeven die behoren bij een toelaatbaar geluidniveau van 25 dB(A). Een equivalent geluidniveau van 25 dB(A) is een algemeen geaccepteerde grenswaarde voor onder andere industrielaawaai voor de nachtperiode binnen een woning.

3 NSG-richtlijn laagfrequent geluid, Nederlandse Stichting Geluidhinder, april 1999

4 Rapport Peutz nr. R 548-3 d.d. 8 juli 1990, "Grenswaarden voor laagfrequent geluid in de woning"

t2.2 Waarden in dB volgens Vercammen-curve uitgaande van een toelaatbaar geluidniveau van 25 dB(A)

Frequentie [Hz]	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
Binnengrenswaarde [dB]	71	65	60	55	50	46	42	39	36

2.2 Buitenland

Naast de in paragraaf 2.1 beschreven en in Nederland vaak gebruikte beoordelingscriteria voor laagfrequent geluid zijn de navolgende in het buitenland toegepaste toetsingskaders voor laagfrequent geluid van windturbines voor dit onderzoek relevant. Sinds 2012 geldt er in Denemarken een specifieke wettelijke norm voor laagfrequent geluid van windturbines en in Ierland is in 2019 een ontwerprichtlijn voor windturbinegeluid gepubliceerd die specifieke beoordelingswaarden heeft voor laagfrequent geluid.

Deense norm

Per 1 januari 2012 zijn in de Deense regelgeving grenswaarden van kracht voor het laagfrequente geluid ten gevolge van windturbines⁵. De grenswaarde voor het laagfrequente (frequentiegebied 10 tot 160 Hz) geluid in woningen betreft een A-gewogen geluidniveau van 20 dB in zowel de dag-, avond- als nachtperiode en geldt bij windsnelheden van 6 en 8 m/s op 10 m hoogte. In deze Deense regelgeving is ook een geluidreductie voorgeschreven voor het berekenen van binnengeluidniveaus uitgaande van invallende geluidniveaus op de gevels van woningen. Deze geluidreductie is gebaseerd op metingen aan 14 verschillende Deense woningen in het buitengebied en in dorpen, waarbij in totaal van 26 verblijfsruimten de geluidreductie is gemeten. Hierbij is ervoor gekozen om uit te gaan van een geluidreductie waaraan circa 67% van de onderzochte woningen voldoet. In tabel 2.3 zijn de Deense reductiewaarden voor de geluidisolatie van woningen gegeven.

t2.3 Geluidreductie binnen-buiten conform Deense norm

Geluidreductie in dB voor de tertsband met middenfrequentie in Hz										
16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
4,6	6,6	8,4	10,8	11,4	13,0	16,6	19,	21,2	20,2	21,2

Concept Ierse richtlijn

In december 2019 is in Ierland een nieuwe conceptrichtlijn voor windturbineontwikkelingen⁶ gepubliceerd. Deze conceptrichtlijn heeft nog niet tot een definitieve richtlijn geleid. In deze richtlijn is voor laagfrequent geluid aangegeven dat het laagfrequent geluid dient te worden

5 Deense Overheid, Miljø- og Fødevareministeriet, „Bekendtgørelse om støj fra vindmøller,” BEK nr. 135, 07, Februari 2019

6 Ierse overheid, Department of Housing, Planning and Local Government, Draft Revised, Wind Energy Development Guidelines, December 2019

beoordeeld naar aanleiding van klachten en dat deze beoordeling middels metingen dient plaats te vinden.

De metingen dienen in de nachtperiode binnen de woning te worden uitgevoerd, waarbij het L_{90} ongewogen, 10 min niet meer mag bedragen dan de in tabel 2.4 vermelde waarden. In de dagperiode zijn 5 dB hogere geluidniveau aanvaardbaar.

t2.4 Voorgestelde toetsingswaarde L_{90} ongewogen, 10 min in de nachtperiode conform concept Ierse norm voor LFG

Grenswaarde in dB voor de tertsband met middenfrequentie in Hz										
16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
83	74	64	56	49	43	42	40	38	36	34

3 Geluidspectrum windturbines

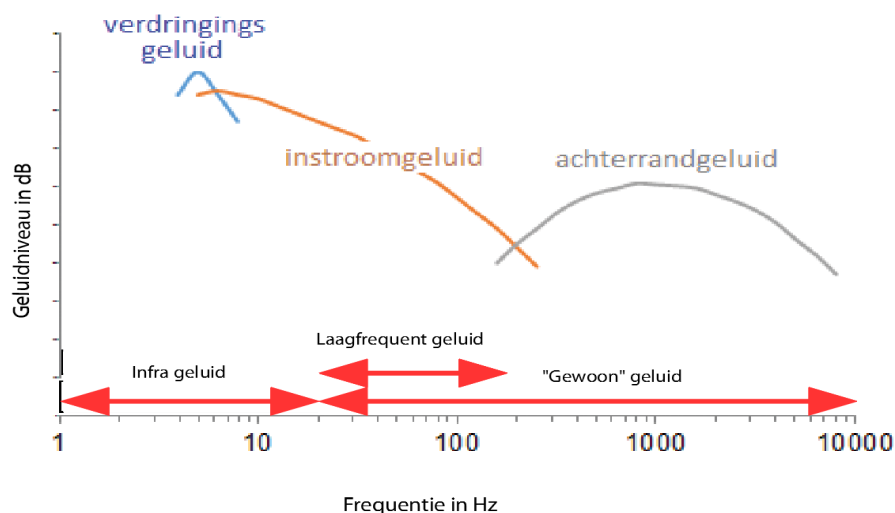
3.1 Ontstaansmechanisme van windturbinegeluid

De geluidemissie van een moderne windturbine wordt voornamelijk veroorzaakt door de luchtstroming (aerodynamische fenomenen) rond de rotorbladen (wieken) van een windturbine. Het aerodynamische geluid dat rond de rotorbladen wordt opgewekt, is onder te verdelen in:⁷

- **Achterrandsgeluid** (trailing edge noise). Als gevolg van de interactie tussen de aanstromende lucht en het rotorblad ontstaat een turbulente stroming achter het wiekprofiel. Als gevolg van de stroomsnelheid rond het rotorblad en deze turbulentie treedt geluidemissie op ('achterrandsgeluid'). Dit achterrandsgeluid manifesteert zich met name in het midden en hoge frequente geluidgebied (frequentiegebied tussen circa 200 en 8000 Hz). De geluidemissie is sterk afhankelijk van de stroomsnelheid en de snelheid van het rotorblad. Dit geluid wordt voornamelijk veroorzaakt aan de uiteinde van de rotorbladen, aangezien daar de hoogste snelheden optreden.
- **Instroomgeluid** (in flow noise). De luchtstroming voor de rotorbladen is zelf ook in meer of mindere mate turbulent. Bij de interactie tussen de luchtstroming en het rotorblad wordt er het zogenaamde instroomgeluid veroorzaakt. Dit geluid manifesteert zich meer in het laagfrequente gebied (frequentiegebied tussen 20 en 200 Hz).
- **Verdringingsgeluid** (thickness sound). Bij een plotselinge zijwaartse beweging van de wiek, bijvoorbeeld door een plotselinge verandering in windsnelheid, ontstaat geluid waarvan de frequentie wordt bepaald door het toerental van de rotor. Dit bevat frequenties van 1 tot ongeveer 20 Hz (infrageluid).

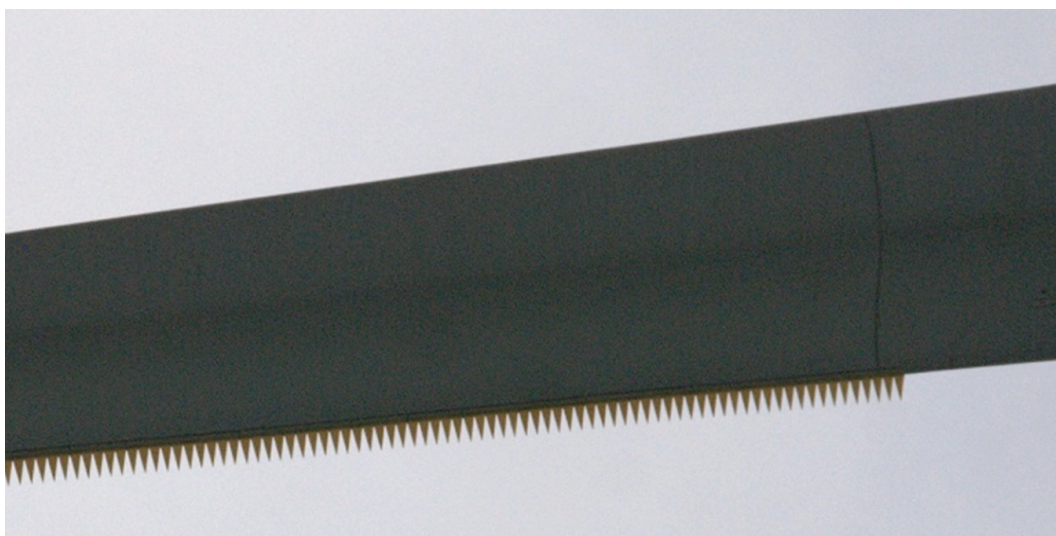
In figuur 3.1 zijn de verschillende vormen van de aerodynamisch geluid met elk hun eigen frequentiegebied grafisch weergegeven.

f3.1 Verschillende vormen van aerodynamisch geluid die optreden bij een windturbine



Ter beperking van de geluidemissie van windturbine of windturbines worden tegenwoordig vaak zogenaamde serrations toegepast. Dit betreft een gekarteld profiel aan de achterzijde van het rotorblad die de turbulentie aan de achterzijde van het rotorblad reduceert en daarmee het achterranggeluid beperkt. In figuur 3.2 zijn dergelijke vertandingen ('serrations') weergegeven. Door het toepassen van dergelijke serrations wordt het achterranggeluid, dus het geluid in het midden en hoge (tussen circa 200 en 8000 Hz) frequentiegebied gereduceerd. Hiermee kan een 4 à 5 dB(A) geluidreductie worden bewerkstelligd. Het instroomgeluid en daarmee het laagfrequent geluid wordt met de toepassing van serrations niet gereduceerd. Relatief gezien is er in het algemeen sprake van een meer laagfrequente geluidemissie als er serrations worden toegepast.

f3.2 Serrations op rotorblad van een windturbine



3.2 Spectrum windturbinegeluid

Ter vaststelling van een representatief geluidsspectrum is uitgegaan van de spectrale geluidvermogen-niveaus van diverse fabricaten en typen windturbines met een nominaal vermogen van 4,5 tot 7,5 MW. Deze geluidvermogens zijn (onder accreditatie) in opdracht van de fabrikant vastgesteld op een testveld conform de IEC 61400-11 standaard. Deze standaard schrijft onder andere voor dat de geluidemissie dient te worden vastgesteld in de tertsbanden met middenfrequenties van 50 tot en met 10.000 Hz. Aanvullend wordt echter in toenemende mate ook de geluidemissie vastgesteld in de tertsbanden lager dan 50 Hz.

Ter bepaling van het representatieve spectrum zijn uitsluitend spectrale gegevens gehanteerd waarbij ook geluidvermogen-niveaus in de tertsbanden 20 tot en met 40 Hz zijn gegeven. Deze spectrale geluidvermogen-niveaus zijn de gegarandeerde geluidvermogens, dat wil zeggen de op het testveld vastgestelde geluidvermogen-niveaus inclusief 1,5 dB onzekerheidsmarge. Uit analyse van de geluidemissiegegevens van diverse turbines blijkt

dat de Nordex N163 (rotordiameter 163 m, nominaal vermogen 5,7 MW) een relatief hoog laagfrequente geluidemissie heeft (opzichte van bijvoorbeeld de Vestas V162 (rotordiameter 162 m, nominaal vermogen 6 MW). Voorts blijkt dat er geen relevant verschil is in de laagfrequente geluidemissie bij rotordiameters van 120-150m en groter dan 150 m. Wel neemt bij toenemend rotoroppervlak de geluidemissie evenredig toe. Pedersen et al. 2015⁸ hebben een verband vastgesteld tussen het nominale elektrische vermogen en de geluidemissie die toeneemt met de volgende formule:

$$L_{WA} = 11 \cdot \log(P_{nom}/1MW) + c_1$$

waarbij:

P_{nom} = het nominale elektrisch vermogen

c_1 = een constante (101,1)

Theoretisch neemt de geluidemissie bij toenemende rotoroppervlak toe op basis van $10 \cdot \log(S_{rotor}/S_0)$

waarbij:

S_{rotor} = oppervlakte van de rotor

S_0 = referentieoppervlakte (1 m²)

In het onderzoek wordt evenwel uitgegaan van $11 \cdot \log(S_{rotor}/S_0)$ ('worst-case'-aanname).

Uitgaande van de Nordex N163 zijn de correctiefactoren voor de vaststelling van de geluidemissie van de referentieturbine:

5 MW, rotordiameter 170: $L_{WA,5MW} = L_{WA,NordexN163} + 11 \cdot \log(22.698 / 20.867) = L_{WA,NordexN163} + 0,40$

8 MW, rotordiameter 200: $L_{WA,8MW} = L_{WA,NordexN163} + 11 \cdot \log(34.416 / 20.867) = L_{WA,NordexN163} + 1,95$

In tabel 3.1 zijn de gehanteerde geluidemissies gegeven voor de referentieturbines 5 en 8 MW. Voorts is voor de 8 MW turbine tevens onderscheid gemaakt in de toepassing van wel of geen vertandingen (serrations) op de bladen.

t3.1 Gehanteerde spectrale geluidvermogens voor de referentieturbine van 5 en 8 MW

Betreft	L _{WA} in dB(A) per tertsband met middenfrequentie in Hz									dB(A)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
5 MW										
L _{E,night}	79,5	89,7	95,8	99,0	101,2	102,3	99,7	92,6	84,2	107,4
L _{W,rated}	80,5	90,7	96,9	100,2	102,4	103,5	101,0	93,9	85,6	108,6
8 MW zonder serrations										
L _{E,night}	81,8	92,0	98,0	101,3	103,4	104,5	101,9	94,7	86,3	109,6
L _{W,rated}	82,6	92,8	98,9	102,2	104,5	105,6	103,1	96,0	87,6	110,6
8 MW met serrations										
L _{E,night}	83,1	91,8	96,8	98,9	100,4	101,1	98,3	91,3	83,3	106,7
L _{W,rated}	83,9	92,6	97,7	99,9	101,4	102,2	99,5	92,5	84,7	107,8

In tabel 3.2 zijn de geluidvermogens voor de referentieturbines gegeven voor de berekening van het laagfrequente geluid (tertsbanden 20 tot en met 160 Hz). Hierbij is uitgegaan van het $L_{W, rated}$, zodat het laagfrequente geluidniveau wordt berekend dat maximaal kan optreden binnen een woning.

t3.2 Gehanteerde geluidvermogens in de tertsbanden 20 tot en met 160 Hz

Betreft	L _{WA} in dB(A) per tertsband met middenfrequentie in Hz								
	20	25	40	50	63	80	100	125	160
5 MW	66,8	69,4	75,4	78,4	83,4	85,4	87,9	92,4	91,4
8 MW zonder serrations	68,5	71,5	77,5	80,5	85,5	87,5	90,0	94,5	93,5
8 MW met serrations	71,3	73,6	79,1	81,5	85,9	87,5	89,5	93,6	92,2

Door de toepassing van de volgende uitgangspunten:

- het optellen van een 1,5 dB onzekerheidsmarge op het in een testveld vastgestelde geluidvermogen;
- uit te gaan van een windturbine met relatief hoge laagfrequent geluidemissie;
- het toepassen van een correctiefactor van $11 \cdot \log(S_{rotor}/S_0)$,

kunnen de in tabel 3.1 en 3.2 gegeven geluidvermogens als "worst case"-uitgangspunt voor de geluidemissie van de referentie windturbines worden beschouwd. Met het hanteren deze uitgangspunten wordt een inzicht gegeven in de meest ongunstigste situatie ten aanzien van laagfrequente geluid, doch die wel in de praktijk kan optreden. Gemiddeld gezien zal er sprake zijn van een beperktere laag frequente geluidemissie.

3.3 Vergelijking met spectra overige geluidbronnen

Iedere geluidbron kent zijn eigen geluidspectrum. Voor sommige geluidbronnen zijn de midden of hoge frequenties meer dominant en voor andere geluidbronnen meer de lage frequenties. Voor de verschillende geluidbronsorten zijn zogenaamde standaard spectra opgesteld. Deze relatieve spectra zijn representatief voor het geluid van een betreffende geluidbronsort. In verschillende normen en onderzoeken worden verschillende standaardspectra gegeven. Niet alle standaardspectra zijn over het gehele audiofrequentiegebied gespecificeerd. In tabel 3.3 is een beknopt overzicht gegeven van in Nederland veel toegepaste standaard spectra. De in deze tabel gegeven waarden betreffen A-gewogen relatieve octaafbandwaarden.

t3.3 Relatieve geluidspectra overige geluidbronnen

Geluidbronsort	Bron	Relatief A-gewogen spectra in dB voor octaafband in Hz									
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Spectrum 1*	NEN_EN_ISO 717-1:2021		-32	-22	-15	-9	-6	-5	-5		
Spectrum 2**	NEN_EN_ISO 717-1:2021		-18	-14	-10	-7	-4	-6	-11		
Wegverkeer licht	RMV 2012 art 4.5		-24	-23	-21	-13	-2,5	-5	-13	-27	
Wegverkeer zwaar	RMV 2012 art 4.5		-17	-17	-15	-8	-3	-6,5	-14	-27	
Railverkeer	NPR 5272: 2003			-27	-17	-9	-4	-4			
Luchtvaart	NPR 5272: 2003			-21	-11	-7	-4,5	-6			
Industrie	Handreiking Zonebeheerplan VROM 2006	-28,6	-20,9	-14,8	-10,2	-7,0	-6,1	-7,4	-9,3	-9,8	
Pop	NSG richtlijn muziekspectra		-27	-14	-9	-6	-5	-6	-10		
House	NSG richtlijn muziekspectra		-13	-8	-8	-7	-7	-9	-10		
Ultra Bas	NSG richtlijn muziekspectra		-6	-5	-8	-10	-11	-11	-9		

* Spectrum 1 is bedoeld voor leefactiviteiten (zoals praten, muziek, radio en TV), spelende kinderen, railverkeer op gemiddelde en hoge snelheden, wegverkeer op auto(snel)wegen (>80km/uur), straalvliegtuigen op korte afstand, industrie met voornamelijk midden en hoogfrequent geluid.

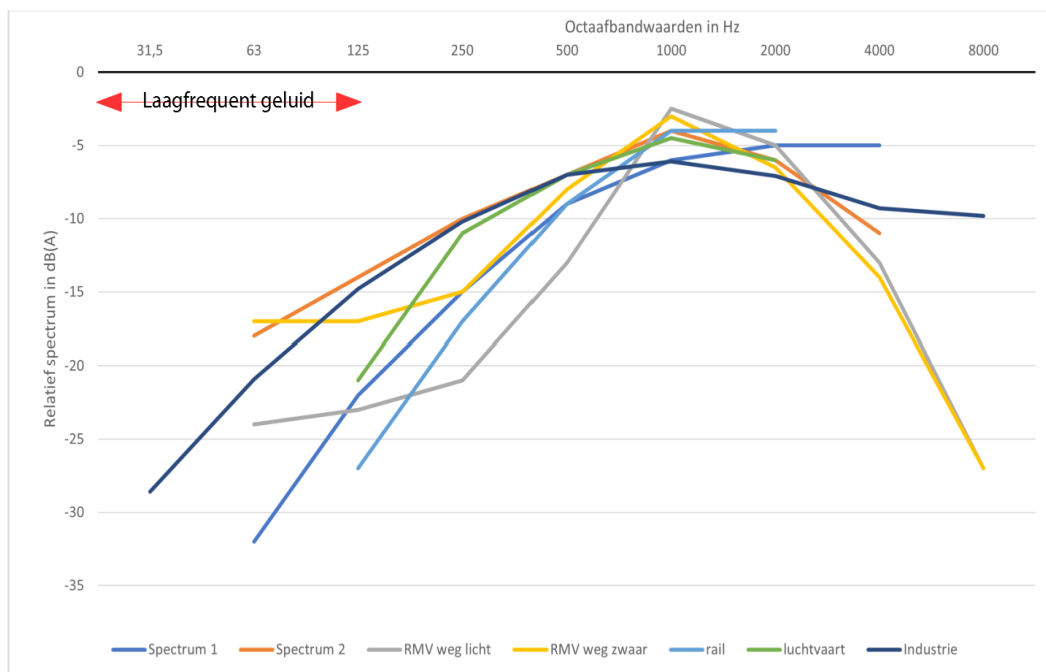
** Spectrum 2 is bedoeld voor wegverkeer binnen bebouwde kom, railverkeer op lage snelheden, propeller vliegtuigen, straalvliegtuigen op grote afstand, discomuziek, industrie met voornamelijk laag en middenfrequent geluid.

In figuur 3.4 zijn enkele van deze standaard spectra grafisch weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat spectrum 2 uit NEN_EN_ISO 717-1:2021 relatief het meeste laagfrequente geluid bevat. Dit is het standaard spectrum conform ISO 717-1 dat representatief is voor onder andere wegverkeer binnen de bebouwde kom, railverkeer op lage snelheden en industrielawaai.

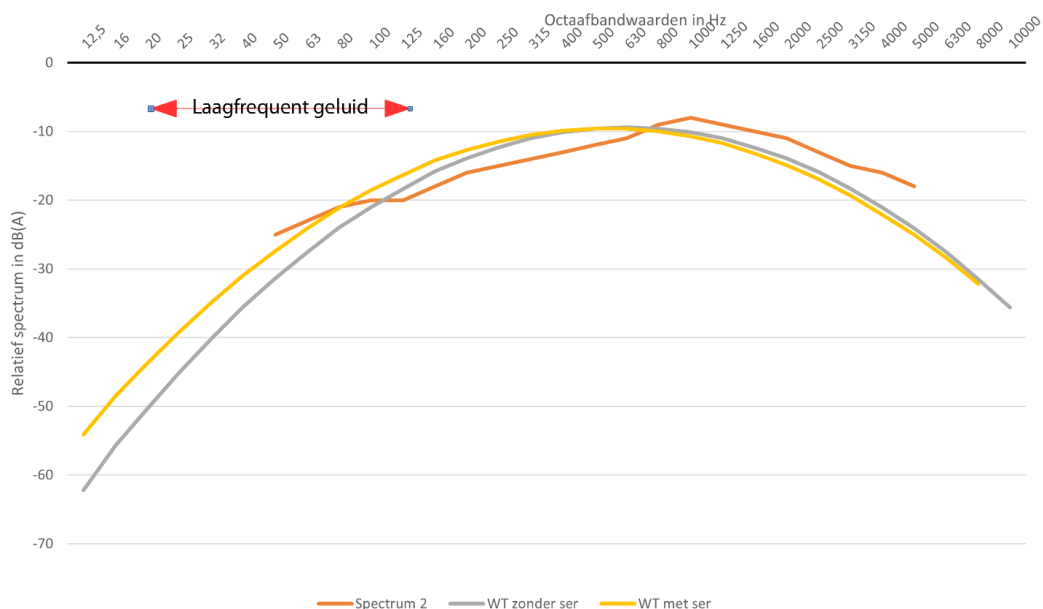
In figuur 3.5 is het relatieve spectrum 2 uit NEN_EN_ISO 717-1:2021 gegeven in tertsbandswaarden. Tevens zijn in deze figuur de relatieve spectra gegeven van de representatieve (8 MW) windturbine met en zonder toepassing van serrations. Hieruit blijkt dat het spectrum van een windturbine met serrations relatief meer laagfrequent geluid bevat dan het spectrum van een windturbine zonder serrations. In absolute zin is de geluidemissie van een windturbine met serration op dB(A)-niveau wel lager dan dezelfde windturbine zonder serrations. Beide spectra (windturbine met en zonder serrations) lijken wel enigszins op spectrum 2 uit NEN_EN_ISO 717-1:2021. Wel blijkt dat in de tertsbanden lager dan 80 Hz het spectrum 2 meer laagfrequent geluid bevat dan de beschouwde windturbines, boven de 80 Hz hebben de windturbines (met name de windturbine met serration) iets meer laagfrequent geluid.

Uit het voorgaande blijkt dat het beschouwde geluidsspectrum van een windturbine laagfrequent niet wezenlijk afwijkt het spectrum van andere geluidbronnen met een enigszins laagfrequent karakter (zoals zwaar wegverkeer, industrielawaai en dergelijke).

f3.4 A-gewogen relatief geluidsspectra van enkele overige geluidbronsorten



f3.5 A-gewogen relatief geluidsspectra van windturbines met en zonder serration



4 Karakteristieke geluidwering woningen

4.1 Achtergrondinformatie

Resonanties (eigenfrequenties) in ruimten

Door het specifieke karakter van laagfrequent geluid (grote golflengte) kan er binnen een woning een patroon van staande golven ontstaan, veroorzaakt door interferentie. Hierdoor ontstaat in een ruimte een patroon van knopen (geluiddrukminima) en buiken (geluiddrukmaxima). Een staande golf kan alleen ontstaan als de golflengte "past" in de ontvangerruimte. De laagste eigenfrequentie die past in een ruimte komt ruwweg overeen met tweemaal de grootste afmeting van deze ruimte. Voor een gemiddelde woonkamer (grootste afmeting bijvoorbeeld 9 meter) bedraagt de laagste eigenfrequentie circa 20 Hz en voor een slaapkamer (grootste afmeting bijvoorbeeld 4 à 5 meter) komt dit overeen met een laagste eigenfrequentie van circa 40 Hz.

Onder de laagste eigenfrequentie wordt de lucht in de ruimte als het ware opgepompt en weer gedecomprimeerd gedurende een trillingsperiode. Boven de laagste eigenfrequentie kunnen ook bij hogere frequenties staande golfpatronen ontstaan (tweede mode, derde mode, etc.), maar naarmate de frequentie hoger wordt, liggen de modi steeds dichter bij elkaar (modale dichtheid stijgt), zodat sterke fluctuaties op verschillende plekken in een ruimte minder optreden.

In het laagfrequente gebied zijn derhalve de afmetingen van de ontvangerruimte en de scheidingsconstructie ten opzichte van de golflengte van geluid zo klein dat de modale dichtheid onvoldoende is. Het gevolg is een sterk met de frequentie fluctuerende overdracht en in het ontvangervertrek ontstaan ruimtelijke fluctuaties van de geluiddruk over het vertrek. Bij hogere frequenties is deze modale dichtheid veel hoger, zodat deze sterke fluctuaties niet meer optreden.

Laagfrequente geluidisolatie gevels

Ten aanzien van de geluidisolatie van de gevels van woningen kan worden gesteld dat de geluidisolatie toeneemt met toenemende frequentie. De geluidisolatie bij midden- en hoge frequenties wordt bepaald door de massa-impedantie van de gevelelementen. Door deze frequentieafhankelijke geluidisolatie zal het geluidspectrum binnenshuis over het algemeen een meer laagfrequent karakter hebben dan het geluidspectrum buiten. Bij nog lagere frequenties speelt de stijfheid van de constructie een rol bij de geluidisolatie van een gevel. Deze is ondermeer afhankelijk van de afmeting (de "overspanning") van plaatvormige elementen zoals beglazing. Kleine paneeltjes in een stijf raamwerk hebben bij de lage frequenties een beduidend hogere geluidisolatie dan wanneer het één vlak zou zijn.

Tussen het stijfheidsgedrag en het massagedrag zit een gebied waarin resonanties een rol spelen, welke zowel door de stijfheid als door de massa bepaald worden. De geluidisolatie kan bij deze frequenties beduidend lager zijn, mede afhankelijk van de hoeveelheid demping in het systeem.

Meestal is er niet sprake van één resonantie maar van meerdere mechanische systemen, ieder met eigen resonanties:

- de plaatresonanties: een plaat heeft meerdere eigenfrequenties, afhankelijk van de trilvorm. De laagste eigenfrequentie treedt op wanneer de plaat in zijn geheel heen en weer beweegt (rigid body mode), de tweede wanneer de helft naar voren en de andere helft naar achteren beweegt (vergelijkbaar met een snaar).
- In het geval van dubbel glas is er de resonantie van de twee glasplaten op een kleine luchtspouw. Bij kleine spouw en niet te zwaar glas ligt deze frequentie bij ongeveer 250 Hz. Bij zwaarder glas en grotere luchtspouw zal de eigenfrequentie lager liggen. In [Partner, Final report - low frequency noise study, 6 april 2007] worden op basis van een theoretische benadering resonantiefrequenties gevonden tussen 85 Hz en 208 Hz.
- De glasruit kan als geheel, als een massa, resoneren op het achterliggende volume dat als veer werkt.

Resumerend kan worden gesteld dat de laagfrequente geluidreducties van gevels/woningen sterke verschillen vertonen in vergelijking met de geluidreducties bij de midden- en hogere frequenties:

- resonanties van panelen/delen van de gevel treden met name op in het laagfrequente gebied. Bij deze resonanties is de geluidisolatie zeer gering;
- in de ontvangerruimte kunnen ruimtemodi ontstaan, waardoor ook in de ruimte significante verschillen ontstaan in geluidniveau. Door kleine afwijkingen in afmetingen van ruimten kunnen hierdoor voor aangrenzende woningen grote verschillen ontstaan in geluidreductie.

In de praktijk zijn er relatief weinig gegevens voorhanden betreffende de laagfrequente geluidreductie van woningen (geluidisolatiemetingen in laboratoria zijn bijvoorbeeld veelal naar de lage frequenties begrensd tot 100 Hz). Ook bij de bepaling van de geluidwering van gevels (NEN 5077) bedraagt de ondergrens de octaafband van 125 Hz.

4.2 In praktijk vastgestelde laagfrequente geluidisolatie gevels

Door Peutz zijn in het verleden voor enkele specifieke onderzoeken de laagfrequente geluidisolaties van woningen vastgesteld. Dit zijn tot zover bekend de enige beschikbare laagfrequente geluidisolaties van woningen binnen Nederland. In het navolgende wordt een kort overzicht gegeven van deze in praktijk gemeten laagfrequente geluidisolaties.

Metingen 1990

In 1990 is in opdracht van het voormalige ministerie VROM door bureau Peutz de geluidreductie van een 7-tal woningen bepaald. Van iedere woning is de geluidreductie bepaald naar de woonkamer en naar één slaapkamer (zie rapport R 548-13 deel F d.d. 8 juni 1990). De exacte locatie en ook het oorspronkelijke bouwjaar van deze woningen is niet meer te achterhalen. De nog wel bekende gegevens van deze woningen zijn opgenomen in tabel 4.1.

t4.1 Kenmerken onderzochte woningen metingen 1990

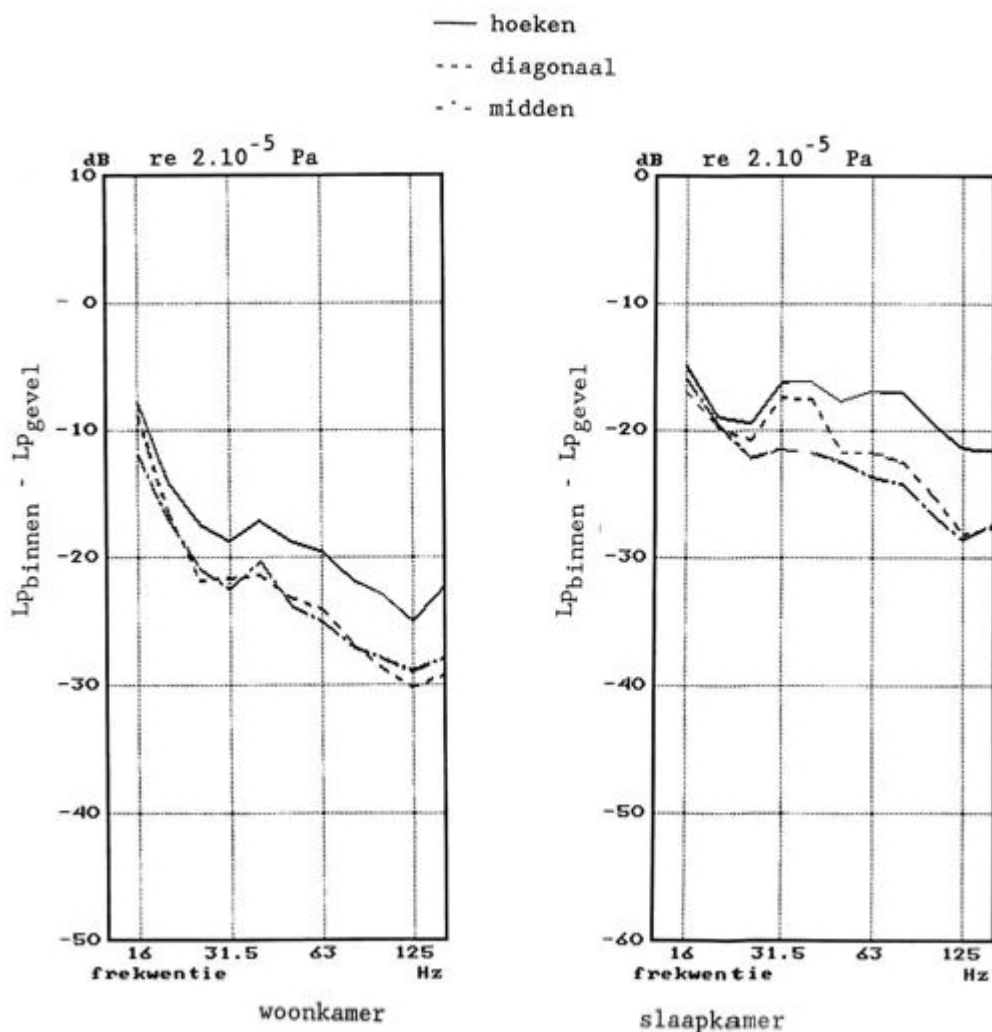
Nr.	Plaats	Soort woning	Wijze fundering	Type grond	Woonkamer		Slaapkamer	
					Oppervlak [m2]	Type beglazing	Oppervlak [m2]	Type beglazing
1	Nijmegen	hoekwoning	op staal	zandgrond	28	enkel	11	enkel
2	Leuth	tussenwoning	op staal	klei	37	dubbel	15	dubbel
3	Nijmegen	tussenwoning	op staal	zand	46	dubbel	12	dubbel
4	Deurne	vrijstaande woning	op staal	zandgrond	48	dubbel	12	dubbel
5	Gouda	tussenwoning	op palen	veen+laag gruis	38	dubbel	15	dubbel
6	Zoetermeer	tussenwoning	op palen	klei+1/2m zand	39	dubbel	12	dubbel
7	Waalwijk	2/1 kap woning	op staal	zandgrond	48	dubbel	8	dubbel

De geluidreducties van deze woningen zijn bepaald op basis van buitenmetingen op korte afstand van de gevel en op basis van binnenmetingen (gemiddelde waarde van 3 hoekposities, alsmede een gemiddeld geluidniveau over een diagonaal van een bovenhoek naar een onderhoek). De gemiddelde geluidreducties van de 7 woningen (woonkamers en slaapkamers) zijn gegeven in figuur 4.3. In tabel 4.2 zijn de uit de figuur afgelezen waarden gegeven, uitgaande van de gemiddelde waarde over de 3 hoekposities en gecorrigeerd voor een gevelreflectie (6 dB).

t4.2 Vastgestelde geluidreducties woningen metingen 1990

Omschrijving	Geluidreductie in dB, per tertsband (Hz)										
	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
woonkamer (onderzoek 1990)	2	8	11	12	11	13	14	16	17	18	16
slaapkamer (onderzoek 1990)	9	12	13	10	10	11	11	11	14	15	15

f4.3 Gemeten geluidreducties onderzoek 1990



Metingen 2009

In 2009 zijn door Peutz laagfrequente geluidreductiemetingen uitgevoerd bij woningen in Hoofddorp-Noord. De metingen zijn deels uitgevoerd met een ruisbron als geluidbron en deels met grondgeluid van Schiphol (relatie hoge laagfrequente geluidmissieniveaus vanwege startende vliegtuigen vanaf de Polderbaan).

In tabel 4.4 is een samenvatting gegeven van deze laagfrequente geluidreductiemetingen. Bij de straatnamen van de gemeten locaties is tussen haakjes het oorspronkelijke bouwjaar van de woning gegeven.

t4.4 Gemeten laagfrequente geluidreducties woningen Hoofddorp

Omschrijving	Geluidreductie in dB, per tertsband (Hz)											
	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
Grondgeluidmetingen												
Antoniahoeve (1994)												
- slaapkamer	30	28	25	9	10	2	19	18	16	13	22	27
- zolderkamer	18	11	11	11	6	9	6	7	4	6	4	6
Louisahoeve (1994)												
- woonkamer	7	7	0	7	7	9	13	15	18	16	18	(9)
- slaapkamer	26	30	20	13	12	5	3	12	13	12	14	17
JC Beetslaan (voor 1970)												
- woonkamer	8	6	13	19	13	9	9	12	11	14	15	19
- slaapkamer	23	16	20	18	20	12	7	x	13	15	18	16
Ruisbronmetingen												
Louisahoeve (1994)												
- woonkamer	-	-	x	15	9	14	17	17	15	20	19	-
- slaapkamer	-	-	13	10	11	14	12	16	16	12	14	-
Houtwijkerveld (1981)												
- woonkamer	-	-	15	15	11	10	18	16	17	16	14	-
- slaapkamer	-	-	x	10	13	18	20	10	8	10	11	-
Landleeuw (1990)												
- woonkamer	-	-	11	8	11	0	8	16	13	18	21	-
- slaapkamer	-	-	28	12	19	21	15	15	18	19	26	-

Metingen 2022

In 2022 zijn door Peutz laagfrequente geluidreductiemetingen uitgevoerd bij woningen in Gouda. De metingen zijn uitgevoerd met een ruisbron als geluidbron. In tabel 4.5 is een samenvatting gegeven van de deze laagfrequente geluidreductiemetingen.

t4.5 Gemeten laagfrequente geluidreducties woningen Hoofddorp

Omschrijving	Geluidreductie in dB, per tertsbands (Hz)								
	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160
Oudebrugweg (1890)									
- woonkamer	7	13	15	20	16	13	200	21	20
- slaapkamer	15	9	13	13	16	15	17	18	20
Schooltuinen (2016)									
- woonkamer	18	9	16	22	21	20	14	15	13
Schooltuinen (2016)									
- keuken	18	9	14	29	34	20	29	20	20
- slaapkamer	17	11	21	19	23	30	27	27	21
- woonkamer	19	9	14	28	20	19	22	24	22
Schooltuinen (2016)									
- woonkamer	15	5	15	19	25	23	19	17	14
- slaapkamer	16	9	15	12	14	14	23	14	17
Gouderaksedijk (1878)									
- woonkamer	15	13	14	22	21	24	25	22	26
Gouderaksedijk (1910)									
- slaapkamer	9	12	11	14	13	13	18	21	22

4.3 Conclusies inzake laagfrequente geluidisolatie gevels

Er is slecht beperkt informatie beschikbaar over de laagfrequente geluidisolaties van woningen. In totaal zijn er zover bekend van 19 woningen de laagfrequente geluidreducties gemeten van een of meerdere ruimten. Bij het merendeel van de woningen zijn 2 ruimten onderzocht, namelijk een woonkamer en slaapkamer. Op basis van deze (enigszins beperkte) meetgegevens kan geen duidelijk verschil worden vastgesteld tussen de geluidreductie van woonkamer of slaapkamers. Tevens kunnen op basis van deze meetgegevens geen duidelijke verschillen worden aangegeven tussen woningen van voor 1970 of woningen die zijn gebouwd conform het huidige geldende Bouwbesluit (2012). Het is dan ook niet voor de hand liggend om hierin onderscheid te maken.

De gemeten laagfrequente geluidisolaties van gevels verschillen per woning en per vertrek zeer relevant van elkaar. De grote verschillen worden naar verwachting met name veroorzaakt door de resonanties van panelen/delen van de gevel en de afmetingen van de ontvangerruimte. Dit is onafhankelijk van het bouwjaar van de woning en/of onder welke bouwregels de woningen zijn gerealiseerd.

In tabel 4.6 is een overzicht gegeven van de gemiddelde (rekenkundig) laagfrequente geluidreductie over alle beschouwde woningen en ruimten.

In tabel 4.6 is ter vergelijking ook de laagfrequente geluidreductie van woningen uit de Deense norm opgenomen.

Op basis van de Nederlandse metingen is in navolging van de Deense norm ook de geluidreductie bepaald waaraan per tertsbands circa 67% van de Nederlandse onderzochte woningen voldoet. Deze geluidreductie, die in het vervolg van dit onderzoek beperkte geluidreductie wordt genoemd, is tevens in tabel 4.6 opgenomen.

t4.6 Laagfrequente geluidreducties

Betreft	Geluidreductie in dB voor de tertsbands in Hz								
	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
Rekenkundig gemiddelde Nederlandse woningen	13	13	11	12	14	15	15	17	18
67% van Nederlandse woningen voldoet hieraan	10	10	9	9	11	12	13	14	15
Conform Deense norm	6,6	8,4	10,8	11,4	13,0	16,6	19,7	21,2	20,2

Uit tabel 4.6 blijkt het volgende:

- De geluidreductie waar 67% van de Nederlandse woningen aan voldoet, is 2 à 3 dB lager dan de gemiddelde geluidreductie van de Nederlandse woningen.
- De geluidreductie conform de Deense norm is vanaf de 50 Hz tertsbands hoger dan de gemiddelde geluidreductie van de Nederlandse woningen.
- In de laagste tertsbands van het laagfrequente geluid zijn zowel de gemiddelde Nederlandse geluidreductie als de beperkte geluidreductie hoger dan de geluidreductie conform de Deense norm.

5 Berekeningen

5.1 Uitgangspunten

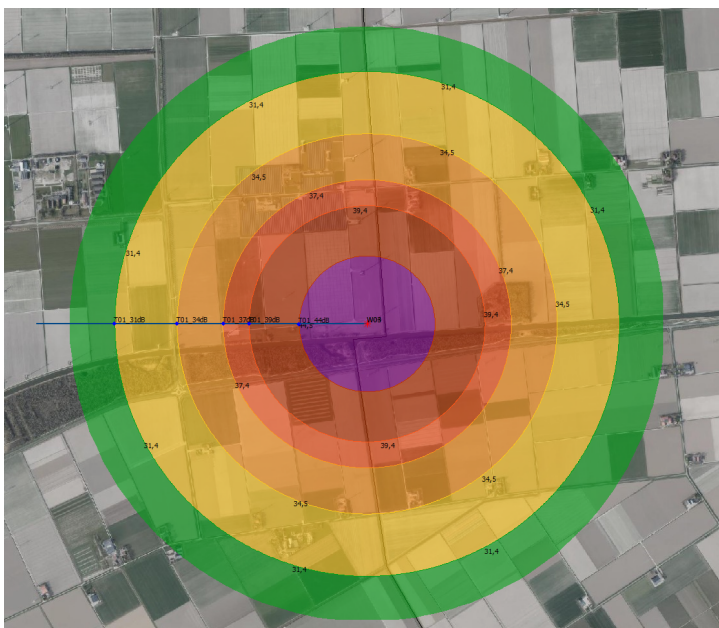
Uitgaande van de referentiespectra van de 8 MW referentie windturbine zonder en met serrations is met behulp van een akoestisch rekenmodel (GeoMilieu versie 2202.2) en de berekende $L_{E,night}$ voor een gemiddelde locatie in Nederland berekend op welke afstanden voldaan wordt aan een L_{night} van 44, 41, 39, 37, 34 en 31 dB. Dit komt overeen met respectievelijk 50, 47, 45, 43, 40 en 37 dB L_{den} . Hierbij zijn de volgende windturbine-opstellingen beschouwd:

- één solitaire windturbine;
- lijnopstelling van 5 windturbines;
- matrixopstelling van 3 rijen van 5 windturbines.

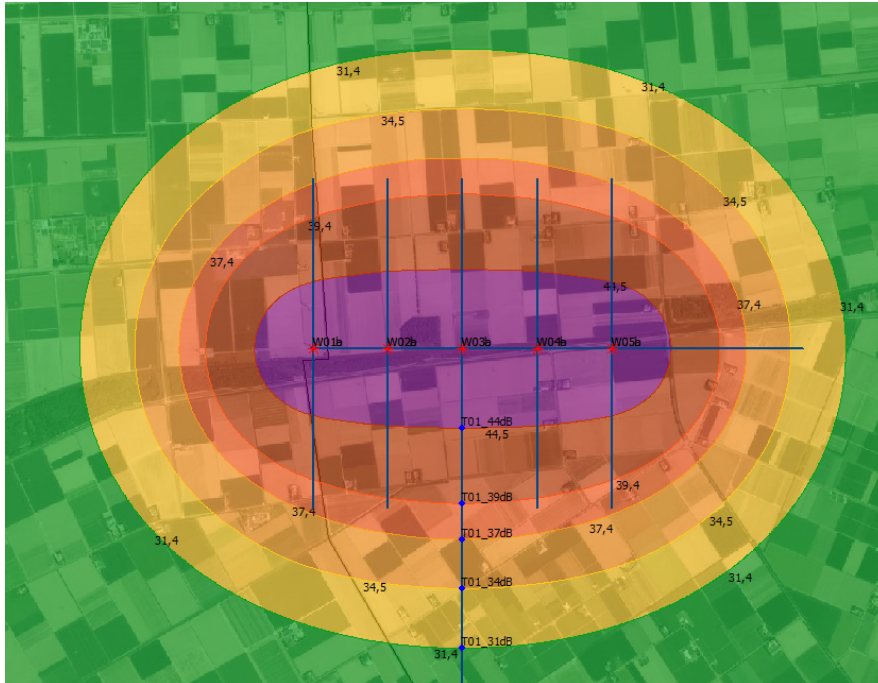
De onderlinge afstanden bij lijn- en matrixopstelling zijn gebaseerd op 3,75 keer de rotordiameter, hetgeen in praktijk normaliter varieert tussen 3,5 en 4 keer de rotordiameter.

In figuur 5.3 is (als voorbeeld) de berekende geluidcontour gegeven van een solitaire windturbine uitgaande van een 8M turbine exclusief serrations.

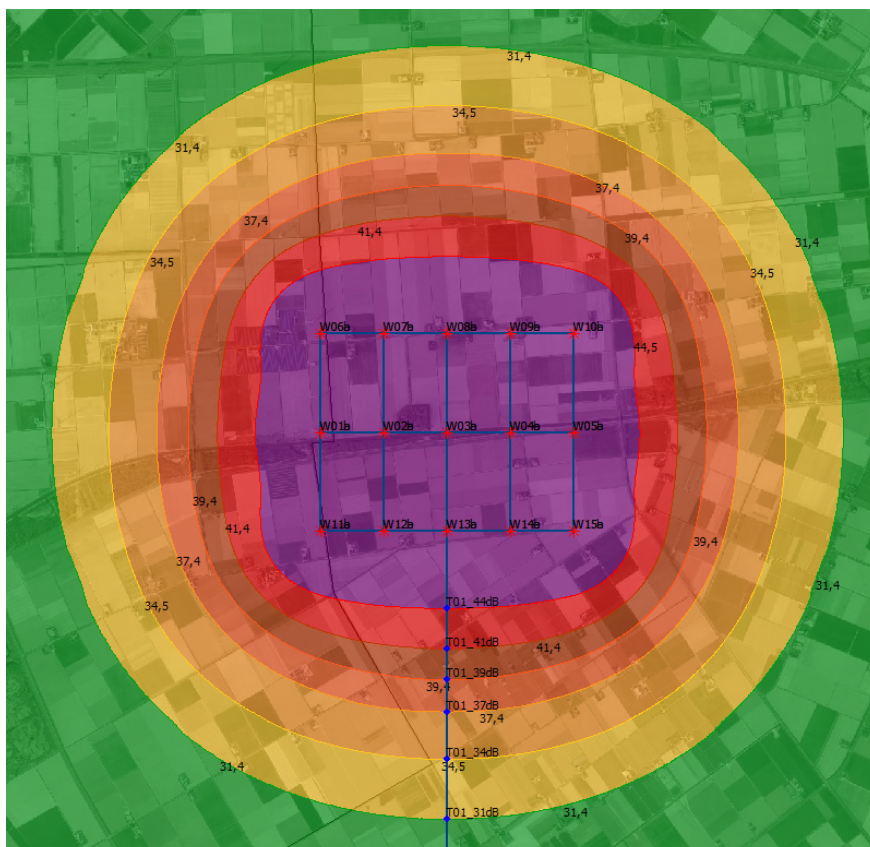
f5.1 Geluidcontouren (L_{night} in dB) solitaire windturbine (8 MW, zonder serrations)



f5.2 Geluidcontouren (Lnight in dB) 5 op lijn windturbines (8 MW, zonder serrations)



f5.3 Geluidcontouren (Lnight in dB) 15 in matrixopstelling windturbines (8 MW, zonder serrations)



5.2 Rekenresultaten

5.2.1 Windturbines zonder serrations

In tabel 5.1 is een overzicht gegevens van berekende afstanden tussen de locatie waarbij nog juist wordt voldaan aan een L_{night} van 31, 34, 37, 39, 41 en 44 dB en de meest nabijgelegen windturbine.

t5.1 Afstand in m tussen windturbine en locatie waarbij voldaan wordt aan L_{night} grenswaarde

Windturbine	Afstand in m tussen meest nabijgelegen windturbine en locatie waarbij voldaan wordt aan L_{night} grenswaarde					
	31 dB	34 dB	37 dB	39 dB	41 dB	44 dB
5 MW windturbine zonder serrations						
solitaire windturbine	1393	1042	784	640	517	362
5 in lijn opstelling	2093	1656	1278	1017	785	495
15 in matrixopstelling	2428	1871	1456	1166	908	572
8 MW windturbine zonder serrations						
solitaire windturbine	1698	1279	969	794	645	457
5 in lijn opstelling	2571	2058	1638	1332	1045	684
15 in matrixopstelling	2921	2310	1830	1500	1195	784

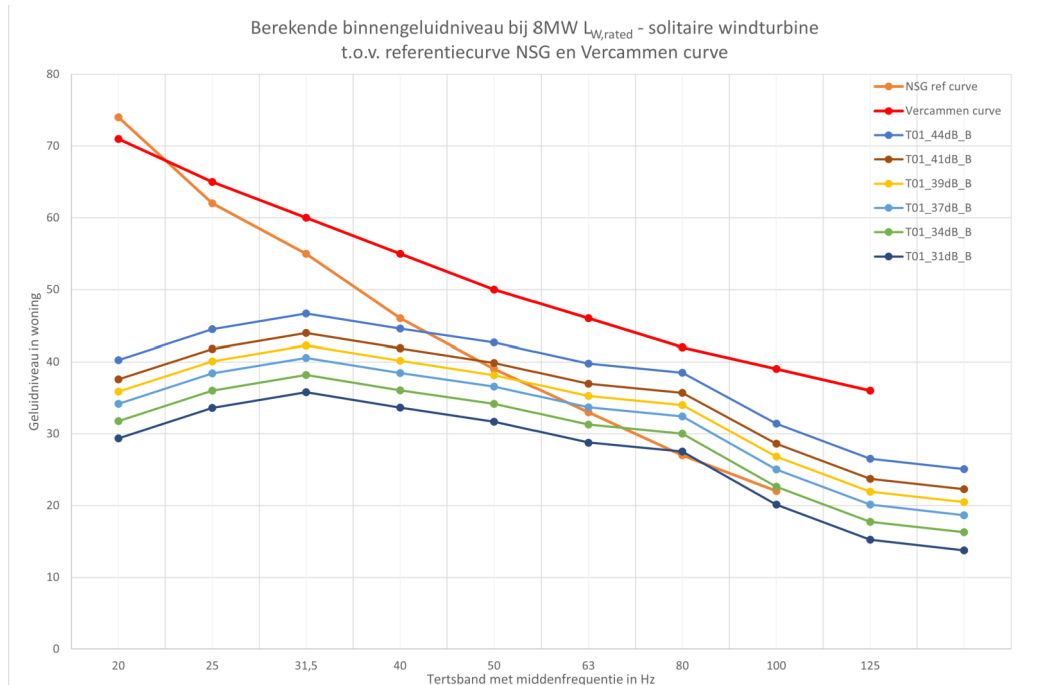
Uit tabel 5.1 blijkt dat de afstanden bij de 8 MW windturbine aanzienlijk groter zijn dan bij de 5 MW windturbine. Aangezien deze grotere afstanden door de frequentieafhankelijke overdracht leiden tot een relatief gezien hogere bijdrage van het laagfrequente geluidniveau aan het dB(A)-niveau zullen in het vervolg van het onderzoek uitsluitend de resultaten van diverse configuraties van een 8 MW windturbine worden gegeven.

In figuur 5.2 tot en met 5.4 zijn de berekende laagfrequente binnenniveaus spectraal weergegeven uitgaande van een windturbine zonder serrations in respectievelijk een solitaire opstelling, een 5 op lijnopstelling en 15 in matrixopstelling, waarbij wordt voldaan aan een grenswaarde van L_{night} van 31, 34, 37, 39, 41 en 44 dB (hetgeen overeenkomt met een L_{den} van 37, 40, 43, 45, 47 en 50 dB). Bij de bepaling van de binnenniveaus is uitgegaan van rekenkundig gemiddelde geluidisolatie van de Nederlandse woningen op basis van de beschikbare metingen (zie paragraaf 4.6). Tevens zijn in deze figuren ook de referentiecurve van de NSG richtlijn en de Vercammen-curve weergegeven.

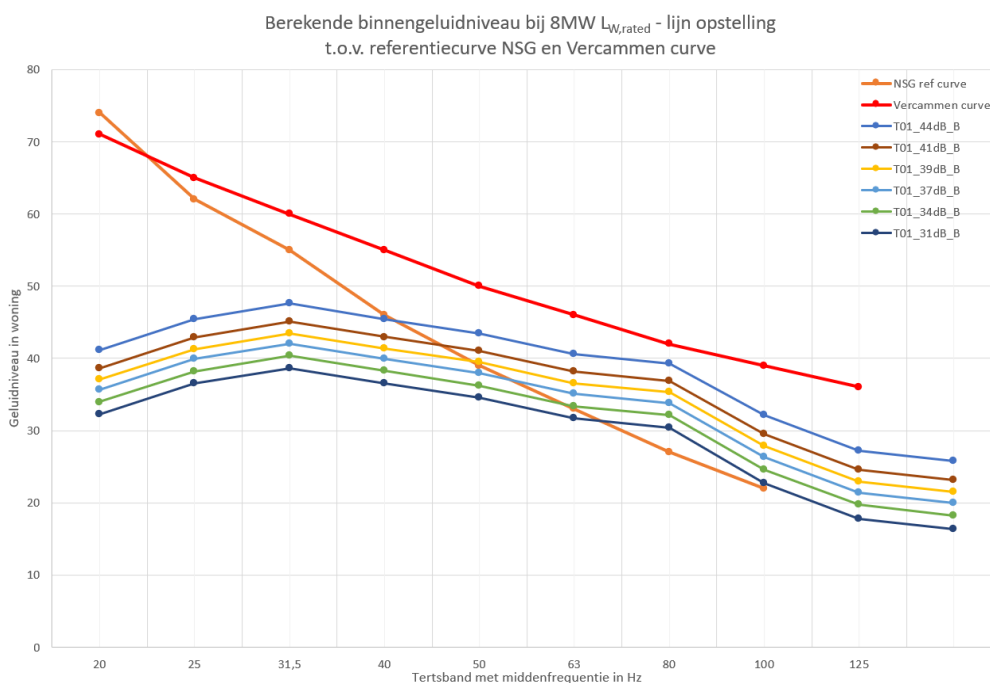
De berekende laagfrequente binnenniveaus uit de figuren 5.2 tot en met 5.4 hebben betrekking op de maximale laagfrequente binnenniveaus die kunnen optreden als de desbetreffende windturbine of combinatie van windturbines in bedrijf is respectievelijk zijn bij P_{rated} . Hierdoor wordt er inzicht gegeven of er op enig moment sprake kan zijn van

hoorbaarheid c.q. hinder door laagfrequent geluid. De jaargemiddelde laagfrequente geluidniveaus zijn lager dan de gegeven binnenniveau in de figuren 5.2 tot en met 5.4.

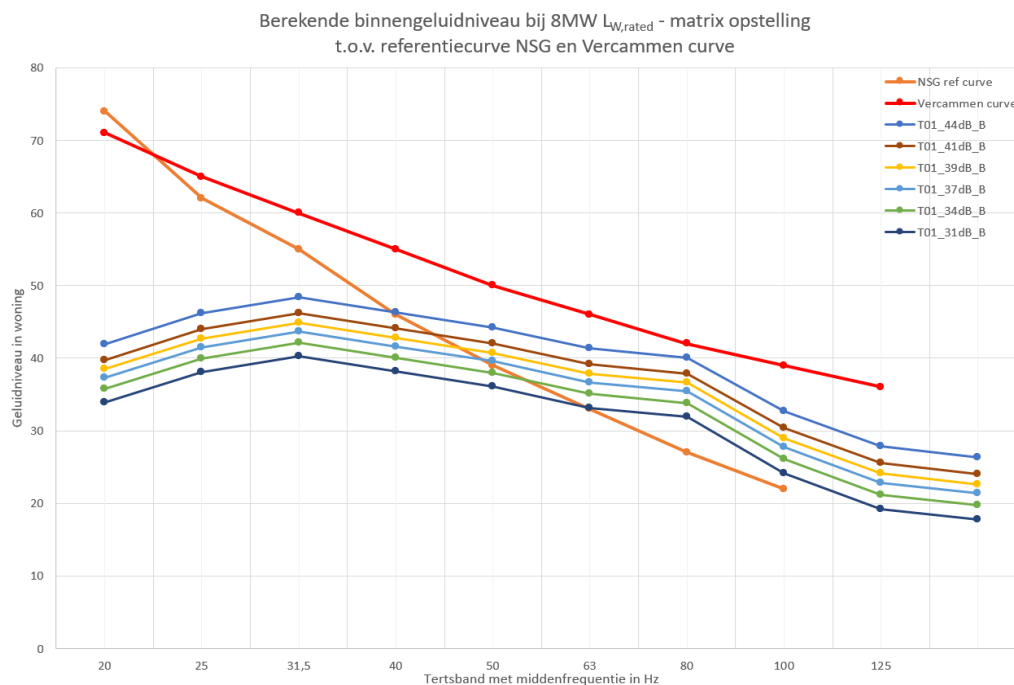
f5.2 Binnenniveau ten gevolge van solitaire windturbine zonder serrations



f5.3 Binnenniveau ten gevolge van 5 op lijn windturbines zonder serrations



f5.4 Binnenniveau ten gevolge van 15 matrix opgestelde windturbine zonder serrations



Uit de figuren 5.2 tot en met 5.4 blijkt het volgende:

- Op alle beschouwde afstanden bij zowel een solitaire windturbine, een 5 op lijn opstelling als een 15 in matrixopstelling is er sprake van een berekend binnengeluidniveau dat hoger is dan de NSG referentiecurve. De grootste overschrijding van de NSG referentiecurve treedt op in de 80 Hz tertsbands. Er zal naar verwachting dus sprake zijn van hoorbaar laagfrequent geluid indien de windturbine of combinatie van windturbines op P_{rated} in bedrijf is respectievelijk zijn.
- Op geen van de beschouwde afstanden is er sprake van overschrijding van de Vercammen-curve. Op basis hiervan mag verwacht worden dat er in het algemeen geen relevante hinder ten gevolge van laagfrequent geluid zal optreden.

5.2.2 Windturbines met serrations

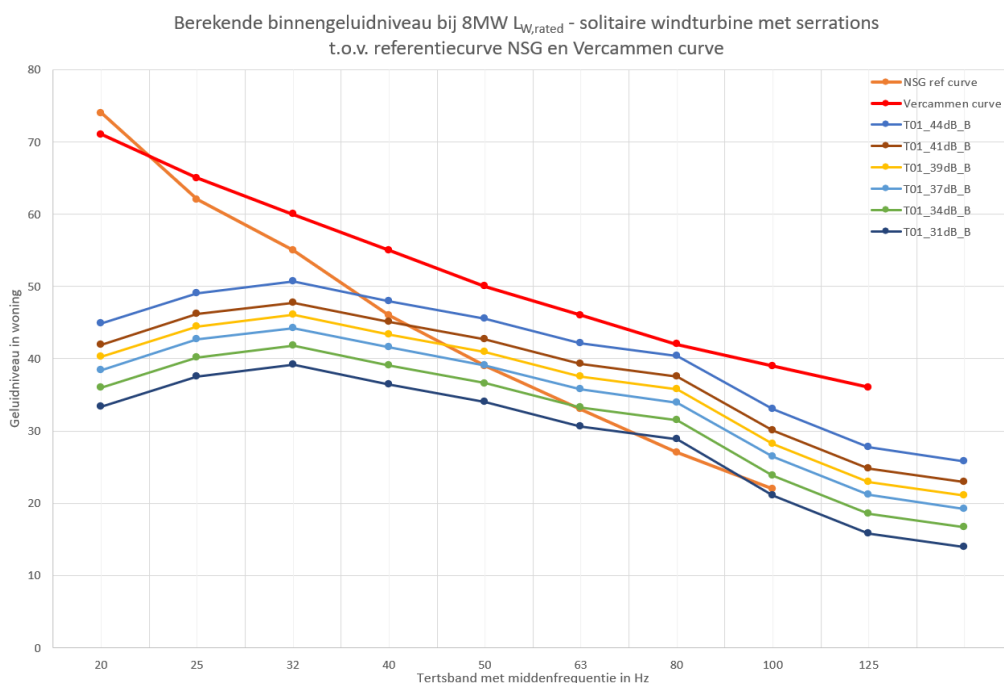
In tabel 5.5 is een overzicht gegevens van berekende afstanden tussen de locatie waarbij nog juist wordt voldaan aan een L_{night} van 31, 34, 37, 39, 41 en 44 dB en de meest nabijgelegen windturbine met serrations.

t5.5 Afstand tussen windturbine met serrations en locatie waarbij voldaan wordt aan L_{night} grenswaarde

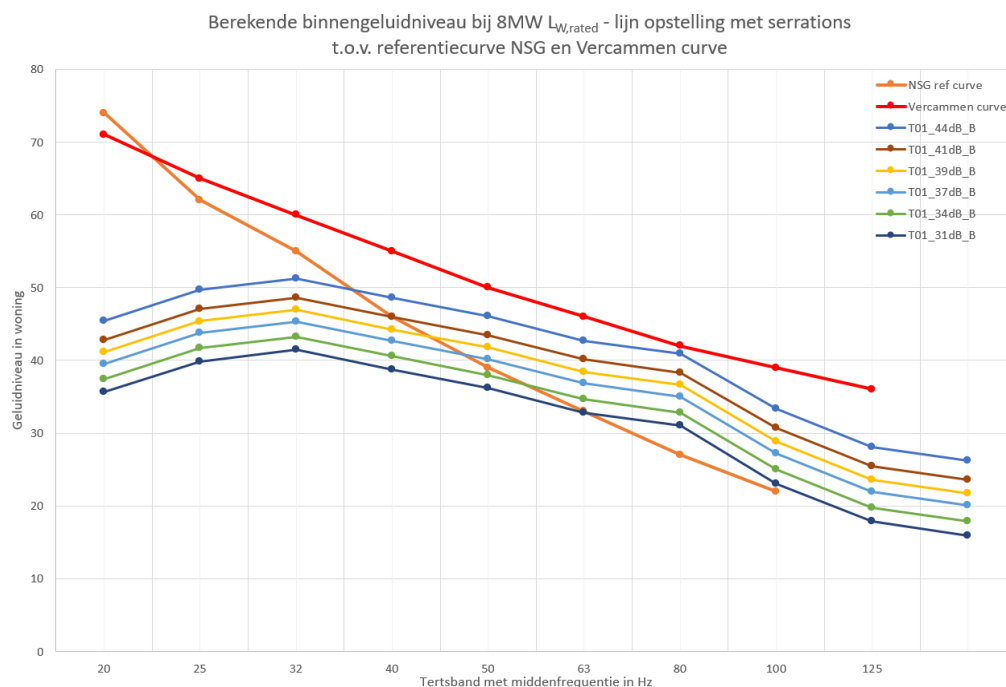
Windturbine	Afstand in m tussen meest nabijgelegen windturbine en locatie waarbij voldaan wordt aan L_{night} grenswaarde					
	31 dB	34 dB	37 dB	39 dB	41 dB	44 dB
8 MW met serrations						
solitaire windturbine	1.372	1.012	753	606	484	327
5 in lijn opstelling	2.213	1.747	1.284	996	748	459
15 in matrixopstelling	2.810	2.191	1.474	1.151	871	523

In figuur 5.6 tot en met 5.8 zijn met de gelijke uitgangspunten als in paragraaf 5.2.2, de laagfrequente binnenniveaus spectraal weergegeven uitgaande van een windturbine met serrations.

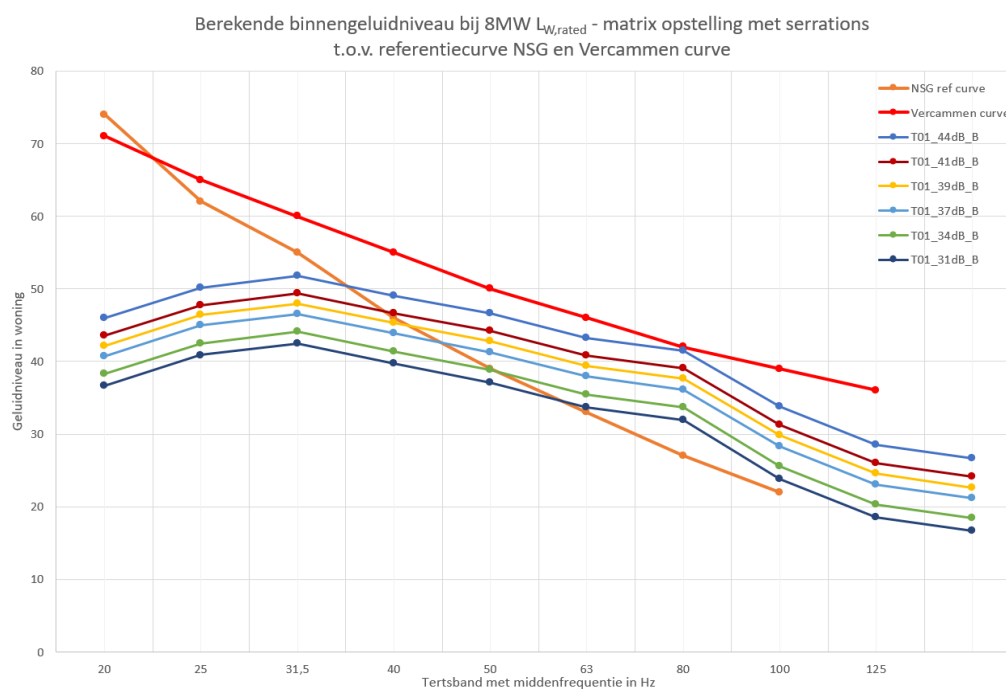
f5.6 Binnenniveau ten gevolge van een solitaire windturbine met serrations



f5.7 Binnenniveau ten gevolge van 5 op lijn opgestelde windturbines met serrations



f5.8 Binnenniveau ten gevolge van 15 in matrix opgestelde windturbines met serrations



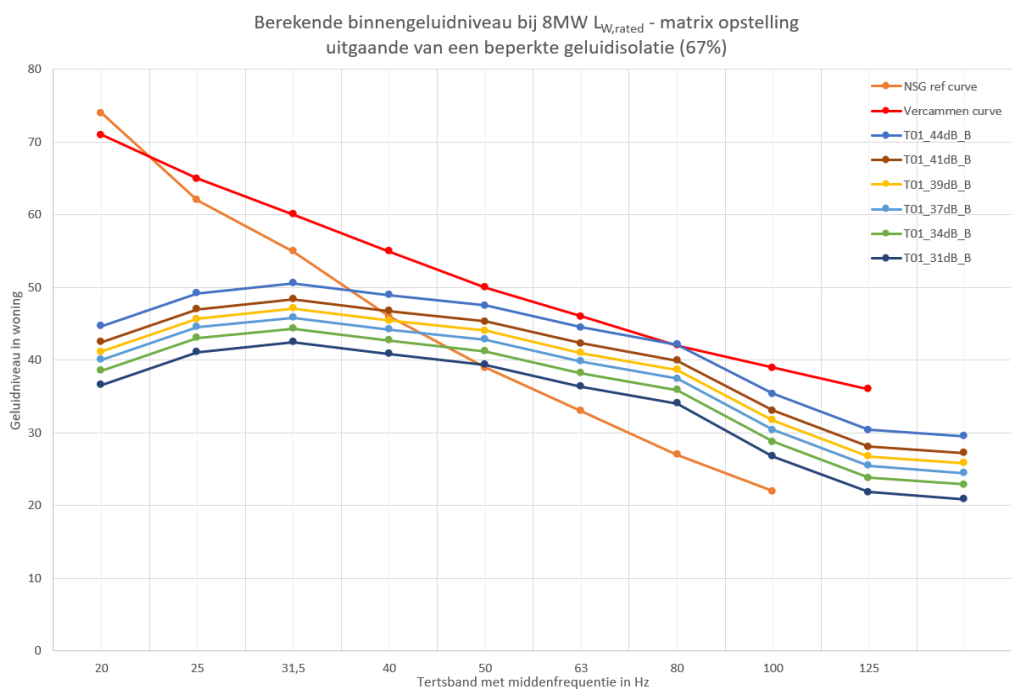
Uit de figuren 5.6 tot en 5.8 blijkt het volgende:

- Bij de windturbines met serrations zijn de laagfrequente geluidniveaus circa 2 dB hoger dan bij de windturbines zonder serrations.
- Bij de windturbines met serrations is ook op alle beschouwde afstanden het berekende binnengeluidniveau hoger dan de NSG referentiecurve. De grootste overschrijding treedt, gelijk aan de situatie van windturbines zonder serrations, op in de 80 Hz tertsband.
- Er zal naar verwachting dus sprake zijn van hoorbaar laagfrequent geluid voor een deel van groep personen die gevoelig is voor laagfrequent geluid indien de windturbine of combinatie van windturbines op P_{rated} in bedrijf is respectievelijk zijn.
- Op geen van de beschouwde afstanden is er sprake van overschrijding van de Vercammen-curve. Op basis hiervan mag verwacht worden dat er in het algemeen geen relevante hinder ten gevolge van laagfrequent geluid zal optreden in de beschouwde situaties.

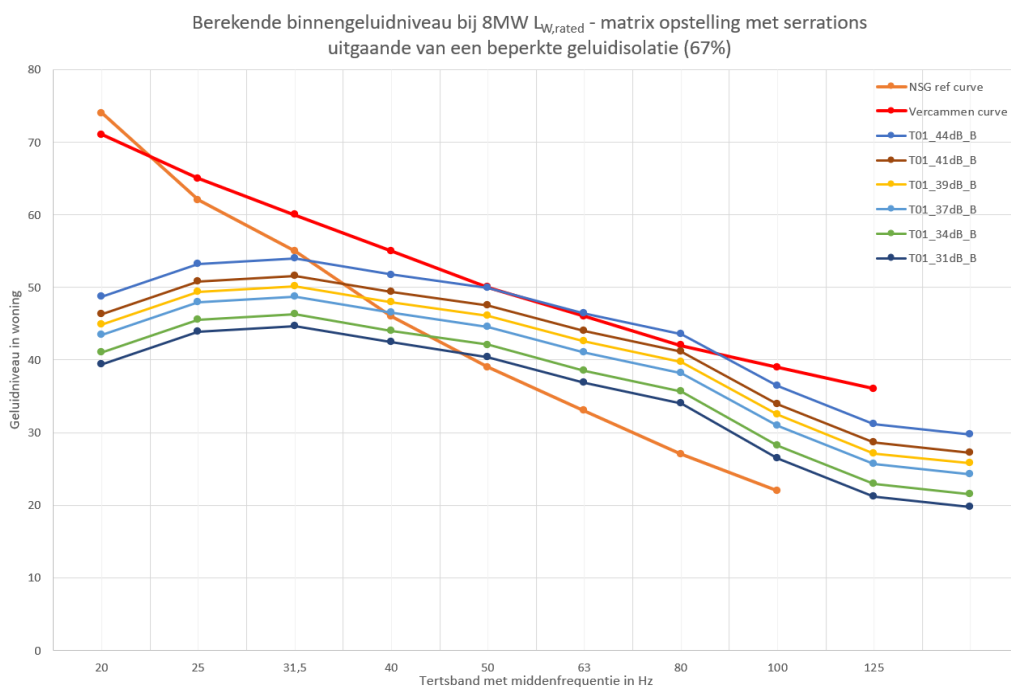
5.2.3 Binnenniveau bij beperkte laagfrequente geluidisolatie

In de voorgaande paragrafen zijn de berekende laagfrequente binnenniveaus gegeven uitgaande van de gemiddelde geluidwering van de Nederlandse woningen. Indien in navolging van de Deense laagfrequente norm wordt uitgegaan van een geluidwering waaraan door ten minste 67% van de Nederlandse woningen wordt voldaan, zullen er enigszins hogere binnenniveaus kunnen optreden. Om deze verschillen als gevolg van de verminderde geluidwering inzichtelijk te maken zijn voor de situatie 15 windturbines in matrixopstelling (situatie met het meeste laagfrequente geluid) tevens de binnenniveaus berekend uitgaande van de geluidreductie waaraan ten minste 67% van de Nederlandse woningen voldoet. In figuur 5.9 zijn de binnenniveaus voor de situatie met windturbines zonder serrations en in figuur 5.10 voor de situatie met windturbines met serrations weergegeven.

f5.9 Binnenniveau uitgaande van beperkte geluidwering ten gevolge van 15 in matrix opgestelde windturbines zonder serrations



f5.10 Binnenniveau uitgaande van beperkte geluidwering ten gevolge van 15 in matrix opgestelde windturbines met serrations



Uit de figuren 5.9 en 5.10 blijkt het volgende:

- Bij de windturbines in matrixopstelling zowel zonder serrations als met serrations is er sprake van een beperkte overschrijding van de Vercammen-curve in de 80 Hz tertsband tijdens het in bedrijf zijn van de windturbines op P_{rated} op een afstand waar voldaan wordt aan 44 dB L_{night} (= 50 dB L_{den}).
- Op alle overige beschouwde afstanden wordt er wel voldaan aan de Vercammen-curve.
- Er kan op enig moment dus sprake zijn van hinder door laagfrequent geluid in deze "worst case"-situatie (windturbines met veel laagfrequent geluid in bedrijf op P_{rated} , 15 windturbines in matrixopstelling, beperkte geluidisolatie voor laagfrequent geluid) waarbij wordt uitgegaan van een grenswaarde van 50 dB L_{den} . Bij toepassing van de overige grenswaarden zal er met deze "worst case"-uitgangspunten in het algemeen geen sprake zijn van relevante hinder door laagfrequent geluid.

5.3 Beoordeling aan Deense norm en concept Ierse richtlijn

In tabel 5.11 is overzicht gegeven van het berekende laagfrequente geluid (L_{pALF} , het A-gewogen geluidniveau voor het frequentiegebied van 10 tot en met 160 Hz) conform de Deense norm. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De norm geldt bij een windsnelheid van 6 en 8 m/s op 10 meter hoogte. Bij een windsnelheid van 8 m/s op 10 m hoogte wordt aangenomen dat de maximale geluidproductie van de windturbine plaatsvindt ($L_{\text{WR, rated}}$). Dit kan als een "worst case"-uitgangspunt worden beschouwd;
- De voorgeschreven geluidwering van de woningen uit de Deense norm is gehanteerd;
- Het L_{pALF} is bepaald vanaf de 20 Hz tertsband.
- Voor de overdracht van het geluid van de windturbines naar de omgeving is gebruikgemaakt van het Nederlandse rekenvoorschrift (bijlage 4 bij de Regeling algemene regels voor inrichtingen milieubeheer).

t5.11 Laagfrequent geluid (L_{pALF}) conform Deense norm

Situatie waarbij wordt voldaan aan :	L_{pALF} in dB(A)					
	Windturbine zonder serrations			Windturbine met serrations		
	solitair	5 op lijn	15 in matrix	solitair	5 op lijn	15 in matrix
$L_{\text{night}} = 31$ dB	8	11	13	11	13	14
$L_{\text{night}} = 34$ dB	11	13	15	13	15	15
$L_{\text{night}} = 37$ dB	13	15	17	16	17	18
$L_{\text{night}} = 39$ dB	15	16	18	18	18	19
$L_{\text{night}} = 41$ dB	17	18	19	19	20	20
$L_{\text{night}} = 44$ dB	20	20	21	22	23	23

Uit tabel 5.11 blijkt dat alleen in de situatie bij een 5 in lijn opstelling en een 15 in matrixopstelling er overschrijding van de grenswaarde van 20 dB(A) optreedt indien wordt uitgegaan van een grenswaarde van 44 dB L_{night} (= 50 dB L_{den}). Uitgaande van alle overige

grenswaarden treden er geen overschrijdingen van de Deense laagfrequente geluidgrenswaarde op.

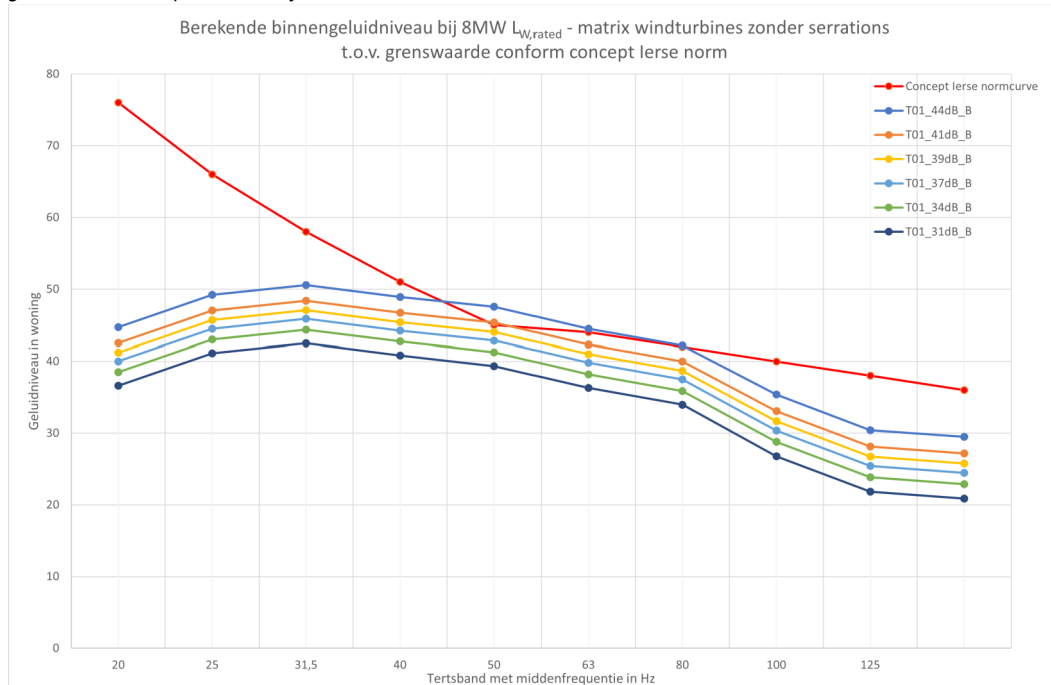
Conform de concept Ierse richtlijn dient het ongewogen gemeten L_{90} (het gemeten geluidniveau dat 90% van de tijd wordt overschreden) over 10 minuten te voldoen aan de grenswaarde per tertsband zoals deze is gegeven in hoofdstuk 2. Voorts is in deze ontwerp richtlijn aangegeven dat het voor de modellering van het geluid van windturbines redelijk wordt geacht om een conversiefactor van $L_{A90} = L_{Aeq} - 2\text{dB}$ te hanteren voor het converteren van het equivalente geluidniveau (L_{Aeq}) te converteren naar het L_{A90} -niveau. Deze conversiefactor wordt in dit onderzoek ook toegepast op het ongewogen geluidniveau, waarbij niet de berekende equivalente binnenniveaus met 2 dB zijn verlaagd, maar de grenswaarde voor het L_{90} met 2 dB verhoogd alvorens deze te gebruiken voor de toetsing van het equivalente binnenniveau.

In de figuren 5.12 en 5.13 zijn de berekende equivalente binnenniveaus voor de 15 in matrix opgestelde windturbines – uitgaande van beperkte geluidwering (situatie met het hoogste laagfrequent geluidniveau) – zonder en met serrations getoetst aan de grenswaarde uit de concept Ierse richtlijn.

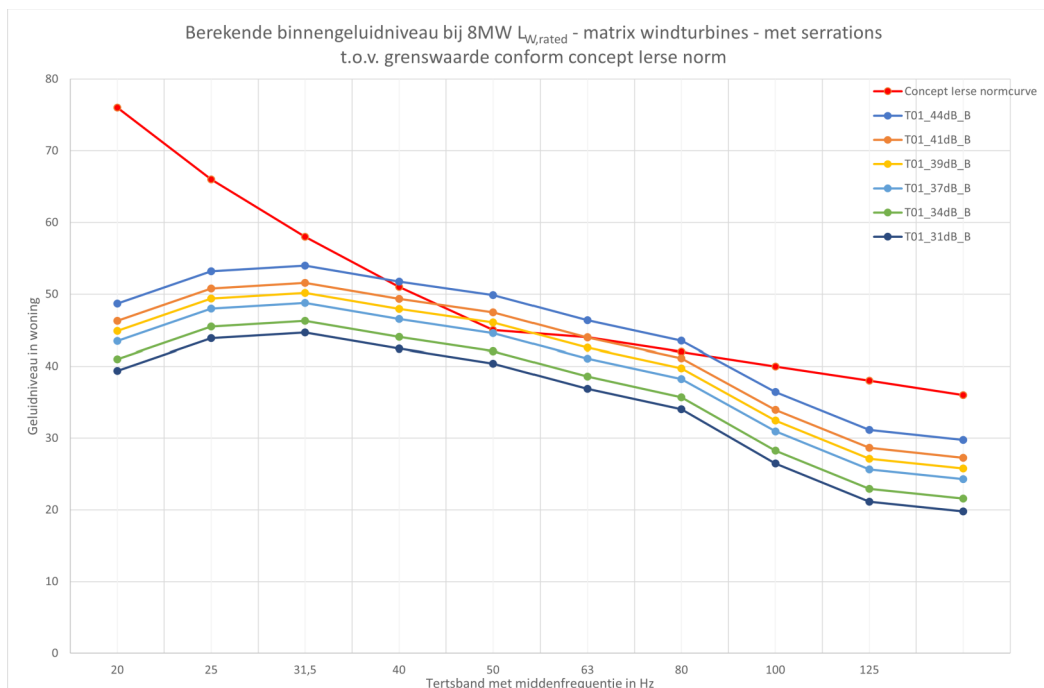
Uit figuur 5.12 blijkt dat windturbines in een matrixopstelling zonder serrations kunnen voldoen aan de concept Ierse richtlijn indien voldaan wordt aan een grenswaarde van 41 dB L_{night} (= 47 dB L_{den}), alleen in de situatie dat voldaan wordt aan een grenswaarde van 44 dB L_{night} is er sprake van overschrijding van de concept Ierse richtlijn.

In de "worst case"-situatie (windturbine in matrixopstelling, windturbines met serrations, beperkte LFG geluidwering) treedt er reeds een overschrijding van de concept Ierse richtlijn op vanaf het voldoen aan een grenswaarde van 39 dB L_{night} .

f5.12 Binnenniveau t.g.v. 15 in matrix opgestelde windturbines zonder serrations uitgaande van beperkte LFG geluidwering getoetst aan concept lerse richtlijn



f5.13 Binnenniveau t.g.v. 15 in matrix opgestelde windturbines met serrations uitgaande van beperkte LFG geluidwering getoetst aan concept lerse richtlijn



6 Conclusies

Het geluidsspectrum van een moderne windturbine is min of meer vergelijkbaar met het spectrum overige geluidbronnen die enigszins een laagfrequent geluidkarakter hebben, zoals wegverkeerslawaai en industrielawaai. Door adequate toepassing van serrations bij een windturbine wordt de totale geluidemissie van een windturbine qua dB(A)-niveau gereduceerd, maar bevat het spectrum relatief gezien wel meer laagfrequent geluid.

Er is beperkt informatie beschikbaar over de laagfrequente geluidisolatie van woningen. Op basis van deze informatie is niet eenduidig vast te stellen of de laagfrequente geluidisolatie van jaren 70 woningen verschilt van moderne woningen die voldoen aan het Bouwbesluit. Vooral nog is uitgegaan van een gemiddelde laagfrequente geluidisolatie van alle in Nederland bekende gemeten woningen.

Uitgaande van een gemiddelde laagfrequente geluidisolatie treden er in de beschouwde situaties laagfrequente geluidniveaus binnen woningen op die de NSG referentiecurve (deels) overschrijden. Er kan dus in de onderzochte situaties op enig moment sprake zijn van hoorbaar laagfrequent geluid in woningen voor een deel van de groep personen die gevoelig is voor laagfrequent geluid. In de onderzochte situaties is er echter geen sprake van overschrijding van de Vercammen-curve. Op basis hiervan mag verwacht worden dat er in het algemeen geen relevante hinder ten gevolge van laagfrequent geluid zal optreden.

Indien er wordt uitgegaan van een beperkte laagfrequente geluidwering van een woning kan er op enig moment sprake zijn van overschrijding van de Vercammen-curve indien wordt uitgegaan van een grenswaarde van 44 dB L_{night} (50 dB L_{den}) en windturbines met serrations. In alle overige onderzochte situaties (bij windturbines zonder serrations en/of in situaties waarbij voldaan wordt aan een grenswaarde van 41 dB L_{night} (47 dB L_{den})) wordt wel aan de Vercammen-curve voldaan. Ook voor deze situatie mag verwacht worden dat er in het algemeen geen relevante hinder ten gevolge van laagfrequent geluid zal optreden.

Van alle onderzochte situaties overschrijdt alleen de situatie met serrations waarbij voldaan wordt aan een grenswaarde van 44 dB L_{night} (50 dB L_{den}), de Deense norm. Alle overige onderzochte situaties voldoen wel aan de Deense norm.

Samenvattend kan in algemene zin worden gesteld dat er sprake kan zijn van enig hoorbaar laagfrequent geluid in woningen, doch dat hinder ten gevolge van laagfrequent geluid beperkt zal zijn als een grenswaarde van 41 dB L_{night} (= 47 dB L_{den}) wordt gerespecteerd.

Zoetermeer,



Dit rapport bevat 35 pagina's.