



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Gezondheidseffecten van windturbinegeluid

RIVM-rapport 2020-0214

I. van Kamp | G.P. van den Berg



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Gezondheidseffecten van windturbinegeluid

RIVM-rapport 2020-0214

Colofon

© RIVM 2021

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

DOI 10.21945/RIVM-2020-0214

I. van Kamp (taakcoördinator en auteur), RIVM
G.P. van den Berg (auteur), Mundonovo sound research

Contactadres:	Antonie van Leeuwenhoeklaan 9 3721 MA Bilthoven, Nederland
Opdrachtgevende instantie:	Het Zwitserse Federale Milieubureau (FOEN)
Opdracht Vertaling:	BZK
Opdrachtnummer:	16. 0076.PJ / S261-1003
Titel van de opdracht:	Gezondheidseffecten van windturbinegeluid
Taakcoördinator:	Irene van Kamp
RIVM-projectnummer:	E/121541/01/AA en M/470005/20/CO
Vertaling:	AVB vertalingen, Amstelveen www.avb-vertalingen.nl

Disclaimer: De informatie en standpunten die uiteengezet worden in dit rapport, zijn afkomstig van de auteurs en geven niet per definitie het officiële standpunt van FOEN weer. FOEN staat niet garant voor de juistheid van de gegevens in deze review. Noch kan FOEN of iemand die namens FOEN optreedt verantwoordelijk worden gehouden voor het mogelijke gebruik van de informatie uit dit document.

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl/

Publiekssamenvatting

Gezondheidseffecten van windturbinegeluid

Vragen over gezondheidseffecten spelen een prominente rol in lokale discussies over de plannen voor uitbreiding van het windpark in Nederland, Zwitserland en elders. Het Zwitserse Federale Milieubureau vroeg het RIVM de literatuur verschenen tussen 2017 en medio 2020 op een rij te zetten, over het effect van geluid van windturbines op de gezondheid van omwonenden.

Het RIVM en Mundonovo sound research verzamelden de wetenschappelijke literatuur over het effect van windturbines op ervaren hinder, slaapverstoring, hart- en vaatziekten en de stofwisseling. Ook werd bekeken wat bekend is over hinder door de visuele aspecten van windturbines en andere niet-akoestische factoren, zoals het lokale besluitvormingsproces.

Uit de literatuurstudie blijkt dat hinder optreedt als gevolg van geluid: hoe sterker het geluid (in dB) van windturbines, hoe groter de hinder ervan. Uit de literatuur bleek niet dat het zogeheten 'laagfrequent geluid' (lage tonen) van windturbines voor extra hinder zorgt tot die gerelateerd aan "gewoon" geluid. Voor andere gezondheidseffecten zijn de resultaten van wetenschappelijk onderzoek niet eenduidig: deze effecten hangen niet duidelijk samen met het geluidniveau, maar soms wel met de ervaren hinder. Deze resultaten onderbouwen de eerdere conclusies van een vergelijkbare opdracht drie jaar geleden.

De literatuur liet duidelijk zien dat omwonenden minder hinder hebben van de windturbines als ze betrokken werden bij de plaatsing ervan. Door mee te kunnen denken over de plaatsing en de balans tussen kosten en baten, ervaren omwonenden minder hinder. Het is daarom belangrijk zorgen van omwonenden serieus te nemen en hen te betrekken bij het planningsproces en de plaatsing van windturbines.

Kernwoorden: windturbine, windpark, ritmisch geluid, laagfrequent, infrageluid, gezondheidseffecten, hinder, slaapverstoring

Synopsis

Health effects related to wind turbine sound

Questions about health effects play a prominent role in local debates about the expansion of windfarms in the Netherlands, Switzerland and elsewhere. The Swiss Federal Office for the Environment asked RIVM to review the literature published between 2017 and mid 2020 about the effects of wind turbine sound on the health of local residents.

RIVM and Mundonovo sound research collected the scientific literature on the effect of wind turbines on annoyance, sleep disturbance, cardiovascular disease and metabolism. Also, they investigated what is known about annoyance from visual aspects of wind turbines and other non-acoustic factors, such as the local decision-making process.

From the literature study, annoyance clearly came forward as a consequence of sound: the louder the sound (in dB) of wind turbines, the stronger the annoyance response is. The literature did not show that so called "low frequency sound" (low pitched sound) leads to extra annoyance compared to "normal" sound. For other health effects, results of scientific research are inconsistent: these effects are not a clear consequence of the sound levels, but in some cases are related to the annoyance people experience. These results underpin previous conclusions from a comparable assignment three years ago.

The literature clearly shows that residents experience less annoyance when they participate in the siting process. By being able to take part in the siting and in balancing costs and benefits, residents experience less annoyance. It is therefore important to take worries of local residents seriously and involve them in the process of planning and the siting of wind turbines.

Keywords: wind turbine, wind farm, rhythmic sound, low-frequency sound, infrasound, health effects, annoyance, sleep disturbance

Inhoudsopgave

1	Inleiding — 9
2	Beschikbare kennis tot 2017 — 11
2.1	Het geluid van windturbines en hoe dit wordt ervaren — 11
2.2	Effecten van windturbinegeluiden voor omwonenden — 12
2.3	Effecten van andere aspecten dan geluid — 13
3	Windturbinegeluid en gezondheid — 15
3.1	Geluidhinder — 15
3.1.1	Reviews waarin hinder aan bod komt — 16
3.1.2	Oorspronkelijke studies naar hinder — 18
3.2	Slaapverstoring — 23
3.2.1	Reviews over slaapverstoring — 24
3.2.2	Oorspronkelijke studies naar slaapverstoring — 25
3.3	Effecten op het hart- en vaatstelsel — 28
3.4	Metabole effecten — 29
3.5	Cognitieve en mentale gezondheidseffecten van windturbinegeluid — 30
3.6	Andere sociale en fysieke aspecten dan geluid; invloed van contextuele en persoonlijke factoren — 31
3.6.1	Visuele aspecten — 32
3.6.2	Contextuele, situationele en persoonlijke factoren — 34
4	Specifieke gezondheidseffecten voor laagfrequent geluid en infrageluid — 39
4.1	Hoorbaarheid van infrageluid en laagfrequent geluid — 39
4.2	Effect van lagere frequenties ten opzichte van 'normaal' geluid — 44
4.3	Onhoorbaar geluid en effecten op het vestibulaire systeem — 46
4.4	Effect van trillingen — 48
5	Conclusies — 51
5.1	Conclusies uit hoofdstuk 3 — 51
5.2	Conclusies uit hoofdstuk 4 — 53
5.3	Eindconclusie — 55
	Dankwoord — 57
	Referenties — 59
	Bijlage 1 Zoekstrategie — 67
	Bijlage 2 Verklarende woordenlijst — 72

Inleiding

Dit rapport geeft een update van een overzichtsartikel dat wij in 2017 hebben gepubliceerd (van den Berg, van Kamp, 2017; van Kamp, van den Berg, 2018) over de mogelijke effecten van geluid van windturbines (WT) op de gezondheid van mensen die bij een windpark wonen. Dit overzicht was gebaseerd op literatuur die was verschenen tot aan begin 2017. Sindsdien zijn er meerdere nieuwe onderzoeken naar windturbinegeluid gepubliceerd en deze vormen een betere basis voor onze kennis over de effecten van windturbinegeluid op omwonenden. Net als bij de review uit 2017 ligt in deze update de nadruk op nieuw bewijsmateriaal dat afkomstig is uit wetenschappelijke publicaties met op de eerste plaats intercollegiaal getoetste artikelen. Enkele wetenschappelijke rapporten en congrespapers bevatten tevens belangrijke en vaak betrouwbare informatie, en zijn daarom ook meegenomen bij het opstellen van deze review.

Deze update is opgesteld in opdracht van de Afdeling Geluid en Niet-Ioniserende straling van het Zwitserse Milieubureau (Bundesamt für Umwelt). Verzocht werd om een actueel overzicht te verschaffen van de conclusies van wetenschappelijke onderzoeken naar de gezondheidseffecten van windturbinegeluid en in het bijzonder te kijken naar infrageluid en laagfrequent geluid. We hebben alle relevante wetenschappelijke papers verzameld die zijn gepubliceerd nadat onze eerdere review uit januari 2017 was afgerond.

Hoofdstuk 2 begint met wat basiskennis over het geluid dat windturbines produceren, de manier waarop dit geluid wordt gehoord en de in de praktijk voorkomende geluidsniveaus. We gebruiken de term 'geluid' om de a priori geïmpliceerde negatieve betekenis van de term 'lawaai' ('ongewenst geluid') te vermijden. We gebruiken alleen de term 'lawaai' wanneer die negatieve betekenis wordt geïmpliceerd, zoals bij 'last van lawaai'. In hoofdstuk 2 worden ook de algemene resultaten van onze eerdere review samengevat.

Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van het bewijsmateriaal dat naar voren is gekomen bij recente onderzoeken naar de gezondheidseffecten van windturbinegeluid op de korte en lange termijn. Niet alleen wordt het aspect geluid beoordeeld, maar ook nieuwe bevindingen ten aanzien van de invloed van persoonlijke, maatschappelijke, contextuele en fysieke aspecten die geen betrekking hebben op geluid. Dezelfde onderwerpen worden besproken in hoofdstuk 4, maar dan specifiek voor geluid met (zeer) lage frequenties, dat op andere manieren een nadelige invloed zou kunnen hebben op mensen dan 'gewoon' geluid. Zowel hoofdstuk 3 als 4 bevat een overzicht van de nieuwe bevindingen en de al beschikbare kennis, die gebaseerd is op de eerdere review uit 2017. In hoofdstuk 5 worden de bevindingen besproken en worden de kwaliteit en resultaten van de nieuwe onderzoeken beoordeeld ten opzichte van eerder bewijsmateriaal.

Bijlage 1 bevat een omschrijving van de zoekprofielen die zijn gebruikt om relevante wetenschappelijke informatie te vinden. De zoekprofielen

zelf zijn niet vertaald omdat de search in het Engels werd gedaan.
Bijlage 2 bevat een verklarende woordenlijst van de gebruikte termen
en afkortingen.

1 Beschikbare kennis tot 2017

1.1 Het geluid van windturbines en hoe dit wordt ervaren

Met verwijzing naar de review uit 2017 (van den Berg en van Kamp, 2017; van Kamp en van den Berg, 2018) verschaffen we in dit hoofdstuk een overzicht van de kenmerken van windturbinegeluid en de manier waarop dit geluid wordt geproduceerd. Moderne windturbines produceren vooral aerodynamisch geluid. Dit wordt veroorzaakt door de luchtstroom die in contact komt met de rotorbladen van de windturbine. De belangrijkste oorzaken van het geluid hebben te maken met atmosferische turbulentie die de rotorbladen treft (instroomgeluid) en met de lucht die langs de achterrاند van het bladoppervlak stroomt (achterrاندgeluid). Dicht bij een windturbine is het hoogtonige achterrاندgeluid dominant. Omdat hoogfrequent geluid in sterkere mate wordt gedempt, is het instroomgeluid met de lagere tonen op grotere afstand juist dominanter. Infrageluid wordt geproduceerd door snelle veranderingen van de kracht op de rotorbladen. Dit leidt tot pieken in het infrageluidgebied, het typische kenmerk van windturbinegeluid dat onhoorbaar is, maar wel terug te zien is in metingen. Het aerodynamische geluidniveau is in grote mate afhankelijk van de draaisnelheid van de bladen. Daardoor is de geluidproductie op zijn hoogst bij de snel draaiende uiteinden van de rotorbladen.

Een belangrijk kenmerk is de variatie in het geluid door het ritme van de roterende bladen, dat ook wel wordt omschreven als zwiepend, zoevend of stampend. Deze variatie verloopt synchroon met de frequentie van de passerende rotorbladen en wordt ook wel de amplitudemodulatie (AM) van het geluid genoemd.

Laagfrequent geluid heeft een frequentiebereik dat ligt beneden 100 Hz tot 200 Hz en wordt geproduceerd door weg- en luchtverkeer en vele andere bronnen. In de meeste onderzoeken wordt gekeken naar laagfrequent geluid als onderdeel van het normale geluidbereik. Er is minder bekend over de effecten van infrageluid, met een frequentie lager dan 20 Hz. Van infrageluid onder de gehoordrempel is niet bekend dat het gezondheidseffecten veroorzaakt, hoewel er aanwijzingen zijn dat een deel van het gehoororgaan kan reageren op onhoorbaar infrageluid.

Het menselijk gehoor is betrekkelijk ongevoelig voor lage frequenties. Dit feit zorgt er samen met het geluidniveau van de verschillende geluidcomponenten van de windturbine voor dat het achterrاندgeluid het meest dominante geluid is wanneer men zich buiten en niet al te ver van een windturbine bevindt. Gevels van gebouwen dempen hogere frequenties beter dan lagere frequenties. Hierdoor zullen geluiden binnenshuis die afkomstig zijn van buiten meer laagfrequente geluiden bevatten dan het geluid buitenshuis.

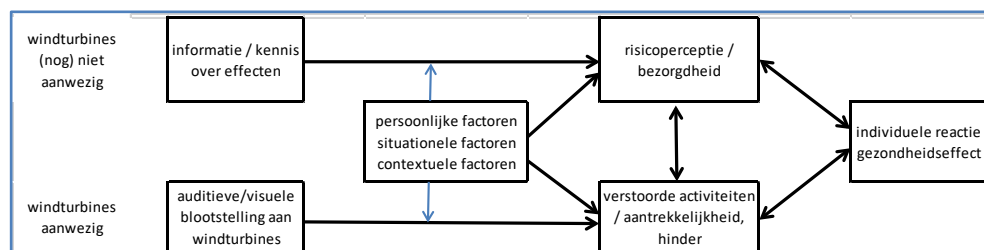
Bij een moderne turbine ligt het bereik van het maximale geluidsvermogensniveau tussen 100 en 110 dBA. Voor een luisteraar op de grond op ongeveer 100 meter afstand van een turbine is het

geluidniveau buiten niet meer dan ongeveer 55 dBA. Op woonlocaties, die verder weg liggen, is dit vaak minder en bij de meeste onderzoeken zijn maar weinig personen blootgesteld aan een gemiddeld geluidsniveau van windturbines van meer dan 45 dBA. Bij een windturbine ligt het maximale constante geluidsniveau slechts enkele (1 tot 3) dB boven het gemiddelde geluidsniveau over een lange periode. Wanneer er duidelijk een zovend of zwiepend geluid hoorbaar is, kan het verschil tussen de hoge en lage geluidsniveaus op dat moment oplopen tot ongeveer 10 dB.

1.2 Effecten van windturbinegeluiden voor omwonenden

Onze review uit 2017 (van den Berg, van Kamp, 2017) leidde tot de conclusie dat wetenschappelijk onderzoek geen eenduidig antwoord geeft op de vraag of windturbinegeluid kan leiden tot andere gezondheidseffecten dan geluidhinder. En als dit wel het geval is, of het dan andere gezondheidseffecten betreft dan die veroorzaakt door andere bronnen van omgevingsgeluid. Opgemerkt werd dat het geluid van windturbines in één aspect duidelijk verschilt van dat van andere geluidbronnen, namelijk door het ritmische karakter, zowel op visueel als auditief vlak.

Ook werd geconstateerd dat het planvormingsproces rondom windparken op "top-down" wijze verloopt, waarbij omwonenden geen inspraak hebben in de plannen (wat vaak het geval is bij andere processen rond infrastructuur).



Figuur 1 Een model voor de relatie tussen de (informatie over) de blootstelling aan windturbines en individuele reacties.

In figuur 1 is te zien hoe plannen voor windparken of al bestaande operationele windparken kunnen leiden tot verstoring en bezorgdheid zorgen. Dit schema geeft aan dat een aantal factoren het effect van (geplande) windturbines kan beïnvloeden. De persoonlijke factoren zijn onder meer aspecten als de houding, verwachtingen en geluidgevoeligheid van personen. Situationele factoren zijn onder meer effecten zoals de zichtbaarheid of bewegende slagschaduw, andere geluidsbronnen, het soort gebied en esthetische aspecten. Contextuele factoren zijn onder meer aspecten als belangen, het besluitvormingsproces, de procedure rondom de locatiekeuze en procedurele rechtvaardigheid (en hoe die wordt ervaren).

Aangetoond is dat mensen hinder of irritatie, boosheid of onbehagen ervaren door windturbinegeluid als zij het gevoel hebben of verwachten dat hun omgevingskwaliteit verslechtert door de plaatsing van windturbines nabij hun woning. Deze reacties kunnen op de lange

termijn gezondheidseffecten tot gevolg hebben. Hinder en slaapverstoring zijn, evenals bij geluid van andere bronnen, de meest onderzochte gezondheidseffecten van windturbinegeluid. In lijn met de definitie van de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) van gezondheid als "een toestand van volledig lichamelijk, geestelijk en maatschappelijk welzijn en niet slechts de afwezigheid van ziekte of andere lichamelijk gebreken" worden geluidhinder en slaapverstoring beschouwd als gezondheidseffecten.

Geluidhinder heeft een direct verband met windturbinegeluid en kan daarom worden beschouwd als het voornaamste gezondheidseffect van windturbines. Bij gelijke geluidsniveaus leidt het geluid van windturbines tot meer hinder dan het geluid van weg- of railverkeer of industrie (Janssen et al, 2011). Op woonlocaties zijn de niveaus van windturbinegeluid echter bescheiden te noemen in vergelijking met andere bronnen, zoals weg- of luchtverkeer of geluid van industrie. Uit een aantal onderzoeken kwam naar voren dat met name het ritmische karakter van het geluid (de technische term hiervoor is amplitudemodulatie of kortweg AM) als hinderlijk werd ervaren. Wij concludeerden dat AM de al ervaren hinder lijkt te verergeren, maar dat AM niet tot hinder leidt bij mensen die positief tegenover windturbines staan of hier voordeel van hebben.

Het bewijsmateriaal over het effect van het niveau van windturbinegeluid 's nachts op slaap was niet overtuigend. Op basis van het beschikbare bewijsmateriaal kon geen eenduidige conclusie worden getrokken ten aanzien van slaapverstoring. Onderzoekers hebben echter wel een verband gevonden tussen zelfgerapporteerde slaapverstoring en hinder door windturbinegeluid. Er was onvoldoende bewijs om een direct verband te leggen tussen andere gezondheidseffecten en windturbinegeluidsniveaus. Maar ook hier hebben onderzoekers wel een verband gevonden tussen de gezondheidseffecten en hinder van windturbinegeluid.

Het gematigde effect van het windturbinegeluidsniveau op de hinder en de reeks factoren die van invloed zijn op de mate van hinder houden in dat het effect van windturbinegeluid zal verminderen als deze factoren ook worden geadresseerd. Dit geldt ook voor andere geluidbronnen.

1.3 Effecten van andere aspecten dan geluid

Naast geluid werden ook verscheidene andere kenmerken aangevoerd die relevant zijn voor mensen die in de buurt van windturbines wonen. Dit zijn onder meer fysieke en persoonlijke aspecten, en de omstandigheden rondom de besluitvorming en locatiekeuze voor een windpark zowel als de communicatie en de relatie tussen verschillende partijen die betrokken zijn bij het proces.

Visuele aspecten bleken een sleutelrol te spelen bij reacties op windturbines. Dit zijn onder meer het (niet) passen in het landschap, schaduwvorming en knipperende lichten. Schaduwvorming of slagschaduw van windturbines draagt bij aan de hinder en ook het draaien van de rotorbladen zelf kan als storend worden ervaren. Lichtflikkering van de bladen, trillingen en elektromagnetische velden bleken een ondergeschikte rol te spelen, zeker bij moderne turbines als het om het effect op omwonenden gaat.

Ook bleek dat niet alleen deze fysieke factoren, maar ook persoonlijke en (psycho-)sociale factoren verband houden met de hinder. In een aantal onderzoeken wordt de rol van geluidgevoeligheid bevestigd in de reactie op windturbines, onafhankelijk van het geluidsniveau of de geluidskenmerken. Personen die profijt hebben van windturbines in hun leefomgeving en/of daar positief tegenover staan, maken in het algemeen minder vaak melding van hinder. Personen die windturbines ervaren als een verstoring van hun privacy en schadelijk voor de kwaliteit van hun leefomgeving, maken daarentegen in het algemeen vaker melding van hinder. Houding en verslaggeving in de media vormen een belangrijk deel van het complexe proces rondom de locatiekeuze van windturbines en zijn van invloed op de reacties. De conclusie van veel onderzoeken luidde dat maatschappelijke aanvaarding van windprojecten in sterke mate afhankelijk is van de vraag of het planvormingsproces rechtvaardig verloopt en of omwonenden bij het proces worden betrokken (bijv. Zaunbrecher et al 2016; Wüstenhagen et al, 2015).

2 Windturbinegeluid en gezondheid

Hinder en slaapverstoring zijn de meest onderzochte effecten van blootstelling aan windturbinegeluid in de leefomgeving. Recenter is ook onderzoek gedaan naar effecten op het hart- en vaatstelsel (ischemische hartziekte/hartinfarct, hypertensie en beroerte) en metabole effecten (diabetes en obesitas) bij mensen die in de buurt van windparken wonen. Ten slotte is er slechts in beperkte mate bewijs beschikbaar voor het verband tussen windturbinegeluid en mentale en cognitieve effecten.

De nieuwe zoekopdracht naar literatuur verschenen tussen 2017 en 2020 leverde 10 reviews op (onder meer onze intercollegiaal getoetste artikel uit 2018) en 45 nieuwe artikelen over het verband tussen windturbinegeluid en gezondheid. Deze zijn allemaal volledig gelezen en 30 daarvan zijn geselecteerd voor de review.

In dit hoofdstuk wordt per gezondheidsuitkomst/-effect een samenvatting gegeven over de huidige stand van zaken wat betreft de bestaande kennis over het verband tussen windturbinegeluid en gezondheid. In iedere paragraaf worden steeds eerst de resultaten van onze review uit 2017 (van den Berg en van Kamp, 2017) kort samengevat. De resultaten, die via dezelfde zoekmethode zijn verkregen (zie bijlage 1 voor de volledige omschrijving), zijn in deze review geactualiseerd op basis van literatuur die tot halverwege juni 2020 is gepubliceerd.

Ook wordt in dit rapport nieuw bewijs gepresenteerd voor de invloed van persoonlijke, situationele en contextuele factoren op de gezondheidseffecten.

Deze review is voornamelijk gebaseerd op de resultaten van epidemiologische studies onder de bevolking en op experimenten die op kleinere schaal in laboratoria zijn uitgevoerd. Let op dat de beschrijving van de effecten van windturbinegeluid zich beperkt tot het 'normale' frequentiebereik. De bevindingen van onderzoeken naar specifieke effecten van laagfrequent geluid en infrageluid, anders dan bij 'normaal' geluid, worden apart samengevat in hoofdstuk 4.

2.1 Geluidhinder

In onze review uit 2017 werd geconcludeerd dat geluidhinder het voornaamste gezondheidseffect is van blootstelling aan het geluid van een operationele windturbine. Op basis van epidemiologische studies, experimenten en verhalen van mensen bleek dat het typische karakter van windturbinegeluid een van de belangrijkste kwesties was. Met name het ritmische karakter van het geluid (de technische term hiervoor is amplitudemodulatie of kortweg AM) wordt als hinderlijk ervaren en wordt omschreven als een *zwiepend*, *zoevend* of *stampend* geluid. Bij gelijke geluidniveaus leidt het geluid van windturbines tot meer hinder dan het geluid van de meeste vormen van transport. Laboratoriumonderzoeken hebben geen doorslaggevende conclusies opgeleverd over het effect van amplitudemodulatie op hinder. Eén

conclusie luidde dat er een grote kans bestaat dat amplitudemodulatie de voornaamste oorzaak is van de typische kenmerken van windturbinegeluid. Een andere conclusie verwerpt amplitudemodulatie als negatieve factor op zich, omdat dit fenomeen in hoge mate samenhangt met de houding die mensen hebben. De overeenkomst is dat AM de al ervaren hinder blijkt te verergeren, maar dat dit niet tot hinder leidt bij mensen die positief tegenover windturbines staan of hier voordeel van hebben. De algemene blootstelling-effectrelatie (Ber) voor hinder door windturbinegeluid omvat alle aspecten die van invloed zijn op de hinder, en levert daarom een gemiddelde op van alle plaatselijke situaties. Daarom vormt deze relatie slechts een indicatie van de ervaren mate van hinder voor een plaatselijke situatie en geldt deze dus niet voor individuele situaties.

In onze review werd opgemerkt dat hinder van windturbines bij lagere geluidniveaus optreedt dan meestal het geval is bij verkeers- of industriegeluiden. Op basis van Nederlandse en Zweedse gegevens is een blootstelling-effectrelatie vastgesteld voor blootstelling binnenshuis en buitenshuis uitgedrukt in Lden en het percentage ernstig gehinderden. Bij later onderzoek werden deze resultaten bevestigd en werden vergelijkbare resultaten verkregen.

2.1.1 *Reviews waarin hinder aan bod komt*

Vier van de tien reviews die sinds 2017 zijn gepubliceerd (met uitzondering van onze review uit 2017) gaan over hinder als de voornaamste gezondheidsuitkomst. In de door Guski et al (2017) opgestelde WHO-review van bewijs voor hinder zijn vier studies naar windturbinegeluid gevonden. Deze studies hadden allemaal een dwarsdoorsnede opzet en waren voor 2015 gepubliceerd. Deze werden geselecteerd voor de review op basis van het percentage ernstig gehinderden (%EH) zoals bepaald met een standaard onderzoeksvraag (ISO/TS 15666:2003) waarin een specifieke geluidbron werd genoemd. Voor windturbinegeluid werd geconcludeerd dat er nog onvoldoende bewijs bestaat, dat het bewijsmateriaal van lage kwaliteit is en dat hierdoor geen betrouwbare algemene blootstelling-effectrelatie kan worden vastgesteld. De WHO besloot echter (in 2018) een voorwaardelijk advies te publiceren met betrekking tot de blootstelling-effectrelatie voor windturbinegeluid op basis van een gemiddeld geluidniveau gedurende 24 uur. Op basis van deze blootstelling-effectrelatie stelde de WHO een voorlopige drempelwaarde van 45 dB Lden in; gezondheidseffecten die optreden bij een lagere waarde, werden als aanvaardbaar beschouwd.

Bij de voor de WHO uitgevoerde review van Guski et al (2017) werd gekeken naar studies die tot aan eind 2014 waren gepubliceerd. In hun literatuuronderzoek hebben Van Kamp et al (2020a, 2020b) een update gegeven van de WHO-review op basis van publicaties die waren verschenen tot aan eind 2019. Hierin kwamen 9 nieuwe publicaties over windturbinegeluid en hinder naar voren (die betrekking hadden op 5 onderzoeken) die aan de inclusiecriteria voldeden.¹ Enkele van deze

¹ 1. Gepubliceerde of aanvaarde papers in intercollegiaal getoetste verslagen, 2. Gepubliceerde congrespapers, 3. Afzonderlijke studies, dus geen reviews, meta-analyses of commentaren, 4. In principe geen beperkingen ten aanzien van talen, 5. Bevolking: algemene bevolking, volwassenen; (voor de effecten op het hart- en vaatstelsel is ook naar kinderen gekeken, voor andere uitkomsten niet relevant of beschikbaar), 6. Situatie: blootstelling

onderzoeken waren al besproken in onze review uit 2017. Gezien het feit dat er meer grootschalige onderzoeken van matige tot goede kwaliteit zijn gepubliceerd sinds de WHO-review concluderen Van Kamp et al dat een nieuwe meta-analyse gerechtvaardigd is.

De verhalende review door Simos et al (2019) omvatte 104 studies en de resultaten worden besproken in combinatie met een reeks medebepalende factoren voor hinder. Deze factoren bestaan naast geluid uit onder meer visuele aspecten (slagschaduw en invloed op het landschap), vastgoedprijzen en veiligheid. Er is geen meta-analyse uitgevoerd en de inclusiecriteria van de studies waren niet duidelijk. Hinder werd beschouwd als een belangrijke uitkomst. De auteurs concluderen dat het bewijs voor een effect beperkt is en dat er waarschijnlijk sprake is van een nocebo-effect vanwege de 'sociaal-cognitieve blootstelling', zoals de auteurs het zelf zeggen. Dit houdt in dat informatie en negatieve verwachtingen - en dus niet zozeer het windturbinegeluidniveau zelf - nadelige effecten tot gevolg hebben. In een reeks aanbevelingen lag de focus met name op het proces rond de locatiekeuze voor windparken (inspraak, het windpark in- en uitschakelen, zichtbaarheid). Deze aspecten worden in paragraaf 3.6 nader uitgewerkt.

In het literatuuronderzoek naar hinder van Freiberg et al (2019) werd de literatuur die was gepubliceerd tussen 2000 en halverwege 2018 op systematische wijze bestudeerd. Voor deze review werden alleen artikelen geselecteerd die voldeden aan de PRISMA-criteria (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) voor rapporten: bevindingen van observatiestudies zonder selectiebias, informatiebias en confounding. Dit leverde 84 artikelen op die voldeden aan de selectie-eisen en waarin hinder en andere gezondheidsuitkomsten werden besproken. In meerdere dwarsdoorsnedestudies (43) werd gerapporteerd dat windturbinegeluid verband houdt met geluidhinder, die wordt beïnvloed door verscheidene persoonlijke en contextuele aspecten, zoals geluidgevoeligheid, houding ten opzichte van windturbines of economische voordelen. De auteurs van de review merken op dat er tussen 2010 en 2012 meer publicaties zijn verschenen. Dit is toe te schrijven aan het feit dat er (let op: wereldwijd) meer aandacht is voor het onderwerp onder het grote publiek, bestaande uit onder meer omwonenden, tegenstanders, politici en de wetenschappelijke gemeenschap. Volgens de auteurs is de geografische spreiding van de studies niet in balans met het aantal windparken op een locatie. Met andere woorden, de studies zijn niet per definitie uitgevoerd in landen waar de meeste windturbines staan. Het meeste onderzoek is uitgevoerd in OESO-lidstaten. Zoals ook werd geconcludeerd bij onderzoeken naar andere omgevingsgerelateerde onderwerpen (bijv. Baliatsas et al, 2012) waren de verschillen in prevalentie van geluidhinder in 11 studies van lagere kwaliteit groter dan in observatiestudies van hogere kwaliteit. Dit is mogelijk te verklaren doordat onder meer de methodiek, de methode voor de

aan omgevingsgeluid thuis en op school (voor kinderen) (GEEN blootstelling aan geluid op de werkvloer of in een omgeving waarin gezondheidszorg wordt verleend, bijv. een ziekenhuis), 7.Studie-opzet: alleen observatiestudies (GEEN experimentele studies die het WHO-protocol volgen), voor de update over effecten op het hart- en vaatstelsel en metabole effecten zijn alleen case-controlstudies en cohortonderzoeken geselecteerd, 8.Relevante uitkomsten: hinder, slaapverstoring, effecten op het hart- en vaatstelsel, metabole effecten (zelfgerapporteerd of klinisch gediagnosticeerd)

steekproeven, de omvang van de proeven en de definiëring van de uitkomst verschilden. Op het gebied van hinder ontbreekt onderzoek over de complexe verbanden van hinder via niet-akoestische factoren, objectief onderzoek naar visuele kenmerken van windturbines en de wisselwerking tussen alle typen blootstelling die te maken hebben met windturbines.

2.1.2 *Oorspronkelijke studies naar hinder*

In deze paragraaf worden de resultaten van de geselecteerde oorspronkelijke studies samengevat. Sommige studies hebben geen betrekking op de periode 2017-2020, maar waren in de vorige review niet opgenomen en worden wel relevant geacht voor de huidige stand van de kennis. Bij iedere studie vermelden we het niveau van het risico op bias (systematische fout) als maatstaf voor de kwaliteitsbeoordeling van de studie en de resultaten ervan. Deze maatstaf wordt bepaald door de eerdergenoemde PRISMA-criteria. Het geluidniveau dat wordt vermeld in de studies betreft doorgaans het gemiddelde geluidniveau bij de gevel van woningen.

Aan de Noorse dwarsdoorsnedestudie van Klaeboe et al (2016) met een middelhoog risico op bias namen 90 personen deel (responspercentage: 38%). De berekende windturbinegeluidniveaus lagen tussen 37 en 47 dB Lden. De hinder werd gemeten aan de hand van de standaard ISO 5 puntsschaal. Houding, demografie, oordelen over visuele aspecten en geluidgevoeligheid waren de voornaamste versturende variabelen (confounders). Geluid van windturbines werd als hinderlijker beschouwd dan geluid van wegverkeer, waarbij het verschil in hinderlijkheid overeenkwam met 17 tot dB. Dit ligt binnen van het bereik van 11-26 dBA, dat Michaud et al (2016a) en Janssen et al (2011) rapporteerden. Geconcludeerd wordt dat niet-akoestische factoren een grote rol spelen bij hinder en dat deze misschien zelfs zwaarder wegen dan het geluid van windturbines zelf.

Aan een Poolse dwarsdoorsnedestudie van Pawlaczyk et al (2018) met een middelhoog risico op bias namen 517 personen deel en het responspercentage bedroeg 78%. De windturbinegeluidniveaus werden berekend en willekeurig gecontroleerd via metingen ter plekke. De geluidhinder werd gemeten aan de hand van de standaard ISO 5 puntsschaal. Woontevredenheid, visuele aspecten, demografie en houding ten opzichte van windturbines waren de voornaamste versturende variabelen. Het percentage ernstig gehinderden onder de deelnemers (%EH) nam significant toe naarmate het geluidniveau (35 tot 53 dB Lden) steeg. Ook nam dit percentage significant toe wanneer men negatief tegenover windturbines stond. Het %EH nam aanmerkelijk af naarmate de afstand tot de dichtstbijzijnde windturbine groter werd.

Een Finse studie van Radun et al (2019) werd geclassificeerd als een studie met een laag risico op bias. Aan deze studie namen 429 personen deel (responspercentage: 57%). Het windturbinegeluidniveau werd berekend en gemeten en vervolgens onderverdeeld in vier blootstellingsklassen: [25-30], [30-35], [35-40] en [40-46] dB Lden. Een van de belangrijkste uitkomsten was hinder (zowel binnenshuis als buitenshuis). Vertrouwen in overheidsinstanties en beheerders, zichtbaarheid, economische voordelen, leeftijd, opleidingsniveau, type

woning en de afstand tot een windturbine waren allemaal factoren die werden meegenomen in de analyse. De geluidniveaus [dB] hangen sterk samen met het percentage deelnemers dat ernstige hinder ondervond (%EH) buitenshuis met een Odds ratio (OR) van 1,41. Oftewel: wanneer het geluidniveau één blootstellingsklasse stijgt, neemt het %EH buitenshuis toe met een factor 1,41. Er werd geen verband gevonden tussen het geluidniveau binnenshuis en hinder. De factor die de grootste invloed had op hinder binnenshuis en buitenshuis was de bezorgdheid van de deelnemers over hun gezondheid.

Aan de Chinese dwarsdoorsnedestudie van Song et al (2016) met een middelhoog risico op bias namen 227 personen deel die in de buurt van een windpark wonen (responspercentage: 77%). Het windturbinegeluidniveau werd gemeten en onderverdeeld in 5 geluidniveaueklassen (van < 40 dB tot > 47,5 dB). Geslacht, leeftijd, woontuur, zichtbaarheid, geluidgevoeligheid, houding en de algemene mening over windturbines waren de belangrijkste verstorende variabelen. Het %EH nam naarmate het geluidniveau steeg toe van 39,5% (95%-BI (betrouwbaarheidsinterval) 28,4–51,4%) tot 75,0% (95%-BI: 50,9–91,3%).

De Community Noise and Health Study (CNHS) van Health Canada naar de impact van windturbines is uitvoerig besproken in onze review uit 2017. Deze grootschalige dwarsdoorsnedestudie van hoge kwaliteit werd uitgevoerd onder 1238 volwassenen die op uiteenlopende afstanden van windturbines wonen. Per woning werd met één volwassen persoon (18-79 jaar), die willekeurig was geselecteerd uit de provincies Ontario (n = 1011) en Prins Edwardeiland (n = 227), een persoonlijk interview gehouden. Een sterk punt van de studie is het hoge responspercentage van 79 procent. De A-gewogen en C-gewogen geluidniveaus buitenshuis werden berekend en er werden extra metingen verricht op een aantal locaties. De resultaten werden gepresenteerd in enkele publicaties die gewijd waren aan verscheidene gezondheidseffecten en in een aparte paper over het effect van slagschaduw op hinder. Er zijn ook papers gepubliceerd waarin de beoordeling van geluidniveaus nabij windturbines en nabij ontvangers wordt beschreven (Keith et al, 2016a), maar deze vallen buiten de scope van dit rapport. Wat betreft hinder ondersteunen de resultaten een verband met blootstelling aan het geluid van windturbines tot een niveau van 46 dBA.

Sinds eind 2017 zijn er nog eens drie artikelen gepubliceerd in het kader van de CNHS: een verklaring over de interpretatie van de bevindingen (Michaud et al, 2018a wordt hier niet besproken), een paper over de algehele hinder van windturbines, waarin ook andere (niet-akoestische) aspecten worden meegenomen (Michaud et al, 2018b) en een paper over het verband tussen de daaruit afgeleide totaalscore voor hinder en subjectieve gezondheidseffecten (Michaud et al, 2018c).

Het concept van een totaalscore voor hinder is ontwikkeld (Michaud et al, 2018b), zodat ook rekening kon worden gehouden met hinder van meerdere kenmerken van windturbines: geluid, knipperende waarschuwingsslampen, trillingen, visuele impact en slagschaduw. Deze totaalscores voor hinder, getest aan de hand van een hoofdcomponentenanalyse, verklaarden 58-69% van de variabiliteit in

de totale hinder. Het verband met de afstand tot de windturbines werd bevestigd in twee grootschalige proeven binnen het CNHS-onderzoek. De hinder nam significant toe in gebieden die op 0,55 tot 1 km afstand van de windturbine lagen (gemiddeld 1,59; 95%-BI 1,02, 2,15) en was op zijn hoogst op een afstand van minder dan 550 m (gemiddeld 4,25; 95%-BI 3,34, 5,16).

In de derde recente paper van Michaud et al (2018c) werd het verband tussen deze totale score voor hinder en een reeks van gezondheidsklachten en -symptomen nader bestudeerd. Onder meer werd gekeken naar de slaapkwaliteit, kwaliteit van leven, tevredenheid over gezondheid, tinnitus, migraine/hoofdpijn en duizeligheid, gebruik van medicatie, geluidgevoeligheid, het cortisolgehalte in het haar en bloeddrukmetingen. De totaalscores voor hinder tussen mensen die aangaven last te hebben van een of meer van deze symptomen (gemiddelde score: 2,53 tot 3,72) en mensen die daar geen last van hadden (0,96 tot 1,41) liepen sterk uiteen. Omstandigheden die niet gerelateerd zijn aan de totale hinder zijn onder meer het cortisolgehalte in het haar, de systolische bloeddruk en de kwaliteit van leven gemeten aan de hand van de twee enkelvoudige vragen over kwaliteit van leven uit de WHOQOL Bref ('tevredenheid met gezondheid' en 'beoordeling van kwaliteit van leven') Onderstreept moet worden dat het hier niet gaat om causale verbanden.

Tijdens hun dwarsdoorsnedestudie vergeleken Botelho et al (2017) de rol van windturbinegeluid en die van hinder bij de beslissing van mensen ten aanzien van geluidbeperkende maatregelen. Er namen 80 personen deel aan deze studie met een middelhoog risico op bias, waarvan er 29 geluidbeperkende maatregelen hadden genomen en 51 niet. Aan de hand van structurele vergelijkingsmodellen werd een schatting gemaakt van het effect van geluidniveaus op gedrag en hinder. Geconcludeerd werd dat het besluit om de woning te isoleren direct verband hield met het windturbinegeluidniveau en niet met hinder. Er kan dus gesteld worden dat de windturbinegeluidniveaus direct gerelateerd zijn aan de financiële gevolgen van de maatregelen die werden genomen om de impact op het welzijn te beperken.

Tijdens een dwarsdoorsnedestudie in Finland met een middelhoog risico op bias probeerden Hongisto et al (2017) een blootstelling-effectrelatie vast te stellen voor hinder binnenshuis die wordt veroorzaakt door geluid van grote windturbines (met een nominaal elektrisch vermogen van 3 tot 5 MW). Bij slechts zeer weinig huishoudens was het geluidniveau binnenshuis hoger dan 40 LAeq. De eerste blootstelling-effectrelatie tussen geluid buitenshuis en hinder binnenshuis veroorzaakt door grote windturbines was gebaseerd op een proef met 429 deelnemers in drie gebieden met windturbines. Wanneer het geluidniveau lager dan 40 dB LAeq was, kwam de relatie overeen met de relatie die was verkregen voor kleinere windturbines (met een vermogen van 0,15 tot 3,0 MW). Het Community Tolerance Level (CTL, tolerantieniveau van de gemeenschap) lag binnen het blootstellingsbereik van 20-50 dB, 3 à 4 dB lager dan bij twee eerdere studies. Voor geluidniveaus hoger dan 40 dB LAeq was het vanwege het kleine aantal deelnemers niet mogelijk om een betrouwbare vergelijking te maken met eerdere studies. Bij geluidniveaus lager dan 40 dB bedroeg het

percentage ernstig gehinderden minder dan 4%. De auteurs concluderen dat grote windturbines (> 3 MW) en kleinere turbines (< 1,5 MW) een vergelijkbare mate van geluidhinder binnenshuis veroorzaken bij geluidniveaus onder 40 dB LAeq.

Schäffer et al (2019) verrichtten een laboratoriumexperiment met 43 deelnemers, waarbij in 24 condities met zowel visuele als auditieve stimuli een verband gezocht werd tussen hinder enerzijds en het windturbinegeluidniveau, de amplitudemodulatie en visuele aspecten anderzijds. Dit betrof een onderzoek van hoge kwaliteit (met een laag risico op bias) en met een studieopzet van het type 'within-subject': iedere persoon test alle condities. De hinder werd gemeten via de ISO 11-puntsschaal. Behalve de houding van deelnemers ten opzichte van windparken bleken zowel visuele als akoestische kenmerken van invloed te zijn op geluidhinder. Een toename in het geluiddrukkniveau en de amplitudemodulatie (AM) zorgde voor meer hinder; als het landschap goed zichtbaar was, nam de hinder af en de zichtbaarheid van een windturbine zorgde juist voor meer hinder. De enkelvoudige effecten van de reeks waarin de stimuli werden aangeboden konden weliswaar worden weggenomen door compenserende maatregelen, maar de eerstgetoonde visuele conditie had grote invloed op de hinderscores van de condities die daarna volgden. Omdat de visuele effecten doorwerkten op de auditieve effecten, was de hinder die veroorzaakt werd door de eerste visuele en auditieve stimuli van invloed op hetgeen de deelnemers zagen en hoorden in de condities die daarna werden aangeboden.

In 2018 werd met hetzelfde team (Schäffer et al, 2018) een luisterexperiment uitgevoerd onder 52 deelnemers. Deze studie had een middelhoog risico op bias en hierbij werd gebruik gemaakt van stimuli waarmee verschillende kenmerken van windturbines en andere breedbandige geluiden werden nagebootst. De relatieve bijdragen van drie akoestische kenmerken (vorm van het geluidsspectrum, diepte van periodieke AM en willekeurige AM) aan hinder van korte duur werden hierbij getest. De variatie in de reacties op de hinder door de akoestische kenmerken kon worden uitgedrukt als equivalente veranderingen in het windturbinegeluiddrukkniveau. Er is geen rekening gehouden met versturende variabelen, maar de waargenomen luidheid en de waargenomen geluidkenmerken werden wel meegewogen, evenals de standaard ISO-vraag over hinder die was aangepast voor acute effecten. Aangetoond werd dat niet alleen het geluiddrukkniveau, maar ook alle drie de kenmerken van invloed zijn op hinder: de hinder nam toe naarmate de energie in het laagfrequente bereik en de diepte van de periodieke AM toenam en de hinder was hoger in situaties met willekeurige AM dan zonder AM. Vergelijkbare veranderingen in de mate van hinder zouden worden veroorzaakt wanneer de geluiddruk verandert met maximaal 8 dB. Geconcludeerd wordt dat het geluiddrukkniveau, de vorm van het geluidsspectrum en tijdelijke variaties in het geluidniveau van invloed zijn op de mate van ernstige hinder. De auteurs merken op dat er praktijkexperimenten op grotere schaal moeten worden verricht om de validiteit/geldigheid van deze bevindingen beter te kunnen beoordelen. Zie ook paragraaf 3.6 voor de impact van visuele aspecten.

In de dwarsdoorsnedestudie van Haac et al (2019) met een middelhoog risico op bias werden de hoorbaarheid en geluidhinder van windturbines beoordeeld. De testpersonen (n=1043) werden telefonisch, online en via e-mail uitgenodigd om deel te nemen en het gemiddelde responspercentage bedroeg 22%. Via een enquête werd de respondenten gevraagd naar de hoorbaarheid, hinder (niet de standaard ISO-vraag), visuele aspecten, de mate van inspraak bij lokale projecten en persoonlijke eigenschappen, zoals geluidgevoeligheid, houdingen en hun mening over de aanblik van het windpark. Voor alle adressen werden de windturbinegeluidniveaus geschat. Het Community Tolerance Level (CTL), waarvoor ook gegevens over hinder en blootstelling beschikbaar waren, werd berekend voor mensen die wel en niet deelnamen aan het onderzoek. Hiervoor werden de percentages ernstig gehinderden gekoppeld aan de windturbinegeluidniveaus. Uit de resultaten bleek dat het geluidniveau van de windturbine de betrouwbaarste voorspellende factor was voor de hoorbaarheid en een zwakke, maar significante, voorspellende factor voor geluidhinder. De kans dat een windturbine te horen was bij iemand thuis nam toe met 31% (Odds ratio (OR): 1,31; 95%-BI : 1,25-1,38] per stijging van het windturbinegeluidniveau met 1 dB (L1h-max), en de kans dat meer hinder werd ervaren nam toe met 9% (OR: 1,09; 95%-BI: 1,02-1,16). De beste verklaring voor geluidhinder is visuele hinder (OR: 11,0; 95%-BI: 4,8-25,4). Ten slotte werd aangetoond dat bij mensen die geen persoonlijk voordeel hebben van windturbines het Community Tolerance Level (CTL) voor windturbinegeluid in de VS overeenkomt met internationale resultaten.

In de vergelijkingsstudie van Hübner et al (2019) met een middelhoog risico op bias werd een combinatie van onderzoeken uit de VS, Duitsland en Zwitserland geanalyseerd. Aan deze onderzoeken namen 1407 (VS) en 1015 (gegevens van Duitsland en Zwitserland samen) respondenten deel en het responspercentage van het totaal van de onderzoeken bedroeg 22%. Aan de hand van een nieuw ontwikkelde beoordelingsschaal (Stress door hinder of AS-schaal) werden de eigenschappen in kaart gebracht van aan stress lijdende personen binnen bevolkingsgroepen die in de buurt van windturbines wonen. In deze schaal zijn hinder door geluid en slagschaduw en stress-symptomen opgenomen. De bevindingen duiden erop dat er weinig sprake was van hinder, stress-symptomen en strategieën om met de hinder om te gaan. De Stress door geluidhinderschaal (waarin slagschaduw niet is opgenomen) hing in negatieve zin samen met de ervaren rechtvaardigheid tijdens het planvormings- en ontwikkelingsproces voor windprojecten. Objectieve indicatoren, zoals de afstand tot de dichtstbijzijnde windturbine en het geschatte geluiddrukkniveau per respondent, bleken niet samen te hangen met geluidhinder. Er werden vergelijkbare patronen geconstateerd in de resultaten van verscheidene Europese en Amerikaanse proeven. In deze studie hadden geluidgevoeligheid en het standpunt over het rechtvaardige verloop van het planvormingsproces de grootste invloed op hinder en stress.

Pohl et al (2018) verrichtten een longitudinaal onderzoek met een middelhoog risico op bias, waarbij 212 personen deelnamen aan de eerste fase en daarvan 133 aan de twee fase, terwijl er 635 personen

uitgenodigd waren om deel te nemen (responspercentage: 33%; uitvalpercentage tweede fase: 33%). De hinder werd gemeten aan de hand van een standaardvraag (ISO 5 puntsschaal); de stress werd gemeten via stressindicatoren die waren overgenomen uit eerdere studies. Er werd een non-responsonderzoek uitgevoerd onder 104 personen die niet hadden deelgenomen. Van de niet-respondenten was 60,6% vrouw en 39,4% man, en het percentage niet-respondenten dat een windturbine kon zien, was lager dan het percentage respondenten (61,5% versus 81,6%). Er was geen verschil in houding ten opzichte van windturbines tussen respondenten en niet-respondenten. Het windturbinegeluid werd opgenomen door de omwonenden die deelnamen aan dit onderzoek. De afstand tot de windturbine was ook bekend, als benadering van de blootstelling. Bij dit longitudinale onderzoek werd tijdens beide meetmomenten geen empirisch bewijs gevonden voor een verband tussen enerzijds hinder of aanvaardbaarheid van windturbines en anderzijds de afstand tot de woning. Door omwonenden werd meer geklaagd over fysieke en psychologische klachten door wegverkeergeluid (16%, twee jaar later was het percentage hetzelfde) dan door windturbinegeluid (10%, twee jaar later 7%). Er bestaat geen getalsmatig sterk verband tussen geluidhinder en de afstand tot de dichtstbijzijnde windturbine of het geschatte geluiddrukkniveau. Rechtvaardigheid was de beste voorspellende factor en de hinder bleek na verloop van tijd af te nemen. Deze bevindingen liggen op één lijn met eerder bewijsmateriaal. Windturbinegeluid (dat door enkele omwonenden was opgenomen) bleek echter een belangrijke indicator voor hinder en stressreacties. Amplitudemodulatie (AM) is mogelijk een van de hoofdoorzaken voor hinder door windturbinegeluid. De auteurs concluderen dat het feit dat kortdurende veranderingen in de amplitude de aandacht trekken en dus het gedrag op dat moment verstoren verklaart waarom AM in zo sterke mate wordt geassocieerd met hinder.

Krogh et al (2019) verrichtten een kwalitatief onderzoek (het risico op bias is niet relevant) waaraan 67 personen deelnamen: 28 van hen verhuisden vanwege een windpark binnen 10 km van hun huis; 31 van hen overwogen dit; 4 personen verhuisden bij voorbaat al voordat het windpark in gebruik werd genomen en de laatste 4 besloten om te blijven. Uit de voorlopige resultaten bleek dat mensen die al leden aan een medische aandoening bezorgd waren dat hun symptomen zouden verergeren doordat er in de buurt van hun woning een windturbine zou worden geplaatst. Hoewel de focus in dit onderzoek niet op hinder op zich ligt, is deze bezorgdheid die van invloed is op het verhuisgedrag mogelijk wel relevant voor de reacties op hinder.

2.2 Slaapverstoring

Onderzoek naar het effect van windturbinegeluid 's nachts op de slaap had in 2017 geen doorslaggevende conclusies opgeleverd. Uit de resultaten van toen kon geen eenduidige conclusie worden getrokken met betrekking tot subjectieve en objectieve slaapindicatoren. Onderzoekers hebben echter wel een verband gevonden tussen zelfgerapporteerde slaapverstoring en hinder door windturbines.

2.2.1 *Reviews over slaapverstoring*

Door de onlangs gepubliceerde WHO-review van het bewijsmateriaal door Basner en McGuire (2018) weten we dat er voldoende sterk bewijs bestaat voor zelfgerapporteerde slaapverstoring en objectieve indicatoren voor slaapverstoring door omgevingsgeluid in het algemeen. Studies waarin onderzoek wordt gedaan naar het verband tussen geluid en slaapverstoring zijn doorgaans gebaseerd op het percentage mensen dat ernstige slaapverstoring ondervindt ('Highly Sleep Disturbed' - %ES), door geluid van een specifieke bron dat wordt gemeten aan de hand van een semi-standaard vraag. De objectieve indicatoren zijn onder meer gegevens over de motiliteit (bewegingen tijdens de slaap) en over wakker worden c.q. zijn (gemeten met behulp van een EEG). Naar aanleiding van hun review concluderen Basner en McGuire dat er pas sinds kort bewijs begint te komen voor slaapverstoring door windturbinegeluid en dat er nog geen blootstelling-effect relatie beschikbaar is. Deze verklaring was gebaseerd op de zelfgerapporteerde slaapverstoring, die naar voren kwam in zes studies die waren gepubliceerd tussen 2000 en 2015, en die moesten voldoen aan de strenge selectiecriteria die werden gebruikt. Voor vijf van de zes studies werd een meta-analyse uitgevoerd, die net als diverse eerdere reviews, waaronder onze eigen review uit 2017, geen eenduidige resultaten opleverde. Er werd onderscheid gemaakt tussen enerzijds studies met vragen waarin lawaai of geluid in de vraag werd genoemd als oorzaak voor de zelfgerapporteerde slaapverstoring en anderzijds studies waarbij windturbinegeluid niet werd genoemd in de vraag. Volgens Basner en McGuire vormt dit een mogelijke bron voor bias. Vier studies bevestigden het sterke verband. Op basis van de Odds ratio's (OR) voor slaapverstoring werd een meta-analyse uitgevoerd voor vijf van de zes studies waarbij bestudeerd werd welke effecten er optreden wanneer de voorspelde geluiddruk niveaus buitenshuis met 10 dBA stijgen. De resultaten tonen aan dat er een niet-significant verband bestaat binnen de samengevoegde gegevens met een Odds ratio van 1,60 (95%-BI: 0,86-2,94). Er kwamen twee onderzoeken aan het licht waarin een objectieve methode werd gebruikt (actigrafie) om de slaapverstoring door windturbinegeluid te beoordelen (Lane, 2016 en Michaud, 2016c). Het onderzoek van Lane was te kleinschalig en na het grootschalige onderzoek van Michaud werd geconcludeerd dat er geen significant verband bestaat tussen geluidsniveaus van windturbines en de slaap die met behulp van actigrafie is gemeten.

In een update van studies (van Kamp et al, 2020a, 2020b), die een vervolg is op de review van de WHO voor wat betreft WT's, werd geconcludeerd dat er sinds 2015 enkele grootschalige onderzoeken van goede kwaliteit naar windturbinegeluid zijn gepubliceerd en dat een meta-analyse hierdoor gerechtvaardigd is. Het zoeken naar literatuur uit de periode halverwege 2015 tot halverwege 2020 heeft 14 nieuwe artikelen over slaapverstoring opgeleverd (11 met zelfgerapporteerde metingen en 3 met objectieve metingen). Voorgesteld werd om een nieuwe meta-analyse uit te voeren van de subjectieve en objectieve metingen voor slaap, zodat het verband tussen slaapverstoring en windturbinegeluid beoordeeld kan worden.

In de review van Micic et al die in 2018 werd gepubliceerd, lag de focus ook op slaapverstoring. Dit betreft een review van mogelijke

mechanismen en niet zozeer van het huidige bewijs voor een verband tussen windturbinegeluid en slaapverstoring. Volgens de auteurs hebben slechts enkele studies een verband aangetoond, maar zij achten het aannemelijk dat windturbinegeluid via twee mechanismen leidt tot slaapverstoring: 1) chronische slaapfragmentatie door frequente fysiologische prikkels vanwege zintuiglijke verstoring tijdens de slaap; en 2) chronische slapeloosheid die personen met een hogere zintuiglijke gevoeligheid en/of personen die al gauw hinder ervaren door omgevingsgeluid zouden kunnen ontwikkelen.

Tussen 2000 en halverwege 2018 vonden Freiberg et al (2019) 19 onderzoeken naar slaap die voldeden aan hun criteria (zoals beschreven in paragraaf 3.1). In de meeste studies waren metingen van zelfgerapporteerde slaapverstoring opgenomen, en in sommige objectieve slaapparameters gemeten met behulp van polysomnografie. In studies van hogere kwaliteit werd windturbinegeluid niet in verband gebracht met zelfgerapporteerde of objectieve slaapverstoring, wat – ten minste deels – tegenstrijdig is met bevindingen van studies van een lagere kwaliteit waarin vaker wordt gesuggereerd dat er een verband bestaat. De conclusies sluiten grotendeels aan op die van Basner en McGuire (2018).

Hieronder worden de resultaten van de oorspronkelijke studies samengevat. Sommige papers hebben geen betrekking op de periode 2017-2020, maar zijn wel hier meegenomen, aangezien deze niet zijn besproken in onze vorige review en wel relevant worden geacht voor de huidige stand van zaken.

2.2.2 *Oorspronkelijke studies naar slaapverstoring*

Lane et al (2016) voerden een veldexperiment uit als case-control-onderzoek waarbij er gedurende vijf nachten slaapmetingen werden uitgevoerd en dagboekjes werden bijgehouden. 27 personen namen deel aan het experiment, waarvan 15 woonachtig waren in een gebied waarin windturbines staan. Het responspercentage bedroeg 50%. De mate van blootstelling werd geschat op basis van de afstand tot de dichtstbijzijnde windturbine; de geluidniveaus werden gedurende het hele experiment gemeten. Onder meer de inslaaptijd, de tijd wakker na inslapen, de totale slaaptijd, het aantal keren wakker worden en de slaapefficiëntie werden gemeten. De subjectieve slaap werd gemeten aan de hand van de standaard maar aangepaste versie van de Pittsburgh Slaapkwaliteitindex. Voor geen enkele objectieve en subjectieve meting werd een statistisch significant verschil gevonden tussen de twee groepen nadat was gecorrigeerd voor geslacht en leeftijd. De auteurs concludeerden dat ofwel windturbinegeluid geen invloed heeft op de slaap, ofwel dat er te weinig deelnemers waren om een dergelijk effect te kunnen constateren, ofwel dat het effect gemaskeerd werd door onbekende factoren. Gesuggereerd werd dat hinder (een aspect dat niet werd gemeten tijdens dit experiment) een belangrijke factor zou kunnen zijn die het verband kan verklaren tussen het geluidniveau en de slaapkwaliteit. Hiervoor werd verwezen naar de bevindingen van Pedersen et al (2011), Persson Wayne et al (2007) en Bakker et al (2012).

Bij een Deense dwarsdoorsnedestudie (Poulsen et al) werd een cohortonderzoek uitgevoerd bij bewoners van 583.968 adressen. Hierbij werd het verband bestudeerd tussen berekende windturbinegeluidniveaus hoger dan 24 dB op de gevel en het laagfrequente geluidniveau binnenshuis en het gebruik van slaapmedicatie op recept. Belangrijke verstorende variabelen waren onder meer leeftijd, geslacht, opleidingsniveau, burgerlijke status, type woning en de afstand tot een nabijgelegen weg. De resultaten toonden aan dat bij een gemiddeld windturbinegeluidniveau van 42 dBA of hoger 's nachts en buitenshuis over een periode van vijf jaar, er een zwak verband bestond met het gebruik van slaapmedicatie met een Odds ratio (OR) van 1,14 [95%- (BI)]:0,98, 1,33) wanneer het geluidniveau met 10 dB toenam. Er werd geen verband gevonden met het geluidniveau binnenshuis. Een nadere analyse toonde aan dat de sterkste verbanden voorkwamen bij oudere mensen. Het risico op bias werd ingeschat op middelhoog, aangezien dit een ecologische studie betreft, waarbij de gegevens worden geanalyseerd op groeps-/bevolkingsniveau en niet per individu.

Bij een Finse dwarsdoorsnedestudie (Radun et al, 2019) met een laag risico op bias onder 429 personen (responspercentage: 57%) werd het verband tussen windturbinegeluidniveaus binnenshuis en zelfgerapporteerde slaapverstoring bestudeerd. Het windturbinegeluidniveau werd gemodelleerd en ingedeeld in categorieën (intervallen: [25-30], [30-35], [35-40] en [40-46] dB Lden). Belangrijke verstorende variabelen waren vertrouwen in overheidsinstanties en beheerders, zichtbaarheid, economische voordelen, leeftijd, geslacht, opleidingsniveau, type woning en de afstand tot een windturbine. Dit leverde een significant, maar zwak verband op tussen de geluidniveauklasse binnenshuis en de subjectieve slaapverstoring met een OR van 1,38 (1,16, 1,65) en een (Nagelkerke pseudo R²-maat gelijk aan 0,50). De gezondheidsklachten van deelnemers hadden echter een grotere invloed op de slaapverstoring dan het geluidniveau van windturbines.

Morsing et al (2018) verrichtten twee laboratoriumexperimenten met zes gezonde studenten gedurende drie nachten op rij. De geluiden waar de studenten aan werden blootgesteld, waren opnames van windturbinegeluid met variatie in het geluiddrukkniveau, de sterkte van de amplitudemodulatie, de vorm van het geluidsspectrum, het toerental van de windturbine ende mate van 'zoeven' of 'stampen' van het geluid. De slaap werd gemeten via polysomnografische indicatoren en via enquêtes. De resultaten leverden enkele aanwijzingen op dat windturbinegeluid leidt tot objectieve slaapverstoring, wat terug te zien is in het feit dat de testpersonen vaker wakker werden, minder lang diep sliepen en een kortere continue slaapfase N2 hadden. Deze bevindingen kwamen overeen met de toename in de zelfgerapporteerde slaapverstoring. Er bestonden echter aanzienlijke verschillen tussen de twee studies, waardoor er niet met zekerheid conclusies konden worden getrokken over de effecten van windturbinegeluid op de slaap. Bovendien leverde de tweede studie beperkt bewijs dat men vaker wakker was bij een sterke amplitudemodulatie en een lager toerental. Een hoger toerental en een sterke amplitudemodulatie hadden een negatieve invloed op de diepste slaap terwijl de lichte slaap vaker werd

verstoord bij een hoog toerental en 'stampen' van het geluid. Zoals hieronder beschreven, werden deze bevindingen gebruikt voor het ontwikkelen van een slaapstudie op grotere schaal (Smith et al, 2020), waarbij de onderzoekspopulatie meer representatief was en de deelnemers werden blootgesteld aan opnames van windturbinegeluid die natuurgetrouwer waren.

In 2020 werd een paper gepubliceerd over een grootschalig slaapexperiment waarin de effecten van windturbinegeluid werden onderzocht (Smith et al, 2020). Aan deze Zweedse studie met laboratoriumexperimenten deden testpersonen mee die deel uitmaakten van de algemene bevolking in de leeftijdsklasse 30-70 jaar, die een Body Mass Index (BMI) lager dan 30 kg/m² hadden en die gewoonlijk sliepen tussen 23.00 uur en 7.00 uur en gemiddeld ongeveer acht uur per nacht sliepen. Andere uitsluitingscriteria waren het gebruik van slaapmedicatie, slaapapneu en zelfgerapporteerde gehoorgevoeligheid; dit laatste werd tijdens de eerste testnacht van de studie onderzocht. Het totale experiment duurde drie nachten, waarbij de eerste nacht fungeerde als gewenningsperiode en tijdens de twee andere nachten werd gewerkt met een blootstellingsgroep en controlegroep. Het windturbinegeluid was kunstmatig samengesteld, maar wel gebaseerd op veel veldopnamen van windturbinegeluid. De gebruikte parameters voor de amplitudemodulatie waren de frequentie-afhankelijke modulatie diepte en de draaisnelheid van de windturbine. Daarnaast werden tijdens de nachten op willekeurige tijdstippen variaties aangebracht om de veldopnames na te bootsen. Het afgespeelde geluid werd afgespeeld op geluidniveau dat in een typisch Zweeds huis binnenshuis te horen is als buitenshuis een constant WT-geluidniveau van 45 dBA heerst. Er werd gekozen voor een over de tijd gemiddeld constant frequentiespectrum in alle bestanden met windturbinegeluid. De uitkomstmaten waren onder meer zelfgerapporteerde slaapkwaliteit en fysiologische maten zoals polysomnografie, polysactigrafie, hartslag, bloeddruk, cortisolgehalte na het ontwaken en cortisolgehalte op de lange termijn in haarmonsters. De belangrijkste verstoringen waren zelfgerapporteerde stress en geluidgevoeligheid. Uit de resultaten bleek dat één nacht blootgesteld worden aan windturbinegeluid van invloed was op de duur van de REM-slaap. Er werden geen effecten gevonden voor andere gemeten fysiologische uitkomsten. De bevindingen laten zien dat constant windturbinegeluid met AM van invloed kan zijn op objectieve en subjectieve metingen van de slaap, wat leidt tot een lagere slaapkwaliteit en een minder uitgerust gevoel 's ochtends. Dit gold zowel voor mensen die doorgaans werden blootgesteld aan windturbinegeluid als voor mensen bij wie dit niet het geval was. In vergelijking met de referentiegroep tijdens zowel de controlenacht als de nacht waarin de opnames van windturbinegeluid werden afgespeeld, gaf de groep die in het dagelijks leven werd blootgesteld aan windturbinegeluid een slechtere score aan de slaapkwaliteit en vermoeidheid. Deze groep gaf ook aan slechter te hebben geslapen dan gewoonlijk. Ook gaf deze groep in vergelijking met de referentiegroep aan een hogere mate van slaapverstoring door geluidsoverlast te hebben ervaren tijdens zowel de controlenacht als de nacht waarin het geluid werd afgespeeld.

Bij de Chinese studie van Song et al (2016) met 227 deelnemers (responspercentage: 77%) werd onderzoek gedaan naar gemeten windturbinegeluidniveaus, ingedeeld in 5 geluidniveaus (< 40 dB tot > 47,5 dB), en zelfgerapporteerde slaapverstoring. Geslacht, leeftijd, woonduur, zichtbaarheid, geluidgevoeligheid, houding en de algemene mening over windturbines werden meegenomen als belangrijke verstorende variabelen. Het verband tussen het LAeq van windturbinegeluid en de subjectieve slaapverstoring was significant, maar met een Spearmans rangcorrelatiecoëfficiënt van 0,21 zwak te noemen. Het risico op bias van deze studie werd ingeschat op middelhoog.

Bij de dwarsdoorsnede studie van Kageyama et al (2016), die eind 2016 in Japan werd gepubliceerd en waaraan 1079 omwonenden deelnamen (responspercentage: 47%), werden veldmetingen verricht bij een beperkt aantal adressen. Op basis van deze metingen werd het windturbinegeluidniveau per adres ingeschat. Aan de slaap gerelateerde symptomen en slapeloosheid (zelfgerapporteerd) waren de belangrijkste uitkomsten. Het risico op een systematische fout (bias) van deze studie werd ingeschat op middelhoog. Ook werd gekeken naar geluid van wegverkeer, geluidgevoeligheid, de houding ten opzichte van windturbines en demografische variabelen. Er werd geen bewijs gevonden voor nadelige effecten van windturbinegeluid op de fysieke/mentale gezondheid, zelfgerapporteerde slaapverstoring en slapeloosheid op basis van de zelfgerapporteerde symptomen. Slapeloosheid bleek vaker voor te komen in gebieden waar windturbines 's nachts een geluidniveau hoger dan 40 dBA produceren. Slapeloosheid en andere symptomen leken voornamelijk te worden beïnvloed door persoonlijke eigenschappen, zoals geluidgevoeligheid en visuele hinder van windturbines.

De Community Noise and Health Study (CNHS) van Health Canada is besproken in onze review uit 2017 voor zover slaapverstoring naar voren kwam in de publicaties tot 2016. Bij het slaaponderzoek (Michaud et al, 2016c) onder 742 deelnemers werden de subjectieve en objectieve metingen verricht. Geconcludeerd werd dat het geluidniveau van windturbines geen effect had op een van de slaapindicatoren nadat gecorrigeerd was voor verstorende variabelen als leeftijd, cafeïne-inname, BMI en gezondheidstoestand. Het risico op bias werd ingeschat op laag. Er zijn geen nieuwe studies over slaap gepubliceerd naar aanleiding van de CNHS.

2.3 Effecten op het hart- en vaatstelsel

Ten tijde van onze review in 2017 was er onvoldoende bewijs voor een direct verband tussen het geluidniveau van windturbines en effecten op het hart- en vaatstelsel.

In de WHO-review voor cardiovasculaire en metabole effecten die is opgesteld door van Kempen et al (2018) kwamen drie dwarsdoorsnede studies naar voren waarin onderzoek werd gedaan naar het verband tussen windturbinegeluid en zelfgerapporteerde hart- en vaatziekten. Er waren geen studies beschikbaar over het verband tussen windturbinegeluid en gediagnosticeerde hypertensie, ischemische

hartziekte en beroertes. In een update van deze review (van Kamp et al, 2020a) kwamen drie publicaties naar voren over twee studies waarin onderzoek werd gedaan naar het verband tussen windturbinegeluid en hypertensie: één dwarsdoorsnedestudie (Michaud, 2018c) en één cohortonderzoek (Poulsen, 2018a). De auteurs van het cohortonderzoek (de Danish Wind Turbine Study of kortweg DWS) concludeerden dat hun onderzoek geen onderbouwing opleverde voor het verband tussen het geluidniveau van windturbines en het verkrijgen van bloeddrukverlagende medicijnen. Let op: het verkrijgen van bloeddrukverlagende medicijnen wordt hier gebruikt als indicator voor de diagnose hypertensie.

Daarnaast hebben we twee nieuwe studies gevonden en geselecteerd waarin onderzoek werd gedaan naar het verband tussen windturbinegeluid en ischemische hartziekte. Beide studies betreffen cohortonderzoeken (Poulsen 2019b; Bräuner et al, 2018). Ook kwamen we tijdens het zoeken één Deens cohortonderzoek tegen (Poulsen, 2019b) (n = 712.402) naar het verband tussen het geluidniveau van windturbines en het optreden van een beroerte. De studies van Poulsen (2019b) leverden geen afdoend bewijsmateriaal op voor een verband tussen het windturbinegeluid buitenshuis en ischemische hartziekte of een beroerte. Deze bevinding werd bevestigd in de studie van Bräuner et al (2018) van het zogeheten Danish Nurse Cohort, dat weinig tot geen steun gaf aan een causaal verband tussen langdurige blootstelling aan windturbinegeluid buitenshuis en ischemische hartziekte.

In hetzelfde Danish Nurse Cohort-onderzoek vonden Bräuner et al (2019a) mogelijke aanwijzingen voor een verband tussen langdurige blootstelling aan windturbinegeluid en atriumfibrillatie (AF) onder verpleegsters. Van de 28.731 verpleegsters die deelnamen aan het cohortonderzoek, ontwikkelden 1.413 AF. Zij werden blootgesteld aan iets hogere windturbinegeluidniveaus dan de controlegroep van deze studie. Verpleegsters die langdurig (gemiddeld 11 jaar) 's nachts en binnenshuis werden blootgesteld aan een windturbinegeluidniveau ≥ 20 dBA bleken statistisch gezien een 30% hoger risico op AF te hebben (95%-BI: 1,05-1,61) dan verpleegsters die werden blootgesteld aan geluidniveaus < 20 dBA. Volgens de auteurs kan chronische hinder een plausibele verklaring zijn voor AF. Voorzichtigheid is echter geboden bij de interpretatie van deze bevindingen, aangezien de blootstellingsniveaus erg laag waren. Een analyse van hetzelfde cohortonderzoek (Bräuner et al, 2019b) leverde geen overtuigend bewijs voor een verband tussen langdurige blootstelling aan windturbinegeluid en het risico op een beroerte.

2.4 Metabole effecten

Ten tijde van onze review in 2017 was er onvoldoende bewijs voor een direct verband tussen het geluidniveau van windturbines en metabole effecten (diabetes en obesitas).

Tijdens de WHO-review van bewijs voor metabole effecten van omgevingsgeluid (van Kempen et al, 2018) werden drie studies gevonden en geselecteerd waarin onderzoek werd gedaan naar het verband tussen windturbinegeluid 's nachts en zelfgerapporteerde

gevallen van diabetes. Deze studies werden gepubliceerd door Pedersen & Persson Waye(2007), Bakker et al, (2012) en Pedersen et al (2011). De resultaten van de WHO-review geven geen onderbouwing voor een verband tussen het geluidniveau van windturbines 's nachts en een hoger risico op diabetes. De update voor DEFRA die in 2020 werd gepubliceerd (van Kamp et al, 2020a) leverde twee nieuwe studies op waarin onderzoek werd gedaan naar het verband tussen windturbinegeluid en gevallen van diabetes: één dwarsdoorsnedestudie (Michaud, 2016b) en één cohortonderzoek (Poulsen, 2018b). Geen van deze twee studies bevestigden dat chronische blootstelling aan WT-geluid samenhangt met een verhoogd risico op diabetes.

Er zijn geen studies naar voren gekomen in de WHO-review, de updates en ons literatuuronderzoek waarin onderzoek is gedaan naar de impact van windturbinegeluid op obesitas.

2.5 Cognitieve en mentale gezondheidseffecten van windturbinegeluid

In het kader van de WHO-richtlijnen werden ook de effecten van windturbinegeluid en cognitieve en mentale gezondheidseffecten beoordeeld (Clark en Paunovic, 2018). Er zijn geen oorspronkelijke studies gevonden rondom het thema windturbinegeluid, maar wel zijn er vijf systematische reviews van bewijsmateriaal gevonden specifiek over het verband tussen windturbinegeluid en de kwaliteit van leven, het welzijn en de mentale gezondheid. Daarom werd voor windturbinegeluid een overzicht opgesteld van deze bestaande systematische overzichtsartikelen omdat originele onderzoeksartikelen niet beschikbaar waren. Geconcludeerd werd dat er slechts een beperkt aantal studies bestond en dat deze van lage kwaliteit waren, waarbij er gebruik werd gemaakt van verschillende uitkomstmaten. Met name de karakterisering van de blootstelling kreeg een slechte score in de beoordeling en vaak werd de afstand tot een windturbine gebruikt als graadmeter voor de mate van blootstelling aan het geluid. Naar aanleiding van tekortkomingen in de studies, inconsistentie en kwalitatieve vergelijkingen tussen studies concluderen de auteurs - op basis van bewijsmateriaal van zeer lage kwaliteit - dat windturbinegeluid geen substantieel effect heeft op de kwaliteit van leven, het welzijn of de mentale gezondheid. Een van de aanbevelingen luidt om bij toekomstige studies ook de spectrale niveaus te adresseren (zie hoofdstuk 4).

In een voor DEFRA opgestelde update van deze review over cognitieve en mentale gezondheidseffecten, kanker, zelfgerapporteerde gezondheid en geboorte-effecten (Clark et al, 2020) wordt aanvullend bewijsmateriaal geleverd op basis waarvan geconcludeerd kan worden dat het bewijs voor de afwezigheid van effecten van het windturbinegeluidniveau op de zelfgerapporteerde kwaliteit van leven of gezondheid van zeer lage kwaliteit is. Dat geldt ook voor het bewijs voor een effect op mentale aandoeningen (angststoornis, depressie) en geboorte-uitkomsten (zie ook Poulsen, 2018c). In deze review werd er geen bewijs gevonden waarin de effecten van windturbinegeluid op kanker worden bevestigd.

In de review van Freiberg et al (2019) werd geconcludeerd dat er geen verband was gevonden tussen windturbinegeluid en stress-effecten en biofysiologische slaapvariabelen. Ook waren de bevindingen op het gebied van slaapverstoring, kwaliteit van leven en mentale gezondheidsproblemen (depressie en angststoornissen) niet consistent.

2.6 Andere sociale en fysieke aspecten dan geluid; invloed van contextuele en persoonlijke factoren

Op basis van het beschikbare bewijsmateriaal over niet-akoestische factoren concludeerden we in 2017 dat het effect van windturbinegeluid zal verminderen als ook een grote reeks van andere factoren wordt geadresseerd die van invloed is op de mate van hinder die verband houden met het wonen in de nabijheid van een windturbine en vanwege de gematigde effecten van het geluidniveau. De invloed van deze factoren is niet noodzakelijkerwijs uniek voor windturbines, maar bij sommige factoren is dat wel het geval.

Toen opnieuw gezocht werd naar literatuur, werden 36 nieuwe artikelen gevonden over het effect van situationele, contextuele en persoonlijke factoren bij hinder en andere gezondheidseffecten. Van 25 artikelen werd de voltallige inhoud gelezen. Twee van de gevonden artikelen betroffen reviews over medebepalende factoren voor hinder: de ene ging over deze factoren in het algemeen (Simos, 2019) en de andere ging alleen in op de visuele aspecten (Freiberg et al, 2019). De selectiecriteria hielden in dat het artikel een studie moest zijn (dus geen commentaar, redactiecommentaar, opiniestuk of brief naar de redactie) en dat in het artikel windturbinegeluid, hinder of andere relevante uitkomsten op enige wijze werden benoemd. In totaal werden 24 papers aanvaard voor de review en 12 artikelen werden verworpen, omdat ze niet voldeden aan deze criteria of omdat ze hierboven al waren besproken. In de beschrijving wordt onderscheid gemaakt tussen studies waarin visuele aspecten, maatschappelijke aspecten en andere aspecten, zoals persoonlijke en contextuele aspecten, worden besproken.

Review

De beschrijvende review van Simos et al (2019), die ook in paragraaf 3.1 aan bod kwam, omvatte 104 artikelen (over 67 studies) en de resultaten worden besproken aan de hand van een reeks medebepalende factoren voor hinder. Windturbinegeluid, infrageluid, laagfrequente geluiden, slagschaduw, veiligheid en effecten op het landschap en vastgoed waren aspecten die werden geadresseerd. Hinder en het zogenoemde windturbinesyndroom werden opgenomen in de uitkomsten. Aangetoond is dat er een zwak verband bestaat tussen slagschaduw enerzijds en hinder en gezondheidsindicatoren anderzijds. Het prevalentiepercentage van ongevallen in de buurt van windturbines ligt erg laag, maar er zijn slechts enkele systematische onderzoeken hiernaar verricht. De resultaten met betrekking tot het effect van de zichtbaarheid van windturbines zijn niet consistent. Uit de analyse van de maatschappelijke aspecten van de ontwikkeling van een windpark bleek dat sociale netwerken, risicoperceptie en de maatschappelijke aanvaardbaarheid een grote rol spelen. In algemene zin concluderen de auteurs dat het bewezen is dat een negatieve perceptie bij

windenergieprojecten kan worden voorkomen als de gemeenschap in een vroeg stadium bij de plannen wordt betrokken. Bij meerdere projecten is aangetoond dat de huizenprijzen aanzienlijk dalen als gevolg van de plannen voor windparken. In sommige gevallen herstelden die prijzen zich weer toen het park in gebruik werd genomen. Op basis van de bevindingen werden enkele aanbevelingen opgesteld.

2.6.1

Visuele aspecten

In veel stukken valt te lezen dat visuele aspecten een belangrijke rol spelen bij de reactie op windturbines. Deze aspecten zijn nauw verweven met het auditieve aspect: hinder van visuele aspecten kan bovenop geluidhinder komen en de geluidhinder zelfs versterken (en vice versa). Visuele aspecten hebben niet alleen betrekking op de zichtbaarheid van windturbines en de ervaren landschapsvervuiling, maar ook op andere kenmerken van windturbines, zoals knipperlichten, slagschaduw en de draaiende rotorbladen.

Review

In 2019 publiceerden Freiberg et al een kwalitatief hoogwaardige review van literatuur over de invloed van visuele aspecten op hinder en slaapverstoring en die van akoestische aspecten. Dit betrof een systematische review waarbij de PRISMA-benadering werd toegepast. Het studieprotocol werd voorafgaand aan de studie gepubliceerd in het International Prospective Register of Systematic Reviews. In deze review worden zeventien studies besproken die zijn gepubliceerd tussen 2000 en halverwege 2018. De samengevoegde prevalentie van ernstige hinder vanwege een verandering in uitzicht en slagschaduw bedroeg 6% per factor. De resultaten voor andere gezondheidseffecten waren niet consistent, maar er waren aanwijzingen dat de zichtbaarheid van een windturbine zelf tot meer slaapverstoring leidt. Andere studies toonden aan dat er in algemene zin een significant en direct verband bestaat tussen hinder door de zichtbaarheid, slagschaduw en knipperlichten enerzijds en een hoger risico op slaapverstoring anderzijds. Slechts één studie gaf een interactief effect aan tussen visuele en auditieve stimuli. Dit houdt in dat de combinatie van visuele en auditieve aspecten tot meer slaapverstoring leidt dan geluid en visuele aspecten los van elkaar. De auteurs concluderen dat de directe en indirecte zichtbaarheid van een windturbine van invloed kan zijn op de gezondheid van omwonenden en dat de ervaren mate van hinder per persoon kan verschillen.

Oorspronkelijke studies

Er zijn verscheidene sinds 2017 gepubliceerde studies gevonden over de impact van visuele aspecten van windturbines in verhouding tot de aanvaardbaarheid voor windturbines (Delicado et al, 2017; Grima-Murcia et al, 2017; Lamy et al, 2017; Frantál et al, 2017; Sklenicka en Zouhar, 2018; Landeta-Manzano et al, 2018). Deze studies betreffen enquêtes, experimenten, documentenanalyses en overleggen met betrokkenen en experts. Allemaal hebben ze als doel om de rol van visuele aspecten in kaart te brengen voor het plan- en besluitvormingsproces en om manieren te bestuderen ter vermindering van de negatieve milieueffecten en maatschappelijke effecten van het gebruik van windenergie.

Delicado et al (2017) hebben een media-analyse uitgevoerd, en ook een analyse van milieueffectrapporten en een analyse van standpunten van overheidsinstanties over deze kwesties. Horizonvervuiling is een term die vaak terugkomt in het debat en die wordt aangevoerd als een belangrijk argument tegen windparken. Het wordt ofwel negatief neergezet als risico op aantasting van de aanblik van een gebied of juist positief als indicator dat in het landschap technologische vooruitgang wordt geboekt. Uit de media-analyse bleek dat het woord 'landschap' zelden wordt gebruikt, maar dat het begrip 'kloof tussen plattelands- en stedelijke gebieden' wel naar voren kwam in opiniestukken. Uit de analyse van de milieueffectrapporten kwam naar voren dat met name NGO's en in sommige gevallen bedrijven uit de toerismesector bezwaren indienden tegen windparken op grond van horizonvervuiling.

Grima-Murcia et al (2017) verrichtten een laboratoriumonderzoek onder 14 respondenten. De respondenten kregen foto's te zien van landschappen met daarin verschillende energiebesparende maatregelen en met een uiteenlopende duur van de blootstelling (de ene foto werd langer getoond dan de andere). De effecten werden gemeten via enquêtes en elektro-encefalogrammen (EEG's). Er zijn in de reacties die zijn gemeten met EEG geen verschillen gevonden tussen de verschillende stimuli, waaronder windturbinegeluid. Bij het zien van een kerncentrale werd echter in een tijdvenster van 400 msec een reactie van de hersenen geregistreerd die kenmerkend is voor het verwerken van negatieve emoties. Dit geeft aan dat EEG's een bruikbare methode kunnen vormen voor het meten van de visuele impact.

Lamy et al (2017) hielden semigestructureerde interviews met 15 omwonenden die op verschillende afstanden tot een windpark wonen. De visuele impact bleek een van de voornaamste aspecten die naast economische voordelen, veiligheidskwesties, geluid en voordelen van duurzame energie van invloed waren op hun perceptie.

In een onderzoek van Frantal et al (2017) onder 474 volwassenen werd de invloed van visuele aspecten van het landschap zelf op de impact van windparken bestudeerd. Uit de resultaten bleek dat de rol van die visuele aspecten sterk afhankelijk was de lokale milieugerelateerde en sociaaleconomische context, waaronder geluidhinder, economische voordelen en het opleidingsniveau vallen.

In een onderzoek onder 400 deelnemers in vier verschillende landen uit Midden-Europa (Sklenicka en Zouhar, 2018) kregen de deelnemers een reeks foto's te zien waarop onder meer windturbines waren toegevoegd via Photoshop en die verband hielden met drie indicatoren voor landschapsplanning (reliëf, landbedekking en landschapspatroon). Het doel was om op basis van algemene principes een objectieve methode te verkrijgen voor het voorspellen van de visuele effecten van windparken op het land. Er werd echter geen significant verband gevonden tussen een van de indicatoren en de aanvaardbaarheid voor windturbines.

Landeta-Manzano et al (2018) beoordeelden de inmenging van een toonaangevende fabrikant van windturbines die moest leiden tot aanvaarding van windenergieprojecten onder de plaatselijke gemeenschap. Tijdens dit kwalitatieve onderzoek werden

semigestructureerde interviews gehouden met 47 betrokkenen en 6 deskundigen (n=53). Tijdens de interventies lag de focus op de visuele impact van de ontwikkelingen, op gezondheids- en veiligheidskwesties en op de betrokkenheid van en de maatschappelijke investering in de plaatselijke gemeenschap. Wat betreft de visuele impact bleek uit de resultaten van het overleg dat de factoren met betrekking tot de locatie van de windturbine de grootste negatieve invloed hebben op de aanvaardbaarheid onder de gemeenschap: tijdens de locatiekeuze werd de mening van de gemeenschap genegeerd.

Tijdens dit nieuwe literatuuronderzoek zijn niet meer technische aspecten gevonden die verband houden met de zichtbaarheid, een element waaraan ruim aandacht werd besteed tijdens een eerdere fase (en dat aan bod kwam in onze review uit 2017).

In de nieuwe studies werd ook geen onderzoek gedaan naar veiligheidsaspecten en elektromagnetische velden veroorzaakt door windturbines of werden deze onderwerpen slechts kort benoemd. Ook wordt geen nieuwe informatie toegevoegd over deze onderwerpen. We verwijzen hier naar de beschrijvingen in onze review uit 2017 en de studie van Lubner et al (2020), die in hoofdstuk 4 aan bod zal komen.

2.6.2

Contextuele, situationele en persoonlijke factoren

Door het onderzoek dat in de afgelopen tien jaar is verricht hebben we in enige mate kunnen verklaren waarom sommige mensen meer worden gehinderd door windturbines dan anderen (Ansensio, et al 2017; Lercher et al, 2017; Haubrich, 2020). Naast fysieke aspecten zijn ook persoonlijke en contextuele aspecten van invloed op de mate van ervaren hinder. Deze aspecten worden vaak 'niet-akoestische factoren' genoemd, wat aangeeft dat ze een aanvulling vormen op de akoestische factoren die worden uitgedrukt in decibel en Hertz. Omdat de term 'niet-akoestisch' verwijst naar een breed scala aan aspecten, die bijgevolg zeer onspecifiek zijn, gebruiken wij liever de term 'persoonlijke en contextuele factoren'. Niet-akoestische factoren kunnen dus verder worden onderverdeeld in de volgende subcategorieën:

- Demografische en sociaaleconomische factoren (leeftijd, geslacht, inkomen, opleidingsniveau);
- Persoonlijke factoren (angst of bezorgdheid ten aanzien van de geluidbron, geluidgevoeligheid, economische voordelen van de geluidbron);
- Situationele factoren (frequentie van de geluidgebeurtenissen, meteorologische omstandigheden, andere geluidbronnen, afstand tot voorzieningen, aantrekkelijkheid van het gebied).
- Maatschappelijke en economische factoren (verwachtingen, houding ten opzichte van fabrikanten of de overheid, verslaggeving in de media, bereidheid tot betalen en aanvaarden);

Hoewel deze lijst verre van volledig is, worden enkele van deze aspecten die relevant zijn in het kader van windturbines hieronder nader uitgewerkt op basis van nieuw bewijs. Let op: er zijn geen papers over situationele factoren gevonden.

Demografische aspecten

Leeftijd, geslacht en opleidingsniveau worden niet als cruciale voorspellende factoren beschouwd voor geluidhinder in het algemeen. Demografische aspecten worden doorgaans wel meegenomen in onderzoeken naar hinder en slaap en in studies waarin andere gezondheidsuitkomsten worden geadresseerd, maar over het algemeen worden ze meer gezien als versturende variabelen dan als belangrijke medebepalende factoren voor hinder. Voor het controversiële onderwerp windenergie en windturbines waarover de politiek in grote mate beslist is echter wel in enige mate bewezen dat geslacht en het opleidingsniveau wel een rol spelen.

Persoonlijke factoren

Angst en geluidgevoeligheid worden steeds aangevoerd als belangrijke voorspellende factoren voor hinder en stressgerelateerde effecten. Geluidgevoelig zijn verwijst naar een interne toestand die wordt bepaald door fysiologische, psychische en houdingsaspecten, leefstijl en de activiteiten van een persoon, die de reactiviteit van die persoon verhogen voor geluid in het algemeen. Geluidgevoeligheid heeft een sterke genetische (d.w.z. erfelijke) component, maar kan ook een gevolg zijn van een ziekte (bijv. migraine) of een trauma. Ook ernstige angststoornissen kunnen samengaan met een verhoogde gevoeligheid voor geluid en daardoor mogelijk leiden tot een gevoel van paniek (Van Kamp en Davies, 2013). Net als in de vorige periode moeten we vaststellen dat de aspecten gevoeligheid en angst in maar weinig studies worden belicht als de voornaamste problemen die verband houden met windturbinegeluid. In meerdere studies (Smith, 2020; Klaeboe, 2016; Michaud, 2016a; Song 2016; Kageyama, 2016), die al eerder in dit document zijn besproken, werden geluidgevoeligheid en soms ook angst in de statistische analyse opgenomen als versturende variabelen. In deze studies wordt de onafhankelijke rol van geluidgevoeligheid in de reactie op windturbines bevestigd; dit veel gebruikte begrip komt ook voor bij andere geluidbronnen. Angst en bezorgdheid lijken een steeds grotere rol te spelen op het gebied van laagfrequent geluid en infrageluid en bij het aangenomen verband met vibro-akoestische ziekte (zie paragraaf 4.3), een aandoening die niet als diagnose wordt erkend door de medische wereld, maar het begrip zelf draagt wel bij aan angst en bezorgdheid.

Maatschappelijke en economische aspecten

In eerdere studies en reviews wordt benadrukt dat het voor de maatschappelijke aanvaardbaarheid van windturbineprojecten onder de lokale gemeenschap van essentieel belang is dat de gemeenschap de gevolgen voor haar toekomstige kwaliteit van leven zelf kan beoordelen. Naast fysieke aspecten spelen ook situationele, maatschappelijke en politieke aspecten een belangrijke rol bij de aanvaarding en bij het gevoel dat het proces rechtvaardig verloopt. De communicatie en de relatie tussen de betrokken partijen (omwonenden, (plaatselijke) overheden, projectontwikkelaar) zijn hiervoor van essentieel belang. We zien dat in de afgelopen tien jaar steeds meer polarisatie is ontstaan tussen deze betrokken partijen.

Sinds onze vorige review uit 2017 zagen we eerst in een aantal landen een toename in het aantal studies waarin onderzoek werd gedaan naar

de maatschappelijke aanvaardbaarheid voor windprojecten onder de lokale gemeenschap. In de meeste van die studies wordt benadrukt hoe belangrijk het is dat het planvormingsproces rechtvaardig verloopt en dat de plaatselijke gemeenschap wordt betrokken en inspraak heeft (Beuret, 2016) (Brennan, 2017) (Langer, 2017) (Liebe, 2017) (MacDonald, 2017) (Scherhauser, 2017) (Sonnberger, 2017) (Kongprasit, 2018) (Clark en Botterill, 2018) (Janhun, 2018) (Kim, 2018) (Gölz, 2018) (Langer, 2018), (Landeta-Manzano, 2018) (Scherhauser, 2018) (Sæþórsdóttir 2018). Opmerkelijk genoeg lijken er sinds kort minder artikelen te zijn verschenen: na 2018 zijn er geen nieuwe artikelen meer gevonden. In de studies naar de maatschappelijke aanvaardbaarheid van windprojecten onder de plaatselijke gemeenschap wordt over het algemeen geconcludeerd dat mensen meer bereid zijn om nieuwe windturbines in hun leefomgeving te accepteren als ze inspraak hebben op het besluitvormingsproces of als de windturbines het eigendom zijn van een groep burgers en/of als de opgewekte elektriciteit gebruikt wordt in de regio zelf en niet wordt geëxporteerd. Ook zijn mensen die nabij hun woning al worden blootgesteld aan windturbinegeluid meer bereid een windpark te accepteren dan mensen die daar voor het eerst mee te maken krijgen. Diverse onderzoekers benadrukken dat de omstandigheden per locatie enorm kunnen verschillen en dat de plaatselijke omstandigheden dus moeten worden meegenomen in een studie naar aanvaardbaarheid. Ook onderstrepen ze dat de complexe verzameling van individuele en gezamenlijke waarden en voorkeuren moet worden bestudeerd; de standpunten van wetenschappers, beleidsmakers en burgers moeten hierin worden verwerkt.

In een interessante paper van Clark et al (2018) wordt geconstateerd dat verschillende betrokkenen met verschillende belangen verschillende 'feiten' aandragen ten aanzien van de legitimiteit van gezondheidsklachten. Het windturbinesyndroom is een voorbeeld van zo'n ziekte die controversieel is in de medische wereld en daarom veel stof doet opwaaien. Uit deze bevinding blijkt dat de belangen en de rechtmatigheid van de argumenten zeer relevant zijn voor de tegenstrijdige omschrijvingen van de 'feiten' over gezondheidseffecten van windturbines.

Na eerdere studies werd geconcludeerd dat economische aspecten ook medebepalend kunnen zijn voor de ervaren mate van hinder van windturbines. Gedeeld eigenaarschap en voordelen werden aangevoerd als belangrijke voorspellende factoren die de negatieve reactie op windturbines kunnen compenseren. Benadrukt werd dat niet alleen de voordelen in deze context belangrijk zijn, maar ook een gevoel van controle (van den Berg et al, 2008). Dit werd bevestigd in de CNHS en in mindere mate in Japanse studies.

In recentere literatuur over maatschappelijke en economische aspecten ligt de focus sterker op *de bereidheid om te betalen, de bereidheid om te aanvaarden* en de waargenomen daling in de woningwaarde die verband houden met windparken (Wen et al, 2018; Thomson, 2018). Thomson concludeerde dat mensen die in de buurt van een windturbine wonen gemiddeld bereid zijn om geld te betalen voor het behoud van een windpark op een specifieke locatie, terwijl mensen die in de buurt

van een steenkolencentrale wonen bereid zijn om geld te betalen om de centrale te ontmantelen. De demografische aspecten hadden geen significant effect op deze resultaten. In tegenstelling tot deze bevindingen en op basis van een systematische review concludeerden Wen et al (2018) dat de respondenten bij verschillende studies consistent juist *meer bereid waren om geld te betalen* om windparken te laten verplaatsen naar een locatie die verder van hun woning lag. Maar dit hing in sterke mate ook af van het aantal windturbines en de hoogte daarvan, wat mogelijk aangeeft dat er geen sprake is van een lineair verband.

3 Specifieke gezondheidseffecten voor laagfrequent geluid en infrageluid

Zoals in onze eerdere review werd beschreven, wordt een reeks gezondheidseffecten onder omwonenden toegeschreven aan de aanwezigheid van windturbines. Infrageluid en/of laagfrequent geluid worden soms genoemd als belangrijke oorzaak van deze effecten, zelfs wanneer het infrageluidniveau erg laag moet zijn of niet bekend is. In paragraaf 2.1 werd opgemerkt dat er op akoestisch vlak verschillen bestaan tussen enerzijds laagfrequent geluid en infrageluid en anderzijds geluid met hogere frequenties. Laagfrequent geluid en infrageluid verzwakken in vergelijking met geluid met hogere frequenties minder naarmate de afstand groter wordt en worden minder gedempt door gevels van gebouwen. We willen in dit document echter meer te weten komen over de effecten: kan infrageluid of laagfrequent geluid andere effecten hebben op mensen dan normaal geluid? In dit hoofdstuk kijken we naar de vraag of infrageluid of laagfrequent geluid speciale aandacht verdient als het gaat om de effecten van windturbine-geluid.

Bij de meeste nieuwe studies werd hersenactiviteit gemeten in reactie op infrageluid en vaak werd deze vergeleken met de reactie op laagfrequent geluid of 'normaal' geluid. In tegenstelling tot hoofdstuk 3 richten we ons in dit hoofdstuk meer op de mechanismen die een rol spelen en minder op de gezondheidseffecten van laagfrequent geluid en infrageluid op de lange termijn. We gebruiken de term 'audiogeluid' voor geluiden in het middenfrequentie- en hogere frequentiegebied, d.w.z. geluiden met frequenties boven 100 Hz tot 200 Hz. Audiogeluid valt dus te vergelijken met wat we 'normaal' geluid noemen, behalve voor het gebied waar laagfrequent geluid en audiogeluid elkaar overlappen, waarin geen duidelijke scheidslijn tussen de twee soorten te onderscheiden is. Hieronder beschrijven we de resultaten van deze studies.

3.1 Hoorbaarheid van infrageluid en laagfrequent geluid

In onze review uit 2017 (Van den Berg en Van Kamp, 2017) stelden we vast dat er dagelijks laagfrequent geluid hoorbaar is dat afkomstig is van weg- en luchtverkeer en vele andere geluidbronnen. Laagfrequent geluid wordt doorgaans gedefinieerd als onderdeel van het normale frequentiebereik van alledaagse geluiden. Er is minder bekend over infrageluid en bovendien wordt infrageluid niet zo vaak waargenomen als laagfrequent of 'normaal' geluid. Infrageluid komt echter niet alleen voor bij windturbines; natuurlijke bronnen (storm, branding), grote dieren, transportmodaliteiten en door de mens gemaakte machines produceren vrijwel dezelfde infrageluidniveaus als windparken. Door de hoge gehoordrempel van de mens zijn we ons over het algemeen niet bewust van het meeste infrageluid.

Het nieuwe literatuuronderzoek leverde 24 publicaties op, waarvan 17 papers relevant waren voor deze update. Twee daarvan waren vóór 2017 verschenen. De 24 gevonden publicaties omvatten twee reviews, dertien oorspronkelijke experimentele studies, één transversale

veldstudie en één bureaustudie. Er werden nog twee onlangs gepubliceerde experimentele studies toegevoegd (Maijala et al, 2020 en Krahé et al, 2020) nadat het literatuuronderzoek was afgerond, waarmee het totaal op 19 relevante papers kwam.

Er bestaan verscheidene nieuwe studies over de mogelijke effecten van laagfrequente geluiden op de mens: hoe reageren mensen wanneer ze worden blootgesteld aan een laagtonig geluid of zelfs aan onhoorbaar infrageluid? De reacties op de middellange en korte termijn kunnen worden onderzocht tijdens een experimentele studie in een laboratorium waarbij korte geluidvoorbeelden worden afgespeeld. Reacties die langer aanhouden of die op de lange termijn optreden, worden doorgaans onderzocht tijdens praktijkstudies waarbij veel personen in hun eigen omgeving worden blootgesteld aan een aantal milieubronnen, waaronder de bron in het onderzoek centraal staat zoals een windpark. Meerdere studies die in dit document worden besproken, maken deel uit van het Europese project EARS II waarin onderzoek werd gedaan naar infrageluid en ultrageluid. EARS II was een vervolg op het eerste EARS-project, dat in 2015 werd gesloten. De conclusie van dit eerste project luidde dat infrageluid met een frequentie lager dan ongeveer 20 Hz anders ervaren lijkt te worden en dat mogelijk andere zintuiglijke processen een signaal leveren aan de auditieve cortex. Ook bij geluidniveaus net iets onder de gehoordrempel waren hersengebieden die emoties verwerken actief (EARS Communiqué, 2015). Het project EARS II bestond voor een belangrijk deel uit onderzoek naar hersenactiviteit bij personen die worden blootgesteld aan infrageluid, waaronder onhoorbaar infrageluid. Het project EARS II werd in 2019 gesloten. Koch (2017) presenteerde een overzicht van de resultaten van het project, inclusief de hieronder vermelde studies.

Behler en Uhlenkamp (2020) doen verslag van de luidheid en onaangenaamheid van geluid met een frequentie van ofwel 8 Hz of 32 Hz bij 19 jonge personen met normaal gehoor die dit gedurende 1,5 seconde te horen kregen in hun rechteroor. Het hoogste geluidniveau tijdens het onderzoek was 140 dB (vermoedelijk om gehoorschade te voorkomen). Ook maten ze de hersenactiviteit terwijl dezelfde personen in een MRI-scanner werden blootgesteld aan de geluiden. De individuele gehoordrempels varieerden bij 32 Hz tussen ongeveer 60 en 80 dB en bij 8 Hz tussen 90 en 115 dB; deze drempelwaarden zijn vergelijkbaar met de drempelwaarden die bekend zijn uit de literatuur. Gemiddeld veranderde de onaangenaamheid van ieder geluid lineair met de ervaren luidheid, maar per persoon verschilde dit sterk. In de MRI-scanner kregen de testpersonen de geluiden nogmaals te horen in hun rechteroor, dit keer met een lage of matige luidheid volgens hun individuele luidheidsschaal. Bij een lage luidheid (5 van de 50 luidheidseenheden) vond er bij beide tonen enige activiteit plaats in de auditieve cortex in beide hersenhelften. Bij een matige luidheid (35 van de 50 luidheidseenheden) was er op dezelfde plekken in de hersenen significante activiteit te zien. De auditieve cortex staat bekend als de plek in de hersenen waar geluid wordt verwerkt en deze studie toont aan dat ook infrageluid hier wordt verwerkt. In deze studie bleek dat activering van de auditieve cortex meer verband houdt met de waargenomen luidheid dan met het daadwerkelijke geluidniveau.

Tijdens een andere laboratoriumstudie onderzochten Burke et al (2019) of de aanwezigheid van een tweede geluid invloed heeft op het kunnen horen van een geluid. Bijvoorbeeld: als een infrageluidtoon net hoorbaar is terwijl er geen ander geluid te horen is, is die toon dan nog steeds te horen wanneer er audiogeluid wordt toegevoegd? Dit werd onder 13 jonge deelnemers met normaal gehoor getest met twee tonen infrageluid (5 Hz en 12 Hz), twee tonen audiogeluid (100 Hz en 1000 Hz) en roze ruis met een frequentie tussen 250 en 4000 Hz. Eerst werd de gehoordrempel van iedere deelnemer drie keer gemeten. Over het algemeen verschilden de drie uitkomsten per deelnemer maximaal 5 dB. Tussen de deelnemers verschilden de gehoordrempels tot 20 dB of meer. Alle gehoordrempels lagen binnen het gehoordrempelbereik dat bekend is uit de literatuur. Als tweede werd een zacht audiogeluid (5 dB boven de gehoordrempel voor dat geluid) toegevoegd aan het infrageluid met een frequentie van ofwel 5 of 12 Hz. Dit bleek geen significante invloed te hebben op de detectiegrens voor het infrageluid. Maar de aanwezigheid van een luider audiogeluid (50 dB boven de gehoordrempel voor dat geluid) zorgde er gemiddeld voor dat de detectiegrens voor het infrageluid hoger kwam te liggen. Deze verschuiving varieerde afhankelijk van de frequentie van 1 tot 9 dB en was significant. Tijdens een derde experiment werd getest of de detectiegrens voor audiogeluid zou veranderen als er infrageluid werd toegevoegd. De detectiegrens voor audiogeluid werd getest terwijl er infrageluid met een frequentie van ofwel 5 of 12 Hz werd afgespeeld. De infrageluidniveaus waren zeer laag: ofwel onhoorbaar (10 dB onder de gehoordrempel) of nauwelijks hoorbaar (5 of 10 dB boven de gehoordrempel). Het infrageluid had geen significant effect op de detectiegrens voor het audiogeluid. Er kan dus geconcludeerd worden dat een matig luid audiogeluid leidt tot een hogere detectiegrens voor infrageluid, maar dat (zeer) zacht audiogeluid geen effect heeft op de hoorbaarheid van infrageluid en vice versa.

Burke et al (2019) merken op dat het bekend is dat geluid ander geluid met een vergelijkbare of hogere frequentie maskeert, waardoor het andere geluid minder goed of niet te horen is. Het kwam dus ook als verrassing dat audiogeluiden geluid met een veel lagere frequentie deels kon maskeren. De auteurs van deze studie concluderen dan ook dat het maskeren van infrageluid blijkbaar anders werkt dan het maskeren van audiogeluiden. Ze merken echter ook op dat als er audiogeluid aanwezig is, de aandacht mogelijk naar dat geluid wordt getrokken waardoor het zachte infrageluid niet meer wordt gehoord. In dat geval is de verschuiving van de detectiegrens niet zo zeer een gevolg van hoorbaarheid, maar meer een gevolg van aandacht. Ook bemerken de auteurs dat er een verband bestaat tussen de afzonderlijke detectiegrenzen voor de twee infrageluidtonen en tussen de afzonderlijke detectiegrenzen voor audiogeluiden, maar er bestaat geen verband tussen de grenswaarden voor infrageluid en audiogeluid. Ze suggereren dat dit mogelijk komt door het feit dat infrageluid en audiogeluid via andere mechanismen worden gedetecteerd.

Weichenberger et al (2017) onderzochten welk effect infrageluid en laagfrequent geluid van discrete frequenties hebben op de hersenactiviteit. Bij 14 jonge deelnemers met normaal gehoor werd de gehoordrempel van het rechteroor vastgesteld bij acht frequenties

tussen 8 en 125 Hz. Alle gehoordrempels lagen binnen het gehoordrempelbereik dat bekend is uit de literatuur. Daarna schatten de deelnemers de luidheid bij iedere frequentie in van geluidniveaus tot maximaal 124 dB. Op basis van deze schattingen werd voor alle deelnemers vastgesteld wanneer ze een matig luid niveau ervoeren bij het infrageluid met een frequentie van 12 Hz.

In de MRI-scanner werden de deelnemers blootgesteld aan drie verschillende condities: de deelnemers kregen de matig luide toon met een frequentie van 12 Hz te horen in hun rechteroor ofwel op een matig luid geluidniveau, of 2 dB onder de persoonlijke gehoordrempel, of er was geen geluid te horen. Iedere conditie duurde 200 seconden, wat relatief lang is. Toen de deelnemers werden blootgesteld aan het matig luide infrageluid, werd er geen hersenactiviteit waargenomen die hierbij paste. De auteurs speculeren dat dit mogelijk toe te schrijven is aan de aanpassing van de neuronen: bij een constante stimulus worden de hersenen na verloop van tijd minder vaak geactiveerd. Gemiddeld werden de hersenen dus niet sterk genoeg geactiveerd tijdens de blootstellingsperiode van 200 seconden, waardoor deze activering niet te zien was in de metingen. Dit is in tegenstelling met de resultaten van een eerdere studie met bijna dezelfde testpersonen en dezelfde instrumenten (Weichenberger et al, 2015). Tijdens die studie werden de deelnemers blootgesteld aan korte fragmenten (3 seconden) infrageluid met een frequentie van 12 Hz en een matige luidheid, die significante hersenactiviteit in de auditieve cortex veroorzaakten.

Toen de testpersonen werden blootgesteld aan het infrageluid met een frequentie van 12 Hz op een geluidniveau net onder de individuele gehoordrempel, was er hersenactiviteit te zien die niet voorkwam bij de twee andere condities. Deze activiteit vond plaats in de auditieve cortex en twee andere hersengebieden die in verband worden gebracht met conflicthantering en de verwerking van emoties. Volgens de auteurs toont de hersenactiviteit bij het onhoorbare geluidniveau aan dat er een onbewuste reactie van het lichaam plaatsvindt en ze speculeren dat bij een langere blootstellingsduur er een 'mogelijk verband' zou kunnen zijn met 'het optreden van diverse fysiologische en psychologische gezondheidseffecten'.

Krahé et al (2020) verrichtten een uitgebreide experimentele studie met 39 deelnemers, waarvan 16 'gepredisponeerd' waren: zij hadden de overheid of een ingenieursbedrijf verzocht om onderzoek te doen naar een probleem met infrageluid bij hen thuis. Alle deelnemers werden steeds gedurende een half uur blootgesteld aan elk van vier verschillende infrageluiden en complete stilte in een zeer stille, huiselijk ingerichte ruimte in een afgelegen gebouw. De deelnemers kregen het infrageluid te horen op drie frequenties (3 Hz met modulatie, 5 en 10 Hz zonder modulatie) op een geluidniveau dicht bij een standaard drempelwaarde die in Duitsland wordt gebruikt, en op een geluidniveau dat 10 dB boven deze drempel ligt bij een frequentie van 18 Hz. Verwacht werd dat sommige deelnemers het geluid zouden horen en sommige niet. Uit de resultaten bleek gemiddeld gezien dat de deelnemers de stilteperiode niet als storend ervoeren, de periode met geluid met lagere frequenties (3 en 5 Hz) als enigszins storend en de periode met geluid met hogere frequenties als matig storend. Voor de meeste geluiden (3, 10 en 18 Hz) gaven de testpersonen scores die de hele schaal van niet storend tot zeer storend besloegen. Voor het geluid

met een frequentie van 5 Hz en voor de stille periode varieerden de scores van niet storend tot enigszins storend. De deelnemers ervoeren het geluid met een frequentie van 18 Hz als gerommel en gezoem; de andere geluiden werden als rommelend en pulserend ervaren. De gepredisponeerde deelnemers bleken niet anders te reageren dan de andere deelnemers. De auteurs concluderen dat de perceptie 'in principe' plaatsvindt in de oren, zelfs wanneer er niet altijd sprake is van een hoorsensatie.

Jurado en Marquardt (2020a) onderzochten de geschiktheid van EEG als methode voor het meten van de ervaren luidheid van een geluid met een zeer lage frequentie. Via een techniek genaamd Frequency Following Response (FFR) registreerden elektroden op het hoofd de zenuwactiviteit die werd gemeten afhankelijk van de luidheid van het geluid. Naar aanleiding hiervan werd vervolgens de hersenreactie op een constant geluid met een frequentie van ofwel 11 of 38 Hz gemeten bij 11 jonge deelnemers met normaal gehoor. De algemene trend was dat bij een luidheid van nul (geluid op het niveau van de gehoordrempel) het gemeten signaal dicht bij de elektrische ruis op de achtergrond in de hersenen lag. In het algemeen steeg bij toenemende luidheid het signaal eerst relatief snel en vanaf een lage tot matige luidheid bleef het constant. Er was op individueel niveau echter sprake van grote afwijkingen van deze trend en de auteurs concludeerden dan ook dat het FFR-signaal dat hier werd gemeten niet samenhangt met de luidheid die door de deelnemers werd ervaren. Ze concluderen dat FFR geen bruikbare methode is voor het meten van de luidheid.

Bij een andere studie deden Marquardt en Jurado (2018) onderzoek naar de perceptie van amplitudemodulatie bij windturbinegeluid: als we een zwiepend of slaand geluid in windturbinegeluid horen, is dit dan alleen de variatie in het geluidniveau van het audiogeluid van de windturbine met de frequentie van de rotorbladen die langs de mast bewegen of zorgt de infrageluidpiek bij dezelfde frequentie voor een (extra) effect? Voor twee geluiden met een discrete frequentie werd de perceptie van het (vereenvoudigde) fenomeen onderzocht. Het geluid werd of gemoduleerd met 8 Hz of aangevuld met een infrageluidtoon met een frequentie van 8 Hz. De variatie in de amplitude (sterkte) van het gemoduleerde geluid met een frequentie van 63 of 125 Hz bedroeg respectievelijk 25% of 37,5% van de oorspronkelijke toonsterkte. Via een aparte test werd vastgesteld bij welk geluidniveau van het infrageluid de combinatie van infrageluid met de 63/125 Hz toon dezelfde luidheid oplevert als de amplitudegemoduleerde toon met een frequentie van 63/125 Hz. Vervolgens werden alle verschillende geluiden gedurende 1,2 seconde veelvuldig en in willekeurige volgorde afgespeeld. In totaal waren zo 400 geluidvoorbeelden te horen. Twaalf jonge deelnemers met normaal gehoor moesten per voorbeeld aangeven of het infrageluid bevatte. Voor alle verschillende geluiden week het percentage correcte antwoorden niet significant af van wat men kan verwachten als er puur wordt gegokt. De auteurs concluderen dat een combinatie van een toon en een constant infrageluid met een frequentie van 8 Hz niet anders aanhoort dan de toonsterkte die met 8 Hz wordt gemoduleerd (zonder het infrageluid): we kunnen het verschil niet horen.

Jurado en Gordillo (2019) onderzochten of de ervaren luidheid van een laagfrequent geluid werd beïnvloed door fluctuaties in het niveau van dat geluid. In dit kader werd een test gehouden onder 24 jonge personen met normaal gehoor, waarbij de deelnemers de luidheid van drie enkelvoudige, laagfrequente tonen (40, 63 en 80 Hz) en één toon met een frequentie van 1000 Hz moesten koppelen aan een aantal tooncombinaties. Iedere combinatie bestond uit twee tonen die bijna dezelfde frequentie hadden als een van de drie enkelvoudige tonen. De combinatie zorgt voor fluctuaties (variaties in de amplitude) bij een frequentie die gelijk is aan het verschil tussen de frequenties van beide tonen. De frequentieverschillen bedroegen 1, 2, 5 en 12 Hz. De resultaten tonen aan dat de fluctuatie bij de lagere frequenties een klein effect had op de luidheid en overeenkwam met 2 dB of minder. De resultaten stemden overeen met al bestaande kennis verkregen uit de literatuur en modellen voor de luidheid.

Op basis van een aantal publicaties, waaronder enkele die hierboven al werden genoemd, vatten Carlile et al (2018) in hun review samen dat kleine verschillen in de gehoordrempel voor infrageluid kunnen leiden tot grote verschillen in de sensatie doordat de luidheid snel toeneemt bij infrageluidfrequenties. Dit werd al eerder gerapporteerd door Moller en Pedersen (2004) en in recentere studies (Koch et al, 2017) wordt dit bevestigd.

3.2 Effect van lagere frequenties ten opzichte van 'normaal' geluid

Gesuggereerd wordt dat infrageluid en laagfrequent geluid van windturbines andere gezondheidseffecten voor omwonenden hebben dan audiogeluid, maar ten tijde van onze review uit 2017 was er weinig wetenschappelijk bewijs dat deze hypothese onderbouwde. Tijdens laboratoriumexperimenten bleken andere effecten voor te komen, zoals trillingen in het lichaam, misselijkheid of duizeligheid, maar alleen wanneer het geluidniveau van het infrageluid hoger was dan bij windturbines voorkomt. We zullen in dit document ook studies bespreken die mogelijk specifieke effecten van infrageluid en laagfrequent geluid laten zien, ongeacht of deze studies betrekking hadden op windturbines of niet.

In zijn verhalende review van de mogelijke effecten van infrageluid van windturbines concludeert Tonin (2017) dat uit een groot aantal metingen blijkt dat infrageluid van windturbines onder de gehoordrempel ligt. Er bestaat onenigheid over het feit of dit betekent dat infrageluid geen effecten kan hebben. Hij merkt op dat er onvoldoende studies zijn uitgevoerd waarbij mensen 'doelbewust zijn blootgesteld aan infrageluid en waarbij de reactie is gemeten'. In de afgelopen jaren zijn er echter enkele relevante laboratoriumstudies gepubliceerd; deze zullen hieronder worden samengevat. Tijdens een grootschalig onderzoek in Nederland vroegen Van Kamp et al (2017) bewoners van drie steden of ze hinder ondervonden van laagfrequente zoemgeluiden van bijvoorbeeld ventilators. 7% van de bijna 4000 deelnemers aan deze studie werd ernstig gehinderd door dergelijke geluiden. Andere geluidbronnen (wegverkeer, bouwwerkzaamheden, brommers en burens) resulteerden in meer gehinderden, variërend van 13% tot 22% van de deelnemers. Sommige

bronnen (spoorwegverkeer en industrie) leidden bij minder personen tot hinder (beide 4%). Mensen die ontevreden waren over hun woonsituatie en geluidgevoelige mensen ervoeren meer hinder dan mensen die hoog scoorden op tevredenheid over de woonsituatie en/of laag scoorden op geluidgevoeligheid. Overdag lag het percentage mensen dat ernstige hinder ondervond van bromtonen hoger wanneer het achtergrondgeluidniveau van wegverkeer hoger was. 's Nachts gold het omgekeerde: een hoger achtergrondgeluidniveau ging samen met iets minder hinder van bromtonen. Er werd geen verband gevonden tussen hinder van bromtonen en geluidisolatie in de gevel (dubbel glas, spouwmuurisolatie, suskasten).

Omdat volgens een congrespaper van Krahé (2019) "laagfrequent geluid ernstige hinder oplevert", bedacht hij een methode om de mate van hinder door laagfrequent geluid en infrageluid van windturbines te beoordelen. Hierbij werd een straftoeslag (penalty) gegeven wanneer het geluid één of meerdere hinderende eigenschappen had, zoals pulseren of een ritmische variatie in het geluidniveau of het tonale karakter. Naar aanleiding hiervan werden penalty's berekend op basis van kennis over de hinder van iedere eigenschap. De berekende penaltywaarden werden vergeleken met de beoordelingen van een aantal geluiden die waren gegeven door een panel bestaande uit 23 experts. Ze moesten elk de hinder van de geluiden beoordelen door er een penalty aan toe te kennen van 3 of 6 dB, of nul (geen penalty). Nadat de oorspronkelijke berekeningen waren aangepast, werd de samenhang tussen de berekende penaltywaarden en de beoordelingen van de experts duidelijk. Deze moet echter nog worden doorgetrokken naar infrageluid en worden getest door middel van praktijkstudies.

Het literatuuronderzoek leverde twee laboratoriumstudies op over mogelijke schadelijke effecten die kenmerkend zijn voor infrageluid en/of laagfrequent geluid.

Stevens en Martens (2018) onderzochten welk effect er optreedt wanneer er gelijke of licht verschillende stimuli te horen waren in beide oren. In een alledaagse omgeving bereikt geluid van een geluidbron het ene oor vaak eerder dan het andere oor. Bij hoge frequenties, waarbij de geluidgolf korter is dan de afmetingen van het hoofd, betekent dit dat de oren niet precies hetzelfde geluid ontvangen op hetzelfde moment. Dit geldt in mindere mate voor lage frequenties, waarbij de golflengte veel groter is dan het hoofd, waardoor er slechts een heel klein verschil merkbaar is tussen het linker- en rechteroor. De auteurs suggereren echter dat wanneer geluid van buiten binnenshuis hoorbaar is, de oren niet dezelfde geluiden ontvangen, omdat het geluid ook bij lage frequenties wordt weerkaatst. De basis voor iedere stimulus in deze studie was steeds één uit drie vergelijkbare geluiden waarvan het grootste deel van de hoorbare energie lag bij frequenties tussen 100 en 200 Hz. Elk geluid kon worden gemoduleerd met 2, 5 of 10 Hz. Dat wil zeggen dat het geluid in een ritme van 2, 5 of 10 keer per seconde varieerde in sterkte. Vervolgens kregen de deelnemers het geluid via luidsprekers aan weerszijden in drie combinaties te horen: 1) het niet-gemoduleerde basisgeluid aan beide zijden; 2) het gemoduleerde geluid aan beide zijden; en 3) het niet-gemoduleerde geluid aan de ene zijde en het gemoduleerde geluid aan de andere zijde. Gemiddeld gaven de 21 deelnemers aan dat het onsamenhangende geluid (combinatie 3) de

meeste hinder opleverde. Ook was de mate van hinder groter wanneer er een modulatiefrequentie (aan een van beide zijden) van 2 Hz werd gebruikt in vergelijking met 5 en 10 Hz. De auteurs merken op dat deze resultaten op één lijn liggen met eerdere studies, waarin werd aangetoond dat grotere verschillen tussen de oren zorgen voor een gevoel van ruimtelijkheid, wat doorgaans wordt ervaren als onaangenaam.

In een Fins rapport, dat nog niet in een wetenschappelijk tijdschrift is gepubliceerd, beschrijven Maijala et al (2020) een enquête, geluidmetingen en laboratoriumexperimenten die zijn opgezet om onderzoek te kunnen doen naar de rol van infrageluid bij gezondheidsklachten die gerelateerd worden aan windparken. 70 van de 1351 respondenten van de enquête (5%) maakten melding van symptomen die werden toegeschreven aan infrageluid van een windpark. Gemiddeld woonden deze 'symptomatische respondenten' dichter bij een windpark dan degenen zonder symptomen. Bij deze respondenten bestond er een significant verband tussen een aantal factoren en hun symptomen: lijden aan chronische aandoeningen, gehinderd worden door verschillende aspecten van windturbines en windturbines beschouwen als een gezondheidsrisico. Van alle respondenten beschouwde 10% infrageluid van windturbines als een groot risico voor de eigen gezondheid; 18% beschouwde het als een groot risico voor de gezondheid in het algemeen. De geluidmetingen werden verricht in twee onbewoonde, landelijk gelegen woningen op 1,5 km afstand van een windpark. Op basis van de metingen werd geconcludeerd dat de infrageluidniveaus in deze woningen vergelijkbaar waren met de geluidniveaus die doorgaans voorkomen in een stedelijke omgeving. Het hoogste geluidniveau werd gemeten bij een frequentie tussen 0,1 en 1 Hz, maar bij deze extreem lage frequenties lagen de geluidniveaus ver onder de gehoordrempel. De opnames met het hoogste infrageluidniveau en de sterkste amplitudemodulatie werden geselecteerd voor de laboratoriumexperimenten. De experimenten leverden de volgende resultaten op: 1) mensen die melding maakten van symptomen die gerelateerd waren aan (infra)geluid van windturbines bleken niet gevoeliger voor infrageluid van windturbines; 2) de combinatie van het windturbinegeluidniveau en de amplitudemodulatie, en dus niet infrageluid, veroorzaakten meer hinder; 3) er werd geen verband gevonden tussen enerzijds infrageluid van windturbines of hinder door windturbinegeluid en anderzijds de hartslag, hartslagvariabiliteit of huidgeleiding (fysiologische maten voor stress).

In het rapport van Krahe et al (2020), dat al in paragraaf 4.1 werd genoemd, staat beschreven dat de deelnemers verscheidene fysiologische testen ondergingen terwijl ze werden blootgesteld. Bij de testen werden de bloeddruk en de hartslag gemeten en werd er een EEG gemaakt. Uit de testen zijn geen verschillen naar voren gekomen tussen de verschillende blootstellingsscenario's en tussen de gepredisponeerde deelnemers en de andere deelnemers.

3.3 Onhoorbaar geluid en effecten op het vestibulaire systeem

In onze review uit 2017 concludeerden we dat de infrageluidniveaus van windturbines in een woonomgeving onvoldoende sterk zijn om het

evenwichtsgevoel te verstoren. Ook is, bij de huidige windturbinegeluidniveaus, het optreden van syndromen zoals vibro-akoestische ziekte (VAD) of de door trilling veroorzaakte evenwichtsorgaanstoornis (VVVD) die het windturbinesyndroom (WTS) veroorzaakt niet bewezen en niet waarschijnlijk. VAD en WTS worden overigens niet erkend als medische diagnoses. Symptomen die geassocieerd worden met windturbinegeluid zouden echter wel het gevolg kunnen zijn van stressreacties die mogelijk verband houden met de aanwezigheid van een windpark. In de afgelopen jaren zijn er geen studies gepubliceerd waarin wordt onderbouwd dat VAD en VVVD echt bestaan.

Jurado en Marquardt (2020b) deden onderzoek naar het effect van infrageluid in de lucht op het vestibulaire systeem. Met behulp van een klinische methode beoordeelden ze de werking van het vestibulaire systeem en maten het elektrisch potentiaal dat gerelateerd is aan spiersamentrekkingen (EMG). Eerder onderzoek heeft uitgewezen dat het vestibulaire systeem geactiveerd kan worden door hard geluid in het middenfrequentie- en hoge frequentiebereik. Hierdoor trekken een spier in de nek en een spier die in verbinding staat met het oog samen, wat gemeten kan worden via EMG. In de klinische praktijk werden harde klikken gebruikt, die ofwel iedere 0,2 seconde gedurende 6 milliseconden te horen waren of als constante harde toon die werd gemoduleerd met 40 Hz. Deze stimuli uit de klinische praktijk werden aangevuld met drie laagfrequente stimuli: een continu geluid gedurende 120 seconden met een frequentie van ofwel 5, 16 of 40 Hz. 15 deelnemers met normaal gehoor kregen deze geluiden in ieder oor afzonderlijk te horen, en dit op een geluidniveau dat overeenkomt met luid geluid. Alleen de elektromyogene reactie (EMG) op de verticale acceleratie van het hoofd werd gemeten, niet de reactie op de horizontale acceleratie of rotatie van het hoofd. De resultaten toonden aan dat er bij de meeste deelnemers een significant verband bestond tussen de geluiden met een frequentie van 500 Hz (die werden gebruikt bij de klinische testen) en een EMG-reactie. Bij vijf deelnemers vond er geen significante reactie plaats in één van beide oren tijdens het horen van de geluidfragmenten, bij vier deelnemers was dit het geval tijdens het horen van het gemoduleerde geluid en bij één deelnemer vond er in beide oren geen significante reactie plaats bij het gemoduleerd geluid. Daarentegen vond er bij met name de lage frequenties geen significante reactie plaats. Bij 4 Hz was er helemaal geen sprake van een significante reactie en bij 16 en 40 Hz slechts bij vier van de vijftien deelnemers (waarvan één in beide oren). De auteurs betwijfelen of infrageluid acceleraties van het hoofd teweeg kan brengen bij lagere geluidniveaus, zoals die in de buurt van windturbines.

Lubner et al (2020) doorzochten de wetenschappelijke literatuur op symptomen aan het audio-vestibulaire systeem nadat mensen waren blootgesteld aan geluid (en elektromagnetische energie). Ze concludeerden dat bij kleine onderzoeken veelvuldig melding werd gemaakt van symptomen, maar dat deze symptomen niet teruggevonden werden in grootschaligere studies of helemaal niet onderzocht waren. Ook concluderen ze dat de symptomen veelal werden onderzocht nadat de zelfgerapporteerde blootstelling had

plaatsgevonden en dat er geen gegevens beschikbaar waren over de situatie vóór de blootstelling.

In het rapport van Krahé et al (2020), dat werd genoemd in paragraaf 4.1 en 4.2, staat beschreven dat de deelnemers verscheidene neurologische testen ondergingen terwijl ze werden blootgesteld. Bij alle testen werd het evenwichtsgevoel bestudeerd. De deelnemers moesten onder meer hun evenwicht bewaren, gerichte bewegingen uitvoeren, maar ook werd gekeken of er nystagmus (herhaaldelijke, ongecontroleerde oogbewegingen) en oogfixatie optrad. Uit de testen zijn geen verschillen naar voren gekomen tussen de verschillende scenario's met blootstelling aan geluid en tussen de gepredisponerde en andere deelnemers.

3.4 Effect van trillingen

Ten tijde van onze review uit 2017 was er weinig informatie bekend over de perceptie van trillingen veroorzaakt door windturbines; in de enige beschikbare studie die na 2000 was gepubliceerd (Cooper, 2014) werd gesuggereerd dat sommige omwonenden sensaties leken te ervaren die werden veroorzaakt door de werking van windturbines en die mogelijk verband hielden met trillingen. We speculeerden dat het ritmische karakter van windturbinegeluid er wellicht toe kan leiden dat een huis gaat trillen en dat de werking van een windturbine dus indirect in een huis zou kunnen worden waargenomen.

Takahashi (2017) onderzocht of zeer laagfrequent geluid/infrageluid als trilling in het hoofd of lichaam ervaren kan worden. Hij stelde vier deelnemers met normaal gehoor in een kantooromgeving bloot aan zes infrageluidtonen en laagfrequente tonen variërend in frequentie van 16 tot 50 Hz. Door per frequentie het geluidniveau te veranderen stelde hij de gehoordrempel vast, evenals de niveaus waarop het geluid 'enigszins storend', 'zeer storend' en 'te luid om te werken' werd. Daarnaast werden ook de geluidniveaus vastgesteld waarop het geluid onaangenaam werd (onaangenaamheidsgrens) en waarop de deelnemers een 'trilling in hun hoofd' voelden (trillingsgrens). Uit de resultaten blijkt dat het niveau waarop de deelnemers een trilling in hun hoofd voelden gemiddeld 6 dB (bij een frequentie van 16 Hz) tot 15 dB (40 Hz) boven hun gemiddelde gehoordrempel lag. Deze trillingsgrens lag bijna op hetzelfde niveau als het niveau waarop het geluid enigszins storend begon te worden. De grenswaarde waarboven het geluid werd beoordeeld als onaangenaam lag zelfs nog hoger en kwam in de buurt van het niveau waarop het geluid 'te hard om te werken' werd. In eerdere studies onderzocht Takahashi hoe de deelnemers de trilling in het lichaam en het hoofd ervoeren toen ze werden blootgesteld aan laagfrequent geluid. Tijdens een studie met 14 deelnemers (Takahashi, 2013) constateerde hij tevens dat de trillingsgrens in het hoofd hoger lag dan de gehoordrempel toen de deelnemers werden blootgesteld aan laagfrequente geluiden met een frequentie van 16 tot 50 Hz. Omdat de drempelwaarde hetzelfde was als de grenswaarde voor 'trilling in het lichaam', concludeerde hij dat het hoofd het lichaamsdeel is dat het meest gevoelig is voor trillingen die worden veroorzaakt door infrageluid. Tijdens de studie uit 2013 stelde hij ook de drempelwaarde voor het waarnemen van trilling vast. De deelnemers droegen hierbij

gehoorbeschermers die het geluidniveau bij het oor met 15 dB dempten bij een frequentie van 16 Hz. Bij een frequentie van 80 Hz nam de demping toe tot 25 dB. Het maakte voor de trillingsgrens bij de laagste frequentie van 16 Hz niet uit of de deelnemers wel of geen gehoorbeschermers droegen. Bij hogere frequenties lag de grenswaarde voor het waarnemen van trillingen ongeveer 10 dB hoger wanneer de deelnemers gehoorbeschermers droegen. Op basis van zijn experimenten veronderstelt Takahashi dat het gevoel van trilling wordt veroorzaakt door de geluiddruk op het trommelvlies en het signaal dat daardoor terechtkomt in het gehoorsysteem. Hij stelt dat het effect van gehoorbeschermers dit niet tegenspreekt, maar dat het geen kwestie is van simpelweg de geluiddruk in de gehoorgang verminderen.

Krahé et al (2020) vroegen de deelnemers om de door hen ervaren trilling, druk en ongemak te beoordelen terwijl ze werden blootgesteld aan alle vier de infrageluiden of stilte (zie de beschrijving in paragraaf 4.1). Al deze sensaties werden voornamelijk rond het hoofd ervaren (hoofd, hersenen, oren) en veel minder in andere lichaamsdelen. Dit gold voor ieder geluidscenario, dus ook voor de stille conditie. Vanwege de soms lage respons en de ongelijke deelnemersaantallen kon niet eenduidig geconcludeerd worden hoe significant de verschillen waren tussen de verschillende blootstellingsscenario's (inclusief stilte).

Nguyen et al (2020) maten de trillingen in drie huizen op relatief grote afstand van een windpark (de afstand vanaf huis 1, 2 en 3 bedroeg respectievelijk 2,4, 3,3 en 5 km). De trilling van de vloer (in huis 2) en het bedonderstel (in huis 1) was zwak en werd veroorzaakt door de wind rond het huis. Daarentegen werd de trilling van het raam (huis 3) veroorzaakt door de amplitudemodulatie van windturbinegeluid en hield deze trilling dus wel verband met het windpark. Bij alle frequenties onder ongeveer 50 Hz lagen de geluidniveaus van de windturbines in deze huizen onder de gemiddelde gehoordrempel, de infrageluidniveaus met minimaal 30 dB.

4 Conclusies

4.1 Conclusies uit hoofdstuk 3

De conclusies over de gezondheidseffecten van windturbinegeluid zijn niet fundamenteel gewijzigd sinds onze review uit 2017. In algemene zin is er een verband gevonden tussen het geluidniveau veroorzaakt door windturbines en hinder. Ook wordt het aannemelijk geacht dat er een verband bestaat met slaapverstoring, hoewel niet met zekerheid gesproken kan worden van een direct verband, omdat er slechts een beperkt aantal studies over dit onderwerp beschikbaar zijn en de resultaten daarvan elkaar soms tegenspreken. Over het algemeen is het bewijs voor zelfgerapporteerde effecten op de slaap sterker dan voor objectieve slaapindicatoren.

De reviews voor de WHO met betrekking tot hinder, slaap, effecten op het hart- en vaatstelsel, metabole effecten en cognitieve en mentale gezondheidseffecten (Guski et al, 2017) (Basner en McGuire, 2018) (van Kempen et al, 2018) (Clark en Paunovic, 2018) hadden allemaal mede betrekking op windturbinegeluid. Samen met enkele reviews van hoge kwaliteit en updates beschikken we nu over een meer solide basis voor de eerdere conclusies. Door het aantal studies, de omvang van de studies en de kwaliteit van het bewijs voor hinder en slaapverstoring kunnen we stellen dat een meta-analyse gerechtvaardigd is. Aanbevolen wordt om hierbij onderscheid te maken tussen objectieve en subjectieve slaapindicatoren. Bovendien komt er voor een reeks klinische uitkomsten en uitkomsten op het vlak van geestelijke gezondheid steeds meer bewijs beschikbaar, maar omdat er te weinig studies zijn, is het nog niet mogelijk een dergelijke meta-analyse uit te voeren.

Sinds 2017 zijn er verscheidene studies gepubliceerd over het verband tussen windturbinegeluid en effecten op het hart- en vaatstelsel, zoals ischemische hartziekte, beroertes en medicijngebruik voor hypertensie. Er zijn geen significante effecten gevonden. Een uitzondering is de zogeheten Danish Nurse Cohort-studie, waarin door de auteurs verslag wordt gedaan van "suggestief bewijs" voor een verband tussen langdurige blootstelling aan windturbinegeluid en atriumfibrillatie onder verpleegsters. Mogelijk is de fibrillatie een gevolg van (chronische) hinder, maar in hetzelfde cohortonderzoek is geen verband gevonden met beroertes of ischemische hartziekte.

De review over hinder, slaapverstoring, gezondheidsuitkomsten voor het hart- en vaatstelsel en metabole effecten (van Kamp et al, 2020a) leverde twee studies op waarin onderzoek wordt gedaan naar het verband tussen windturbinegeluid en het aantal gevallen van diabetes. In geen van de beide studies werd een verband gevonden tussen windturbinegeluid en zelfgerapporteerde of gediagnosticeerde diabetes. Ook is het niet bewezen dat er een verband bestaat tussen windturbinegeluid en obesitas.

Daarnaast bestaat onvoldoende bewijs voor een direct verband tussen mentale gezondheid en de kwaliteit van leven en het geluidniveau van

windturbines. De cognitieve effecten van windturbinegeluid zijn niet onderzocht. Ook zijn er geen significante verbanden gevonden tussen windturbinegeluid en een laag geboortegewicht en kanker.

Ondanks het beperkte bewijsmateriaal kon een blootstelling-effectrelatie voor windturbinegeluid worden ontwikkeld in de WHO-richtlijnen (WHO, 2018), waarin er voorwaarden werden verbonden aan de betreffende grenswaarden. In de huidige "Environmental Noise Guidelines for the European Region" wordt aanbevolen dat het geluidniveau van windturbines maximaal 45 dB (Lden) mag bedragen op basis van een prevalentie van 10% ernstig gehinderden (WHO, 2018). De Wereldgezondheidsorganisatie merkt bovendien op dat de blootstelling aan geluid van een bron in de omgeving, zoals een windturbine, door eenvoudige maatregelen verminderd kan worden, zoals het isoleren van ramen of het plaatsen van geluidschermen (WHO, 2018). Met een meta-analyse op basis van het bewijs dat sinds 2014 beschikbaar is kunnen we een meer solide blootstelling-effectrelatie afleiden voor hinder en slaap.

De algemene blootstelling-effectrelatie voor hinder door windturbinegeluid omvat alle aspecten die van invloed zijn op de hinder, en levert daarom een gemiddelde op van alle plaatselijke situaties. Daarom vormt deze relatie slechts een indicatie van de te verwachten mate van hinder voor een plaatselijke situatie. Eén studie toont aan dat deze relatie ook kan worden gebruikt voor grotere turbines (met een vermogen van 3 tot 5 MW) die we sinds kort in het landschap zien. In een poging om samengestelde maten voor hinder te ontwikkelen, waaronder ook hinder door andere factoren dan geluid, hebben Michaud et al (2018b) laten zien hoe complex de hinder door windturbines is. Freiberg et al (2019) raden aan om deze complexe banen waarlangs hinder bij de mens ontstaat in studies op te nemen als uitkomstparameter, die wordt beïnvloed door verschillende modererende variabelen, of als mediërende variabele voor andere gezondheidsuitkomsten. Een samengestelde maat voor meerdere blootstellingen' ten gevolge van windturbines is veelbelovend voor de toekomst.

Hoewel de lijst verre van volledig is, blijken geluidgevoeligheid, houding ten opzichte van windturbines, visuele aspecten en economisch voordeel wederom de belangrijkste mediators en moderatoren.

Uit epidemiologische studies en experimenten is nogmaals gebleken dat het typische karakter van windturbinegeluid een van de voornaamste kwesties is. Met name het ritmische karakter van het geluid (de technische term hiervoor is amplitudemodulatie of kortweg AM) wordt als hinderlijk ervaren en wordt omschreven als een zwiepend of zovend geluid. Op woonlocaties zijn de windturbinegeluidniveaus bescheiden te noemen in vergelijking met het geluidniveau van andere bronnen, zoals wegverkeer of geluid van industrie. Maar bij gelijke geluidniveaus leidt het geluid van windturbines tot meer hinder dan dat van andere bronnen. Dit werd wederom bevestigd in recente studies (o.a. Klæboe, 2016). Naar aanleiding van een akoestische analyse werd amplitudegemoduleerd geluid in één nieuwe studie aangewezen als belangrijke oorzaak voor de klachten. Over het algemeen wordt de

conclusie dat hinder toeneemt bij amplitudemodulatie nog steeds onderbouwd, maar AM is geen ondubbelzinnige oorzakelijke factor. Uit meerdere nieuwe experimenten is gebleken dat de combinatie van AM en visuele aspecten een goede voorspeller is voor de reactie (in termen van hinder). Het is de moeite waard om het effect van die twee factoren samen nader te onderzoeken in het veld bij grotere groepen.

In enkele studies werd het effect van landschapsbeoordeling en andere visuele aspecten onderzocht. Aangenomen wordt dat chronische hinder van deze fysieke factoren en van geluid verband houdt met stress. Het is in voldoende mate bewezen dat stress de gezondheid en het welzijn van mensen kan aantasten. Er bestaat echter geen bewijs voor een direct verband tussen visuele aspecten van windturbines en gezondheidseffecten. In meerdere studies zijn de doorslaggevende factoren voor acceptatie uitvoerig beoordeeld. Inspraak in het besluitvormingsproces, mede-eigenaarschap (letterlijk en figuurlijk) en gebruik van de energie die in de directe omgeving wordt opgewekt, worden aangevoerd als belangrijke aantrekkende factoren.

Over het algemeen wordt geconcludeerd dat mensen meer bereid zijn om nieuwe windturbines in hun leefomgeving te accepteren als ze inspraak hebben in het besluitvormingsproces, als de windturbines het eigendom zijn van een groep burgers, als de opgewekte elektriciteit gebruikt wordt in de regio zelf en niet wordt geëxporteerd en als mensen in algemene zin het gevoel hebben dat ze controle hebben. Dit komt overeen met de conclusies over de rol die deze factoren spelen bij het verzachten van de aversieve effecten van andere bronnen, zoals geluid van vliegtuigen (Ansensio et al, 2017) (Lercher et al 2017) (Haubrich, 2020). De gezondheid wordt vaak genoemd in debatten over windparken, maar de feiten over gezondheidseffecten die worden aangevoerd, spreken elkaar vaak tegen.

4.2 Conclusies uit hoofdstuk 4

Recente studies bevestigen de resultaten van onze eerdere review grotendeels: de perceptie van infrageluid en laagfrequent geluid komt over het algemeen overeen met wat we al weten uit de literatuur en er bestaat geen enkele aanwijzing voor het feit dat infrageluid met een geluidniveau ver onder de gehoordrempel enig effect kan hebben op de mens.

Op één studie na tonen de studies die sinds 2017 zijn gepubliceerd aan dat infrageluid en laagfrequent geluid, net als normaal geluid, in de auditieve cortex worden verwerkt. Bovendien komen de gehoordrempels op basis van de hersenactiviteit overeen met de gehoordrempels op basis van 'klassieke' psychoakoestiek. De hersenstudies tonen tevens aan dat de luidheid van infrageluid en zeer laagfrequent geluid zeer snel toeneemt in vergelijking met normaal geluid, wat ook bekend is uit de 'klassieke' psychoakoestiek. Een nieuwverworven inzicht is dat de individueel ervaren luidheid meer samenhangt met de hersenactiviteit dan met het geluidniveau. Wellicht heeft dit te maken met geluidgevoeligheid; een zeer gevoelig persoon ervaart een bepaald geluidniveau luider dan een persoon die minder gevoelig is.

In één studie (Weichenberger et al, 2017) wordt gesuggereerd dat er een verband bestaat tussen een onhoorbaar infrageluid met een frequentie van 12 Hz en hersenactiviteit. Niet duidelijk is welk effect deze hersenactiviteit elders in de hersenen of het lichaam kan hebben. De auteurs nemen een grote sprong door te speculeren dat dit in verband zou kunnen worden gebracht met fysiologische en psychologische gezondheidseffecten. Wij zijn van mening dat we eerst zeker moeten weten dat een onhoorbaar geluid daadwerkelijk dit effect teweegbrengt. Het geluidniveau van de stimulus lag slechts 2 dB onder de gehoordrempel. Misschien lag de stimulus tijdens de langdurige blootstelling zo dicht bij de hoorbaarheidsgrens dat de hersenen erdoor gestimuleerd werden. De auteurs suggereren dat de deelnemers "voortdurend aan het gokken waren, ongeacht of de stimulatie al dan niet daadwerkelijk plaatsvond toen ze het infrageluid net onder de gehoordrempel te horen kregen" (Weichenberger et al, 2017). Er werd niet 'gegokt' (geen overeenstemmende hersenactiviteit) toen er geen geluid te horen was. Ze suggereren dat een reactie van de buitenste haarcellen op onhoorbaar geluid, zoals Salt en Hullar (2010) ook beschreven, een verklaring zou kunnen zijn voor de hersenactiviteit die optreedt. Een andere verklaring kan zijn dat er hersenactiviteit plaatsvond omdat het infrageluid net onder de gehoordrempel misschien wel net te horen was met tussenpozen. Als dat het geval is, kan het voor de hersenen lastig zijn om het geluid te herkennen en in te schatten, omdat het bijna niet hoorbaar is. Dit verklaart mogelijk de activiteit in de amygdala en de cingulate cortex anterior (ACC), waarvan verslag werd gedaan door Weichenberger et al (2017). We weten dat deze hersengebieden betrokken zijn bij de verwerking van geluiden (temporal gyrus superior) en het ervaren van tinnitus (ACC) (Vanneste en De Ridder, 2012). De ACC heeft betrekking op gebieden die betrokken zijn bij de verwerking van emoties, zoals de amygdala (Stevens et al, 2011). Wat de verklaring ook moge zijn, de hersenactiviteit vond plaats toen het infrageluid een geluidniveau had dat dicht bij de hoorbaarheidsgrens lag en niet bij lagere geluidniveaus verder van de hoorbaarheidsgrens af. Wil infrageluid van een windpark effect hebben, moet dit wel het geval zijn. Onze conclusie luidt dat de hersenactivering door infrageluid moet worden onderzocht, waarbij de geluidniveaus vergelijkbaar zijn met die in de buurt van windturbines/windparken en er gebruik wordt gemaakt van meer natuurgetrouwe geluiden. Pas dan kunnen we concluderen of onhoorbaar infrageluid een effect kan hebben op omwonenden.

Als er normaal geluid te horen is, kan het lastiger zijn om zacht infrageluid te detecteren ten opzichte van situaties waarin alleen het zachte infrageluid te horen is. Daarentegen blijkt de aanwezigheid van (zacht) infrageluid geen effect te hebben op de detectiegrens voor normaal geluid. Infrageluid kan echter wel de perceptie van normaal geluid beïnvloeden: de combinatie van een toon met een frequentie van 63 of 125 Hz en infrageluid met een frequentie van 8 Hz klinkt in onze oren hetzelfde als een toon met een frequentie van 63/125 Hz met een variatie in sterkte van 8 Hz. Er moet meer onderzoek worden verricht om te weten te komen of deze interactie tussen infrageluid en normaal geluid plaatsvindt binnen een groter frequentiebereik en niet alleen met kunstmatige geluiden die worden gebruikt in een laboratorium. Als die interactie dan nog steeds plaatsvindt, houdt dat het volgende in: 1) de

grenswaarde waarop het menselijke oor infrageluid van windturbines kan detecteren kan hoger komen te liggen vanwege de aanwezigheid van normaal windturbinegeluid; en 2) de infrageluidpiek bij de bladpasseerfrequentie (en de boventonen daarvan) kan in principe worden waargenomen als een modulatie van het normale geluid dat afkomstig is van een windturbine of uit de omgeving. In de praktijk is de waargenomen 'extra modulatie' waarschijnlijk minder duidelijk dan de modulatie van het windturbinegeluid die al optreedt onder omstandigheden waarin sprake is van een infrageluidpiek.

De recente studies over de mogelijke effecten van hoorbaar infrageluid en laagfrequent geluid bevestigden de eerdere resultaten. Wanneer mensen, met inbegrip van degenen die klagen over infrageluid van windturbines, worden blootgesteld aan windturbinegeluid en ook infrageluid, kan de combinatie van het windturbinegeluidniveau en de amplitudemodulatie, en dus niet infrageluid, leiden tot meer hinder. Ook had infrageluid van windturbines geen effect op fysiologische maten van stress, zoals verandering van de hartslag, hartslagvariabiliteit of huidgeleiding. Zacht of onhoorbaar infrageluid of zeer laagfrequent geluid veroorzaakt geen reactie van het vestibulaire systeem, ten minste niet in het deel waarin verticale acceleratie wordt gedetecteerd. Wanneer mensen worden blootgesteld aan infrageluid of zeer laagfrequent geluid, voelen ze een trilling in hun lichaam of hoofd wanneer het geluidniveau dichtbij of hoger dan de gehoordrempel ligt. Bij een vergelijkbaar of hoger geluidniveau wordt het geluid als minder aangenaam beoordeeld, ofwel vanwege de luidheid, of vanwege de trilling erbij of door beide. Een laagfrequent geluid bleek ook minder aangenaam als het geluid dat in het ene oor te horen was iets verschilde van het geluid dat in het andere oor te horen was. Bij laagfrequent geluid is de kans dat dit gebeurt binnen groter dan buiten. Ten slotte: trillingen die werden gemeten in woningen op relatief grote afstand van een windpark (2,4 tot 5 km) waren gering en het is niet waarschijnlijk dat deze nadelige effecten teweegbrengen. De trilling van een venster werd veroorzaakt door het luchtgeluid van een windpark; de trillingen van de vloer en een bedonderstel hadden een hogere kans dat ze werden veroorzaakt door de wind rond het huis.

Dit brengt ons tot de conclusie dat laagfrequent geluid deel uitmaakt van het totale geluid van windturbines en dezelfde effecten als audiogeluid heeft: het kan storend zijn en kan effecten hebben op het inslapen en de slaap zelf. Als het chronisch te horen is, kan het leiden tot verdere gezondheidseffecten. Dit geldt ook voor andere geluidbronnen, zoals weg-, spoorweg- of luchtverkeer. Omdat laagfrequent geluid slechts in beperkte mate verzwakt, wordt dit op grotere afstand en in woningen relatief dominant. Infrageluid verzwakt zelfs nog minder, maar infrageluid dat afkomstig is van windturbines en wordt geproduceerd op de gebruikelijke afstand van woningen is te zwak om door de mens te kunnen worden ervaren.

4.3 Eindconclusie

Het geluidniveau van windturbines is bescheiden te noemen in vergelijking met dat van andere transportmodaliteiten (weg-, spoorweg- en luchtverkeer) of industrie. Studies tonen aan dat in de praktijk de

geluidniveaus meestal lager dan 45 dBA liggen. Desondanks leidt windturbinegeluid bij gelijke geluidniveaus tot meer hinder dan dat van vele andere bronnen.

Op basis van de huidige kennis over het effect van windturbinegeluid op de gezondheid kunnen we concluderen dat wonen in de buurt van een windturbine of het horen van geluid van windturbines kan leiden tot chronische hinder onder omwonenden. Er bestaat geen consistent bewijs voor andere gezondheidseffecten, zoals slaapverstoring, slapeloosheid en geestelijke gezondheidseffecten. Het nieuwe bewijsmateriaal bevestigt de eerdere conclusies over de invloed van de laagfrequente component van windturbinegeluid en infrageluid van windturbines: er bestaat geen enkele aanwijzing voor het feit dat dit andere effecten voor omwonenden heeft dan normaal geluid of dat infrageluid met een geluidniveau ver onder de gehoordrempel enig effect kan hebben. Wanneer mensen worden blootgesteld aan windturbinegeluid (over alle frequenties), vormen het geluidniveau en de amplitudemodulatie van al het windturbinegeluid samen de voornaamste oorzaak voor meer hinder, dus niet laagfrequent geluid of infrageluid.

Het is bewezen dat slaapverstoring eerder verband houdt met hinder dan met windturbinegeluid boven een bepaald geluidniveau. Nieuw bewijsmateriaal heeft bovendien aangetoond dat er een verband bestaat tussen de totale hinder en gezondheidsklachten, maar we kunnen geen conclusies trekken over de richting van dit verband: hebben mensen die ernstig worden gehinderd door windturbinegeluid meer gezondheidsklachten of worden mensen met gezondheidsklachten meer gehinderd door windturbinegeluid?

Toch kan chronische hinder op zich leiden tot het gevoel dat de kwaliteit van de leefomgeving is verslechterd of in de toekomst zal verslechteren. Dit kan een negatieve impact hebben op het welzijn en de gezondheid van mensen die in de buurt van windturbines wonen. Het gematigde effect van windturbinegeluid op hinder en de reeks factoren die de mate van hinder voorspellen houden in dat het effect van windturbinegeluid zal verminderen als ook andere aspecten worden geadresseerd die worden geassocieerd met hinder. De invloed van deze factoren is niet per se uniek voor windturbines. Belangrijke factoren zijn geluidgevoeligheid, houding ten opzichte van windturbines, gezondheidsproblemen, visuele aspecten en aspecten die verband houden met de procedure voorafgaand aan de plaatsing van een windpark. De rol van factoren, zoals inspraak in het planvormingsproces, procedurele rechtvaardigheid, het gevoel rechtvaardig te worden behandeld, en de balans tussen kosten en baten van windturbines worden zelfs nog sterker onderstreept in het beschikbare bewijsmateriaal. Samengevat: de gezondheidsklachten houden voornamelijk verband met een reeks niet-akoestische factoren en niet per se met de daadwerkelijke mate van blootstelling.

Dankwoord

Deze update is gefinancierd door de Afdeling Geluid en Niet-ioniserende straling van het Zwitserse Milieubureau (Bundesamt für Umwelt). We zijn zeer erkentelijk voor de bijdragen van Floor Boekelman, Rob van Spronsen en Sietske Staatsen, Joost Gorter en Kim White, waarmee deze review kon worden opgesteld. Ook willen we Judith Hin en Marjolein 't Hoen bedanken voor het controleren van het manuscript.

Referenties

- Ansensio, César, Gasco Sanchez, Luis, Arcas, G.(2017) A Review of Non-Acoustic Measures to Handle Community Response to Noise around Airports, *Current Pollution Reports* 3(3):230–244.
- Bakker, R. H., Pedersen, E., van den Berg, G. P., Stewart, R. E., Lok, W., & Bouma, J. (2012). Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Science of the total environment*, 425, 42-51.
- Baliatsas, C., Kamp, I. van, Bolte, J., Schipper, M., Yzermans, J., Lebret, E.(2012) Non-specific physical symptoms and electromagnetic field exposure in the general population: can we get more specific? A systematic review. *Environment International*: 2012, 41(1), 15-28
- Basner, M. and S. McGuire (2018). "WHO environmental noise guidelines for the european region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(3).
- Behler and Uhlenkamp (2020): Behler, O. and S. Uppenkamp (2020). "Activation in human auditory cortex in relation to the loudness and unpleasantness of low-frequency and infrasound stimuli." *PLoS ONE* 15(2).
- Beuret, JE. (2016). Is trust negotiable? Building a place-based general interest for the acceptance of the Saint Briec and Saint Nazaire offshore wind farms. *Geographie Economie Societe*, 2016; 18(3):335-58.
- Botelho A, Arezes P, Bernardo C, Dias H, Pinto LMC (2017) Effect of Wind Farm Noise on Local Residents' Decision to Adopt Mitigation Measures *Int J Environ Res Public Health*. 2017 Jul 11;14(7).
- Bräuner, E. V., Jørgensen, J. T., Duun-Henriksen, A. K., Backalarz, C., Laursen, J. E., Pedersen, T. H., ... & Andersen, Z. J. (2018). Long-term wind turbine noise exposure and incidence of myocardial infarction in the Danish nurse cohort. *Environment international*, 121, 794-802.
- Bräuner, E. V., Jørgensen, J. T., Duun-Henriksen, A. K., Backalarz, C., Laursen, J. E., Pedersen, T. H., ... & Andersen, Z. J. (2019a). Long-term wind turbine noise exposure and the risk of incident atrial fibrillation in the Danish Nurse cohort. *Environment international*, 130, 104915.
- Bräuner, E. V., Jørgensen, J. T., Duun-Henriksen, A. K., Backalarz, C., Laursen, J. E., Pedersen, T. H., ... & Andersen, Z. J. (2019b). Association Between Long-Term Exposure to Wind Turbine Noise and the Risk of Stroke: Data From the Danish Nurse Cohort. *Journal of the American Heart Association*, 8(14), e013157.
- Brennan, N., Van Rensburg, T.M. & Morris, C. (2017). Public acceptance of large-scale wind energy generation for export from Ireland to the UK: evidence from Ireland. *Journal of Environmental Planning and Management*, 60:11, 1967-1992.
- Burke, E., Hensel, J., Fedtke, T., Uppenkamp, S., & Koch, C. (2019). Detection Thresholds for Combined Infrasound and Audio-Frequency Stimuli. *Acta Acustica united with Acustica*, 105(6), 1173-1182.
- Carlile S., Davy J.L., Hillman D., Burgemeister K. (2018). A Review of the Possible Perceptual and Physiological Effects of Wind Turbine Noise. *Trends in Hearing*, 23.

- Clark C., Crumpler C., Notley H (2020) Evidence for environmental noise effects on health for the United Kingdom policy context: A systematic review of the effects of environmental noise on mental health, wellbeing, quality of life, cancer, dementia, birth, reproductive outcomes, and cognition *International Journal of Environmental Research and Public Health* (2020) 17:2 Article Number: 393.
- Clark, C. and K. Paunovic (2018). "Who environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and quality of life, wellbeing and mental health." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(11).
- Clark, S. and L. C. Botterill (2018). "Contesting facts about wind farms in Australia and the legitimacy of adverse health effects." *Health (London, England : 1997)* 22(4): 337-355.
- Cooper, S (2014): The results of an acoustic testing program Cape Bridgewater wind farm. The Acoustic Group, report 44.5100.R7:MSC, 2014
- Delicado, A., Truninger, M., Figueiredo, E., Silva, L. & Horta, A. (2017). A Blot on the landscape: Consensus and Controversies on Wind Farms in Rural Portugal. *Emerald Publishing Limited*, 2017; 179-195.
- EARS Communiqué (2015). Ears Project Communiqué: Assessment and safety of non-audible sound. June 2015
- Frantál, B., Van Der Horst, D., Kunc, J., Jaňurová, M. (2017). Landscape disruption or just a lack of economic benefits? Exploring factors behind the negative perceptions of wind turbines. *Journal of Landscape Ecology*, 15(2):139-47.
- Freiberg, A., Schefter, C., Girbig, M., Murta, V. C., & Seidler, A. (2019). Health effects of wind turbines on humans in residential settings: Results of a scoping review. *Environmental research*, 169, 446-463.
- Freiberg, A., Schefter, C., Hegewald, J. & Seidler, A. (2019). The influence of wind turbine visibility on the health of local residents: a systematic review. *Int Arch Occup Environ Health* 92, 609–628.
- Gölz, S. & Wedderhoff, O. (2018). Explaining regional acceptance of the German energy transition by including trust in stakeholders and perception of fairness as socio-institutional factors. *Energy Research and Social Science*, 43: 96-108.
- Grima Murcia, M.D., Sanchez Ferrer, F., Sorinas, J., Ferrandez, J.M. & Fernandez, E. J. (2017). Application of electroencephalographic techniques to the study of visual impact of renewable energies. *Journal of Environmental Management*, 2017 Sep 15;200:484-9.
- Guski, Rainer Dirk Schreckenberg and Rudolf Schuemer (2017) WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14(12), 1539; <https://doi.org/10.3390/ijerph14121539> - 08 Dec 2017
- Haac, T. R., Kaliski, K., Landis, M., Hoen, B., Rand, J., Firestone, J., ... & Pohl, J. (2019). Wind turbine audibility and noise annoyance in a national US survey: individual perception and influencing factors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(2), 1124-1141..
- Haubrich, Julia Narcisa E. Burtea Paul Hooper Rebecca Hudson Dan Radulescu Fiona Raje Dirk Schreckenberg (2020) Foundations for a comprehensive approach of acoustic and non-acoustic measures of aircraft noise annoyance mitigation Aerospace Europe conference, Bordeaux, France.

- Hongisto V, Oliva D, Keranen J (2017) Indoor noise annoyance due to 3-5 megawatt wind turbines-An exposure-response relationship. *J Acoust Soc Am.* 2017 Oct;142(4):2185.
- Hübner, G., Pohl, J., Hoen, B., Firestone, J., Rand, J., Elliott, D., & Haac, R. (2019). Monitoring annoyance and stress effects of wind turbines on nearby residents: A comparison of US and European samples. *Environment international*, 132, 105090. ISO/TS 15666:2003(en) Acoustics — Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys <https://www.iso.org/standard/28630.html>.
- Janhunen, S., Hujala, M. & Pätäri, S. (2018). The acceptability of wind farms: the impact of public participation. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 20:2, 214-235.
- Janssen, S.A., Vos, H, Eisser AR, Pedersen E. (2011) A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources. *J Acoust Soc Am* 130(6): 3746-3753.
- Jurado C, D Gordillo, BCJ Moore (2019): On the loudness of low-frequency sounds with fluctuating amplitudes. *Journal of the Acoustical Society of America*, v146 n2 1142-1149.
- Jurado and Marquardt (2020b): On the Effectiveness of airborne infrasound in eliciting vestibular-evoked myogenic responses. Jurado C, T Marquardt. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, v39 n1 3-16.
- Jurado, C., & Marquardt, T. (2020a). Brain's Frequency Following Responses to Low-Frequency and Infrasound. *Archives of Acoustics*, 45(2), 313-319.
- Kageyama, T., Yano, T., Kuwano, S., Sueoka, S., & Tachibana, H. (2016). Exposure-response relationship of wind turbine noise with self-reported symptoms of sleep and health problems: A nationwide socioacoustic survey in Japan. *Noise & health*, 18(81), 53.
- Keith, S. E., Feder, K., Voicescu, S. A., Soukhovtsev, V., Denning, A., Tsang, J., ... & van den Berg, F. (2016). Wind turbine sound pressure level calculations at dwellings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3), 1436-1442.
- Kim, H., Cho, S.H. & Song, S. (2018). Wind, power, and the situatedness of community engagement. *Public Underst Sci*, 28(1):38-52.
- Klaeboe R, Sundfor HB. Windmill Noise Annoyance, Visual Aesthetics, and Attitudes towards Renewable Energy Sources. *International journal of environmental research and public health*. 2016;
- Koch (2017): Hearing beyond the limit: Measurement, perception and impact of infrasound and ultrasonic noise. Koch C, M Brink. 12th ICBEN Congress on noise as a public health problem, 2017
- Kongprasit, S., Waewsak, J., Chaichana, T. In: Waewsak J, S OT, Gagnon Y, Sangkharak K, editors. (2017). *Wind Turbine and Local Acceptance in Southern Thailand C3 - Energy Procedia*. Elsevier Ltd, 138: p. 380-5.
- Krahe (2019): Proposal of a procedure assessing the annoyance of low-frequency noise and infranoise C3 - INTER-NOISE 2019 MADRID - 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering

- Krahé D, Alaimo Di Loro A, Müller U, Elmenhorst E, De Gioannis R, Schmitt S, Belke C, Benz S, Großarth S, Schreckenber D, Eulitz C, Wiercinski B, Möhler U. Lärmwirkungen von Infrasschallimmissionen (Noise effects from infrasound immissions). Report Umweltbundesamt (German Environmental Agency), 2020, available at <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/laermwirkungen-von-infrasschallimmissionen> (report in German with English summary)
- Krogh, C. M., McMurtry, R. Y., Dumbrille, A., Hughes, D., & Gillis, L. (2020). Preliminary Results: Exploring Why Some Families Living in Proximity to Wind Turbine Facilities Contemplate Vacating Their Homes—A Community-Based Study. *Open Access Library Journal*, 7, e6118.
- Lamy, J., Azevedo, I.M.L., de Bruine, W., Morgan, M.G. Perceptions of wind energy projects in two coastal Massachusetts communities. *Electricity Journal*. 2017;30(7):31-42.
- Landeta-Manzano, B., Arana-Landín, G., Calvo, P.M. & Heras-Saizarbitoria, I. (2018). Wind energy and local communities: A manufacturer's efforts to gain acceptance. *Energy Policy*, 121:314-24.
- Lane JD, Bigelow PL, Majowicz SE, McColl RS (2016) Impacts of Industrial Wind Turbine Noise on Sleep Quality: Results From a Field Study of Rural Residents in Ontario, Canada. *J Environ Health*. 2016 Jul;79(1):8-12.
- Langer, K., Decker, T. & Menrad, K. (2017). Public participation in wind energy projects located in Germany: Which form of participation is the key to acceptance? *Renewable Energy*, 2017;112:63-73.
- Langer, K., Decker, T., Roosen, J. & Menrad, K. (2018). Factors influencing citizens' acceptance and non-acceptance of wind energy in Germany. *Journal of Cleaner Production*, 175:133-44.
- Lercher, Peter, Bert De Coensel, Luc Dekonink, and Dick Botteldooren Community Response to Multiple Sound Sources: Integrating Acoustic and Contextual Approaches in the Analysis *Int J Environ Res Public Health*. 2017 Jun; 14(6): 663. Published online 2017 Jun 20. doi: 10.3390/ijerph14060663 PMID: 28632198
- Liebe, U., Bartczak, A. & Meyerhoff, J. (2017). A turbine is not only a turbine: The role of social context and fairness characteristics for the local acceptance of wind power. *Energy Policy*, 107:300-8.
- Lubner RJ , Kondamuri NS , Knoll RM , Ward BK , Littlefield PD , Rodgers D , Abdullah KG , Remenschneider AK , Kozin ED. (2020) Review of Audio vestibular Symptoms Following Exposure to Acoustic and Electromagnetic Energy Outside Conventional Human Hearing. *Frontiers in neurology*, 11: 234.
- Macdonald, C., Glass, J. & Creamer, E. (2017). What Is the Benefit of Community Benefits? Exploring Local Perceptions of the Provision of Community Benefits from a Commercial Wind Energy Project. *Scottish Geographical Journal*, 2017;133(3-4):172-91.
- Maijala P, A Turunen, I Kurki, L Vainio, S Pakarinen, C Kaukinen, K Lukander, P Tiittanen, T Yli-Tuomi, P Taimisto, T Lanki,, K Tiippana, J Virkkala, E Stickler, M Sainio. Infrasonnd does not explain symptoms related to wind turbines. Report of the Prime Minister's Office, Helsinki 2020
- Marquardt and Jurado (2018): Amplitude Modulation May Be Confused with Infrasonnd. Marquardt T, C Jurado. *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 104 (2018) 825 – 829

- Michaud DS, Keith SE, Feder K, Voicescu SA, Marro L, Than J, et al (2016a) Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 139:1455-66.
- Michaud, D. S., Feder, K., Keith, S. E., Voicescu, S. A., Marro, L., Than, J., ... & Lavigne, E. (2016b). Exposure to wind turbine noise: perceptual responses and reported health effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3), 1443-1454.
- Michaud DS, Feder K, Keith SE, Voicescu SA, Marro L, Than J, Guay M, Denning A, Murray BJ, Weiss SK, Villeneuve PJ. (2016c) Effects of wind turbine noise on self-reported and objective measures of sleep. *Sleep*. J1;39(1):97
- Michaud, D. S., Feder, K., Voicescu, S. A., Marro, L., Than, J., Guay, M., ... & Villeneuve, P. (2018a). Clarifications on the design and interpretation of conclusions from health Canada's study on wind turbine noise and health. *Acoustics Australia*, 46(1), 99-110.
- Michaud, D. S., Leonora Marro and James McNamee (2018b). "Derivation and application of a composite annoyance reaction construct based on multiple wind turbine features." *Canadian journal of public health = Revue canadienne de sante publique* 109(2): 242-251.
- Michaud, D. S., Leonora Marro and James McNamee (2018c). "The association between self-reported and objective measures of health and aggregate annoyance scores toward wind turbine installations." *Canadian journal of public health = Revue canadienne de sante publique* 109(2): 252-260.
- Micic, G., Zajamsek, B., Lack, L., Hansen, K., Doolan, C., Hansen, C., ... & Mercer, J. (2018). A review of the potential impacts of wind farm noise on sleep. *Acoustics Australia*, 46(1), 87-97.
- H. Møller and C. S. Pedersen, Human hearing at low frequencies, *Noise Health* 6 (23), 37-57 (2004).
- Morsing, Ageborg J., Smith, M. G., Ögren, M., Thorsson, P., Pedersen, E., Forssén, J., & Persson Waye, K. (2018). Wind turbine noise and sleep: Pilot studies on the influence of noise characteristics. *International journal of environmental research and public health*, 15(11), 2573.
- Nguyen, D. P., Hansen, K., & Zajamsek, B. (2020). Human perception of wind farm vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 39(1), 17-27.
- Pawlaczyk-Łuszczynska, M., Zaborowski, K., Dudarewicz, A., Zamojska-Daniszevska, M., & Waszkowska, M. (2018). Response to noise emitted by wind farms in people living in nearby areas. *International journal of environmental research and public health*, 15(8), 1575.
- Pedersen, E. , Kerstin Persson Waye (2007). Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments *Occupational and environmental medicine*, 2007, 64.7: 480-486.
- Pedersen, E. (2011) Health aspects associated with wind turbine noise: Results from three field studies. *Noise Control Eng. J.* 2011, 59, 47-53.
- Pohl, J., Gabriel, J., & Hübner, G. (2018). Understanding stress effects of wind turbine noise-The integrated approach. *Energy Policy*, 112, 119-128.
- Poulsen, A. H., Raaschou-Nielsen, O., Peña, A., Hahmann, A. N., Nordsborg, R. B., Ketznel, M., ... & Sørensen, M. (2018a). Long-term exposure to wind turbine noise and redemption of antihypertensive medication: a nationwide cohort study. *Environment international*, 121, 207-215.

- Poulsen, A. H., Raaschou-Nielsen, O., Peña, A., Hahmann, A. N., Nordsborg, R. B., Ketznel, M., ... & Sørensen, M. (2018b). Long-term exposure to wind turbine noise at night and risk for diabetes: a nationwide cohort study. *Environmental research*, 165, 40-45.
- Poulsen, A. H., Raaschou-Nielsen, O., Peña, A., Hahmann, A. N., Nordsborg, R. B., Ketznel, M., ... & Sørensen, M. (2018c). Pregnancy exposure to wind turbine noise and adverse birth outcomes: a nationwide cohort study. *Environmental research*, 167, 770-775.
- Poulsen, A. H., Raaschou-Nielsen, O., Peña, A., Hahmann, A. N., Nordsborg, R. B., Ketznel, M., ... & Sørensen, M. (2019a). Impact of long-term exposure to wind turbine noise on redemption of sleep medication and antidepressants: a nationwide cohort study. *Environmental health perspectives*, 127(3), 037005.
- Poulsen, A. H., Raaschou-Nielsen, O., Peña, A., Hahmann, A. N., Nordsborg, R. B., Ketznel, M., ... & Sørensen, M. (2019b). Long-term exposure to wind turbine noise and risk for myocardial infarction and stroke: a nationwide cohort study. *Environmental health perspectives*, 2019(3), 037004.
- Radun J, Hongisto V, Suokas M. (2019) Variables associated with wind turbine noise annoyance and sleep disturbance. *Building and Environment*. 150:339-48.
- Sæþórsdóttir, A.D., Ólafsdóttir, R., Smith, D. (2018). Turbulent times: tourists' attitudes towards wind turbines in the Southern Highlands in Iceland. *International Journal of Sustainable Energy*. 2018;37 (9):886-901.
- Salt A.N., Hullar T.E., Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing research*. 2010 Sep 1;268(1):12-21.
- Schäffer, B., Pieren, R., Schlittmeier, S. J., & Brink, M. (2018). Effects of different spectral shapes and amplitude modulation of broadband noise on annoyance reactions in a controlled listening experiment. *International journal of environmental research and public health*, 15(5), 1029.
- Schäffer, B., Pieren, R., Hayek, U. W., Biver, N., & Grêt-Regamey, A. (2019). Influence of visibility of wind farms on noise annoyance—A laboratory experiment with audio-visual simulations. *Landscape and Urban Planning*, 186, 67-78.
- Scherhauser, P., Höltinger, S., Salak, B., Schauppenlehner, T. & Schmidt, J. (2018). A participatory integrated assessment of the social acceptance of wind energy. *Energy Research and Social Science*, 45:164-172.
- Scherhauser, P., Höltinger, S., Salak, B., Schauppenlehner, T. & Schmidt, J. (2017). Patterns of acceptance and non-acceptance within energy landscapes: A case study on wind energy expansion in Austria. *Energy Policy*, 109:863-70.
- Simos, J., Cantoreggi, N., Christie, D. & Forbat, J. (2018). Wind turbines and health: a review with suggested recommendations. *Environnement Risques & Santé*, 2018; 18: 1-11
- Sklenicka, P. & Zouhar, J. (2018). Predicting the visual impact of onshore wind farms via landscape indices: A method for objectivizing planning and decision processes. *Applied Energy*, 209:445-54.
- Smith M.G., Ögren M., Thorsson P., Hussain-Alkhateeb L., Pedersen E., Forssén J., Ageborg Morsing J., Persson Wayne K (2020) A laboratory study on the effects of wind turbine noise on sleep: Results of the polysomnographic WITNES study. *Sleep* (2020).

- Song K, Di G, Xu Y, Chen X. Community survey on noise impacts induced by 2MW wind turbines in China. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*. 2016; 35:279-90.
- Sonnberger, M. & Ruddat, M. (2017). Local and socio-political acceptance of wind farms in Germany. *Technology in Society*, 2017;51:56-65.
- Stevens FL, Hurley RA, Taber KH. Stevens et al, 2011: Anterior cingulate cortex: unique role in cognition and emotion. *Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences*. Spring; 23(2): 121-5.
- Stevens and Martens (2018): Stevens, M. and W. L. Martens (2019). The influence of binaural incoherence on annoyance reported for unpleasant low frequency sound C3 - Australian Acoustical Society Annual Conference, AAS 2018, Australian Acoustical Society.
- Takahashi, Y. (2013) Vibratory sensation induced by low-frequency noise: The threshold for "vibration perceived in the head" in normal-hearing subjects. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control* 32, no. 1/2, (2013): 1-10, 2013.
- Takahashi, Y. (2017): Study on the relationship between unpleasantness and perception of vibration in the head of subjects exposed to low-frequency noise C3 - Takahashi Y. INTER-NOISE 2017 - 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering
- Thomson, H. & Kempton, W. (2018). Perceptions and attitudes of residents living near a wind turbine compared with those living near a coal power plant. *Renewable Energy*, 123:301-11.
- Tonin (2017): A Review of Wind Turbine-Generated Infrasound: Source, Measurement and Effect on Health. *Tonin R Acoustics Australia*. 2018;46(1):69-86.
- van den Berg, F., & van Kamp, I. (2017). Health effects related to wind turbine sound. Commissioned by the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN)
- Van Den Berg, F., Pedersen, E., Bouma, J., & Bakker, R. (2008). Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents.. Final report. <https://www.rug.nl/research/>
- Van Kamp I, Breugelmans O, Van Poll R, Baliatsas C, Van Kempen E. (2017): Determinants of annoyance from humming sound as indicator of low frequency noise C3 - In: McMinn T, Duncan A, editors. *Proceedings of ACOUSTICS 2017 Perth: Sound, Science and Society - 2017*
- van Kamp, I., & van den Berg, F. (2018). Health effects related to wind turbine sound, including low-frequency sound and infrasound. *Acoustics Australia*, 46(1), 31-57.
- van Kamp, I., Simon, S., Notley, H., Baliatsas, C., & van Kempen, E. (2020a). Evidence Relating to Environmental Noise Exposure and Annoyance, Sleep Disturbance, Cardio-Vascular and Metabolic Health Outcomes in the Context of IGCB (N): A Scoping Review of New Evidence. *International journal of environmental research and public health*, 17(9), 3016.
- van Kamp, I., van Kempen, E. E. M. M., Simon, S. N., & Baliatsas, C. (2020b). Review of Evidence Relating to Environmental Noise Exposure and Annoyance, Sleep Disturbance, Cardio-Vascular and Metabolic Health Outcomes in the Context of the Interdepartmental Group on Costs and Benefits Noise Subject Group (IGCB (N)). RIVM Report 2019-0088; Netherlands.

- Van Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G., & Foraster, M. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and cardiovascular and metabolic effects: a summary. *International journal of environmental research and public health*, 15(2), 379.
- Vanneste and De Ridder, 2012: The auditory and non-auditory brain areas involved in tinnitus. An emergent property of multiple parallel overlapping subnetworks. Vanneste S, D De Ridder. *Frontiers in Systems Neuroscience*, v6 (20120508)
- Weichenberger, M., Kühler, R., Bauer, M., Hensel, J., Brühl, R., Ihlenfeld, A., ... & Kühn, S. (2015). Brief bursts of infrasound may improve cognitive function—An fMRI study. *Hearing Research*, 328, 87-93.
- Weichenberger M, Bauer M, Kühler R, Hensel J, Forlim CG, Ihlenfeld A, et al (2017): Altered cortical and subcortical connectivity due to infrasound administered near the hearing threshold- Evidence from fMRI. *al* (2017). *PLoS ONE* 12(4): e0174420
- Wen, C., Dallimer, M., Carver, S. & Ziv, G. (2018). Valuing the visual impact of wind farms: A calculus method for synthesizing choice experiments studies. *Total Environ*, 1;637-638:58-68.
- WHO, 1946. Constitution of the World Health Organization: principles. World Health Organization. (<http://www.who.int/about/mission/en/>) (accessed 12 September 018).
- WHO, Environmental Noise Guidelines for the European Region (2018) WHO, Bonn.
- Wüstenhagen, R., M. Wolsink, M.J. Bürer. Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy policy* 35 (5), 2683-2691, 2013
- Zaubrecher, B.S. and M. Ziefle, Integrating acceptance-relevant factors into wind power planning: A discussion. *Sustainable Cities and Society*, 2016. 27: p. 307-314

Bijlage 1 Zoekstrategie

Onze vorige review was gebaseerd op een systematisch literatuuronderzoek over de periode tussen 2000 tot begin 2017. Er zijn drie databanken doorzocht: Scopus, Medline en Embase. Voor deze review-update is gebruik gemaakt van publicaties uit de periode tussen januari 2017 en juni 2020 en in juli 2018 bijgewerkt aan de hand van precies dezelfde zoekstrategie en databanken als in 2017. Voor de tweede update die ging over de periode tot juli 2020 waren de databanken Medline en Embase niet meer beschikbaar of niet beschikbaar in dezelfde vorm. Het platform en de zoeksyntaxis waren veranderd, dus er moest een nieuwe zoekstrategie worden toegepast. Daarnaast hebben we dit keer gebruik gemaakt van de databank PsycINFO; het bleek dat deze nauwelijks iets toevoegde aan de referenties uit de andere databanken.

De mogelijke effecten van onhoorbaar geluid met zeer lage frequenties vormen een belangrijk onderwerp in de publieke discussie omtrent windparken. Daarom werd dit onderwerp toegevoegd aan het literatuuronderzoek. Opnieuw is gekeken naar observationele studies en experimentele studies die staan beschreven in de intercollegiaal getoetste literatuur. De talen waarin literatuur gezocht werd, waren Duits, Engels, Frans en Nederlands. De zoekstrategie staat hieronder beschreven.

Voor het hoofdonderwerp -gezondheidseffecten van windturbinegeluid- zijn alleen artikelen opgenomen waar in de titel, het overzicht of de samenvatting wordt vermeld dat er onderzoek is gedaan naar het verband tussen het geluid van windturbines enerzijds en de reactie, gezondheid en het welzijn anderzijds. Ook studies waarin gesproken werd over inspraak van omwonenden tijdens het proces rondom de locatiekeuze, zijn geaccepteerd voor de review. Dit hield in dat het verband tussen blootstelling aan (laagfrequent) windturbinegeluid en hinder, gezondheid, welzijn en verstoring van dagelijkse activiteiten onder volwassenen was onderzocht. Voor het onderwerp "laagfrequent geluid" zijn studies opgenomen waarin in de titel de woorden laagfrequent geluid, geluid of infrageluid werden gebruikt, alsmede de woorden reactie, gezondheidseffect of welzijn.

Voor de eerste selectie zijn we de volgende criteria gebruikt. Inclusie: artikelen waarin volksgezondheidseffecten, perceptie, standpunten en bezorgdheid in verband met windturbines worden besproken. Uitsluiting: artikelen waarin effecten worden besproken die geen betrekking hebben op de mens, zoals effecten voor het ecosysteem, dieren, artikelen over puur technische aspecten van windturbines, artikelen over gezondheidseffecten van geluid, maar niet specifiek van windturbinegeluid.

De artikelen zijn onderverdeeld in 7 categorieën: reviews, gezondheidseffecten, offshore, laagfrequent geluid, visuele aspecten, maatschappelijke aspecten en niet relevant. Alle reviews en studies naar gezondheidseffecten zijn volledig bestudeerd; studies over offshore

windparken werden bij voorbaat uitgesloten, opname van papers uit de andere categorieën werd heroverwogen na lezing van de samenvattingen.

Ten slotte werd na volledige bestudering van de reviews en artikelen over gezondheidseffecten door de twee auteurs een definitieve beslissing genomen over het al dan niet opnemen in dit overzicht. Uiteindelijk zijn er 83 nieuwe publicaties opgenomen in het rapport.

In de context van dit rapport wordt per uitkomst een samenvatting gegeven van de voornaamste resultaten. Van de belangrijkste studies worden de studie-opzet, de uitkomst nader besproken. Voor deze review zijn voornamelijk wetenschappelijke publicaties gebruikt die afkomstig zijn uit intercollegiaal getoetste verslagen en congrespapers. Zoals gebruikelijk is al het materiaal uit de geselecteerde literatuur gelezen en geanalyseerd, maar niet per definitie opgenomen als referentiemateriaal, omdat de studie bijvoorbeeld minder relevant was dan we aanvankelijk dachten of wanneer het materiaal ook in ander referentiemateriaal werd besproken (bijv. een congrespaper en een artikel van dezelfde auteur/over dezelfde studie).

A.1 Zoek strategie in Scopus, Medline and Embase databases, until July 2018

De gehanteerde strategie is hetzelfde als in ons eerdere overzichtsrapport en artikel (van den Berg en van Kamp, 2017; Van Kamp en van den Berg, 2018). Het literatuuronderzoek is in het Engels uitgevoerd.

A.2 Search strategy in Scopus, July 2018-July 2020

Topic: health effects of wind turbine sound

TITLE ("wind turbine*" OR "windmill*" OR "windmill*" OR "windfarm*" OR "wind farm*" OR "windpark*" OR "wind park*" OR "windenerg*" OR "wind energ*"))

AND

(TITLE ("health effect*" OR "health risk*" OR "stress" OR "annoy*" OR "health impact*" OR "sleep" OR "noise avoid*" OR "noise abat*" OR "preval*" OR "inciden*" OR "adverse" OR "human health*" OR "avers*" OR "attitud*" OR "percept*" OR "perceiv*" OR "quality of life" OR "well being" OR "wellbeing" OR "concern*" OR "emot*" OR "accept*"))

AND PUBYEAR > 2017

Topic: low frequency effects

TITLE("infrasound*" OR "low frequency nois*" OR "low frequency sound*" OR "infrasonic*" OR "low frequency thresh*" OR "audibi*")

AND

(TITLE("health effect*" OR "risk*" OR "stress" OR "annoy*" OR "health impact*" OR "sleep" OR "noise avoid*" OR "noise abat*" OR "preval*" OR "inciden*" OR "adverse" OR "human health*" OR "avers*" OR "attitud*" OR "percept*" OR "perceiv*" OR "quality of life" OR "well being" OR "wellbeing" OR "concern*" OR "emot*" OR "accept*"))

AND PUBYEAR > 2017

A.3 Search strategy in Embase, July 2018-July 2020

Topics: health effects of wind turbine sound and low frequency effects

#1. 'wind turbine'/exp OR 'wind farm'/exp OR 'wind turbine*':ti,ab OR 'wind farm*':ti,ab OR 'wind power'/exp

- #2. 'low frequency noise'/exp OR (low:ti AND frequency:ti AND ('noise*':ti OR 'signal*':ti OR 'noise':ti,ab OR 'low frequency sound':ti,ab OR 'low frequency ultrasound':ti,ab OR 'low frequency signal*':ti,ab OR 'low frequency thresh*':ti,ab OR 'infrasound'/exp OR 'infraso*':ti OR 'audability':ti,ab OR 'audibl*':ti)
- #3. 'noise'/exp/mj OR 'nois*':ti OR 'noise pollution'/exp/mj
- #4. 'hearing'/exp/mj
- #5. 'sound'/exp/mj OR 'sound*':ti
- #6. 'annoyance'/exp OR 'annoy*':ti
- #7. 'wellbeing'/exp OR 'health*':ti OR 'health'/exp OR 'health status'/exp OR 'wellbeing*':ti
- #8. 'aversion*':ti OR 'stress*':ti OR 'complain*':ti OR 'distress*':ti OR 'disturb*':ti OR 'worries':ti OR (('sensiti*' NEAR/3 noise):ti) OR 'sound pressure level*':ti OR 'sleep disturbance*':ti OR 'sleep quality':ti OR 'stress'/exp OR 'cognitive*':ti OR 'aversion'/exp OR 'distress syndrome'/exp OR 'sleep quality'/exp OR 'perception*':ti OR 'unpleasant*':ti
- #9. 'quality of life'/exp OR ('quality':ti AND ('life':ti OR living:ti))
- #10. #2 OR #3 OR #4 OR #5 OR #6 OR #7 OR #8 OR #9
- #11. #6 OR #7 OR #8 OR #9
- #12. #1 AND #10
- #13. #1 AND #10 AND [2017-2020]/py
- #14. #1 AND #10 AND [2017-2020]/py AND ([dutch]/lim OR [english]/lim OR [french]/lim OR [german]/lim)
- #15. #2 AND #11 NOT #1
- #16. #2 AND #11 NOT #1 AND [2017-2020]/py
- ##17. #2 AND #11 NOT #1 AND [2017-2020]/py AND ([dutch]/lim OR [english]/lim OR [french]/lim OR [german]/lim)

A.4 Search strategy in Psycinfo, Januari 2017-July 2020

Topic: health effects of wind turbine sound

("health effect*" or "risk*" or "stress*" or "annoy*" or "health impact*" or "sleep*" or "noise avoid*" or "noise abat*" or "preval*" or "inciden*" or "adverse" or "human health*" or "avers*" or "attitud*" or "percept*" or "perceiv*" or "quality of life" or "well being" or "wellbeing" or "concern*" or "emot*" or "accept*" or "commun*" or "engag*" or "activis*" or "prefer*").m_titl.)

and

("wind turbine*" or "wind farm*" or "wind park*" or "windfarm*" or "windpark*" or "windmill*" or "wind mill*" or "wind energ*" or "windenerg*").m_titl.)

Topic: low frequency effects

("health effect*" or "risk*" or "stress" or "annoy*" or "health impact*" or "sleep*" or "noise avoid*" or "noise abat*" or "preval*" or "inciden*" or "adverse" or "human health*" or "avers*" or "attitud*" or "percept*" or "perceiv*" or "quality of life" or "well being" or "wellbeing" or "concern*" or "emot*" or "accept*" or "commun*" or "engag*" or "activis*" or "prefer*").m_titl.

and

("infrasound*" or "low frequency nois*" or "low frequency sound*" or "infrasonic*" or "low frequency thresh*" or "audibi").m_titl.

A.5 Inclusie- en uitsluitingscriteria

Opnemen wanneer:

- artikel betrekking heeft op (alle aspecten van) windturbinegeluid;
- en: artikel een (kwalitatieve of kwantitatieve) studie betreft; geen beperkingen ten aanzien van studie-opzet;
- en: er in enige mate een verband wordt gelegd met gezondheidseffecten en/of (maatschappelijk) welzijn (met inbegrip van hinder, reactie van de gemeenschap);
- en: geschreven in de Engelse, Franse, Duitse of Nederlandse taal.

Uitsluiten wanneer:

- artikel betrekking heeft op beroepsmatige gezondheid en veiligheid; offshore; effecten op andere mensen dan omwonenden;
- of: artikel een commentaar, hoofdartikel of opinie, of een brief aan de redactie betreft; errata of discussie tussen mensen.

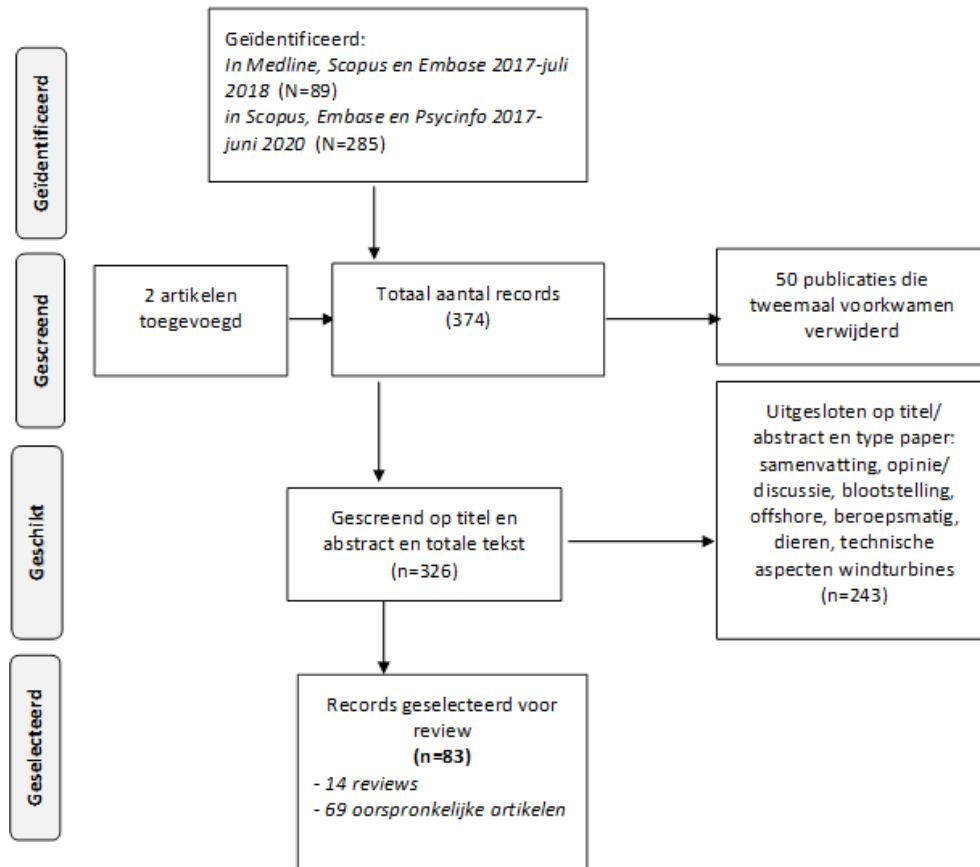
Met betrekking tot niet-akoestische effecten:

Opnemen wanneer een of meer van de onderstaande kwesties wordt besproken:

- Visuele aspecten:
 - o impact op landschap, draaibeweging, horizonvervuiling, enz.
 - o lichteffecten; schaduwflikkering
- Veiligheid
- Trilling
- Elektromagnetische velden
- Contextuele en persoonlijke factoren (geluidgevoeligheid, houding, effect van inspraak, mede-eigenaarschap)

A.6 Zoekresultaten

Zoals te zien in onderstaand stroomschema leverde het literatuuronderzoek 324 (374 - 50) publicaties op, waarvan 83 zijn opgenomen in de review en de referentielijst.



Bijlage 2 Verklarende woordenlijst

ACC	Anterior cingulate cortex (een hersengebied)
AM	Amplitude Modulatie
Atrial fibrillation	Boezemfibrillatie (hartritmestoornis)
Bias	Systematische fout
BMI	Body Mass Index: maat die het overgewicht bij een persoon weergeeft.
BI	Betrouwbaarheidsinterval (waarde ligt met 95% waarschijnlijk in dit interval)
CNHS	Canadian Noise and Health study/Canadees geluid en gezondheidsonderzoek
Confounder	Verstorende variabele
Cross-sectional	Dwarsdoorsnede: een studie op één moment in de tijd
CTL	Community Tolerance Level: tolerantieniveau van de gemeenschap
DALY	Disability-Adjusted Life Year (aantal levensjaren gecorrigeerd voor beperkingen): een maat voor de totale last aan ongezonde/verloren levensjaren die ontstaat door ziektes
dB	decibel, een maat om het geluidniveau weer te geven
dBA	A-gewogen decibel, aangepast naar de gevoeligheid van het menselijk gehoor
DEFRA	Department for Environment, Food & Rural Affairs (in Groot Brittanië)
EEG	Electroencephalogram
BEr	Blootstelling-effect relatie
EMG	Electromyogram
Et al	Geeft aan dat een publicatie meerdere auteurs heeft
EU	Europese Unie
FFR	Frequency Following Response: reactie van brein waarbij een opgelegde frequentie gevolgd wordt
(%)EH	(percentage) Ernstig gehinderd
(%)ES	(percentage) Ernstig slaapverstoord
IHD	Ischemische hartziekte
Incidentie	Maat van het aantal nieuwe gevallen van een (medische) aandoening in een populatie over een bepaalde tijdsperiode
L _{den}	Dag-avond-nacht equivalent geluidniveau: etmaalgemiddeld geluidniveau waarin avond en nacht zwaarder meetellen
L _{Aeq}	A-gewogen equivalent geluidniveau over een bepaalde periode
L _{night}	Nachtelijk equivalent geluidniveau
MW	MegaWatt (miljoen Watt)
NAS	Noise Annoyance Stress: geluidhinder-stress
NS	Geluidgevoeligheid
OR	Odds Ratio: de verhouding tussen twee kansen
Polysomnography	Een set van tests om slaapverstoring te meten/diagnosticeren
Prevalentie	Aantal feitelijke gevallen van een ziekte/ verwonding/aandoening in een populatie in een bepaalde periode

PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses: Voorkeur-items voor het rapporteren van systematische reviews en meta-analyses
REM	Rapid Eye Movement (slaapstadium)
SD	Standaard deviatie (standaardafwijking van een gemiddelde)
SPL	Sound Pressure Level/geluiddrukniveau: feitelijk geluidniveau op een zeker tijdstip
VAD	Vibroacoustic disease: vermeende vibroakoestische ziekte/aandoening
VVVD	Visceral vibratory vestibular disease (vermeende ziekte/aandoening van evenwichtorgaan gerelateerd aan inwendige trillingen)
WHO	Wereld Gezondheidsorganisatie
WT	Windturbine
WTA	Willingness to Accept: bereidheid te accepteren
WTP	Willingness to Pay: bereidheid te betalen

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag