Notitie **TNO 2021 M11123**

Environment & Sustainability
Oude Waalsdorperweg 63
2597 AK Den Haag
Postbus 96864
2509 JG Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 10 00
F +31 70 328 09 61

Aan
Gemeente Oosterhout
t.a.v. 5.1,2,e

Van
5.1,2,e

Onderwerp
Laagfrequent geluid van windturbines in de gemeente Oosterhout

Datum
22 juni 2021

Onze referentie
DHW-2021-AS-100340274

Projectnummer
060.49139

E-mail
5.1,2,e

Doorkiesnummer
5.1,2,e

Inhoud

1. Samenvatting
2. Methodes voor de beoordeling van geluid van windturbines
3. Berekening voor Energiepark A59
4. Referenties
Bijlage A: details van de berekening
Bijlage B: resultaten voor de veertien toetspunten

1 Samenvatting

Energieleverancier Eneco heeft het voornemen om twee nieuwe windturbines te bouwen die onderdeel vormen van het Energiepark A59 in de gemeente Oosterhout, direct ten zuiden van rijksweg A59, aan de oostzijde van het Wilhelminakanaal. Pondera Consult heeft de ruimtelijke onderbouwing geschreven voor de vergunningverlening [1]. De nieuwe windturbines zijn hoger[1] dan zes nabijgelegen, bestaande windturbines op bedrijventerrein Weststad III, aan de westzijde van het Wilhelminakanaal[2].

De ruimtelijke onderbouwing bevat een akoestisch onderzoek, waarbij ook het aspect laagfrequent geluid is beschouwd. Volgens het rapport is geen aparte kwantitatieve beoordeling van laagfrequent geluid nodig, omdat dit al wordt afgedekt door de toetsing aan grenswaarden voor het windturbinegeluid.

---

1 Het akoestisch onderzoek bij de ruimtelijke onderbouwing gaat uit van een type windturbine met een ashoogte van 154 m en een tiphoogte van 235 m. De as- en tiphoogten van de bestaande windturbines zijn respectievelijk 100 en 145 m.

2 Hoewel Eneco ook eigenaar is van de windturbines op bedrijventerrein Weststad III en er volgens [1] sprake is van een landschappelijke en visuele samenhang in een cluster van windturbines, behoren volgens Pondera Consult de nieuwe en bestaande windturbines op inrichtingsniveau volgens de Wet milieubeheer niet tot dezelfde inrichting. Zie [1], paragraaf 1.4.

Op verzoek van de gemeente Oosterhout heeft TNO een onafhankelijk onderzoek ('second opinion') uitgevoerd naar het laagfrequente geluid (tussen 20 en 100 Hz) van de windturbines. De aanleiding hiervoor is de bezorgdheid van omwonenden over de gevolgen van laagfrequent geluid voor de gezondheid.

In paragraaf 2 wordt een kort overzicht gepresenteerd van de beoordeling van windturbinegeluid en de mogelijke extra hinder door laagfrequent geluid van windturbines op basis van literatuur over dit onderwerp, die is opgenomen in de referentielijst (paragraaf 4). Uit die literatuur blijkt dat er (momenteel) geen bewijs is dat de huidige grenswaarden voor windturbinegeluid onvoldoende bescherming bieden tegen laagfrequent geluid.

In paragraaf 3 worden resultaten gepresenteerd van berekeningen van laagfrequent geluid van de nieuwe en bestaande windturbines voor de situatie in Oosterhout. TNO heeft geluidberekeningen uitgevoerd voor de veertien toetspunten uit het onderzoek van Pondera Consult [1], waarbij de akoestische bronsterkten (geluidproductie) van de windturbines uit het onderzoek van Pondera Consult zijn overgenomen[3]. De resultaten worden getoetst volgens twee in Nederland gangbare, maar niet wettelijk vastgelegde methodes: de methode van de NSG (Nederlandse stichting geluidshinder) en de methode van Vercammen. Beide zijn opgesteld om apart rekening te houden met laagfrequent geluid. De NSG geeft een frequentie-afhankelijk geluidniveau (de NSG-curve) waarboven het laagfrequente geluid hoorbaar is. De tweede methode werkt met de Vercammen-curve, die het niveau aangeeft waarbij een bepaalde kans op hinder (volgens Vercammen 3 tot 10%[4]) door laagfrequent geluid optreedt.

Voor de vergelijking tussen de resultaten van de berekeningen en de bovengenoemde curves zijn zowel de huidige als de toekomstige situatie van belang. Op vijf van de veertien toetspunten[5] is er in de bestaande situatie al een overschrijding van de NSG-curve en op één van deze vijf punten is er een overschrijding van de Vercammen-curve. In de toekomstige situatie is er (vanzelfsprekend) op dezelfde vijf punten een overschrijding van de NSG-curve, en komen er drie punten met een overschrijding bij. De toekomstige situatie leidt niet tot overschrijdingen van de Vercammen-curve op andere punten dan het punt waar in de bestaande situatie al een overschrijding is.

Hieruit concluderen we dat de nieuwe windturbines kunnen zorgen voor laagfrequent geluid dat binnenshuis hoorbaar kan zijn, maar dat de kans op hinder door laagfrequent geluid volgens de methode met toetsing aan de Vercammen-curve klein is in 13 van de 14 toetspunten in het onderzoek van Pondera Consult.

---

3 De bronsterkte varieert met de windsterkte. Er is uitgegaan van de gemiddelde akoestische bronsterkte gedurende de nachtperiode, die volgens de gegevens van de fabrikant 2 dB lager is dan de maximale bronsterkte.

4 We hebben geen literatuur kunnen vinden waarin de relatie tussen de curve en de kans op hinder wordt onderbouwd.

5 Van deze vijf punten liggen er volgens het rapport van Pondera Consult [1] vier binnen een gezoneerd industrieterrein.

Het enige punt (toetspunt 6) waar de overschrijding van de Vercammen-curve optreedt is tevens het punt met de hoogste geluidbelastingen L_{den} en L_{night} door windturbinegeluid, die in de bestaande situatie al hoger zijn dan de grenswaarden. De nieuwe windturbines zorgen hier niet voor een significante toename, omdat in de toekomstige situatie het geluid van de bestaande windturbines in het betreffende punt dominant is.

Volgens de berekeningen van Pondera Consult is er naast punt 6 een tweede punt (toetspunt 5) waar de geluidbelasting L_{den} door windturbinegeluid in de toekomstige situatie hoger is dan 47 dB[6]. De nieuwe windturbines zorgen hier voor een toename van L_{den} van 47 naar 49 dB en van L_{night} van 41 naar 43 dB[7].

2 Methodes voor de beoordeling van geluid van windturbines

In deze paragraaf wordt een kort overzicht gegeven van
i) grenswaarden voor de beoordeling van geluid van windturbines,
ii) twee methodes voor aparte beoordeling van het laagfrequente geluid van windturbines.

Hierbij wordt verwezen naar relevante literatuur over geluidhinder door windturbines. In paragraaf 3 worden de twee beoordelingsmethodes voor laagfrequent geluid toegepast op de bestaande en toekomstige windturbines.

2.1. Geluid van windturbines en het menselijk gehoor

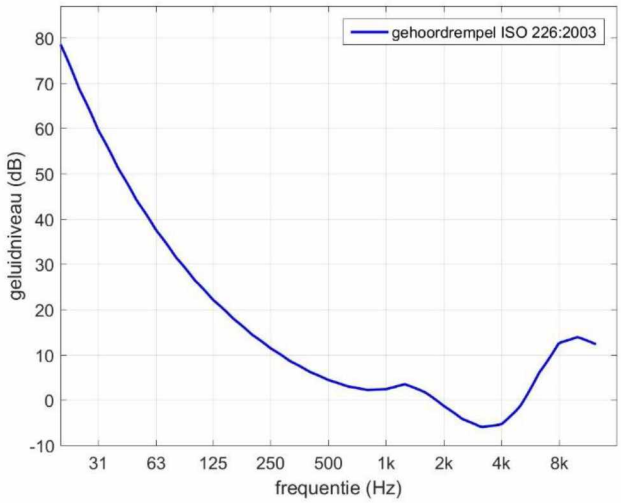
Geluid van windturbines heeft een breed frequentiespectrum. Dit betekent dat het lage en hoge tonen bevat, met frequenties van typerend 20 Hz tot 10 kHz. Het deel van het spectrum van 20 tot 100 Hz wordt gewoonlijk aangeduid als laagfrequent geluid.

Figuur 1 toont een grafiek waarin de gemiddelde gehoordrempel van jonge, gezonde mensen is weergegeven. Hieruit blijkt dat het geluidniveau van een laagfrequente toon met een frequentie van bijvoorbeeld 31 Hz ongeveer 60 dB moet zijn om gehoord te worden, terwijl dat bij 1000 Hz ongeveer 2 dB is. Met andere woorden, het menselijk gehoor is minder gevoelig voor lage tonen dan voor hoge tonen.

---

6 Volgens Pondera Consult geldt de grenswaarde van 47 dB bij geluidgevoelige bestemmingen voor de bijdrage tot L_{den} van alleen de nieuwe windturbines en niet voor het geluid van alle windturbines (bestaande en nieuwe) samen, omdat de twee nieuwe turbines een aparte inrichting zijn volgens de Wet milieubeheer. De grenswaarde is echter gekozen vanuit de belangenafweging tussen een aanvaardbare kans op geluidhinder en zoveel mogelijk potentiële locaties voor windenergie. Dan is het niet logisch dat de bescherming tegen geluidhinder afhankelijk is van de opdeling van een cluster van windturbines (zie ook voetnoot 2) in verschillende inrichtingen. Daarmee zou ook de kans op hinder door windturbinegeluid groter worden dan wat de wetgever toelaatbaar acht met het stellen van de grenswaarde van 47 dB.

7 Net als punt 6 ligt ook punt 5 volgens het rapport van Pondera Consult [1] binnen een gezoneerd industrieterrein en heeft het ook een hoge geluidbelasting door wegverkeer en industrie. De gecumuleerde geluidbelasting in punt 5 van alle geluidbronnen neemt door de komst van de nieuwe windturbines met 1 dB toe van 65 naar 66 dB [1].



Figuur 1. Gemiddelde gehoordrempel van jonge, gezonde mensen [2].

Bij de beoordeling van geluid wordt hiermee rekening gehouden. Dit gebeurt gewoonlijk door de zogeheten A-weging toe te passen. De A-weging corrigeert bij benadering voor de variatie van de gehoordrempel met de frequentie. Lage tonen krijgen een lager gewicht dan hoge tonen.

Geluid van windturbines bestaat niet uit een enkele toon, maar uit een breed spectrum van lage en hoge tonen. De A-gewogen geluidbelasting wordt berekend door de bijdragen van alle tonen (frequentiebanden) bij elkaar op te tellen, waarbij afhankelijk van de frequentie via de A-weging wordt gecorrigeerd voor de gehoordrempel.

2.2. Grenswaarden voor de beoordeling van geluid van windturbines

Voor de beoordeling van de effecten van windturbinegeluid worden twee verschillende A-gewogen geluidniveaus gebruikt [3]:

- het dag-avond-nacht-niveau (L_{den}) voor geluidhinder,
- nachtniveau (L_{night}) voor slaapverstoring.

Beide niveaus worden bepaald op de buitengevel van een woning. In het Activiteitenbesluit [4] is voor beide geluidniveaus van windturbinegeluid een grenswaarde vastgesteld, namelijk 47 dB voor L_{den} en 41 dB voor L_{night}.

De grenswaarden zijn bepaald op basis van:

- resultaten van onderzoeken naar hinder en slaapverstoring door windturbinegeluid [3],
- de belangenafweging tussen mogelijkheden voor het realiseren van windenergie enerzijds en het voorkomen van hinder anderzijds.

In de onderzoeken naar hinder en slaapverstoring door windturbinegeluid zijn gegevens geanalyseerd van een groot aantal mensen uit Zweden en Nederland. De waarde van 47 dB voor het dag-avond-nacht-niveau komt overeen met een gemiddelde kans op ernstige hinder van 8% binnenshuis en 19% buitenshuis[8,9,10]. De waarde van 41 dB voor het nachtniveau komt overeen met een gemiddelde kans op slaapverstoring van 26%.

2.3. Laagfrequent geluid van windturbines

Volgens Pondera Consult [1] wordt aan de grenswaarden van 47 en 41 dB voldaan en is er daarom geen reden om aan te nemen dat er nog extra hinder of slaapverstoring ontstaat door het laagfrequente geluid van de windturbines. Voor de onderbouwing hiervan verwijst Pondera Consult naar rapporten van het RIVM uit 2013 [7] en 2020 [8], een rapport van LBP uit 2013 [9] en een rapport van RIVM en GGD Amsterdam uit 2018.

In 2017 is een overzichtsartikel gepubliceerd over gezondheidseffecten van geluid van windturbines, inclusief laagfrequent geluid [10]. In 2020 is een update van deze studie gepubliceerd [8],[11]. In deze studies werd ook geconcludeerd dat er momenteel geen bewijs is voor extra hinder door het laagfrequente geluid van windturbines. Deze literatuur kan inderdaad worden beschouwd als een onderbouwing van de stelling dat de genoemde grenswaarden aan het A-gewogen geluidniveau voldoende bescherming bieden.

Er bestaan twee (niet wettelijk vastgelegde) methodes om wel apart rekening te houden met het laagfrequente geluid:

- een methode beschreven in de NSG-richtlijn voor laagfrequent geluid [12],
- een methode ontwikkeld door Vercammen [13].

Bij de eerste methode wordt voor verschillende frequenties tussen 20 en 100 Hz getoetst of het geluid hoorbaar is. Hierbij moeten geluidniveaus binnenshuis worden vergeleken met een curve, die we hier als NSG-curve aanduiden. De tweede methode werkt met een soortgelijke curve, maar deze representeert kans op hinder (volgens Vercammen 3 tot 10%[11]) in plaats van hoorbaarheid. Deze curve duiden we hier aan als Vercammen-curve.

---

8 De aanbeveling van de WHO in de huidige "Environmental Noise Guidelines for the European Region" is een grenswaarde voor L_{den} van 45 dB op basis van een prevalentie van 10% ernstig gehinderden [10].

9 In een recent onderzoek uit Canada werd gevonden dat het percentage met ernstige hinder (thuis, zonder onderscheid tussen binnenshuis en buitenshuis) bij niveaus van 40 tot 46 dB varieerde van 6% tot 20% [5]. In een Pools onderzoek werd een percentage van 23% met ernstige hinder binnenshuis gevonden voor niveaus van 48 tot 55 dB [6].

10 In kader 5.1 van het rapport van Pondera Consult [1] wordt gesteld dat de kans op ernstige hinder bij de grenswaarde van 47 dB overeenkomt met hetgeen bij de normering voor wegverkeersgeluid, railverkeersgeluid en industriegeluid als maximaal toelaatbaar wordt beschouwd. Bij verkeersgeluid is er naast de maximale waarde ook een voorkeursgrenswaarde, waarbij het percentage ernstige hinder lager is (ongeveer 3%). Voor het geluid van windturbines is er geen voorkeursgrenswaarde.

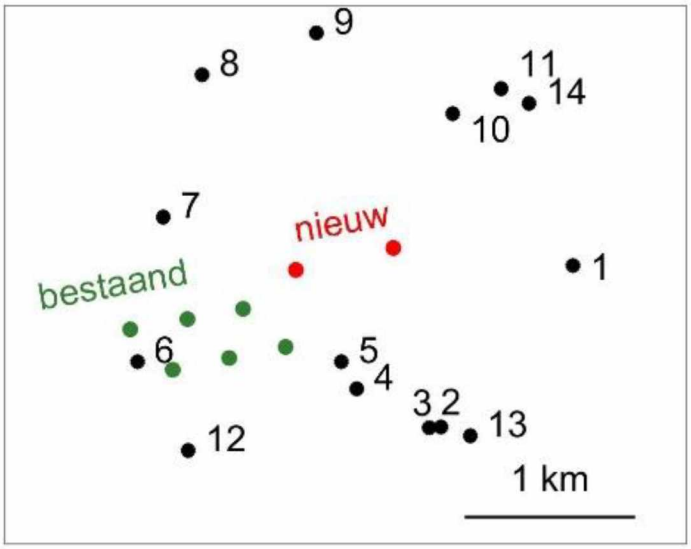
11 We hebben geen literatuur kunnen vinden waarin de relatie tussen de curve en de kans op hinder wordt onderbouwd.

In 2009 heeft RIVM de twee methodes toegepast voor een evaluatie van de grenswaarden van 47 en 41 dB voor windturbinegeluid [14]. Berekende geluidniveaus op 800 m afstand van een windturbine werden vergeleken met de curves van NSG en Vercammen. Er werd geen significante overschrijding gevonden, waaruit geconcludeerd werd dat toetsing aan de grenswaarden voldoende bescherming biedt tegen het laagfrequente geluid. De twee methodes worden overigens niet genoemd in de studies van RIVM uit 2017 [10] en 2020 [8].

In het onderzoek van Pondera Consult [1] is op basis van model-berekeningen een prognose gemaakt van het geluid van de twee nieuwe windturbines voor veertien punten in de omgeving van het windpark. De afstanden tot de nieuwe windturbines varieerden van 730 tot 1660 m. Figuur 2 toont een schematische weergave van de situatie, met de zes bestaande en twee nieuwe windturbines. Pondera Consult berekende de volgende waarden voor het geluid van de nieuwe windturbines:

- 37 tot 46 dB voor het dag-avond-nacht-niveau,
- 31 tot 40 dB voor het nachtniveau.

De grenswaarden van 47 dB respectievelijk 41 dB worden dus nergens overschreden. Hierbij is geen rekening gehouden met het geluid van de bestaande windturbines (behalve voor cumulatie; zie [1]).



Figuur 2. Plattegrond van de zes bestaande windturbines (groen) en de twee nieuwe windturbines (rood) en de veertien toetspunten (nummers 1 t/m 14) uit het onderzoek van Pondera Consult.

3 Berekening voor Energiepark A59

In deze paragraaf presenteren we de resultaten van een analyse van laagfrequent geluid van de bestaande windturbines (Nordex N90/2500) en de nieuwe windturbines (Nordex N163-5.X). De berekeningen zijn uitgevoerd voor de veertien toetspunten in figuur 2 uit het onderzoek van Pondera Consult [1]. De resultaten worden vergeleken met de referentiecurves die in de vorige paragraaf zijn genoemd.

3.1. Methode voor het bepalen en beoordelen van laagfrequent geluid

Bij berekeningen is zoveel mogelijk aangesloten bij het Reken- en Meetvoorschrift voor geluid van windturbines [15], maar in de rekenmethode zijn drie aanpassingen nodig om de methodes van beoordeling van laagfrequent geluid te kunnen toepassen. Het gaat om de volgende aanpassingen (zie bijlage A voor de details):

- het achterwege laten van de A-weging (de beoordeling van laagfrequent geluid is gebaseerd op ongewogen geluidniveaus),
- het achterwege laten van de meteocorrectieterm (wat betekent dat er geen middeling over verschillende meteorologische toestanden gedurende het jaar wordt uitgevoerd),
- het vervangen van het standaard rekenmodel voor de geluiduitbreiding naar de omgeving door een rekenmodel ontwikkeld door TNO, dat op een gedetailleerdere manier rekening houdt met de invloed van de atmosfeer en de bodem op geluidgolven, en geschikter is dan het standaard model voor lage frequenties en hoge geluidbronnen.

Voor de geluidemissie (de akoestische bronsterkte van de windturbines) is uitgegaan van de gegevens van de fabrikant, die zijn overgenomen uit het rapport van Pondera Consult [1]. De geluidemissie en de berekeningen van de geluiduitbreiding zijn in meer detail beschreven in bijlage A.

Ter illustratie toont Figuur 3 een grafiek waarin het berekende geluidniveau van één windturbine is weergegeven als functie van de frequentie. De berekening is uitgevoerd voor een afstand van 700 m tot de windturbine, zowel voor een bestaande als een nieuwe windturbine. Figuur 4 toont een vergelijkbare grafiek voor een afstand van 1400 m. In beide grafieken is ook de gehoordrempel weergegeven, alsmede de curves volgens de NSG-richtlijn [12] en de methode van Vercammen [13][12]. Volgens verwachting ligt de NSG-curve dicht in de buurt van de gehoordrempel, aangezien de NSG-richtlijn is gebaseerd op hoorbaarheid[13].

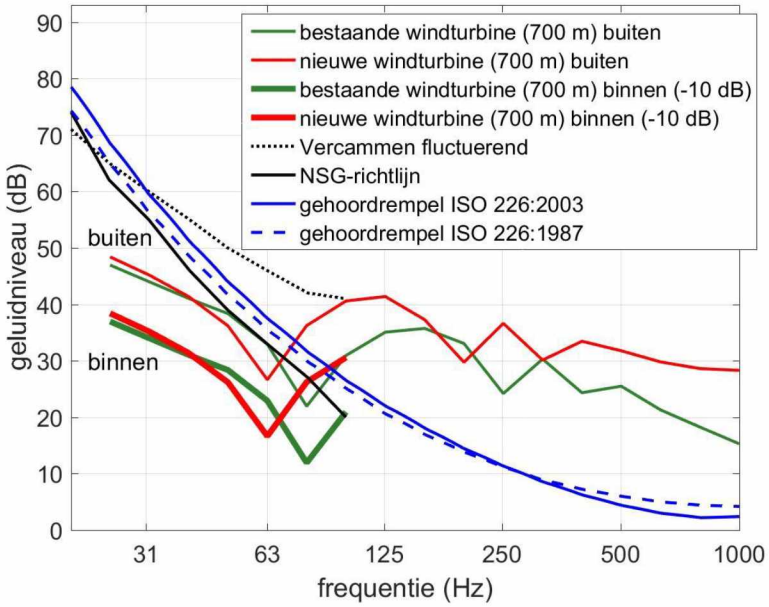
---

[12] Er bestaan verschillende Vercammen-curves. In navolging van het onderzoek door het RIVM [14] is de Vercammen-curve voor fluctuerend geluid gebruikt. (In [9] staat dat het ritmische karakter van het geluid als hinderlijk wordt ervaren en wordt omschreven als een zwiepend of zoevend geluid.) Verder is gekozen voor de curve die geldig is voor een A-gewogen geluid van 30 dB (de niveaus zijn 31-37 dB op 700 m en 23-28 dB op 1400 m); deze is te vinden in een rapport van LBP [13]. Uit dit rapport blijkt dat de verschillen tussen verschillende Vercammen-curves maximaal 5 dB zijn.

[13] De gehoordrempel volgens ISO 226 is geldig voor zuivere tonen. Voor breedbandig geluid kan de luidheid hoger zijn [16], dus kan de gehoordrempel lager liggen. Met dit aspect wordt bij de NSG-richtlijn geen rekening gehouden.

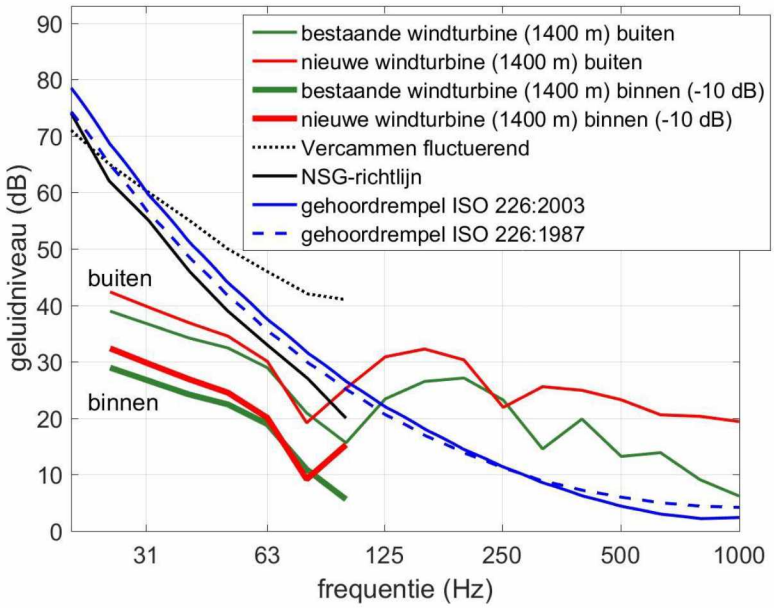
De curves volgens de twee methodes dienen voor toetsing van het geluidniveau binnenshuis. Daarom zijn de berekende spectra buiten (dunne lijnen) verlaagd met 10 dB, als schatting van het geluidspectrum binnenshuis (dikke lijnen). Er is dus rekening gehouden met een gevelisolatie van 10 dB[14]. De precieze gevelisolatie is afhankelijk van de frequentie en de constructie van de woning.

Uit Figuur 3 en Figuur 4 kan het volgende worden geconcludeerd. In het geval van één windturbine is er op 700 m geen overschrijding van de twee curves tot 80 Hz. Bij 100 Hz wordt de NSG-curve overschreden door de nieuwe windturbine, maar de Vercammen-curve wordt niet overschreden. Dat laatste betekent volgens Vercammen dat bij dit geluid, hoewel net hoorbaar, de kans op hinder minder dan 10% is. Op 1400 m liggen de frequentiespectra van het berekende geluidniveau circa 6 dB lager. Bovendien zijn de dips in de spectra wat verschoven. Beide curves worden in dit geval niet overschreden.



Figuur 3. Berekend (ongewogen) geluidniveau in tertsbanden, voor de bestaande en de nieuwe windturbines, op 700 m afstand, zowel buitenshuis als binnenshuis. Ook weergegeven zijn de Vercammen-curve, de NSG-curve, en de gehoordrempel volgens ISO 226 (2003 en 1987).

[14] Voor de gemiddelde gevelisolatie is een hogere waarde gebruikelijk als het gaat om het A-gewogen geluidniveau binnenshuis in een breed frequentiespectrum tot 10 kHz. Laagfrequent is de isolatie lager. Bovendien kunnen bij lage frequenties in een ruimte van plaats tot plaats grote verschillen optreden in het geluidniveau door staande golven. Daarom is gekozen voor een 'veilige' waarde voor de gevelisolatie van 10 dB. Ook in [14] is deze waarde aangehouden en wordt vermeld dat Vercammen adviseert geen hogere waarde dan 10 dB voor gevelisolatie af te trekken.



Figuur 4. Als Figuur 3, voor 1400 m afstand.

3.2. Onderscheid tussen bestaande en toekomstige windturbines

In werkelijkheid is er geen sprake van één enkele windturbine, zoals in Figuur 3 en Figuur 4, maar van zes bestaande en twee nieuwe windturbines, die meestal allemaal tegelijk in werking zullen zijn. In het onderzoek van Pondera Consult [1] wordt het geluid van de twee nieuwe windturbines samen genomen, maar apart beschouwd van het geluid van de zes bestaande windturbines omdat bestaande en nieuwe windturbines volgens de Wet milieubeheer twee gescheiden inrichtingen zijn (zie paragraaf 1). Voor omwonenden zal er echter sprake zijn van één windpark[15], waarbij het geluid van de bestaande en nieuwe windturbines moeilijk te onderscheiden is. Zelfs als dit onderscheid te maken valt, blijft het voor de kans op geluidhinder nog steeds van belang om het geluid van het totale cluster van nieuwe en bestaande windturbines als geheel te beoordelen. Dit geldt niet alleen voor laagfrequent geluid, maar ook voor de toetsing van de niveaus L_{den} en L_{night} aan de grenswaarden. Anders zou het maximaal toelaatbare niveau van windturbinegeluid afhankelijk worden van de opdeling van een cluster van windturbines in verschillende inrichtingen, waarbij de kans op hinder groter wordt dan met het stellen van de grenswaarden aan L_{den} en L_{night} aanvaardbaar werd geacht.

[15] Pondera Consult geeft aan dat aan de eis van de provincie tot ‘clustervorming’ wordt voldaan vanwege de plaatsing van twee nieuwe windturbines dichtbij bestaande windturbines (waarbij de onderlinge afstand tussen de nieuwe windturbines groter is dan de kleinste afstand tussen een bestaande en een nieuwe windturbine). Daarom vormen de nieuwe windturbines samen met de bestaande windturbines een ruimtelijk en visueel cluster. Zie [1], paragraaf 4.2.

Uit tabel 5.3 van het rapport van Pondera Consult [1] is op te maken dat in de bestaande situatie de geluidbelasting L_{den} van alle windturbines samen op de toetspunten, op één uitzondering na (toetspunt 6), de grenswaarden van 47 en 41 dB niet overschrijdt. Realisatie van de nieuwe windturbines heeft volgens het rapport tot gevolg dat er één toetspunt met een overschrijding bij komt, namelijk toetspunt 5, waar L_{den} van windturbinegeluid toeneemt van 47 naar 49 dB en L_{night} van 41 naar 43 dB. Beide punten liggen volgens [1] binnen een gezoneerd industrieterrein.

3.3. *Laagfrequent geluid op de toetspunten*

We hebben het laagfrequente geluid berekend voor de veertien toetspunten uit het onderzoek van Pondera Consult, en beoordeeld volgens de methode die in paragraaf 3.1 is geïllustreerd voor het geluid van één windturbine (op 700 en 1400 m afstand). Voor de veertien toetspunten hebben we de geluidbijdragen van verschillende windturbines bij elkaar opgeteld, op drie manieren:

- de bijdragen van de zes bestaande windturbines samen,
- de bijdragen van de twee nieuwe windturbines samen,
- de bijdragen van alle acht windturbines samen.

De resultaten zijn weergegeven in bijlage B. Uit de resultaten is te zien op welke punten er *binnenshuis* een overschrijding optreedt van de curves van NSG en Vercammen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen drie situaties, overeenkomend met de genoemde drie manieren van optellen van geluidbijdragen van windturbines:

1) bestaande situatie, met alleen de zes bestaande windturbines in bedrijf,
2) (hypothetische) situatie met alleen de twee nieuwe windturbines in bedrijf,
3) toekomstige situatie, met alle acht windturbines in bedrijf.

Uit de resultaten blijkt dat een overschrijding van de Vercammen-curve alleen optreedt op toetspunt 6, in de bestaande situatie (1) en de toekomstige situatie (3). In onderstaande tabel is met 'x' aangegeven in welke situatie en op welke toetspunten er een overschrijding is van de NSG-curve.

		geen overschrijding van de NSG-curve
	x	wel overschrijding van de NSG-curve

	nummer van toetspunt uit [1] (Punten met nummers aangegeven met * liggen volgens [1] op een gezoneerd industrieterrein.)													
Situatie	1	2	3	4*	5*	6*	7	8*	9	10	11	12*	13	14
bestaand (6 windturbines)				x	x	x	x					x		
alleen 2 nieuwe windturbines	x			x	x	x	x			x				
toekomst (8 windturbines)	x		x	x	x	x	x			x		x		

Hieruit blijkt het volgende.

- Op de toetspunten 4, 5, 6, 7, en 12 is er in de bestaande situatie al een overschrijding van de NSG-curve;
- Alleen op de punten 1, 3 en 10 zorgen de nieuwe windturbines voor een overschrijding van de NSG-curve in de toekomstige situatie, terwijl daar *geen* overschrijding is in de bestaande situatie.

4 Referenties

[1] 5.1,2,e (Pondera Consult Consult), "Ruimtelijke onderbouwing Windpark Energiepark A59 (Oranjepolder), gemeente Oosterhout", rapport 79109, 18 februari 2021.

[2] ISO 226:2003 / ISO 226:1987. *Acoustics—Normal Equal-Loudness Level Contours*; International Organization for Standardization: 5.1,2,e Switzerland, 2003 / 1987.

[3] 5.1,2,e "Hinder door geluid van windturbines", TNO-rapport 2008-D-R1051/B (2008).

[4] Artikel 3.14a uit het Activiteitenbesluit https://wetten.overheid.nl/BWBR0022762/2021-01-01#Hoofdstuk3_Afdeling32_323_Artikel314a.

[5] 5.1,2,e et al : The Journal of the Acoustical Society of America 139, 1443 (2016).

[6] 5.1,2,e et al, Int. 5.1,2,e Res. Public Health, Aug; 15(8): 1575 (2018).

[7] 5.1,2,e et al. "Windturbines: invloed op de beleving en gezondheid van omwonenden (update 2013)", RIVM-rapport 200000001/2013.

[8] 5.1,2,e "Health effects related to wind turbine sound: an update", RIVM report 2020-0150.

[9] LBP Sight "Literatuuronderzoek laagfrequent geluid windturbines", rapport 2013. (https://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/10/Literatuurrapport%20laagfrequent%20geluid%20windturbines%202013.pdf)

[10] 5.1,2,e "Health effects related to wind turbine sound, including low-frequency sound and infrasound", Acoust. Aust. (2017).

[11] 5.1,2,e "Gezondheidseffecten van windturbinegeluid", RIVM-rapport 2020-0214 (2020).

[12] NSG-richtlijn laagfrequent geluid, zie https://nsg.nl/nl/nsg-richtlijn_laagfrequent_geluid.html.

[13] Zie referentie [14]. Zie ook LBP Sight, "Beoordeling laagfrequent geluid", 27 februari 2017, https://www.windparkkoningspleij.nl/wp-content/uploads/2017/06/Bijlage-16-MER-bijlage-5-2-Laagfrequent-geluid.pdf.

[14] 5.1,2,e et al., "Evaluatie nieuwe normstelling windturbinegeluid", RIVM-rapport 680300007 (2009).

[15] Reken- en meetvoorschrift voor de geluidbelasting van windturbines, Staatscourant 2010, 19592, 23 oktober 2010 (bijlage 4).

[16] 5.1,2,e "Practical ranges of loudness levels of various types of environmental noise, including traffic noise, aircraft noise, and industrial noise", Int. 5.1,2,e Res. Public Health **2011**,8. https://www.mdpi.com/1660-4601/8/6/1847.

[17] 5.1,2,e "Computational atmospheric acoustics" (Kluwer, Dordrecht, 2001).

[18] Handleiding Meten en Rekenen Industrielawaai (HMRI), internet-uitgave 2004.

Bijlage A: details van de berekening

De geluidniveaus van de windturbines zijn berekend volgens het Reken- en Meetvoorschrift voor geluid van windturbines [15], met enige aanpassingen die hieronder beschreven worden.

Het rekenvoorschrift [15] geeft de volgende formule voor het A-gewogen jaargemiddelde geluidniveau L_{eq} bij een waarnemer:

$$L_{eq} = L_E - D_{geo} - D_{refl} - D_{scherm} - D_{veg} - D_{terrein} - D_{bodem} - C_{meteo}.$$

De formule bevat de volgende termen.

- L_E een emissieterm: het A-gewogen geluidsvermogenniveau per octaafband,
    - gewogen gemiddeld over een windsnelheidsverdeling (op ashoogte),
    - inclusief een optionele correctiefactor voor de richtwerking van windturbines (die hier niet is meegenomen, aangezien Pondera Consult deze factor niet noemt),
- $D_{geo} = 10 \lg (4\pi r^2)$ de geometrische demping, met r de afstand van de bron naar de waarnemer,
- D_{bodem} de bodemdemping, overgenomen uit de rekenmethode HMRI voor industrielawaai [18],
- D_{scherm}, D_{veg}, $D_{terrein}$ dempingstermen die in dit geval niet relevant zijn, d.w.z. deze termen worden gelijk aan nul verondersteld,
- C_{meteo} de meteocorrectieterm uit de rekenmethode HMRI [18], die klein is of gelijk aan nul in de hier beschouwde situaties met een hoge geluidbron.

Voor de beoordeling van laagfrequent geluid moet niet het A-gewogen geluidniveau maar het ongewogen geluidniveau worden berekend. Daarom wordt gewerkt met een ongewogen emissieterm. Verder is er een andere methode gebruikt voor de invloed van bodem en meteorologische omstandigheden, die hieronder wordt toegelicht. Ook is de middeling over verschillende meteorologische toestanden die de geluiduitbreiding beïnvloeden achterwege gelaten. Dit betekent dat de meteocorrectieterm C_{meteo} niet wordt gebruikt.

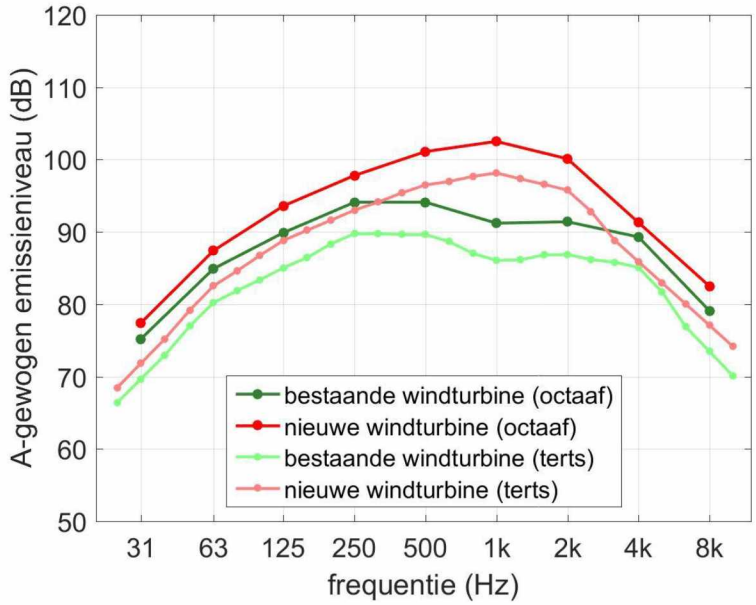
De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Figuur 3 en Figuur 4 voor het geluid van een enkele windturbine en in de figuren in bijlage B voor het geluid van meerdere windturbines samen. Hieronder worden de onderliggende berekeningen van de emissie en de geluidoverdracht (bodemdemping) beschreven.

Geluidemissie

De spectra van de emissieterm L_E zijn overgenomen uit het rapport van Pondera Consult [1]. Er is uitgegaan van de gemiddelde emissie in de nachtperiode.

De spectra uit het rapport zijn weergegeven in Figuur A1. De grafiek toont A-gewogen octaafbandspectra en tertsbandspectra. De octaafbandspectra komen uit het rapport van Pondera Consult [1]. De tertsbandspectra hebben we hieruit berekend.

Voor toepassing van de beoordelingsmethodes van laagfrequent geluid zijn ongewogen tertsbandspectra nodig. Daarom zijn de A-gewogen tertsbandspectra omgerekend naar ongewogen tertsbandspectra (niet weergegeven).



Figuur A1. A-gewogen emissieniveau van de bestaande windturbine (Nordex N90/2500) en de nieuwe windturbine (Nordex N163-5.X). Weergegeven zijn de octaafbandspectra uit het rapport van Pondera Consult [1], gemiddeld voor de nachtperiode, en de hieruit berekende tertsbandspectra.

Geluidoverdracht

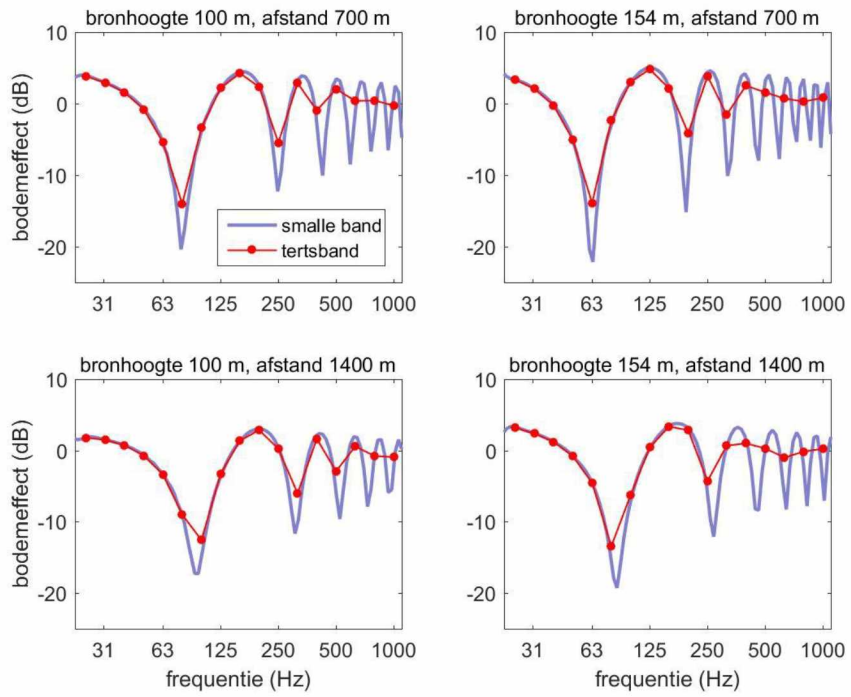
De geluidoverdracht wordt gerepresenteerd door de term D_{bodem}. Hierbij spelen invloeden van de atmosfeer en de bodem een rol. Omdat de HMRI [18] niet specifiek ontwikkeld is voor laagfrequent geluid, is in dit onderzoek een andere rekenmethode gebruikt voor de berekening van D_{bodem}. Dit is een numerieke rekenmethode die wordt aangeduid als de PE-methode [17][16].

[16] In het RIVM-onderzoek uit 2009 [14] is een ander overdrachtsmodel gebruikt, ontwikkeld in het EU-project Harmonoise.

Er is uitgegaan van een geluidbron op ashoogte van 100 m voor de bestaande windturbine en 154 m voor de nieuwe windturbine. Voor de resultaten weergegeven in Figuur 3 en Figuur 4 is gerekend voor twee afstanden van de waarnemer tot de windturbine, 700 en 1400 m. De hoogte van de waarnemer is 5 m. Verder is uitgegaan van een logaritmisch meewindprofiel, met een windsnelheid van 4,6 m/s op 10 m hoogte en 6,9 m/s op 100 m hoogte. Voor de bodem is uitgegaan van een grasbodem, met een stromingsweerstand van 300 kN s m^{-2} [17]. De plaatselijke verharding van de bodem, door schuin geplaatste zonnepanelen die in de nabijheid van de twee toekomstige windturbines zijn voorzien, heeft geen significante invloed op de overdracht van laagfrequent geluid naar de toetspunten.

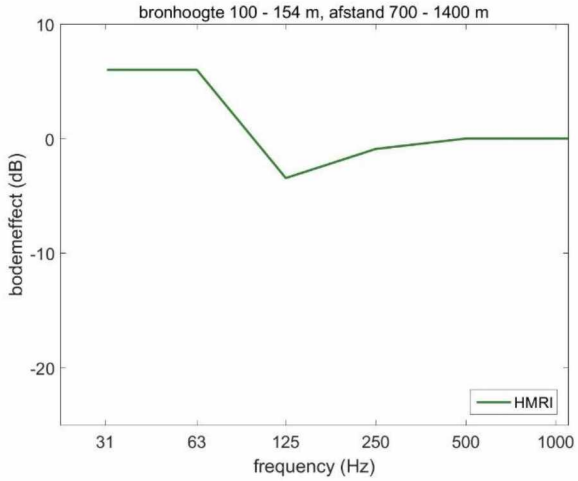
Figuur A2 toont de met PE berekende overdrachtspectra voor de twee afstanden (700 en 1400 m) en de twee bronhoogtes. Weergegeven is het spectrum van 'het bodemeffect' ($-D_{bodem}$), zowel het smalbandige spectrum dat direct uit de PE-berekening komt als het tertsbandspectrum dat nodig is voor de beoordeling.

De spectra vertonen zogeheten 'bodemdips', die veroorzaakt worden door interferentie tussen direct geluid van de bron naar de waarnemer en geluid dat de waarnemer via de bodem bereikt. Afhankelijk van de bronhoogte en de afstand variëren de frequenties van de bodemdips. (Als niet van een puntbron zou worden uitgegaan maar van een verdeling van de geluidbron in een gebied rond de ashoogte, dan zullen de bodemdips ongeveer 5 dB minder diep zijn.)



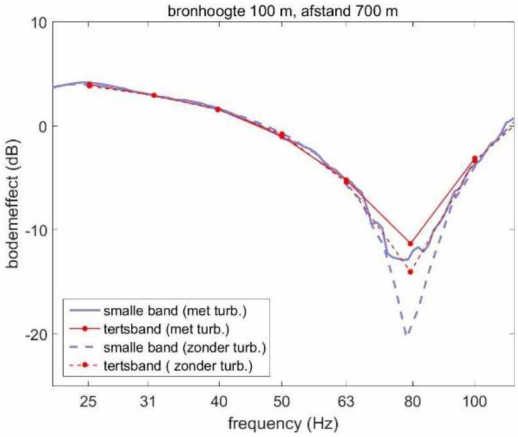
Figuur A2. Overdrachtspectra berekend met de PE-methode, voor afstanden van 700 m (boven) en 1400 m (onder), en bronhoogtes 100 m (links) en 154 m (rechts). Weergegeven is 'het bodemeffect' ($-D_{bodem}$) als functie van de frequentie.

Ter vergelijking toont Figuur A3 het overdrachtspectrum volgens de HMRI [18]. In dit geval is het overdrachtspectrum niet significant verschillend voor de vier combinaties van twee bronhoogtes en twee afstanden. Het spectrum volgens de HMRI wijkt duidelijk af van de spectra berekend met PE. Opvallend is dat er geen duidelijke bodemdips optreden zoals bij PE.



Figuur A3. Bodemeffect ($-D_{\text{bodem}}$) volgens de HMRI [18].

Ter controle is een aanvullende berekening met PE uitgevoerd waarbij ook rekening is gehouden met de invloed van atmosferische turbulentie op de geluiduitbreiding. Het is namelijk bekend dat turbulentie leidt tot minder diepe bodemdips. Dit blijkt in dit geval mee te vallen. Het resultaat weergegeven in Figuur A4 laat zien dat de bodemdip bij 80 Hz (tertsband) ongeveer 3 dB minder diep wordt door de invloed van turbulentie.

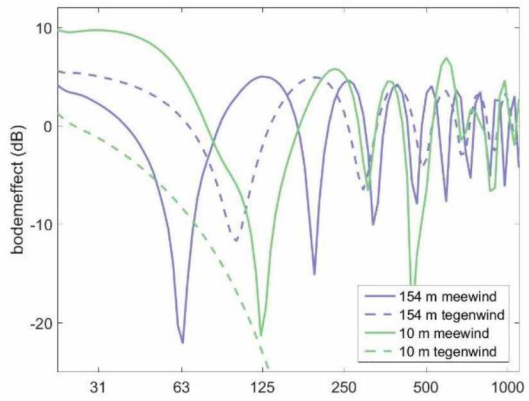


Figuur A4. Overdrachtspectra tot 100 Hz berekend met de PE-methode, voor 700 m afstand en bronhoogte 100 m, met en zonder atmosferische turbulentie.

Tenslotte is ook de invloed van de windrichting op de geluiduitbreiding onderzocht. Bij de berekeningen met PE is uitgegaan van een logaritmisch meewindprofiel (wind in de richting van de bron naar het waarneempunt). Ter controle is een aanvullende berekening met een (even sterk) tegenwindprofiel uitgevoerd.

De blauwe lijnen in Figuur A5 tonen de berekende spectra bij meewind en tegenwind, voor bronhoogte 154 m en afstand 700 m. Bij tegenwind blijkt de eerste bodemdip te verschuiven van 63 Hz naar ongeveer 100 Hz. Als gevolg hiervan wordt het tertsbandniveau bij 63 Hz bij tegenwind hoger dan bij meewind.

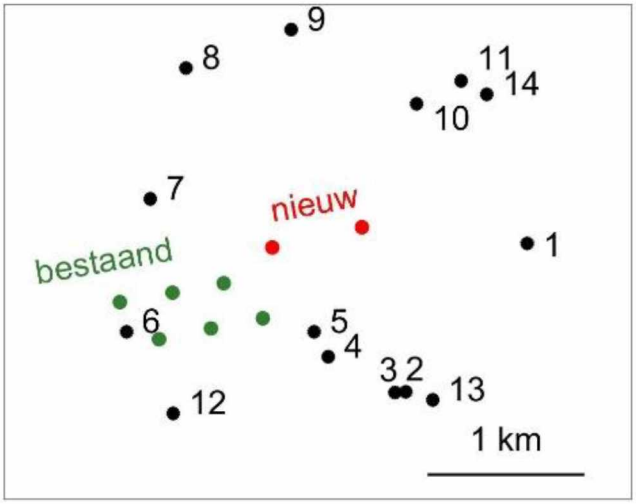
In situaties met geluidbronnen dicht bij de grond, zoals bij verkeersgeluid, zijn geluidniveaus bij tegenwind lager dan bij meewind. Dit wordt geïllustreerd door de groene lijnen in Figuur A5 voor bronhoogte 10 m. Bij tegenwind neemt het geluidniveau sterk af met toenemende frequentie. Deze sterke afname treedt bij een hoog gelegen geluidbron niet op.



Figuur A5. Overdrachtspectra berekend met de PE-methode, voor 700 m afstand, bronhoogtes 154 m en 10 m, bij meewind en tegenwind.

Bijlage B: resultaten voor de veertien toetspunten

In deze bijlage presenteren we de resultaten van de berekeningen voor de veertien toetspunten. Figuur B1 toont de locaties van de windturbines en de toetspunten.



Figuur B1. Locaties van de bestaande windturbines (groen), de toekomstige windturbines (rood), en de veertien toetspunten (nummers 1 t/m 14) uit het rapport van Pondera Consult [1].

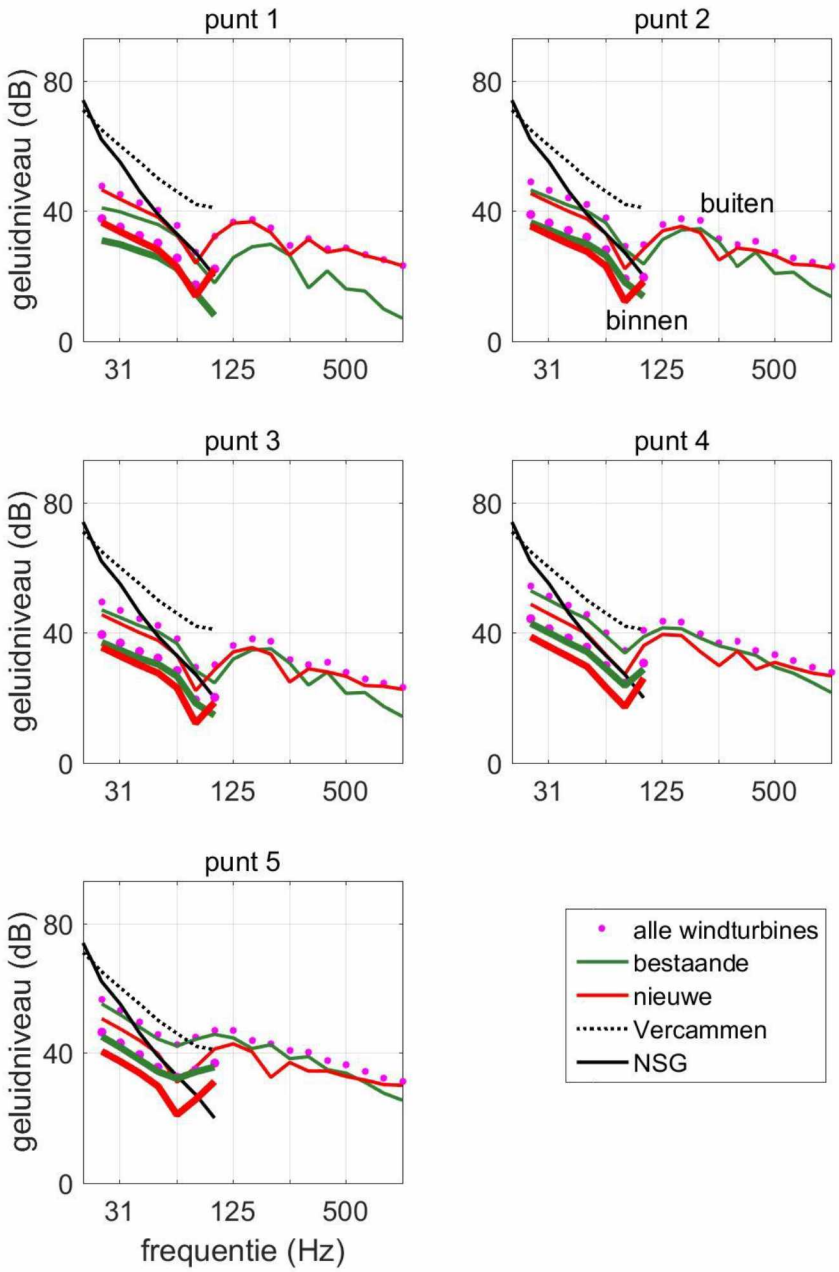
De figuren B2 t/m B4 tonen de resultaten, op dezelfde wijze als in Figuur 3 en Figuur *4* voor een enkele windturbine. In dit geval zijn de bijdragen van de windturbines bij elkaar opgeteld op drie manieren:

- de bijdragen van de zes bestaande windturbines samen (groene lijnen),
- de bijdragen van de twee nieuwe windturbines samen (rode lijnen),
- de bijdragen van alle acht windturbines samen (roze punten).

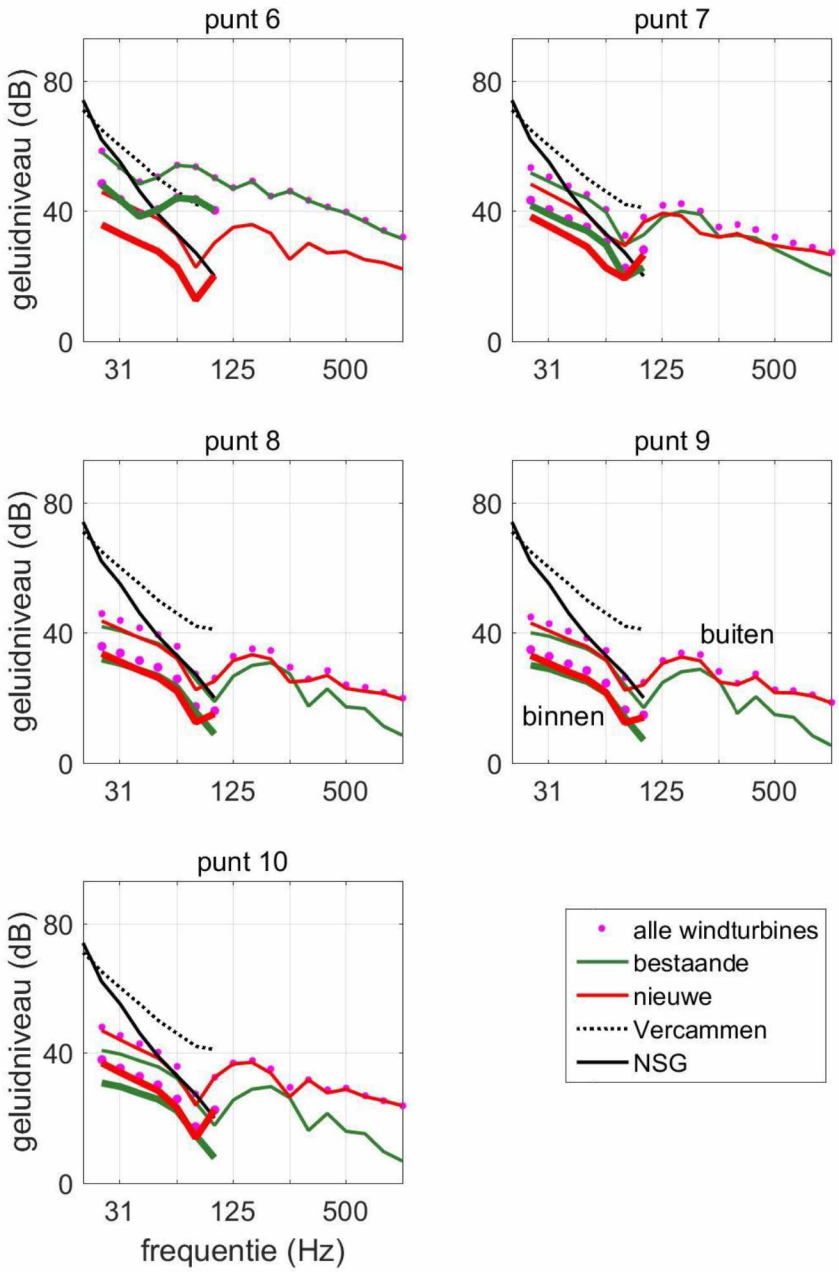
Bovendien is onderscheid gemaakt tussen

- geluid buitenshuis (dunne lijnen, kleine punten),
- geluid binnenshuis (dikke lijnen, grote punten).

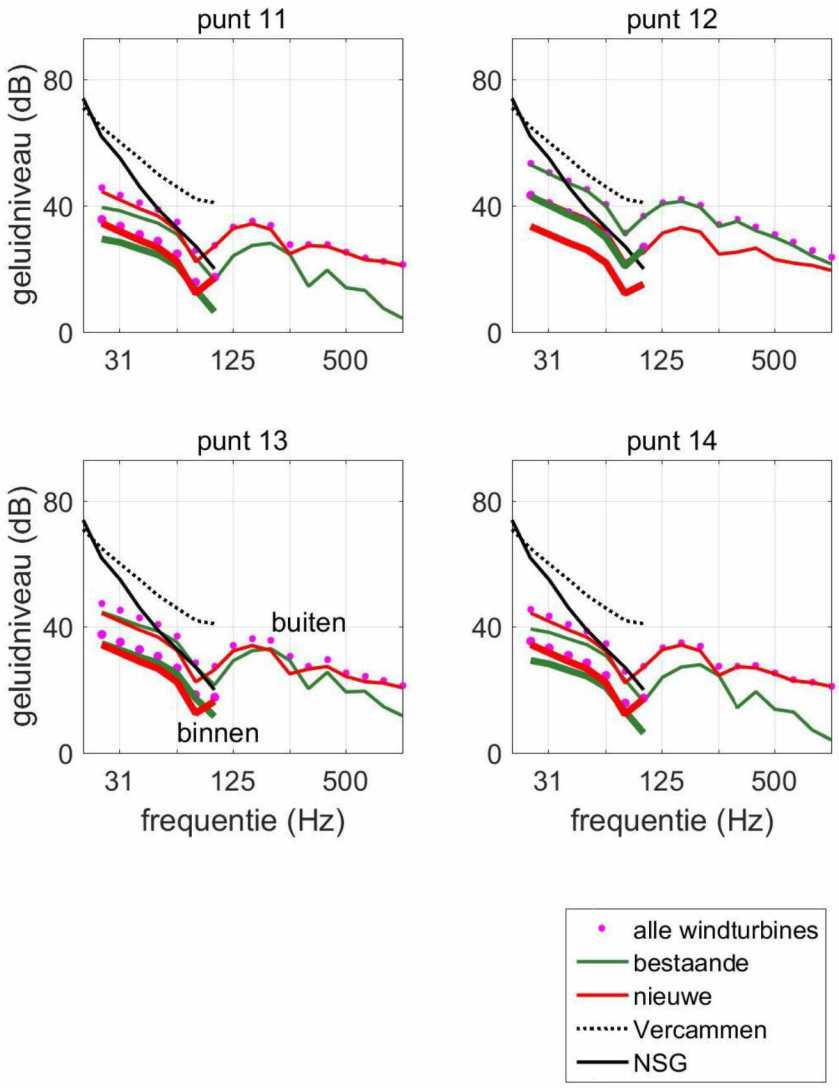
De geluidniveaus binnenshuis moeten vergeleken worden met de curves van NSG en Vercammen.



Figuur B2. Resultaten (zonder A-weging) voor de toetspunten 1 t/m 5 (dunne lijnen: geluidniveau buiten; dikke lijnen: geluidniveau binnen).



Figuur B3. Resultaten (zonder A-weging) voor de toetspunten 6 t/m 10 (dunne lijnen: geluidniveau buiten; dikke lijnen: geluidniveau binnen).



Figuur B4. Resultaten (zonder A-weging) voor de toetspunten 11 t/m 14 (dunne lijnen: geluidniveau buiten; dikke lijnen: geluidniveau binnen).