Geluid in ‘t kort

Inleiding

In ’t kort is dit essay ontstaan als gevolg van ervaren gezondheidsproblemen, waarvan de oorzaak zou kunnen ontstaan door het plaatsen en ontwikkelen van parken met grote industriële windturbines.

Dat begon met het ontwikkelen van een windpark omdat EZ met alle provincies afspraken maakte over de hoeveelheid te plaatsen windturbines, landelijk te plaatsen 6000 MW, waarvan 530,5 MW in Fryslân, en wel een windpark van zo’n 60 turbines, de rode stippen rechts, rondom en tussen de daar liggende dorpen bij de Afsluitdijk in Fryslân, met Pingjum als ongelukkig middelpunt.
Dat was te veel, te ondoordacht, en zonder overleg in en met een zo klein deel van Fryslân.



Het bleek dat de overheid al jaren geleden de regelingen voor toelaatbare geluidseisen zo aanpaste, dat de plaatsing van turbines langs de dijk van de Noordoostpolder binnen de wettelijke kaders van geluidshinder viel. Daarbij bleek ook dat de methoden voor het meten van geluid zijn „aangepast”: het uitgangspunt is de melding van de fabrikant dat zijn turbine een zekere hoeveelheid deciBellen produceert en dat hierdoor geluidsprofielen voor omwonende basis voor beleid vormen.
Verschillende adviesbureaus rapporteerden hierover, alle uit literatuur onderzoek onder verwijzing naar andere literatuuronderzoeken.
Een verzoek aan ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M), de Staatssecretaris mevrouw W.J. Mansveld, van 1 april 2014, leidde tot het opzetten van een kennisplatform Windenergie, dat vervolgens ook verwees naar een groot aantal literatuuronderzoeken.
Een voorstel uit deze brief om dit gezamenlijk met de Belgische Gezondheidraad op te pakken, faalde.

Het RIVM, het Rijks Instituut voor Volksgezondheid en Milieu, heeft verschillende rapporten gepubliceerd, die over het algemeen aangeven dat het wel meevalt, Ampel onderzoek daarin stelt echter ook vast dat niet alle citaten uit andere literatuuronderzoeken, juist en/of volledig zijn geformuleerd.

Intussen neemt in Nederland het verzet tegen windenergie steeds fellere vormen aan en zijn ongeveer 140 actiegroepen druk bezig met het verweer tegen de overlast die windturbines veroorzaken.
Bij onze zuiderburen heeft zowel in Wallonië als ook in Frankrijk de Raad van State zich tegen de opstelling van windturbines uitgesproken omdat de overlast van turbines niet in maatschappelijk aanvaardbare procedure is vastgelegd. Het Beierse Hooggerechtshof stelde dat het pulserende karakter van het windturbine geluid niet zomaar verwaarloosbaar is. Ook uit Australië komen berichten van felle tegenstand tegen turbines, om redenen van overlast en daarmee gezondheids-schade.

De gevoeligheid van mensen en dieren is zeker onderling verschillend, waarin het niet-horen van geluid betekent niet dat er geen geluid is.

In ‘t kort gaat dit essay in op wat geluid is, wat geluid kan betekenen voor de gezondheid van mens en dier, hoe dat voelen uitwerkt en onderzoekt de waardering van geluid in de regelgeving.

Wouter Vogelesang

Inhoud

Inhoudsopgave

Inleiding 1

Inhoud 2

Wat is geluid? 3

Het gehoor, het waarnemen van trillingen, geluid. 3

Geluidsterkte in de spreektaal 5

Appreciatie van geluid – hoe waarderen we geluid? 5

Risico's van geluid 6

- Auditieve invloeden op de mens 6
- Auditieve invloeden op dieren 8
- Onderzoeken tot nu 8

Enkele theoretische beschouwingen over de theorie van geluid 11

Wat is twee keer zoveel geluid? 12

De weging van geluid 14

Ontstaan van geluid in een turbine. 16

Opwekking van geluid door de wieken. 17

Tipwervels 18

De opstelling van windturbines 21

- Invloed op de opgenomen energie 21

Het geluidspad 22

De maximale opbrengst van een windturbine 23

Normering van het geluid in Europa 27

- Normering van geluidsmeting in Nederland 31
  - Twee rekenvoorbeelden 32
- Normering van geluidsmeting in Denemarken 33
  - Discussie 34

Meten van geluid 34

- Gebruik van geluid 34
- Te meten componenten 35
- Doel van geluidmeting 35
- Regelgeving voor de geluidsmeting 37

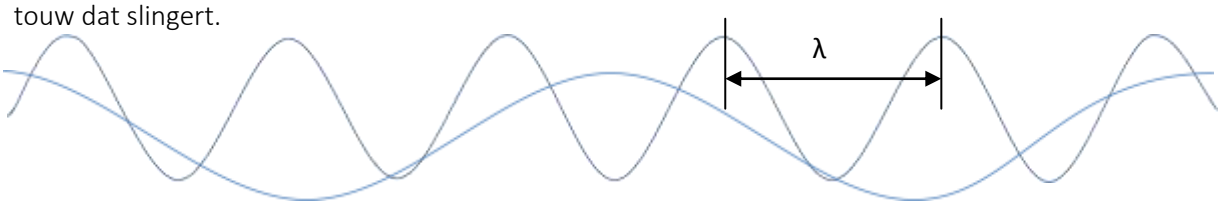
Berekening van de geluidsbelasting 38

Invloed op geluid en geluidsbeleving 39

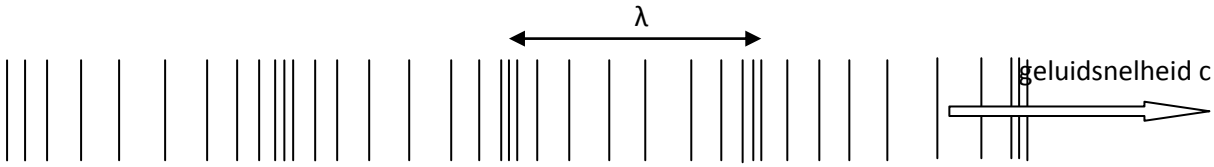
Wat is geluid?

Geluid is een trilling, meest in lucht, die in het oor het trommelvlies in beweging brengt. Geruis is geluid, zonder een duidelijke frequentie; een muzikale toon is geen enkelvoudige toon, maar een samenstel van trillingen, die per individu andere beleving kan oproepen.
Geluid is een trilling, maar niet iedere trilling is (voor de mens) met het gehoor waarneembaar.
Het begint met de grondfrequentie, en heeft daarboven andere frequenties, die deel van de totale toon uitmaken: grondtoon en boventonen, de eerste harmonische en volgende harmonische frequenties.

Gebruikelijk is de voorstelling van geluid als iets van een trillende snaar, zoals bij een viool, of een touw dat slingert.



Geluid, de trilling van een medium, is drukverandering en die is het best voor te stellen als een lopende verdichting, zie hieronder.



De geluidsnelheid vormt de samenhang tussen golflengte en frequentie volgens de formule:

$$geluidsnelheid = frequentie \times golflengte$$
$$c = f \times \lambda$$

De frequentie f kent de dimensie Hz, trillingen per seconde.
De golflengte λ is de afstand tussen twee golfpieken, en heeft de dimensie m [meter].
De geluidsnelheid in lucht hangt af van de temperatuur en is ongeveer 340 m/s, of zo'n 1200 km/u. In water is dat 5 × zoveel, in steen nog meer.

Het gehoor, het waarnemen van trillingen, geluid.

Voor levende wezens is geluid belangrijk in de overdracht van ervaring, van gevoel of kennis, om enkele aspecten te noemen, berichtgeving in de breedst mogelijke zin. Voor een boodschap in de vorm van geluid, is direct contact met anderen niet nodig: gehoor werkt ook buiten zicht van de boodschapper.

De mens heeft oren, veel dieren ook. Vissen hebben geen oren, zoals zoogdieren ze kennen, maar zijn wel degelijk gevoelig voor geluid – moet je de vissers maar eens vragen.
Vissen en zeezoogdieren hebben geen gehoorschelpen. Zeezoogdieren hebben een gehoorsysteem dat ongeveer werkt zoals bij landzoogdieren, vissen hebben een laterale lijn met ontvangers, neuromasten, langs de zijkant van hun lichaam, die een gedetailleerd hydrodynamisch beeld van de omgeving geven en zo ook een hydrodynamisch geluidsbeeld. Sommige vissen hebben een zwemblaas, een soort extra versterker voor een beter horen. De beperking bij vissen is het bereik: de hoogst waarneembare trillingen liggen rond 1000 Hz.

Zeezoogdieren horen veel meer dan de mens, de zeer lage en ook heel hoge. Extreem is het frequentiebereik bij de dolfijnachtigen: tot 10 keer dat van de mens.
Ongewervelde dieren, spinnen, geleedpotigen en wormen bezitten geen gehoororgaan, zijn dus „doof" maar nemen wel degelijk trillingen, een vorm van geluid, waar. Insecten nemen geluid met

organen waar, die op wat voor ons merkwaardige plaatsen zitten: op poten of voelsprieten of op andere plaatsen.
Belangrijk voor de begripsvorming is dat er geen essentieel verschil is tussen een trillingsgolf in lucht, of een geluidsgolf. Het kan hetzelfde zijn, de één hoort mens of dier, het andere niet. Beide kunnen ook te zamen waarneembaar zijn. En: geen geluid waarnemen, horen dus, betekent niet dat er geen geluid is.

Enkele voorbeelden van bereik, waarbij de gevoeligheid voor geluid zeker niet hetzelfde is:

• Kikker	100	-	2.500	Hz	
• Mens	20	-	20.000	Hz	(voordat ze naar de disco gaan)
• Olifant	1	-	20.000	Hz	
• Tijgers	2	-	100.000	Hz	
• Vis	1	-	1.000	Hz	
• Vleermuis	100	-	100.000	Hz	

Bij mensen hangt het bereik af van leeftijd. Gezonde, jonge, mensen horen trillingen tussen 20 Hz, de heel lage tonen en 20.000 Hz, de heel erg hoge tonen.
Honden horen tonen tot ruim over 50.000 Hz, veel hoger dus dan de mens. Daarom zijn ze gevoelig voor violen, die ook zeer hoge en (zeer) valse tonen kunnen produceren.
Aan de andere zijde van het spectrum zijn honden in staat hele lage tonen waar te nemen, tot zo'n 1 tot 2 Hz.
Dolfijnen horen geluiden tot 130.000 Hz en de „zang" van de grotere walvissen ligt in de frequentie van 40 Hz tot 4.000 Hz en kan in water tot 20 zeemijl ver dragen[1] veel verder dan in lucht, hoewel sommige bronnen aangeven dat het bereik in water nog veel meer kan zijn. Ook corvina's[2], een soort baars van soms wel een meter lang in de golf van Mexico, levert een bijzonder luide bijdrage in onderzeese herrie met 177 dB[3] en dat draagt zo'n 15 zeemijl ver. Anders dan bij de walvisachtigen (een vis heeft geen echt gehoor) kent de frequentie een piek bij ~ 380 Hz.
Voor de mens geldt dat de hoogste gevoeligheid tussen de 500 en 8.000 Hz ligt en de gevoeligheid voor het aanwezige geluid bij 20 Hz is heel erg laag.
Ongeboren baby's nemen ook al geluid waar, en kunnen zelfs al gehoorbeschadiging oplopen.
Bedenk daarbij dat boven 80 dB gehoorbescherming onvermijdelijk is:

• Gehoordrempel[4] volwassenen	10 dB
• Bladgeritsel	15 dB
• Slaapkamer, stil in Fryslân	20 dB
• Drents platteland	25 dB
• Bibliotheek	30 dB
• Slaapkamer, druk aan Champs Elysees	40 dB
• Gesprek	60 dB
• rijdende auto	80 dB
• Snurkende man	tot 90 dB
• discotheek	120 dB
• pijngrens	130 dB
• scheepshoorn	140 dB

Het geluidsniveau bij het heien op zee ligt op 262 dB[5], aldus TNO-medewerker Wim Verboom in Vara's vroege vogels. ESTEC in Noordwijk test systemen met geluidsdruk tot ruim 150 dB. Zeker ook de lage frequenties bij ca 5 Hz zijn belangrijk voor het gedrag[6] door het gebrul bij de start van een raket.

[1] Bron: NOAA – National Oceanic and Atmospheric Organisation
[2] Cynoscion othonopterus
[3] http://rsbl.royalsocietypublishing.org/content/13/12/20170656
[4] De gehoordrempel en in het algemeen, gevoeligheid voor geluid, hangt af van frequentie, leeftijd en vermoeidheid
[5] Bron: Maritiem Nederland 21-12-2017; Michel Verschoor – Overheid meet volgens brancheorganisaties met twee maten; Visserij in de tang van offshore, wind en zandwinning

Bij een niveau van 150 dB treedt bij de mens algehele doofheid op en bij 190 dB treedt de dood in. Ook zeedieren overleven deze geluidsdruk niet.

Geluidsterkte in de spreektaal

Sprekend over de sterkte van het geluid, zijn de volgende definities in de spreektaal belangrijk:

- Geluidsdruk p_g – meten we in Pa (N/m²)
- Geluidsniveau L – een drukverhouding - meten we in dB
- Geluidsintensiteit J – meten we in Watt/m²
- Geluidsvermogen – meten we in Watt
- Luidheidsniveau – meten we in foon
- Belasting door/van geluid – meten we in Lden – een over tijd gemiddelde waarde van drukverhouding, die weer in dB gemeten wordt

De sterkte van het geluid hangt af van het vermogen dat door geluid aan ons oor wordt overgedragen. Het waarnemen van het geluid hangt af van de gevoeligheid die voor het „geluid" bestaat, ontwikkeld is, of nog over is gebleven, gelet op leeftijd, eigenschappen, soort, enz.

Appreciatie van geluid – hoe waarderen we geluid?

Dit thema is al heel oud: 2.500 jaar geleden was al bekend dat muziek in staat is om mensen te ontroeren. Mensen kunnen in extase komen, een aspect dat in alle culturen bekend is. Het kan daarom zowel mensen prettig stemmen, een gevoel van volmaaktheid geven maar anderzijds is misbruik daarvan ook zeer bekend. Vaste ritmes, geluiden en/of trillingen die irriteren, waaraan niet te ontsnappen is, leveren onbegrepen ziektebeelden. Van de mens is dat bekend, van dieren ook, gelet op recente en minder prettige ervaringen in Denemarken.



Van Plato en Confucius is bekend dat er over het thema geluid veel is nagedacht: muziek kun je niet beetpakken, of in je zak steken: het harmonische karakter zou een ethische component hebben. Daarom moest volgens Plato, strenge regulering muziek ordenen, want anders zou het tot chaos en depressie leiden als gevolg van ritmische en melodische moeilijkheden, zoals hij in zijn *WETTEN* schrijft.
Pythagoras vond het verband tussen toonhoogte en de lengte van een snaar en legde de basis voor de hedendaagse toonladder vast.

Muziek in zijn algemeenheid kent per definitie eigenlijk zekere ritmes. Juist de afwijking van het vaste ritme, de afwijkingen in toonhoogten en de combinatie van verschillende tonen, geeft de zo gewenste harmonie in al zijn variaties.
Het geluid van de zee is ook ritmisch, met een stochastisch variërende component er op: het is nooit hetzelfde en geeft daardoor rust. Voor het ruisen van de bossen geldt hetzelfde.

Zodra echter die variaties gaan ontbreken, ontstaat een probleem. Ook dat kennen we uit de popmuziek waarin het niet-aflatende, monotone ritmische dreunen, de jeugd fantastisch vindt, maar ouderen verfoeien het: ze worden er door geërgerd, maar dat komt ook doordat de jeugd de daarbij geproduceerde hogere tonen wel hoort, maar de oudere mens niet meer evenals de meer „ervaren" festivalbezoekers (maar die zijn toch kierewiet).

[6] Het geluidsgeneratorsysteem bij Estec bestaat uit vier verschillende hoorns met lage afsnijfrequenties van 25, 35, 80 en 160 Hz. Drie hoogfrequent generatoren completeren deze apparatuur. Er kan een totaal geluidsniveau van 154,5 dBL worden bereikt

De schoonheid van muziek zit in de afwijking van de regelmaat, onder het regime van een vast ritme. Blijft de afwijking weg, dan verwordt dit tot een niet aflatende dreun, die mensen tot waanzin kan drijven.

Analoog hieraan geldt wat al eeuwen als foltering[7] bekend staat: het vastzetten, zo u wilt boeien, van een individu en die een vast ritme[8] te laten ondergaan, brengt een mens tot waanzin.
Dit geldt ook voor dieren: nertsen gaan elkaar te lijf, ondergaan spontane vruchtafdrijving en ontwikkelen onderling een zeer hoge mate van agressiviteit, wanneer windturbines in hun buurt komen te staan en dag en nacht hun niet aflatende zjoef-zjoef-zjoef-zjoef de ruimte in sturen, hetzij als geluid, hetzij als trilling door de bodem.

In een vorige paragraaf is voor dieren het bereik van de gevoeligheid voor geluid aangegeven. Dieren als tijgers, olifanten en de grotere zeezoogdieren staan met elkaar in verbinding door geluid in lagere frequenties, en voor de mens onhoorbaar. Dat wil niet zeggen dat andere frequenties zijn uitgesloten.

Risico's van geluid

Auditieve invloeden op de mens

Traditioneel is geluid voor de overlevende mens is geluid het middel om berichten over te dragen, voor gevaar te waarschuwen en emoties uit te drukken.
Muziek diende harmonisch te klinken, kon ook sensuele risico's in zich dragen en kon in de ogen van filosofen ook misbruikt worden.
Tegenwoordig vinden we ongeveer alles mooi, maar de invloed van geluid, het risico van een overdaad aan geluid, kent individueel grote verschillen. Leeftijd speelt hierbij een belangrijke rol, voor de oudere mens blijken die risico's[9] des te sterker aanwezig te zijn.

Scheepstoeters, hoorns zo u wilt, maken ook gebruik van juist de lagere frequenties: die dragen het verst. Degene die het lef heeft voor een scheepshoorn te staan als die afgaat, ondergaat een bijzondere ervaring: complete verstijving. De luchtmacht maakte gebruik van dit merkwaardige effect door F104's met nabrander aan, laag over de gekaapte trein bij Wijster te laten vliegen. Tijgers doen dit ook: laagfrequente gebrul verstijft, of verlamt, een prooi.

Uit de literatuur blijkt dat er een zeker risico is voor de foetus op het krijgen van gehoorschade. Hoewel buikwand en de uterus van de moeder een behoorlijke demping van geluid en trillingen geven, zou bij hoge piekwaarden het geluid in de buik nog boven de 80 dB kunnen komen. In welk stadium de gehoorschade mogelijk op zou kunnen treden, is niet duidelijk.
Voor jeugd, die hun grenzen nog niet verkend hebben, treedt bovendien het gevaar van onderschatting van de risico's op.
Zwangere vrouwen in relatie tot trillingen en schokken ondergaan een hoger risico op schade bij de foetus. Zij genieten echter wettelijke bescherming (BW art 658) in werkomstandigheden en kunnen bij een werkgever schadeloosstelling eisen met eventueel smartengeld. Hier is echter geen werkgever/werknemer relatie aan de orde, alhoewel het plaatsen van industriële windturbines in een woon omgeving eigenlijk het woongebied de facto omvormt tot industriegebied.

---

[7] Deze marteling is voor het eerst door Hippolytus de Marsiliis een jurist uit Italië, geboren 1451 in Bologna, zo rond 1482 bedacht. Abusievelijk ook bekend als de Chinese torture.
Het folterende effect zit in het langzame tempo van de druppels, het feit dat er geen wisselend ritme in het vallen zit en de onmogelijkheid aan de ervaring te kunnen ontsnappen.
Het slachtoffer kan bijna voorspellen wanneer de volgende druppel zal vallen en een spanning bouwt zich op in de persoon.
Bij de eerste drup is het: nou, ja, drup, maar na 500 druppels is iedere druppel een baksteen op je hoofd.
Het is de combinatie van herhaling, geen kant uitkunnen, de machtloosheid en geen keuze hebben, slechts die eeuwige waterdruppel, dat het zo waanzinnig maakt.

[8] Analoog aan de niet aflatende regelmaat van de waterdruppel geldt slagschaduw van windturbines, in zijn extreme vorm leidend tot fotogene epilepsie en kunnen lichtflitsen psychische problemen tot gevolg hebben.

[9] Bron: w[3].arbokennisnet.nl/images/dynamic/dossiers/geluid_en_trillingen/D_geluid.pdf

Korte termijn effecten van auditieve invloeden zijn onder andere:

- Schrikeffecten
- Toename van de hartfrequentie
- Spierspanning
- Duizeligheid
- Hoofdpijn
- Slaapstoornissen (na lawaaiblootstelling)
- Ongevallen
- Verstoring van auditieve en visuele perceptie

Lange termijn effecten kunnen zijn:

- Hoge bloeddruk
- Oogafwijking (nystagmografische afwijkingen)
- Chronische stressverschijnselen
- Apathie depressie

Het vaststellen van de lawaaibelasting is verplicht in de risico-inventarisatie met ARBO-wet art. 5. In het ARBO-besluit afdeling 3, art 6.6 t/m 6.11, staat beschreven hoe dit moet.
De regelgeving stelt ook dat goed inzicht moet zijn in het frequentiespectrum en tevens de demping die als gevolg van omgevingseigenschappen ontstaat.

De verwaarloosbaarheid van de risico's[10] van juist de lage frequenties in de RIVM-rapportage[11] verdient nader onderzoek: blootstelling aan infrageluid beïnvloedt degelijk direct het vestibulaire systeem, zie blad 34/58 van dit rapport. Dit rapport, naast andere onderzoeken, geeft ook aan dat nader onderzoek op dit terrein verzocht wordt. Een paar oudere onderzoeken[12] stellen vast dat er wel degelijk biologische directe effecten zijn, waarvoor voldoende bewijs is. Ook hier is nader onderzoek verzocht.
De effecten[13] zijn: cardiovasculaire veranderingen (hartslagversnelling)

Voorts nog enkele feiten over de risico's van laag frequent geluid:

- 3 Hz: depressies, wrevel en irritatie bij voldoende blootstelling
- 7 Hz: nare ervaring, of misselijkheid, desoriëntatie en hoofdpijn.
- 9 Hz: epileptische aanvallen
- 12 Hz: spontane darmbewegingen
- 18 Hz: ogen gaan vibreren
- lage frequenties in gevechtsituaties[14] verlammingsverschijnselen;
  verhoging daarna veroorzaakt gevoelens van angst of paniek en ook een wazig gezichtsveld[15]

Gebruikelijk is de aanname dat de onderste gehoorgrens bij de mens op 20 Hz ligt; infrasound is de gebruikelijke benaming voor dit frequentiebereik. Waarden tussen 20 en 200 Hz benoemt men als laag frequent bereik, hoewel de bovengrens niet overal dezelfde is.
Echter, bij voldoende volume, neemt de mens geluid waar bij een frequentie van 1 of 2 Hz[16].

---

[10] risico aansprakelijkheid - benadeelde stelt en de EIGENAAR (niet gebruiker, leaser of wat dan ook) betaalt. Voorbeeld. Als een dakpan van je huis afwaait en op een auto valt, kan de benadeelde de EIGENAAR van de woning aansprakelijk stellen, bv een pensioenfonds. En die betaalt. Zie ook artikel 185 Wegenverkeerswet (oud art 31 WvW). Van toepassing op OG, vliegtuigen, voertuigen etc. Het lijkt het uitzoeken waard. De windturbine is OG dus er is een risico aansprakelijkheid.
Mogelijk ook van toepassing op planschade, gezondheidsschade en al die andere problemen uit de inventarisatie van mr. Jan Veltman (advocaat bestuursrecht te Amersfoort). Zo kan een onvoorspelbare rekening ontstaan.

[11] RIVM rapport 200000002/2013, blad 34/58

[12] waaronder het uitstekende en goed gedocumenteerde advies Gezondheidsraad 2004/14, over de invloed van geluid op de slaap en gezondheid.

[13] advies Gezondheidsraad 2004/14, tabel 2, blad 101

[14] recente bestrijding van piraterij voor de kust van Somalië kan hiervan gebruikmaken.

[15] zie ook: Bryan, M. E., & Tempest, W. (1973). Are our noise laws adequate? AppliedAcoustics, 6, 219-232.
Tempest, W., ed. (1976). Infrasound and low frequency vibration. London:Academic press

[16] H. Møller and C. S. Pedersen: Low-frequency wind-turbine noise; J. Acoust. Soc. Am., Vol. 129, No. 6, June 2011

Oren nemen dit geluid waar, maar de subjectieve geluidskwaliteit verschilt van dat bij de hogere frequenties. Onder de 20 Hz verdwijnt het tonale gevoel en krijgt het geluid een discontinu karakter en een gevoel van druk op de oren ontstaat.
Bij deze lage pulsfrequenties is het zelfs mogelijk de puls van elke toon te volgen en te tellen. Voorts neemt de luidheid meer toe in vergelijking met de luidheid bij hogere frequenties en bij een volume boven de gehoorgrens wordt dit niet alleen als luid ervaren, maar bovendien als zeer hinderlijk.

Laag frequent geluid boven de gehoordrempel kan zowel de kwaliteit van werken beïnvloeden als een ongestoorde rustige slaap. De natuurlijke, persoonlijke, verschillen in de hoogte van de gehoordrempel spelen hier ook een rol.

Auditieve invloeden op dieren

Dieren ondergaan geluid op een andere manier dan de mens.
Geluid is zeker ook een manier om berichten over te brengen, voor binding met en zorg voor jonge dieren, voor affectie enz. Waarschuwen bij gevaar aan soortgenoten, indruk maken op indringers, of balts zijn eveneens belangrijke thema's.
Hiermee is auditieve beïnvloeding niet anders dan bij de mens, hoewel ook wel eens een vorm van overleg merkbaar aanwezig is.
Belangrijk is wel te onderkennen dat gebruikte frequenties niet altijd voor de mens hoorbaar zijn. Voor zeedieren, ligt dat ook zo.
Op land vindt het ontstaan van geluid meest plaats door het weer en/of door industrie en verkeer.

Op zee is de intensiteit van het scheepvaartverkeer een belangrijke bron van geluid, hoewel de meeste zeedieren zich daar niet al te veel van (b)lijken aan te trekken[17]. Met name dieren, die alleen beweging in het water kunnen waarnemen, kunnen turbinegeluid slechts tot ~ 10 m vanaf een windturbine. Vissen die reageren op verschillen in geluidsdruk nemen dit waar tot op afstanden van verscheidene kilometers afstand, onafhankelijk van de geluiden die het soms intensieve scheepvaartverkeer ontwikkelt.

Soorten als kabeljauw en tong nemen het breedband productiegeluid van windturbines waar tot op verscheidene kilometers afstand. Het heien van palen om windturbines te plaatsen leidt tot hoge drukpulsen in het water en beweging van zanddeeltjes in water en zeebed. Hierdoor ontstaat ook gedragsverandering.

Om botsing met onderzeeboten op fundaties van windturbines te voorkomen, heeft de Duitse Bundeswehr transponders op die fundaties geplaatst.
Een bronniveau van 200 dB re 1 µPa op 1 m is voldoende bescherming tot een afstand van 2 zeemijl[18]. Dit heeft zeker effect op het gedrag van vissen en walvisachtigen.

Onderzoeken tot nu

1. Onderzoek door TNO verricht[19], is voornamelijk gebaseerd op vragenlijsten: het vaststellen van een dosis-effectrelatie[20] van het windturbinegeluid. Daarbij stelt dit onderzoek dat er onzekerheid bestaat omdat windturbinegeluid niet overeenkomt met internationale standaarden, zoals belasting door verkeersgeluid. Voor een goede handhaving is voldoende wetenschappelijk onderbouwing nodig, zo stelt het TNO rapport in de inleiding[21]. Dit rapport geeft ook aan dat bij gebrek aan betere methode, de methode van het bepalen van de hinder door verkeers- en industrielawaai is toegepast (§3 – doelstelling).[22]

[17] Mathias H. Andersson - Offshore wind farms – ecological effects of noise and habitat alteration on fish; Department of Zoology; Stockholm University (2011)
[18] J Acoust Soc Am. 2013 Nov;134(5):3536-45. doi: 10.1121/1.4823841.
[19] de basis is een tweetal onderzoeken in Zweden (2000, 2005), en één in Nederland (2007).
[20] In Nederland is dat het TNO-rapport 2008-D-R1051/B van oktober 2008: Hinder door geluid van windturbines
[21] RIVM-rapport 200000002/2013 spreekt dit tegen: alle geluidsaspecten zijn meegewogen (§3 - blad 21/58
[22] Voor het verhogen van het responspercentage kregen respondenten een cadeaubon – TNO rapport blad 7/29.

2. Onderzoek naar gezondheidseffecten van windturbines vond voornamelijk in het buitenland plaats (zie punt 3), in een met de nu door deze extra plaatsing in Nederland niet vergelijkbare situatie qua volume, landschapstype (nl geen bergen in Nederland) bevolkingsdichtheid en vermogen van de turbines[23]. Daarbij is in het TNO rapport gewezen op de gebrekkige weging van slaapverstoring als gevolg van een te algemene vraagstelling. Juist slaapverstoring[24] veroorzaakt grote problemen, aldus vele klagers in Nederland (en daarbuiten)[2526].

3. Vrijwel alle nieuwste literatuurstudies verwijzen naar enkele en dezelfde bronnen en onderschrijven feitelijk de oude onderzoeksresultaten die de bekende conclusies ondersteunen.
Vele onderzoeken krijgen in de nieuwste literatuuronderzoeken het stempel „niet-wetenschappelijk" en daardoor is het des te opvallender dat deze onderzoeken het alleen eens zijn over de noodzaak nader onderzoek te doen om de gezondheidsaspecten in kaart te brengen en een veilige afstand woningen en bedrijfspanden nabij windturbines te kunnen adviseren. Ook in Canada[27] is geadviseerd een goed wetenschappelijk onderzoek te doen naar de effecten van laag frequent geluid.

4. Oudere onderzoeken stellen echter wel degelijk verbanden vast tussen (infra)geluid en gezondheidseffecten. Sommige nieuwe ontkennen het verband eenvoudig, zoals Leventhall (2013)[28], die stelt dat het menselijk lichaam inwendig zoveel infrageluid (oa door bloedstroming en ademhaling) produceert dat dit van buitenkomend geluid zou overstemmen[29]. Het recente RIVM rapport stelt dat directe beïnvloeding van het vestibulaire systeem door blootstelling aan infrageluid, niet wetenschappelijk is bewezen (blad 34/58). Een paar oudere onderzoeken[30] leren juist dat er wel degelijk biologische directe effecten zijn, waarvoor voldoende bewijs is. De effecten[31] zijn: cardiovasculaire veranderingen (hartslagversnelling), voor vasoconstrictie en momentane toename in bloeddruk is eveneens voldoende evidentie. Voort wijst dit advies naar verandering in slaapstadium, EEG-ontwaken, (begin van) motorische onrust en gedragsmatig ontwaken, zaken waaraan nieuwere onderzoeken voorbijgaan.

5. Enkele resultaten uit oudere onderzoeken naar (de toepassing van) laag frequent geluid wijzen op somatische werking, op de pressieperceptie, zie de paragraaf over auditieve invloeden op de mens. Verhoging veroorzaakt ook gevoelens van angst of paniek en ook een wazig gezichtsveld[32], zie ook punt 13 hierna.

6. Op zeer laag niveau en bij voldoende blootstelling, veroorzaakt 3 Hz depressies, wrevel en irritatie. Het experiment van de Franse hoogleraar Vladimir Gavreau om met een superfluit, die aangeblazen werd door een straalmotor, onhoorbare, zeer lage tonen te produceren waarmee menselijke organen kapot getrild zouden kunnen worden, is een operationalisering van dit wetenschappelijk inzicht.

7. In tegenstelling tot de Hoge Gezondheidsraad van België hebben wij nog geen recente initiatieven bij de Nederlandse Gezondheidsraad ontdekt gericht op adequaat onderzoek naar mogelijke gezondheidseffecten voor omwonenden in deze nieuwe situatie, waarin een wetenschappelijk

---

[23] Turbines uit de tijd van de metingen, hadden een ashoogte die grofweg onder de helft ligt van de nieuwste turbines, die inzet zijn voor turbineopstelling op land.
[24] TNO rapport | 2008-D-R1051/B, § 6 - Discussie
[25] Niet onvermeld mag blijven dat juist slaapverstoring grote spanningen in de lokale gemeenschap oproept: in 2014 ontstond een vechtpartij op een stembureau. In de uitwerking van het rapport van Fryslân foar de Wyn bleek dat de gehele eis tot plaatsing van windturbines in de bebouwde omgeving, tot zeer grote spanningen leidde. In Drenthe leidde dit bijna tot dodelijke ongelukken.
[26] Nissenbaum et al, Effects of industrial windturbine noise on sleep and health. Noise health 2012;14:237-43
[27] Ontario ministry of environment –rapport RFP no OSS 078696
[28] Leventhall, G. (2013) Infrasound and the ear. Proceedings 5th International Conference on windturbine noise, Denver
[29] RIVM rapport 200000002/2013, blad 34/58
[30] waaronder het uitstekende en goed gedocumenteerde advies Gezondheidsraad 2004/14, over de invloed van geluid op de slaap en gezondheid.
[31] advies Gezondheidsraad 2004/14, tabel 2, blad 101
[32] zie ook: Bryan, M. E., & Tempest, W. (1973). Are our noise laws adequate? Applied Acoustics, 6, 219-232. Tempest, W., ed. (1976). Infrasound and low frequency vibration. London:Academic press

verantwoord advies is opgebouwd. Ook eerder recent Nederlands onderzoek naar medische gevolgen troffen wij niet aan, anders dan het gemelde uit 2004.
Een rapport van de Belgische Hoge Gezondheidsraad vermeldt de stelling dat België moet deelnemen aan een onderzoek of zelfs het voortouw moet nemen in een internationale studie over de eventuele specifieke invloed van draaiende windmolens op de gezondheid en het welzijn.

8. Bekend is dat veel omwonenden hinder ervaren van nabij geplaatste windturbines. Potentiële, toekomstige omwonenden voelen zich onvoldoende gehoord over de door hen verwachte overlast. De literatuurstudie uit 2013 van het RIVM[33] stelt onvoldoende gerust door de beperkte scoop en het ontbreken van focus op de Nederlandse situatie. Daarbij eindigt ook dit rapport met het advies voor nader onderzoek.

9. Stroboscopie-effecten zijn een belangrijk onderdeel van regelgeving voor helikoptervluchten, vanwege het effect op de piloot. Deze zijn t.a.v. de megawindturbines die in het landschap van het dichtbevolkte Nederland geplaatst gaan worden voor zover wij weten niet onderzocht. Wel zijn deze effecten in de programmatuur van de turbines op te vangen, waardoor de gevolgen afnemen of zelfs verdwijnen.
Onophoudelijk volgende lichtwisselingen, met name de ritmische herhaling van opeenvolgende slagschaduwen van een of meer opgestelde windturbines op woningen of bedrijfsgebouwen, kunnen fotogene-epilepsie voor daarvoor gevoelige personen opwekken.

10. Geluidsnormen in Nederland zijn onlangs zo gewijzigd dat meer geluid (47 dB) - bij gevelmeting - wordt toegestaan[34].
Daarbij wordt gemeten aan de hand van een jaargemiddelde, waardoor hogere waarden, ook 's nachts (41 dB), zijn toegestaan.
De geluidsmeting[35] vindt naar de regelgeving uitsluitend plaats in het geluidspad door de lucht. Het geluidspad door grond en grondwater is in de regelgeving over het hoofd gezien, maar minstens zo belangrijk.
Geluidsmeting op de gevel neemt niet de mate van geluidsisolatie in ogenschouw, welke juist bij de oudere solitaire woningen in de als windpark-zoekgebied aangewezen regio's, zeer laag is. Daarnaast zijn de relatief lege gebieden waar plaatsing is beoogd, doorgaans tot nu toe „stiltegebieden", zodat geluid harder aankomt dan wanneer ook andere achtergrondgeluiden[36] aanwezig zijn.

11. De geluidshinder die omwonenden van windturbines aangeven, is op grond van Nederlands onderzoek is veelal geduid als psychisch fenomeen.
Onderzoek naar als psychisch geduide klachten bij andere aandoeningen, denk aan het recent onderzoek naar klachten bij borstprotheresedraagsters, blijkt nogal eens bij nader onderzoek toch een lichamelijke oorzaak te hebben.

12. Laagfrequent geluid – LFG – is in de regelgeving uitgesloten[37]. Het is juist dit LFG[38] dat de meeste energie bezit en dus het verste draagt.
Uit de onderzeedienst is bekend dat hoorbaarheid van onderwatergeluid over meer dan 10 km van zeker niet ongebruikelijk is, zodat een geluidspad van geluid via drukgolven in ondergrond en grondwater, rond een windturbine ook aannemelijk is.
Het RIVM geeft aan dat nog weinig bekend is over verspreidingsgebied en de gezondheidseffecten[39];

[33] RIVM rapport 200000002/2013 – Windturbines: invloed op beleving en gezondheid omwonenden
[34] RIVM rapport 200000002/2013: Deze afstanden tot gebouwen zijn niet per se gebaseerd op samenhangede effecten van veiligheid en gezondheid, maar vooral op basis van de beschikbare ruimte, citaat blz 17/58
[35] Geluidsbeoordeling is een buitengewoon gecompliceerde bezigheid: niet wetenschappelijk verantwoord eenduidig, omdat alle geluidspieken buiten beschouwing blijven.
[36] Het gaat hier om verschillen van meer dan 6 dB(A) en bij overschrijding zijn het juist de stilte gebieden die daardoor aantasting ondergaan. Maar juist de stiltegebieden zijn de „betere" locaties voor grote windturbines
[37] LFG is geluid met frequentie < 20 Hz, ook bekend als infrageluid. Maar juist deze frequentieband is van de meting en dus van de beoordeling uitgesloten
[38] Denemarken stelt als enig land grenswaarden aan LFG: max 20 dB bij de frequentie van 10 – 160 Hz.
[39] RIVM-rapport 200000002/2013 ondersteunt dit (§3.3.3, blad 25/58): er is nog onvoldoende bekend over de samenhang van frequentie met hinder. Zie ook de samenvatting van §3.

daarentegen hebben zowel de Duitse Bundeswehr en de US Navy daar uitvoerig onderzoek naar verricht.

13. Laag Frequent Geluid ligt onder de menselijke gehoordrempel en mensen zouden dit dus niet kunnen horen[40]. Echter bij discofeesten maakt onze lieve jeugd graag gebruik van de somatische werking van zware bassen, die niet zo zeer het gehoor aanspreken, als wel de complete buikwand: die gaat op de maat van de muziek mee heen en weer.
In woningen speelt hetzelfde effect: het geluidspad door de lucht spreekt wanden en ramen aan, en het geluidspad door de grond, de fundatie. Het effect is dat wanden en ramen vervolgens geluid afstralen.
Op de regelgeving ten aanzien van het meten is zware kritiek: die sluit de effecten van de laagste frequenties uit. Uit een onderzoek van middelbare scholieren van het St. Odulphuslyceum in Tilburg bleek dat 19 Hz geen effect heeft op het menselijk lichaam, maar wel op de psyche[41][42]. Hoewel kennelijk eenvoudig en reproduceerbaar meetbaar, is opname in de beschouwingen van het Platform Windenergie als zijnde niet-wetenschappelijk, afgewezen.

14. Møller et al[43] hebben bestaande onderzoeken vergeleken op het thema laagfrequent geluid van de grotere windturbines. Zij stellen dat meerdere onderzoeken klaarblijkelijk niet voldoende onderbouwde gegevens publiceren, en hier en daar op belangrijke thema's onjuistheden vermelden. Ook zijn metingen van LFG met open vensters niet alleen toegestaan, maar soms ook beter, wanneer de gehinderde personen aangeven dat op bepaalde plaatsen er meer geluid is, dan ergens anders. Een dergelijke benadering vinden we ook in het VK. Ook vinden zij in de bestaande onderzoeken geen systematisch onderzoek naar het verband tussen infrasoon geluid en de grootte van de turbine.

Afsluitend zijn een groot aantal onderzoeken gebaseerd op literatuuronderzoek, die in zichzelf de stand van de wetenschap niet verder brengen. Logisch is daarop dus algemeen de vraag: Ga onderzoek doen, want we weten niet precies wat de effecten van geluid, zowel het hoorbare als het onhoorbare infrageluid zijn.
In het bijzonder was het de Belgische Hoge Gezondheidsraad, die dit gezondheidsaspect nadrukkelijk aan de orde stelt.

Enkele theoretische beschouwingen over de theorie van geluid

Dit verschil in geluidsdruk, p_g, een druk gemeten in Pa (N/m²), is ook te beschouwen als een hoeveelheid energie per m³, of ook J/m³.
Deze energiehoeveelheid levert tegen een wand, een trommelvlies, een energiedichtheid per m² af, dat is de geluidsintensiteit: de hoeveelheid energie op een oppervlak per eenheid van dat oppervlak.
Voor de over een periode T gemiddelde intensiteit J geldt:

$$J = T^{-1} \int_0^T \left(\frac{(p_g)^2}{z} \right) dt = {p_{eff}}^2 / z \quad \left[W / m^2 \right]$$

Hierin is:
z = de specifieke akoestische weerstand van het medium [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$].

Wel is hier belangrijk de *hele* periode van *alle* trillingen mee te nemen, anders is het resultaat gemankeerd, zie ook blad 29.
Merk op dat hier p_{eff}, de effectieve waarde van de geluidsintensiteit [Pa], kwadratisch samenhangt met de geluidsdruk J [W/m²].

[40] RIVM-rapport 200000002/2013 stelt eigenlijk: geluid dat je niet kan horen, veroorzaakt geen hinder
[41] zie: www.exo.science.ru.nl/bronnen/biologie/infrageluid.html (via wikipedia te vinden)
[42] Ook het onlangs opgerichte Platform Windenergie kenmerkte dit onderzoek als van geen waarde, omdat het niet door een wetenschappelijke instelling is gedaan.
[43] Møller, H., & Pedersen, C. S. (2011). Low-frequency noise from large wind turbines. Acoustical Society of America. Journal, 129(6), 3727-3744. 10.1121/1.3543957

Die geluidsintensiteit J_0 is bij 1000 Hz (een soort nulpunt) 10^{-12} W/m², de gehoordrempel.
Maximaal, en dat is de pijngrens, is een geluidsdruk van 1 W/m², ook weer bij 1000 Hz, te verdragen.
Het verschil is 12 ordegroottes, of een factor 10^{12}.
Rekenkundig is dat slecht vergelijkbaar en bovendien geeft een constante druk, dus zonder drukverschillen, geen overdracht van geluid en dus ook niet van trillingen.

Belangrijk is daarmee de verhouding van de trillingsdrukken:

$$actuele\ geluidsdruk\ /\ gehoordrempel$$

De gehoordrempel, het nulpunt, is *voor de mens* 10^{-12} Wm^{-2}, en kent dus geen nulwaarde.
De gevoeligheid van het menselijk oor voor frequenties heeft een ongeveer logaritmisch karakter en dan is de keuze voor een logaritmische benadering hier logisch, in dit geval met grondtal 10.
Deze verhouding, gebaseerd op de menselijke gehoordrempel, is de basis van het vastleggen van geluidsdruk.
De maximale waarde voor deze verhouding is:

$$\frac{Pijngrens}{gehoorgrens} = \frac{1\ {}^{W}/_{m^2}}{10^{-12}\ {}^{W}/_{m^2}} = 10^{12}$$

Dit getal is dimensieloos.
De logaritme van deze waarde heet het *geluidsniveau L*, uitgedrukt in Bel, of, het meest gebruikt, de deciBel:

$$geluidsniveau\ L = {}^{10}\log\left(\frac{pijngrens}{gehoorgrens}\right) = 12\ [B],$$

de maximale maat voor de *mens*.
Gebruikelijk is dit getal met 10 te vermenigvuldigen en dan ontstaat de decibel, of dB.
Voor de goede orde: bij de gehoorgrens is de geluidsintensiteit, in W/m² dus niet 0.
Zowel pijngrens als gehoorgrens hangen af van de frequentie.

Voor alle duidelijkheid: het geluidsniveau is een verhouding van de actuele geluidsintensiteit, die een kwadratische waarde heeft uit de geluidsdruk p_g, dus in Pa, en zo is de verhouding van de geluidsintensiteiten ook een verhouding van de geluidsdrukken en vanwege het kwadraat in de logaritmische vergelijking ontstaat dan:

$$L = 20\ \log\left({}^{p_g}/_{p_{g0}}\right)$$

Met $p_{g0} = 2 \times 10^{-5}$ [Pa], zijnde de gehoorgrens.
Uitgangspunt van deze opstelling is nog steeds de trillingsfrequentie van 1000 Hz.

Wat is twee keer zoveel geluid?

Iedereen praat over decibellen, dB's, en dit is politiek als de grootste waarheid beschouwd.
Hier begint direct de discussie wat de hoeveelheid geluid voorstelt en wat bij wat de *mens* minimaal nodig is om ook iets te kunnen horen.

De deciBel, dB, is en blijft niets meer dan een rekenwaarde om de druk van geluid numeriek te maken en daarmee een objectieve maatstaf in handen te krijgen. De beoordeling van geluid lijkt wel op de bespreking van het weer en om die reden, staat hiervoor, op blad 2, een opsomming van hier van toepassing zijnde begrippen.

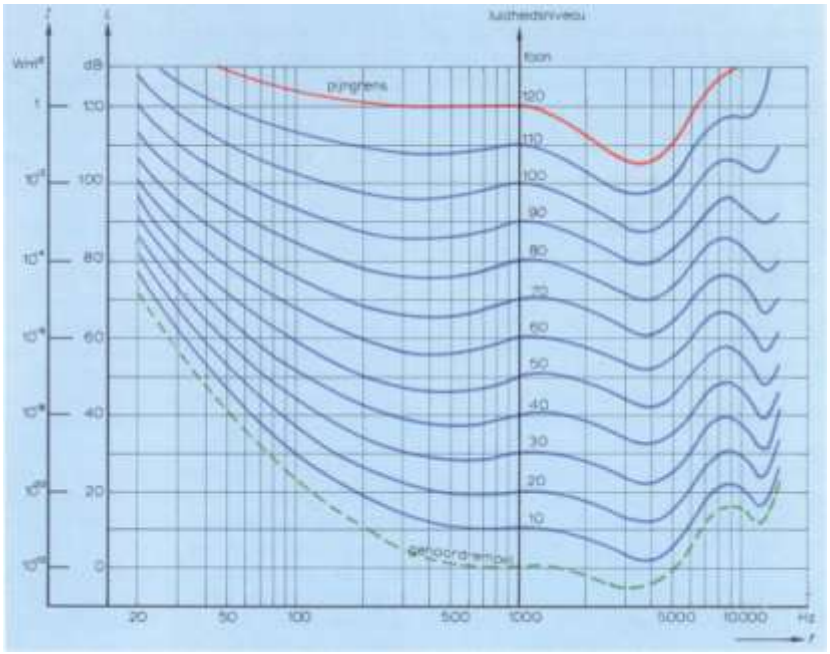
Geluidsdruk, voor de mens hoorbaar, kent een enorme spreiding: een factor 10^{12}. Voor een goede beheersing van deze spreiding is de logaritmische weergave eigenlijk de enig juiste.

Hier is de decibel, de dB, is een logaritmische rekenwaarde met als grondtal 10 de gebruikelijke waarde. Als de geluidsdruk *p* van een waarde P toeneemt met een factor 2, dan groeit het geluidsniveau *L* van $^{10}\log_{10}$ P naar $^{10}\log 2\times P = {}^{10}\log 2 + {}^{10}\log P = 0{,}3010 + {}^{10}\log P$.[44]
De eenheid hiervan is [B], de Bel, en met de gebruikelijke decibel is de waarde daarom vermenigvuldiging met een factor 10, dus 3 dB.

Terugrekenend levert met grondtal 10, maar nu rekenend met de Bel, voor een verdubbeling van de geluidsdruk $10^{(3{,}01/10)} = 10^{0{,}301} = 1{,}9998$ of de verdubbeling[45] van de geluidsdruk.
De waarde van P, de geluidsdruk, is uitgedrukt in Pa, N/m².

De volgende vraag is welke eenheid hier van toepassing is: de decibel als verhouding, want die is het eenvoudigst te meten – als het goed gebeurt, maar belangrijker is de luidheid van geluidstrillingen.

Voor het ervaren van geluid is niet een logaritmische rekenwaarde van belang, maar de luidheid. Op basis van de decibel als rekenwaarde, is naar het ervaren van luidheid[46] uitvoerig ontologisch onderzoek gedaan op normale personen in de leeftijd van 18 tot 25 jaar en leidde tot onderstaande grafiek[47] van isofonen (ISO 226-1987), lijnen van gelijke luidheid met als eenheid de foon.



In de grafiek vallen een tweetal dippen op: de eerste bij ca 4 kHz: een hogere gevoeligheid voor de menselijke stem (spraakfrequentie van de telefoon) en de andere bij ca 13 kHz, de frequentie van geritsel en krakende takjes in de natuur, van belang voor het overleven van de mens. De vorm van de gehoorgang bij de mens leidt tot deze eigenschappen.

Voorbeeld: een geluiddrukniveau van 40 dB en 1000 Hz is de luidheid 40 foon of phone. Bij 100 Hz heeft 52 dB dezelfde fysiologische luidheid.
Het menselijk gehoor zwakt dus luidheid af met 12 dB, een factor 15,8 in deze grafiek. Er zijn hiervoor heel veel metingen gedaan en de laagst meetbare gevoel van luidheid ligt echter niet bij 0 dB. De groene lijn bij 3 tot 4 kHz toont dit; bij deze frequentie heeft het menselijk oor de maximale gevoeligheid. En reclame maakt hier „handig” gebruik van, waarover later.

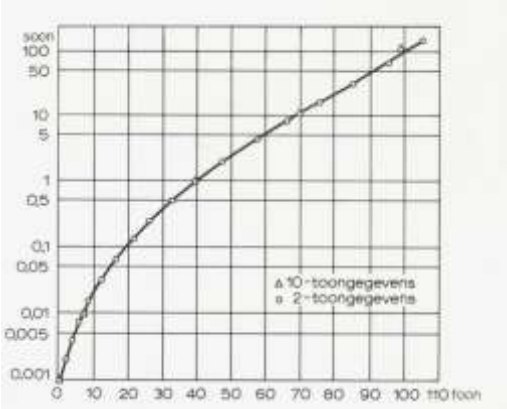
---

[44] Het grondtal van een logaritme staat niet altijd op dezelfde plaats: vaak voorafgaand aan het log-teken als $^{10}\log$; in veel literatuur staat de hier overigens niet toegepaste notatie $\log_{10}$.
[45] Een verhoging van 40 naar 47 dB is een factor $10^{0{,}7} = 5$ - voudige verhoging van de geluidsdruk.
[46] Niet elk mens is even gevoelig voor geluid; het varieert met de leeftijd en tevens met het geslacht.
[47] Bron:Fletcher en Munson 1933– later uitgewerkt door Robinson en Dadson; er zijn veel isofoon-grafieken in omloop, de hier getoonde komt uit de technische WP.

Nogmaals de grafiek: bij de luidheid van 40 foon en 1000 Hz is de geluidsdruk 40 dB (zo is de foon gedefinieerd). De frequentie 20 Hz levert bij deze luidheid een geluidsdruk van ~ 91 dB. De geluidsdruk voor dezelfde luidheid neemt met 51 dB toe.

Het ervaren van luidheid in foon hangt oa af van frequentie, van geslacht, en ook van leeftijd. De isofoon bij 1000 Hz en 40 dB is niet een verdubbeling bij 50 foon.
De toename in luidheid van 40 naar 50 foon is een andere voor het gevoel dan de luidheidtoename van 90 naar 100 foon.

De *foon-dB* schaal is bedoeld een zuivere toon te beoordelen en niet het fysiologische effect van complexere geluiden. Optellen van de luidheid van twee zuivere tonen van verschillende frequentie gaat niet, bijvoorbeeld een toon van 200 Hz met luidheid 70 foon samen met een toon van 3150 Hz met ook 70 foon levert geen 140 foon, maar iets anders.



Om die reden is de sone ingevoerd. Eén sone komt overeen met 40 foon en is gedefinieerd als:

$$S = 2^{(P-40)/10}$$

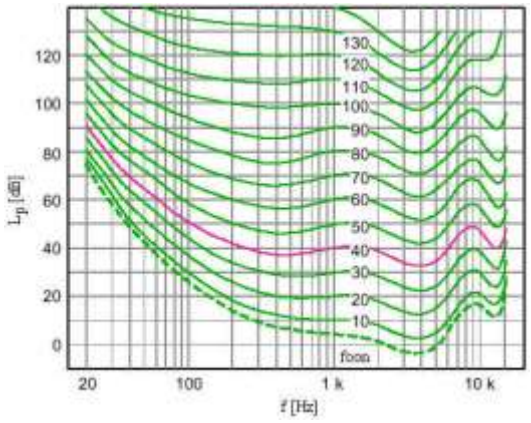
Hierin:

S = luidheid [sone]
p = luidheid [phone of foon]

Voorbeeld 1:
Een geluiddruk van 80 dB betekent $2^{(80-40)10} = 16$ sones. Een verhoging van de geluiddruk naar 90 dB geeft $2^{(90-40)/10} = 32$ sones.
Deze verhoging van de geluiddruk is daarmee een verdubbeling in sones, de luidheid.

Voorbeeld 2:
De verhoging zoals bij Urk van 40 naar 47 dB betekent dus, simpel rekenend met de waarden uit de definitie: $\Delta S = 2^{(47-40)/10} - 2^{(40-40)/10} = 2^{0,7} - 1 = 0,6\ [sone] = 0,6 \times 40 = 24\ [fone]$
24 fone bij een frequentie van 1000 Hz betekent een verhoging met 24 dB voor breedbandig geluid.
Evenzo bij 20 Hz een verhoging van 12 dB.
Meer dan een verdubbeling, dus. In feite een verviervoudiging.
Dit effect, deze vermenigvuldigingsfactor, is bekend in het publieke domein.

Het gebruik van sones geeft een verbetering van de waarneming van luidheid en de samenbundeling van spectraal niveau en een kental voor de beoordelingswaarde van breedbandig geluid.
Deze waarde is dan een goede maatstaf voor de menselijke geluidervaring.



De weging van geluid

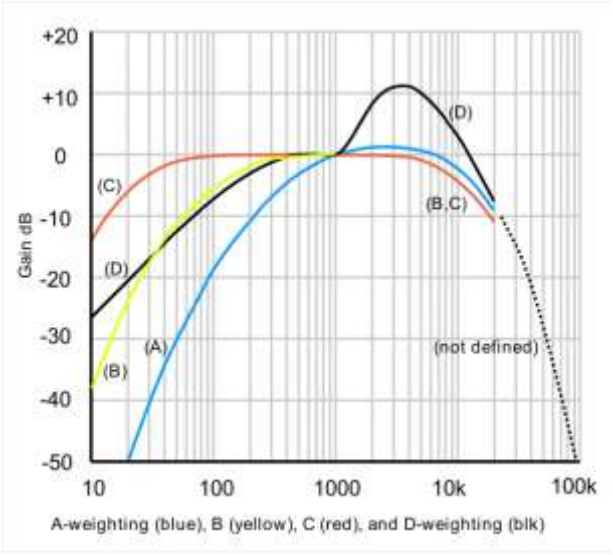
Rechts is een andere weergave van isofonen[48]. Deze is ongeveer dezelfde als de vorige, zij het dat bovendien de isofoon van 40 foon met rood is aangegeven.

Deze isofoon is bijzonder omdat die de basis is voor de A-weging. Bij 20 Hz ligt de gehoorgrens van 0 foon op ~ 72 dB. Dus stelt de A-weging dan dat de geluidsdruk bij 20 Hz verlaagd mag worden met 72

[48] Zie ook http://www.aist.go.jp/aist_e/latest_research/2003/20031114/20031114.html

Hz: de mens hoort die toch niet. De hierna volgende grafiek geeft aan dat dit dan ca 50 dB bedragen zal.

In de vorige paragraaf is al aangehaald dat isofonen de luidheid, als te ervaren door de mens, weergeven. De onderste lijn, de streeplijn geeft de gehoordrempel aan, zodanig dat bij 0 dB alleen bij de frequentie van 2 tot 3 kHz er nog iets te horen valt.



A-weighting (blue), B (yellow), C (red), and D-weighting (blk)

In de geluiddruk-presentaties, vooral van toepassing bij windturbines, valt op dat waarnemingen eerst boven 20 Hz zijn weergegeven en lagere zijn eigenlijk allemaal verwaarloosd. De grafiek hiernaast geeft die echter wel vanaf 10 Hz.

De eigenschappen van het menselijk oor dempen geluid. Om dit numeriek te maken, zijn filters gedefinieerd:

- A-filter: benadert de van 40 foon isofoon. En nu de grafiek hiervoor: bij 20 Hz ligt de gehoorgrens van 0 foon op ~ 72 dB. De A-weging stelt dus dat de geluidsdruk bij 20 Hz verlaagd mag worden met 72 Hz: de mens hoort die toch niet. Om dit te bepalen zijn vele metingen gedaan die tot deze grafische voorstelling leidden.
- B-filter (gele lijn): de 70 foon isofoon.
- C-filter: de 100 foon isofoon.
- D-filter: is gedefinieerd voor hinder door de hogere frequenties, voornamelijk geïnitieerd voor het meten van de hinder van vliegtuiglawaai.

De A-weging – aangegeven als dB(A) –voor de lagere geluiddrukken en geeft daar een heel behoorlijk beeld van de demping[49] in het menselijke gehoor, let wel, voor de lagere geluidsniveaus, zoals bij de isofoon van 40 foon.
De B-weging – dB(B) – is eigenlijk niet meer in gebruik alhoewel die een beter beeld geeft van het middenniveau van de geluiddruk.
De C-weging – dB(C) – is voor de hoge geluiddrukken vanaf 100 foon de aangewezen maat onder meer voor geluidspieken.

De G-weging is bedoeld voor het meten van infrageluid: frequenties tussen lager dan 20 Hz en valt buiten bovenstaande grafiek. Een G-curve (of –filter) geeft de resultaten van frequenties weer tussen 1 en 20 Hz. De gehoordrempel voor zuivere tonen ligt in de G-weging in de ordegrootte van 95 tot 100 dB, zie ook de luidheidgrafiek van blad 13.

Een G-gewogen geluidsniveau onder 85 of 90 dB is eigenlijk voor mensen niet hoorbaar.
Gebruikelijk in NL is het toepassen van de A-weging op het geluidsniveau en laat volgens het Nederlandse voorschrift de laagste frequenties buiten beschouwing (evenals de hoogste).

Middenfrequentie octaafband (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

Het beschouwen van uitsluitend het A-gewogen niveau vanuit dit voorschrift, laat een substantieel deel van het totale volume geluid buiten beschouwing. Bij de door Møller et al[50] onderzochte

[49] Zie ook: http://www.acoustic-glossary.co.uk/frequency-weighting.htm, citaat: Low frequency noise, which disturbs many people, is also suppressed by A weighted meters. Currently thousands of wind turbines being built in rural areas are highlighting this low frequency anomaly.

[50] Møller, H., & Pedersen, C. S. (2011). Low-frequency noise from large wind turbines. Acoustical Society of America. Journal, 129(6), 3727-3744. 10.1121/1.3543957

windturbines zit een flink deel van het opgewekte geluid bij de lagere frequenties: de één derde octaafband met het hoogste geluidsniveau zit op of onder de 250 Hz. Buiten iedere twijfel is daarmee dat het laagfrequente deel van het geluidspectrum een belangrijke rol speelt in de herrie bij de buren.

Het niveau van het geluid binnenshuis op korte afstanden vanaf de turbine, hangt van de turbine zelf af en toont tussen turbines van het zelfde type onderling ook verschillen, hangt af van de geluidsisolatie van het huis en de positie van de meting in de kamer. Een gewogen geluiddruk niveau van 44 dB (het maximum in Denemarken) geeft al een risico van hinder op een flink deel van de bewoners als gevolg van het laagfrequent geluid, ook binnenshuis.

De Deense avond/nacht limiet voor windturbines van 20 dB in het A-gewogen geluidsniveau in het bereik van 10 - 160 Hz, samenhangend met industrieel geluid (maar niet met dat van windturbines), zal zeker het niveau binnenskamers overschrijden, die gevolg zijn van het niveau op de gevel van de 44 dB grens.

Om problemen zeker te vermijden, is het beste een geluidsniveau op de gevel van ca 35 dB aan te houden.
Daarmee zou bekend moeten zijn dat de veel gebruikte A-weging eigenlijk per definitie niet geschikt is voor dit geluidsvolume, maar de vertaalslag daarvan naar wet- en regelgeving ontbreekt tot nog toe.

Dat het menselijk oor bepaalde frequenties minder goed waarneemt, houdt zeker niet in dat er dan minder geluid aanwezig is: de mens hoort het eenvoudig niet.

Ontstaan van geluid in een turbine.

Het ontstaan van geluid is sterk afhankelijk van de bouw van de windturbine en de opbouw bestaat gebruikelijk uit een (te heien) fundatie, n daarboven op de mast met gondel en de rotor met wieken. In Nederland en België is de mast meest een gesloten stalen koker, en in Duitsland zie je ook wel vakwerkmasten, zoals bij de hoogspanningsmasten.

Alle onderdelen spelen hier een rol in de ontwikkeling en het onderhouden van het geluidspad. Het geluid begint bij de luchtstroming langs de wieken, die vervolgens de rotor in beweging brengen, met alle interne delen om een generator aan te drijven die zo goed mogelijk aan moet sluiten op het net. Destijds ging het om het aansluiten op een 50 of 60 Hz wisselstroomgenerator, maar tegenwoordig is dat een gelijkspanningsgenerator en vervalt die noodzaak.

De literatuur geeft twee effecten die bij windturbines voor drukwisseling zorgen: mechanisch geluid en het aero-akoestisch opgewekte geluid.
Ook de tipwervel kan een groot drukverschil kan opwekken.

De belangrijkste geluidsbronnen in de gondel en de mast zijn:

- Omstroming van wieken met de rotor
- Rem van de rotor als geheel
- Generator in de gondel (ook als dit een zgn direct-drive generator is)
- Gelijkstroom-wisselstroom omvormer
- Eventuele tandwiel-vertragingskast
- Het tornsysteem
- Hydrauliek
- koelsystemen

Dit begint bij het analyseren van de geluidsbron:

- Wat is de geluidsbron
- Hoe ligt het geluidspad.

De bron van het geluid is de beweging van de wieken als gevolg van de langsstromende wind. Met name de hoge snelheid van de wiektip doet veel kwaad en is het hoogte verschil tussen de wiektip in de bovenste stand en de wiektip in de onderste stand een bron van veel ellende, waarover later meer.

De literatuur geeft aan dat de afstroming van de lucht aan de achterzijde van het wiekprofiel, de trailing edge,een belangrijke geluidsbron is, zo niet de grootste.

Dus:

1. Lagere wiektipsnelheid (langzamer draaien van de rotor)
2. Wieken niet onder exact 120°, maar afwijkend onderling
3. Wieklengte: niet alle (drie) wieken dezelfde lengte
4. Elektronisch gestuurde en variërende wiek rotatie, dwz de rotor draait in wisselende toerentallen
5. Bij industriële windparken: onderzoek of per molen wisselende snelheden het effect kunnen verminderen
6. Isolatie van de gondel van de wiek: in het bijzonder de opstelling van de generator
7. Per deel van de rotatie aanpassen van de stand van de wiek om
    a. overtrek in het bovenste deel te voorkomen.
    b. Verticale stampbeweging van de gondel te verminderen
8. Luchtweerstand langs de mast verminderen (rotor verder van de mast af)
9. Verminderen van:
    a. aanstroming van de wiek
    b. afstroming van de wiek
    c. tipwervel meest met winglets (wellicht ook door grenslaagafzuiging)
10. Vortex-generators toepassen.

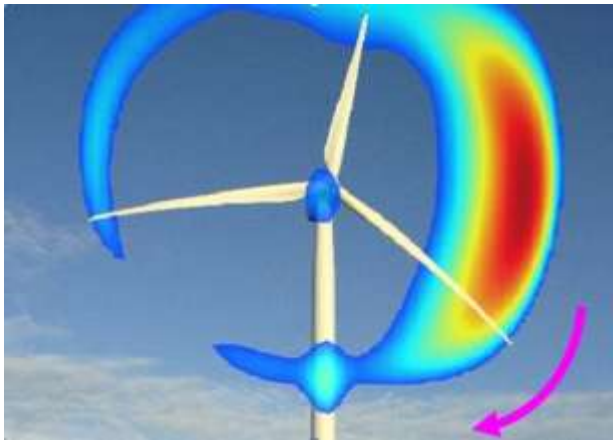
Van bovenstaande mogelijkheden is alleen punt 9 van belang en daar vindt het nodige onderzoek plaats. Een zogenaamde zaagtand aan de achterrand van de wiek, verbetert de afstroming van de lucht over de wiek en blijkt enige vermindering van het geluidsniveau met zich te brengen.

Aangaande punt 7, de overtrek eigenschappen van de wiek zijn belangrijk bij een vaste instelling en tegenwoordig geeft de pitch instelling (de hoek van aanstroming) als regelinstrument betere mogelijkheden en bovendien een belangrijke geluidsreductie.

Van de andere mogelijkheden is de uitvoering is nooit echt onderzocht en brengt tevens mogelijk te hoge kosten met zich.

Opwekking van geluid door de wieken.

Als bekend, is geluid een drukwisseling. De mens neemt dit waar door het horen en heeft daar een ingebouwde demping voor; de bekenden A, B of C weegfactor beschrijft dit fenomeen. Voor ieder levend wezen is die weegfactor anders.

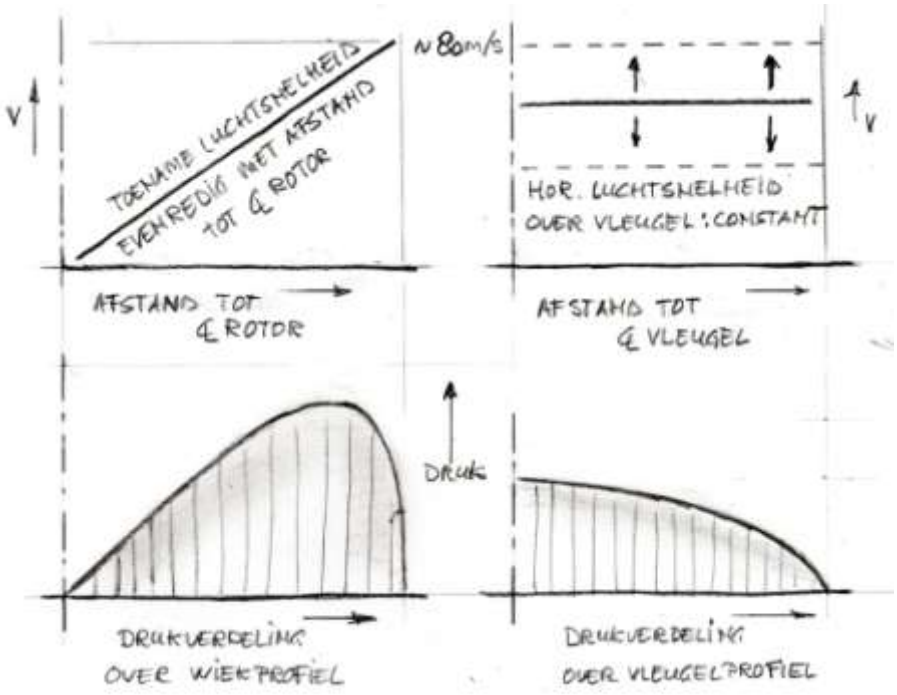


Mechanisch geluid ontstaat in de aandrijflijn van de windturbine, in de generator en de tandwielkast en aero-akoestisch geluid (geluiden die door de wieken worden geproduceerd in interactie met de lucht).
Aero-akoestisch geluid ontstaat zowel aan de voorzijde van een vleugelprofiel als aan de achterrand en de mate van turbulentie in de luchtstroming om de wieken bepaalt welke de dominante factor is en aan de uiteinden, maar vooral aan de achterrand van de wieken en is sterk afhankelijk van de snelheid waarmee de lucht over de wieken stroomt.

De drukverdeling over de lengte van de wiek is nooit constant.

In de figuur hieronder is links het snelheidsverloop geschetst van de lucht over een wiek en rechts dat over een vliegtuigvleugel. Voor de wiek is het verband lineair door de constante draaisnelheid van de rotor en bij het vliegtuig is die over de hele lengte dezelfde. De tipsnelheid van een wiek kan bij moderne windturbines zo'n 300 km/h zijn, in overtoeren situatie, het dubbele.

Aan zowel het begin als het einde van de wiek is de lift gelijk nul. De lift neemt met de snelheid over het vleugelprofiel toe en voor het eerste stuk is het redelijk dit als een lineaire deel te beschouwen. De grafiek linksonder, toont naar verwachting overeenkomst met de karakteristiek van een scheepsschroef.



De figuur hiervoor toont in rood de plaats in het rotorvlak, waar de grootste drukpiek ontstaat: het neergaande deel van de wiekrotatie geeft de hoogste druk en veroorzaakt een ritmisch, pulserend geluid.

Hier spelen twee effecten een rol: de dopplerversterking (de neergaande beweging brengt het geluid naar de waarnemer toe) en tevens de toename in windsnelheid bij toenemende hoogte, waardoor de windbelasting gedurende de gehele rondgang van de rotor niet dezelfde blijft. Deze amplitudemodulatie, deze regelmatige variatie in geluidssterkte, geeft geluid een zwiepend karakter en juist dit geluid is een belangrijke oorzaak van hinder van omwonenden. Met name bij de avondinversie, als aan de grond de wind 's avonds wegvalt, zodat toename van de windsnelheid in hoogte versterkt, valt dit verschijnsel op.

Het vaak geciteerde RIVM-rapport[51] stelt ook dat amplitudemodulatie een variatie van ongeveer 5 dB op de gewone 'ruis' van de windturbine veroorzaakt. Het RIVM rapport noemt dit 'piekjes', maar per verhoging met 3 dB betekent dit een verdubbeling van het geluidsdruk. Metingen wezen uit dat drukvariaties in de ordegrootte van ongeveer 7dB zijn[52]. Het kan nog zijn dat het meetresultaat nog afhankelijk is van de plaats van meting.

Lee[53] onderzocht tijdens een luistertest de mate van hinder door amplitudemodulatie door het geluid van windturbines. De resultaten toonden een statistisch significant effect op hinder. Op basis van dit resultaat adviseert Lee dat naast de equivalente geluidsniveaus ook de amplitudefactor zou moeten worden meegenomen bij onderzoek.
De wettelijke geluidsmaten, L_{den} en L_{night}, houden geen rekening met deze variatie van ca 5 dB[54].

Tipwervels

Minder bekend is het fenomeen van de tipwervel.[55]
Een tipwervel, of vortex, onstaat als gevolg van het drukverschil onder en boven de vleugel van een vliegtuig, zoals het schetsje toont. Het einde van de vleugel is een druklek, een soort kortsluiting, tussen het vacuümdeel boven de vleugel en de overdruk onder de vleugel. `

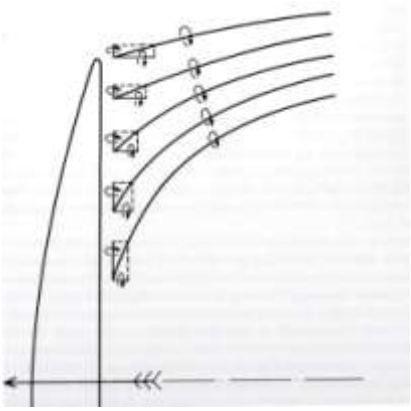


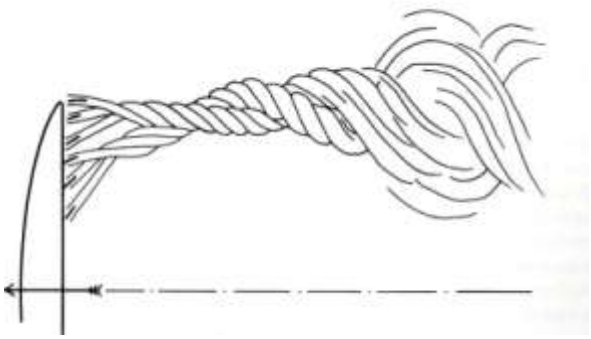
[51] zie §3.5 van het RIVM rapport 200000001/2013
[52] In Duitsland heeft het Beierse Hogere Regionale Hof vastgesteld meetwaarden van windturbinegeluid standaard met 3dB te verhogen. Hoger beroep bij het Duitse Federaal Hof van Justitie bevestigde dit.
[53] Lee, S., , S., K. Kim et al (2011) – Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise. Noise Control Engineering Journal 59(1): 38-46.
[54] RIVM rapport 200000001/2013, §3.4.2, blad 27
[55] Promotieonderzoek UT Stefan Oerlemans

De opstaande stukken aan de vleugeluiteinden, de winglets, verhinderen gedeeltelijk het vormen van het druklek, waardoor de tipwervel kan ontstaan. Sommige bronnen stellen zelfs dat deze winglets hetzelfde effect hebben als het enigszins verlengen van de vleugel.
Bij de grotere windturbines komen deze vormstukken ook voor, zij het dat de rotatie een middelpuntvliedende kracht opwekt, die buiging veroorzaakt en zo de afmeting zeer beperkt.

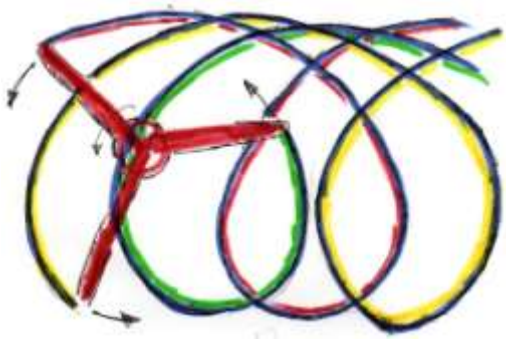
De rotatiebeweging in de lucht, de tipwervel dus, ontstaat over de gehele lengte van de vleugel.
De twee schetsen hieronder[56] geven aan dat deze wervels over de hele vleugel ontstaan en samenkomen aan het eind van de vleugel en zo een zich concentrerende wervel vormen met een as in de lengterichting van het vliegtuig.

Deze wervels zijn erg stabiel, vrijwel recht en kunnen zeer lang zijn: achter een jumbojet kan deze wervel wel 10 km lang zijn en dusdanig veel energie dragen dat lichte vliegtuigen rollen en feitelijk onbestuurbaar blijken te zijn.





Vogels wekken deze wervels ook op en met name uilen hebben aan het uiteinde van de vleugels bijzondere veren die deze wervels zodanig dempen dat zij vrijwel geluidloos kunnen vliegen.
Deze wervels ontstaan ook bij zeilschepen rondom de top van de mast; rookproeven toonden ze en laten snelheden zien in die wervel van ± 4 m/s[57], gemeten is 15 m/s[58]; andere schrijvers noemen enige honderden km/u.
De wervels van deze zog-turbulentie, of wake-tubulence, hebben een vrijwel gesloten karakter en zijn zeer stabiel. Helikopters hebben van deze zog-turbulentie ook last, en zijn als gevolg daarvan luid en duidelijk hoorbaar.
Het verschil met een gewoon vliegtuig is de lineaire toename van de luchtsnelheid over de lengte van de wiek. Bij windturbines is dit beeld eender.
V oor zowel de windturbine als de helikopter geldt dat dit een schroefvormige wervel oplevert, waarin





hoge snelheden kunnen optreden. In beide gevallen geldt dat deze schroefvormige wervel een

[56] Frederic W. Lanchaster, Aerodynamics, Vol I; 1907
[57] Zie:Aero-Hydrodynamics of sailing; C.A. Marchaj, 2nd edition
[58] Improving BEM-based Aerodynamic Models in Wind Turbine Design Codes Proefschrift TUD – Tonio Sant – ISBN 978-99932-0-483-1

periodieke drukverhoging opwekt, een pulsvormige drukverhoging die een waarnemer als klappen kan ervaren.

Bij de windturbine treedt bij iedere omwenteling van de rotor drie keer op: bij iedere wiekpassage; op dit punt is er geen verschil met de herrie van een helicopter alleen die verdwijnt na een korte poos.

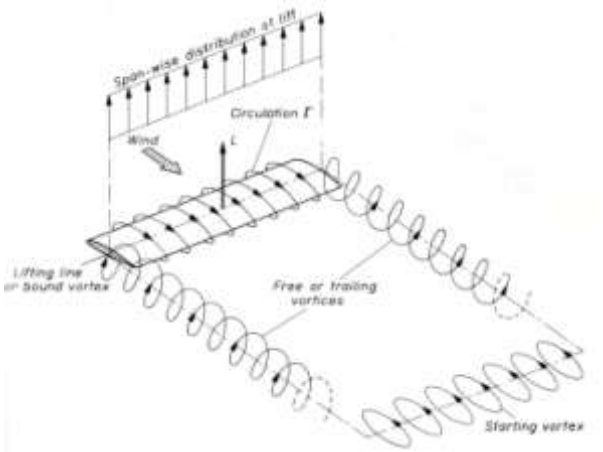
De schets links geeft schetsmatig weer hoe zo'n wervel in de tijd vorm krijgt.
De foto rechts is in Denemarken gemaakt en toont de rondlopende drukpiek, die in deze (instabiele) meteorologische omstandigheden juist leidt tot het vormen van wolken en het rondlopende karakter van de drukpiek toont.

Let ook op de lengte van deze schroefvormige wervel: die is heel veel meer dan 20 × tiphoogte en verrassend genoeg is de uitdemping van de wervel niet bijzonder groot.

Tot nog toe is het effect van de tipwervel niet geheel duidelijk voor windturbines, anders dan een oud onderzoek aan de TUD.
Wel is duidelijk dat de tipwervels meer energie gaan dragen naarmate het te installeren vermogen, en daarmee de wieklengte, toeneemt.

In de scheepvaart, zowel bij het schroefontwerp als bij de zeilvoering van zeilschepen, vaart, zijn tipwervels zeer bekend en wordt daar gebruik van gemaakt.
Als in het water de snelheid van de schroef hoog genoeg wordt, kan de onderdruk vacuüm opwekken en zo een bellenpatroon vormen rondom de schroef: cavitatie.
Deze cavitatie op het schroefblad kan grote schade veroorzaken, maar kan ook een hulp zijn[59]

Voor een vlakke, eindige vliegtuigvleugel geeft simulatie van de wervelvorming door magnetische fluxlijnen een goed beeld[60].
De figuur hiernaast toont het beeld voor een 2-dimensionale vliegtuigvleugel, waar lift en luchtsnelheid gelijkmatig verdeeld zijn over het profiel.
De circulatie Γ is een functie van de luchtsnelheid V_0, de koorde c van het profiel en de hoek van inval α:



$$\Gamma = f(V_0 \star c \star \alpha\ )\ m^2/s$$

De tipwervel, die zich eigenlijk langs het hele profiel ontwikkelt, wordt in dit magnetische equivalente beeld vooronderstelt zich alleen aan de uiteinden van het profiel te ontwikkelen. Een wervel kan niet „in de lucht hangen"; een wervel eindigt tegen een eindplaat, of een of andere harde wand, maar of zal anders een gesloten kring vormen, zoals te zien is, wanneer iemand met een sigaar kringetjes blaast[61].

Het geheel van de rotaties moet nul zijn. De aan de vleugel gebonden wervel, zet zich voort in de vrije wervels, of trailing vortices,, en het sluiten van de kring wekt wat men de startwervel of starting vortex, noemt, op.

De energie van de wervel kan niet zomaar veranderen: een gebonden wervel, de wervel die om het profiel heen loopt, blijft in de orde grootte dezelfde, zodra die overgaat in een vrije wervel. Dat betekent dus ook dat de tipwervel wat circulatie aangaat, ook in grootte evenredig is met de aan het profiel gebonden wervel, beschreven in het theorema van Helmholtz.

[59] http://www.swzonline.nl/system/files/archive//194810.pdf – Schip en werf – 1948 – uitgave no 18; dr.ir. W.P.A. van Lammeren
[60] Zie: C.A. Marchaj, Aero-Hydrodynamics of Sailing; 2nd edition, chapter 2
[61] Theorema van Helmholtz – gepubliceerd in 1858; Prandtl en Lanchester bouwden hier verder op voort

Omdat ook lucht enige viscositeit inhoudt, zullen ook de vrije wervels, de trailing vortices, uiteindelijk uitdempen, maar zijn eerst over grote afstanden stabiel, zoals ook de foto hiervoor toont.

De opstelling van windturbines

In het dichtbevolkte Nederland (en ook België) is het lastig om voldoende plaats te vinden voor grootschalige windparken.
Het vinden van een goede plaats zonder al te zeer problemen met de omwonenden, vraagt zeer veel moeite, inlevingsvermogen en wijsheid om te kunnen voldoen aan de twee belangrijkste eisen:

- Voldoende plaats voor het gevraagde te installeren vermogen[62]
- Voldoende ver van bewoonde panden om overlast van geluid en/of slagschaduw en wervels te voorkomen.

De plaats van de opstelling van een windturbine met een geïnstalleerd vermogen is belangrijk voor de opbrengst van energie: een turbine die op zee 10 GWh oplevert, levert met een ruwe schatting aan de kust ca 4 GWh en evenzo in het binnenland, Drenthe bijvoorbeeld, ca 2 GWh.

Invloed op de opgenomen energie

De opgenomen energie is het omzetten van de kinetische energie die in de stromende lucht aanwezig is. Deze is rechtstreeks afhankelijk van de grootte van het rotoroppervlak en ligt in de orde grootte van 500 tot 800 kWh/m² en per jaar.
De alles bepalende factor voor de opgenomen hoeveelheid windvermogen is de belasting per jaar, of het aantal uren per jaar dat de turbine maximaal belast is, ook bekend als de productiefactor.

Neem aan dat grofweg een windjaar bestaat uit 2.500 uur[63], dan levert iedere m² gemiddeld per jaar:

$$\frac{500\ kWuur/m^2}{2500\ uur} = 0{,}2\ kW/m^2$$

Rekening houdend met de hoogste waarde, 800 kWu/m², dan is de opbrengst 0,32 kWu/m², of als de eenheid h voor het uur gebruikt wordt: 0,32 kWh/m².

Een turbine met wieken van 55 m lengte, heeft een rotoroppervlak van

$$\pi \cdot r^2 = \pi \cdot 55^2 = 9.503\ m^2$$

Dit levert voor de hoogste belastingswaarde zo een potentiële opbrengst van het vermogen P:

$$9.500\ m^2 \times ca\ 0{,}3\ kW/m^2 = 3.040\ kW\ of\ 3{,}0\ MW$$

Een redelijk te verwachten maximale vermogensopbrengst[i] is bij deze afmetingen en productiefactor is 3 MW[64][65]. Dit te installeren vermogen kent een productiefactor van 28% bij 2500 uur. Op land is die opbrengst meestal minder en in de orde grootte van hooguit 2,5 MW[66]; op zee ligt de verwachting hoger, en zou zo'n 30% kunnen zijn.

Dezelfde berekening vanuit het Handboek Risicozonering toont:

$$P = \frac{(Ø\ Rotor)^2}{{C_1}^2} = \left(\frac{110}{2}\right)^2 = 3.025\ kW\ of\ 3{,}0\ MW$$

De constante C_1 met de waarde 2,0 geldt voor IEC-1 condities. Bij IEC-2 condities geldt: C_1 = 2,2.
Deze benadering geeft langs een andere methode dezelfde uitkomst.

---

[62] Merkwaardig is de eis van de NL overheid: een inspanningsverplichting, maar geen resultaatverplichting
[63] https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/windenergie-op-land/techniek/opbrengst: max 2200 uur/jaar, of prod. factor = 2200/8760 = 25%; minder windrijke locaties bijv. Drenthe is het maximum 1800 uur per jaar; 2500 uur productie/jaar geeft productiefactor 28%
[64] Zie ook Handboek Risicozonering, bijlage B-7, figuur 1, voor IEC-1 condities
[65] Bijvoorbeeld Vestas V112 3.0 MW, Ø rotor 112 m, wieklengte 54,6 m, fabriek: 3.3 MW bij 9852 m² geeft 0,33 kW/m².
[66] Dit zou de maximale waarde kunnen zijn per windturbine voor het windpark Nij Hiddum Houw, maar daar ligt de voorbereiding met een wieklengte van 55 m op een vermogen van 4 MW.

De ashoogte van de rotor speelt een belangrijke rol. In Duitsland zien we veel hoge masten met turbines waarvan de rotordoorsnede ca 50% is van de ashoogte, terwijl in NL zien we vaak dat de rotordoorsnede ongeveer zo groot is als de ashoogte; groter komt ook vaak voor.
Een beperkende factor is de materiaalsterkte: dit leidt voor deze wieken met een gewicht van ca 70 80 ton, tot maximale wieklengtes van ca 75 - 80 m.
De maximale tipsnelheid ligt meest in de ordegrootte van 300 km/u.
Eén van de veiligheden is de overtoerenbeperking: het dubbele van het nominale toerental, dat met een tipsnelheid van ca 600 km/u al dicht de geluidsnelheid nadert.

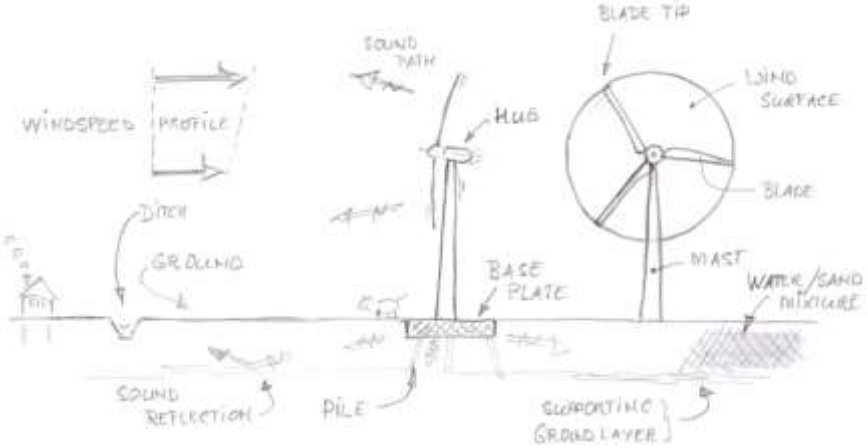
De wijze van opstellen van groepen windturbines heeft zeker gevolgen voor de gewonnen energie productie.
Logisch en te verwachten is dat een windturbine in een enkelvoudige opstelling vrije toegang heeft tot de energie die wind met zich brengt. Staat er een tweede turbine aan lijzijde, dan neemt de hoeveelheid vrije energie af. Om die reden zetten projectontwikkelaars turbines vaak zo ver mogelijk uit elkaar, maar dat heeft weer als nadeel dat het grondbeslag toeneemt en daarmee de verdienste van de turbine-eigenaar(s) per m² grondoppervlak ook. Deze opstelling laat bij 3 MW turbines (dwz Ø 110 m rotor voor IEC-1 omstandigheid) een opgesteld vermogen toe van 6 turbines of 18 MW per km², of 180 kW per ha.

De onderlinge afstand is dan 437 m (factor = $\pi/(2\sqrt{3})$), wanneer we rekening houden met een opstelling als in gelijkmatig verdeelde cilinders.
In dit geval is de afstand bijna 4 keer de rotordoorsnede; voor ontwerpdoeleinden is het gebruik deze factor meest te nemen als 3 tot 5 × de rotordoorsnede. Naderhand zal een gedetailleerde berekening dit moeten nalopen, waarbij de RVO[67] een afstand van 6 × de rotordoorsnede aangeeft.
Voor omstandigheden in windarmere gebieden, neemt de rotordoorsnede toe tot ruim 60 m voor het opbrengen van dit vermogen, dus ~ 3,3 × de rotordoorsnede.

Zeer veel zal afhangen van de oppervlakte waar de turbines zich bevinden: een meer of zee geeft weinig verstoring van toestromende lucht, terwijl landopstellingen, zeker bij, tussen of om een bosrijke omgeving, aanzienlijke turbulentie veroorzaakt.

Het geluidspad

De weg van geluidsbron naar waarnemer is niet altijd de kortste weg; het is wel de eenvoudigste aanname voor het meten van het geluid, waarover later.
In de onderstaande schets zijn geluidspaden aangegeven, die de turbine als geheel, zelf ontwikkelt.



De gondel te zamen met het samenstel van rotor en generator, vormt de geluidsbron. De wieken genereren het geluid door de stroming van de lucht, de generator zet de roterende beweging om in elektriciteit en iedere deel van de overbrenging heeft daarin een bijdrage.

[67] https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/windenergie-op-land/techniek/opbrengst

Het geluidspad kan velerlei zijn: het kan door de lucht gaan, vanuit de actie = reactie gaat het even groot de mast in, en vervolgens de fundatie. En de fundatie straalt het geluid weer af op zijn omgeving.
Grond kan zelf ook geluid doorleiden: hoe massiever de grond en/of hoe natter de grond, hoe beter die geluid doorleidt.

Het onderbreken van het geluidspad is een nog onvoldoende uitgenutte mogelijkheid van geluidsreductie. Recent bleek dat componenten in een windturbine nauwelijks voldoende geïsoleerd opgesteld zijn. Aandacht voor juist dit deel van de constructie helpt beslist.

De weg waarlangs geluid zijn weg vindt, hangt af van:

- Onderbreken van geluidspad op geschikte plaatsen
- Vermijden van valse omleiding van geluidspad
- opbouw van de mast
- isolatie aan de binnenzijde
- isolatie van de fundatiepalen
- voorkomen van resonantie: met name grote plaatvelden zijn berucht
- voorkomen van doorleiden van trillingen, waaronder geluid, naar of van componenten en tevens de fundaties ervan
- Isolatie onder opstelling van
    - Generator
    - Omvormers
    - componenten, bijvoorbeeld van de hydrauliek
    - Voedingsbekabeling
- Soepel aangrijpen van de rotorrem

Bij het windpark in Houten ontstaan grotere geluidsvolumes bij 150 en 495 Hz. Deze blijkbaar constant aanwezige frequentiepieken produceren een goed hoorbare monotone dreun. Het wijst duidelijk naar een niet, of slecht, opgestelde component. Het kan overigens van alles zijn: van een generator tot een hydrauliek installatie; nadere analyse wees naar een bron in de aandrijflijn van de Vestas-turbine.

Geluid heeft een drager nodig: bijvoorbeeld lucht. Geluid loopt niet door het luchtledige, door vacuüm: daar is niks te bewegen, dus geluid vindt daar geen pad om langs te gaan. Geluid loopt ook door een vaste stof, bij een stethoscoop bijvoorbeeld en ook door een vloeistof.
Geluid heeft ook snelheid. In lucht is de geluidsnelheid ongeveer 1200 km/u, meest bekend als 340 m/s. In water is dat ca 1500 m/s, in ijs en steen ongeveer 3300 m/s en in ijzer 5000 m/s of 18.000 km/u.

Deze drukverandering loopt gebruikelijk door lucht, maar kan ook door vaste stoffen lopen: de stethoscoop is daar een voorbeeld van.
Zeedieren hebben zonder uitzondering gevoeligheid voor trillingen, zij het dat ze niet allemaal echt horen en geluid waarnemen, maar geluid is ook een trilling. En die wordt waargenomen.

De maximale opbrengst van een windturbine

De energieopbrengst is per definitie het verschil in (kinetische) energie voor en na de passage van het rotorvlak. De potentiële energie speelt in dit geval geen, althans verwaarloosbare, rol.
De technische ontwikkeling is er op gericht uit iedere m² zoveel mogelijk energie te halen. Alle energie er uit te halen, is zelfs theoretisch onmogelijk: Albert Betz heeft dit aangetoond. Vanzelfsprekend hangt de opgenomen energie voor een belangrijk deel af van de windsnelheid en van de vormgeving van de wieken, de technologie in de gondel en ook het onderhoud van de turbine.
Het theoretische aspect van de vermogensopname staat in deze paragraaf centraal.

De benadering uit 1919 van Albert Betz[68], bekend als Wet van Betz[69], toont hoeveel kracht en daarmee vermogen een rotorschijf van een windturbine, dan wel kan opnemen.

De Wet van Bernoulli[70], geeft het verband met de windsnelheid in een controle oppervlak (CO) voor de rotor, in het rotorvlak en daarachter: energie kan niet spontaan ontstaan of verdwijnen.

De belangrijkste grootheden zijn:

- *h* = hoogte tov een willekeurig horizontaal referentievlak
- *v* = stroomsnelheid
- *A* = oppervlak ⊥ stroomsnelheid [m²]
- ϕ = volumedebiet (stromende massa) van hoeveelheid fluïdum stromend gedurende Δt door een controle oppervlak [m³/s] (is dus doorstroomde oppervlak × snelheid)
- *V* = volume van stromende fluïdum door het CO gedurende Δt
- *ρ* = fluïdum dichtheid (constante waarde) [m/s³]
- *p* = druk
- *Δt* = tijdsinterval (eindig en kort)
- g = zwaartekracht

In formule is de wet van Bernoulli, de continuïteitsvergelijking:

$$druk \times oppervlak \times luchtsnelheid \times \Delta t + potentiële\ energie + kinetische\ energie = constant$$

of:

$$p \cdot A \cdot v \cdot \Delta\, t + m \cdot g \cdot h + ½ \cdot m \cdot v^2 = constant$$

De term $A \cdot v \cdot \Delta\, t$ is niets anders dan het volume V, dat gedurende een tijd Δt door een oppervlak A stroomt. Het product $A \cdot v$ is het volumedebiet ϕ, het volume dat in een tijd Δt een gebied in- of uitstroomt.
De hoeveelheid massa, langs de stroomlijnen, blijft constant per tijdseenheid.
De massa is ook het product van volume en dichtheid en blijft constant langs een stroomlijn:

$$\begin{aligned} m &= V_{in} \cdot \rho = V_r \cdot \rho = V_{uit} \cdot \rho \\ &= \phi_{in} \cdot \rho \cdot \Delta t = \phi_r \cdot \rho \cdot \Delta t = \phi_{uit} \cdot \rho \cdot \Delta t \end{aligned}$$

Omwerken leidt tot:

$$p + \rho g h + ½ \rho g^2 = constant$$

In woorden: de som van statische druk + de drukhoogte + de dynamische druk verandert niet.

De energiebalans kent de algemene vorm:

$$\begin{aligned} &p_{in} \cdot \phi_{in} \cdot \Delta\, t + \rho \cdot \phi_{in} \cdot \Delta\, t \cdot g \cdot h_{in} + ½ \cdot \rho \cdot \phi_{in} \cdot \Delta\, t \cdot {v_{in}}^2 \\ &= p_{uit} \cdot \phi_{uit} \cdot \Delta\, t + \rho \cdot \phi_{uit} \cdot \Delta\, t \cdot g \cdot h_{uit} + ½ \cdot \rho \cdot \phi_{uit} \cdot \Delta\, t \cdot {v_{uit}}^2 + F_r \cdot v_r \cdot \Delta\, t \end{aligned}$$

In de onderhavige situatie is de druk nagenoeg een constante, zodat een verschil in hoogte verwaarloosbaar klein is. Voorts is bij een gewone luchtstroom er geen inhoudelijke verandering van de energie: energie gaat niet verloren en ontstaat niet.

In deze te vereenvoudigen opstelling geldt, omdat de druk in de beschouwde omgeving nagenoeg constant blijft en tevens dat geen vermogen spontaan ontstaat of verdwijnt:

$$h_{in} = h_{uit}\ en\ tevens: p_{in} = p_{uit}$$

De per tijdseenheid opgenomen hoeveelheid energie in het rotorvlak is te schrijven als:

$$\begin{aligned} F_r \cdot v_r \cdot \Delta\, t &= ½ \cdot \rho \cdot \phi_{in} \cdot \Delta\, t \cdot {v_{in}}^2 - ½ \cdot \rho \cdot \phi_{uit} \cdot \Delta\, t \cdot {v_{uit}}^2 \\ &= ½ \cdot \rho \cdot \phi_{in} \cdot \Delta\, t \cdot ({v_{in}}^2 - {v_{uit}}^2) \end{aligned}$$

Een bewegende luchtstroom bezit kinetische energie: de bekende formule is:

$$E = ½ m \vec{v}^2$$

[68] Albert Betz, een Duitse natuurkundige, stelde in 1919 vast dat een windturbine nooit meer dan 59,3% van de kinetische windenergie, stromend door een rotorvlak, kan opnemen, zie: A. Betz, (1966) Introduction to the theory of Flow Machines, Oxford: Pergamon Press
[69] Zie ook: M. Ragheb: Wind energy conversion theory, the Betz equation – 10-2-2017
[70] Ook bekend als de eerste hoofdwet van de thermodynamica.

Het vermogen dat een windturbine kan afnemen, de energie per tijdseenheid is gedefinieerd als:

$$P = \frac{dE}{dt}$$

Differentiëren van E naar t geeft:

$$\begin{aligned} P = \frac{dE}{dt} &= \frac{d(½m\vec{v}^2)}{dt} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{dm}{dt} \cdot \vec{v}^2 + 2m \cdot \frac{d(\vec{v})}{dt} \right) \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot \vec{v}^2 = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot \vec{v}^2 \end{aligned}$$

De snelheid $\vec{v}$ is een vector-grootheid: deze heeft een richting en grootte langs de stroomlijnen. Voor deze beschouwing is voldoende deze constant te nemen over het gehele oppervlak en nemen aan dat $\vec{v} \equiv v$, maar varieert in grootte langs de stroomlijn.

Ter plaatse van de rotor is de snelheid v_r.

Uitgaand van een stationair, onsamendrukbaar en homogeen stromingsveld[71], geldt dat het massadebiet in het controle oppervlak van de rotor zowel voor, in als na het rotoroppervlak hetzelfde blijft.

Er geldt:

$$\begin{aligned} \dot{m} = \frac{dm}{dt} &= A_{rotor} \cdot v_r \cdot \rho \\ &= \phi_{in} \cdot \rho \\ &= \phi_{uit} \cdot \rho = \ constant \end{aligned}$$

Invullen in de beschouwing over het opgenomen vermogen geeft:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot {v_r}^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot A_{rotor} \cdot \rho \cdot v_r \cdot {v_r}^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot A_{rotor} \cdot \rho \cdot {v_r}^3 \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \rho \cdot {v_r}^3 \end{aligned}$$

waarin D de doorsnede van de rotor is.

Het zo opgewekte vermogen ontstaat door het opnemen van de kracht door de rotor van de turbine, of het onttrekken van impuls aan de lucht, in formule:

$$F_r = verandering\ van\ impuls\colon \frac{d}{dt}\ (m \cdot \vec{v})$$

Uitgaand van een homogeen volumedebiet en een gelijkmatige snelheidsverdeling, dan is:

$$\begin{aligned} m &= \rho \cdot \phi_r = \rho \cdot \phi \\ \vec{v} &= v_{in} - v_{uit} \end{aligned}$$

Invullen levert:

$$\begin{aligned} F_r &= \frac{d}{dt}(m \cdot \vec{v}) \\ &= \frac{dm}{dt} \cdot \vec{v} + m \cdot \frac{dv}{dt} \\ &= \dot{m} \cdot \vec{v} + m \cdot (v_{in} - v_{uit}), waarbij\ \dot{m} = 0, en\ dus\colon \\ &= \rho \cdot \phi \cdot (v_{in} - v_{uit}) \end{aligned}$$

Voor het opgenomen vermogen in het rotorvlak geldt:

[71] De aanname van een stationaire en stroming met een homogene snelheidsverdeling) is niet geheel juist: turbulentie rondom de mast, invloeden van gondel en mast zijn verwaarloosd, evenals de samendrukbaarheid van lucht en tevens is ook de omgevingsdruk constant verondersteld.

$$P = F_r \cdot v_r \cdot \Delta\, t = \rho \cdot \phi \cdot (v_{in} - v_{uit}) \cdot v_r \cdot \Delta\, t$$

Er zijn twee bijzondere gevallen: $v_{uit} = 0$, ofwel alle energie, al het vermogen, blijft in het rotoroppervlak van de windturbine achter, met als gevolg dat het volumedebiet achter het rotoroppervlak, nul wordt en dus maximaal opvult.
Het tweede uiterste geeft $v_{uit}=v_{in}$, waardoor de opgenomen hoeveelheid energie gelijk nul is.
Het eerste geval is fysisch onmogelijk en in het tweede geval is er geen rotor.

Het maximaal op te nemen vermogen is, de maximale energie is het verschil in kinetische energie ½ ṁ v², ΔE, voor en na de rotorschijf is de in de rotor opgenomen hoeveelheid energie, het vermogen van de turbineschijf, in algemene termen geeft dit:

$$\frac{dE}{dt} = ½\, m v_r^2$$
$$= \frac{1}{2}\, m \cdot ({v_{in}}^2 - {v_{uit}}^2)$$

de massa m van de doorlopende hoeveelheid lucht door hete controleoppervlak van de rotorschijf, is het product van de fluïditeit ϕ en de snelheid ter plaatse van het rotorblad:

$$m = \rho \cdot \phi \cdot v_r$$

Aan elkaar gelijkstellen levert:

$$½ \cdot \rho \cdot \phi_{in} \cdot \Delta\, t \cdot ({v_{in}}^2 - {v_{uit}}^2) = \rho \cdot \phi_{uit} \cdot (v_{in} - v_{uit}) \cdot v_r \cdot \Delta\, t$$

En met: $\phi_{in} = \phi_{uit}$
geeft dit voor de luchtsnelheid ter plaatse van het rotoroppervlak:

$$v_r = \frac{v_{in} + v_{uit}}{2}$$

Tot ieders verrassing levert dit het rekenkundig gemiddelde van de snelheden op.

Invullen in de vergelijking voor het vermogen ΔE, de energie per tijdseenheid:

$$\Delta E = ½\, \dot{m} \times ({v_{in}}^2 - {v_{uit}}^2) = ¼ \cdot\ A \cdot \rho \cdot (v_{in} + v_{uit}) \cdot ({v_{in}}^2 - {v_{uit}}^2)$$

Uitwerken:

$$\Delta E = ¼ \cdot A \cdot \rho \cdot ({v_{in}}^3 - v_{in} \cdot {v_{uit}}^2 + {v_{in}}^2 \cdot v_{uit} - {v_{uit}}^3)$$

De beschouwing over het maximaal opneembare windvermogen geeft met de verhouding $\frac{v_{uit}}{v_{in}}$ de opstelling:

$$\Delta E = ¼ \cdot A \cdot \rho \cdot {v_{in}}^3 \cdot \left(1 - \frac{{v_{uit}}^2}{{v_{in}}^2} + \frac{v_{uit}}{v_{in}} - \frac{{v_{uit}}^3}{{v_{in}}^3}\right)$$

of:

$$\Delta E = ¼ \cdot A \cdot \rho \cdot {v_{in}}^3 \cdot \left(1 - \left(\frac{v_{uit}}{v_{in}}\right)^2 + \frac{v_{uit}}{v_{in}} - \left(\frac{v_{uit}}{v_{in}}\right)^3\right)$$

Differentiëren van ΔE naar $\frac{v_{uit}}{v_{in}}$ geeft aan wanneer de verhouding van de snelheden het maximum voor de vermogensopname in de rotorschijf ontstaat levert voor de grote tussen de grote haken (de rest vormt feitelijk een constante):

$$P = \frac{\Delta E}{dt} = constante \times \left(0 - 2 \cdot \left(\frac{v_{uit}}{v_{in}}\right)^1 + 1 - 3 \cdot \left(\frac{v_{uit}}{v_{in}}\right)^2\right)$$
$$= constante \times \left(1 + 2\left(\frac{v_{uit}}{v_{in}}\right) - 3\left(\frac{v_{uit}}{v_{in}}\right)^2\right)$$

Dit geeft 2 waarden voor de gezochte verhouding, waarvan de negatieve waarde niet voldoet:

$$\frac{2 \pm \sqrt{2^2 + 4 \times 3}}{2} = \frac{2 \pm \sqrt{16}}{2} = +3\ of\ -1$$

zodat:

$$\frac{v_{uit}}{v_{in}} = \frac{1}{3}$$

Invullen in de vergelijking voor ΔE, het opgenomen vermogen in de rotorschijf, levert zo:

$$P = \frac{dE}{dt} = \Delta E = ¼ \cdot A \cdot \rho \cdot {v_{in}}^3 \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \frac{1}{3} - \left(\frac{1}{3}\right)^3\right)$$
$$= ¼ \cdot A \cdot \rho \cdot {v_{in}}^3 \cdot \left(1 - \frac{1}{9} + \frac{1}{3} - \frac{1}{27}\right)$$
$$= ¼ \cdot A \cdot \rho \cdot {v_{in}}^3 \cdot \frac{32}{27} = ½ \cdot A \cdot \rho \cdot {v_{in}}^3 \cdot \frac{16}{27}$$
$$= ½ \cdot A \cdot \rho \cdot {v_{in}}^3 \cdot 0{,}59259 \ \left[{watt}/{m^2}\right]$$

Maximaal kan een ideale rotorschijf van aangeboden windvermogen 16/27 deel, of maximaal 59,3 % opnemen, dus onder ideale omstandigheden met een homogene snelheidsverdeling en zonder invloeden van mast, en gondel.

Let wel, dit is geen rendementsberekening: het is de maximale hoeveelheid energie die een stromend medium af kan geven.

De formule:

$$P = \Delta E = ½ \dot{m} \times ({v_{in}}^2 - {v_{uit}}^2) = ¼ \cdot \ A \cdot \rho \cdot (v_{in} + v_{uit}) \cdot ({v_{in}}^2 - {v_{uit}}^2)$$

In de verhouding $\frac{v_{uit}}{v_{in}}$ schrijven levert:

$$P = ¼ \cdot \ A \cdot \rho \cdot {v_{in}}^3 \cdot \left(1 + \frac{v_{uit}}{v_{in}}\right)\left(1 - \left(\frac{v_{uit}}{v_{in}}\right)^2\right)$$

Het aangeboden windvermogen is:

$$W = ½ \cdot \ A \cdot \rho \cdot {v_{in}}^3 \ [W]$$

Invullen geeft voor het maximum haalbaar windvermogen:

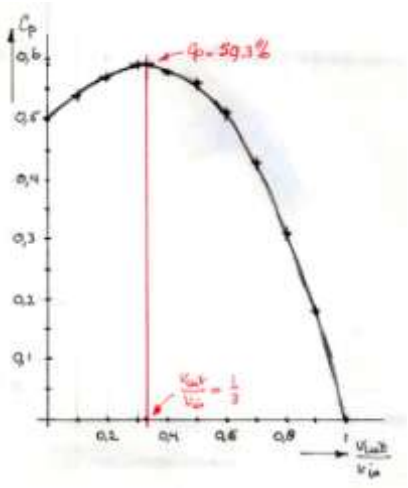
$$P_{max} = 0{,}2909 \cdot {D_{rotor}}^2 \cdot {v_{in}}^3 \ [W]$$

Gebruikelijk is voor de verhouding van P/W de dimensieloze term C_p de power-coëfficiënt, ook wel de Betz – coëfficiënt genoemd, te gebruiken:

$$C_p = \frac{P}{W} = ½ \cdot \left(1 + \frac{v_{uit}}{v_{in}}\right)\left(1 - \left(\frac{v_{uit}}{v_{in}}\right)^2\right)$$

Stel nu: $v_{uit} = v_{in}$, dan is de rechter term = 0: de rotor neemt geen energie op en C_p=0,5. Het andere geval, $v_{uit} = 0$, dan is $C_p = 0$.

Als reeds berekend: het maximum voor C_p =0,5926, bij de verhouding $\frac{v_{uit}}{v_{in}} = \frac{1}{3}$, zie de grafiek.



In de praktijk is het halen van een C_p waarde van 0,4 of 40 % al een goede prestatie, gelet op invloeden van mast, gondel en andere kleine verstoringen.

Het bepalen van het maximale vermogen voor een turbine met ashoogte 100 m, rotordoorsnede 110 m en in windklasse 1 levert bij een gemiddelde windsnelheid van 10 m/s resultaat:

$$P_{max} = 0{,}2909 \cdot 110^2 \cdot 10^3/10^6 \ [MW]$$
$$= 3{,}52 \ [MW]$$

Dit resultaat is het theoretisch maximaal haalbare, enigszins vergelijkbaar met het Carnot-rendement uit de fysica.
In de praktijk blijkt ~65% van deze waarde haalbaar als maximale waarde.

Normering van het geluid in Europa

„Vanuit de Europese regelgeving wordt in Nederland bij geluid van weg-, rail- en vliegverkeer het over de dag, avond en nacht gemiddelde geluidniveau berekend, inclusief de toeslagen. Het resultaat is het L_{den}: het

gemiddelde geluidniveau over day, evening en night, inclusief een toeslag van 5 dB voor de avond en 10 dB voor de nacht"[72].

De afstraling van geluid naar de waarnemer begint van uit het rotorvlak en hangt in beginsel af van het vermogen van de windturbine. De afstand tot de waarnemer is de eerste belangrijke parameter voor de hoeveelheid geluid bij de waarnemer. Atmosferische omstandigheden dempen het geluid langs het geluidspad in belangrijke mate, zij het dat het geluidspad merkwaardige en onverwachte effecten op kan leveren.
De krachten tijdens het werken van de windturbine volgen zeker ook het axioma *actie is reactie*.
Dat betekent ook dat het geluid zowel door de lucht kan gaan, als ook de grond in als gevolg van de reactiekrachten vanuit het pad: wiekengondelmastfundatie.

De eerste logische, en eenvoudigste, keuze voor het bepalen van minimale afstand van waarnemer tot windturbine is de hoogte van turbine. Zo was tot 2011 in Nederland de eis minimaal 4 × de ashoogte de te hanteren afstandsmaat.

Belangrijk in de beperking is de toelaatbare hoeveelheid geluid. Om die reden is het beter te zoeken naar de meting van het geluid en is deze regeling ontstaan voor weg-, rail- en vliegverkeer. Echter voor pulserende geluidsbronnen als windturbines, is de regeling volgens de EU-richtlijn[73] niet bedoeld geweest. In deze richtlijn is de geluidsbelasting gedefinieerd als een gemiddelde over een etmaal.

Nederland is het enige land in Europese Unie die deze geluidsnormen zo hanteert. Het middelen van de geluidsdruk over de dag, avond en nacht, geldt bij windturbines niet per dag, zoals hierboven gesteld, maar over een heel jaar.

Nederlandse en Deense geluidsnormen windturbines

Nederland	
- 47 dB Lden (jaargemiddeld) - 41 dB Lnight (jaargemiddeld) *[≈ 43 - 45 dB(A) bij 8 m/s op 10 m hoogte]*	
Denemarken	
In woongebieden: • 37 dB(A) bij 6 m/s* • 39 dB(A) bij 8 m/s*	Nabij woningen in het buitengebied: • 42 dB(A) bij 6 m/s* • 44 dB(A) bij 8 m/s*
En sinds 1 januari 2012 in Denemarken	
Laagfrequent geluid in woningen in woongebieden: • 20 dB bij 6 m/s* • 20 dB bij 8 m/s*	Laagfrequent geluid in woningen in het buitengebied: • 20 dB bij 6 m/s* • 20 dB bij 8 m/s*
** Windsnelheid op 10 m hoogte*	

Alleen al daarmee zijn In Nederland dit de ruimst geldende geluidsnormen binnen Europa[74].

In de tabel hierboven[75] zijn verschillen aangegeven voor de eisen die aan het maximale geluid worden gesteld. In dit tabelletje zijn de afstanden waarop turbines dan mogen staan, niet vermeld.

Onderstaande tabel geeft een globale vergelijking van de toelaatbare afstanden.

Toelaatbare afstand	Solitaire turbine	Windparken > 5 turbines
Nederland	200 m	400 m
Vlaanderen	300 m	875 m
Wallonië	425 m	800 m
Duitsland	400 m	> 900 m
Denemarken	325 m	1050 m

Dit geeft aan dat de Nederlandse regelgeving de kleinste afstanden tussen bewoonde panden en windturbines toelaat en tegelijkertijd de hoogste geluidsniveaus toelaat. Stel daarbij vast dat Nederland het dichtst bevolkte land van West Europa is.
Ook voor windturbines is Nederland ongeveer het dichtst bezette land van West-Europa.

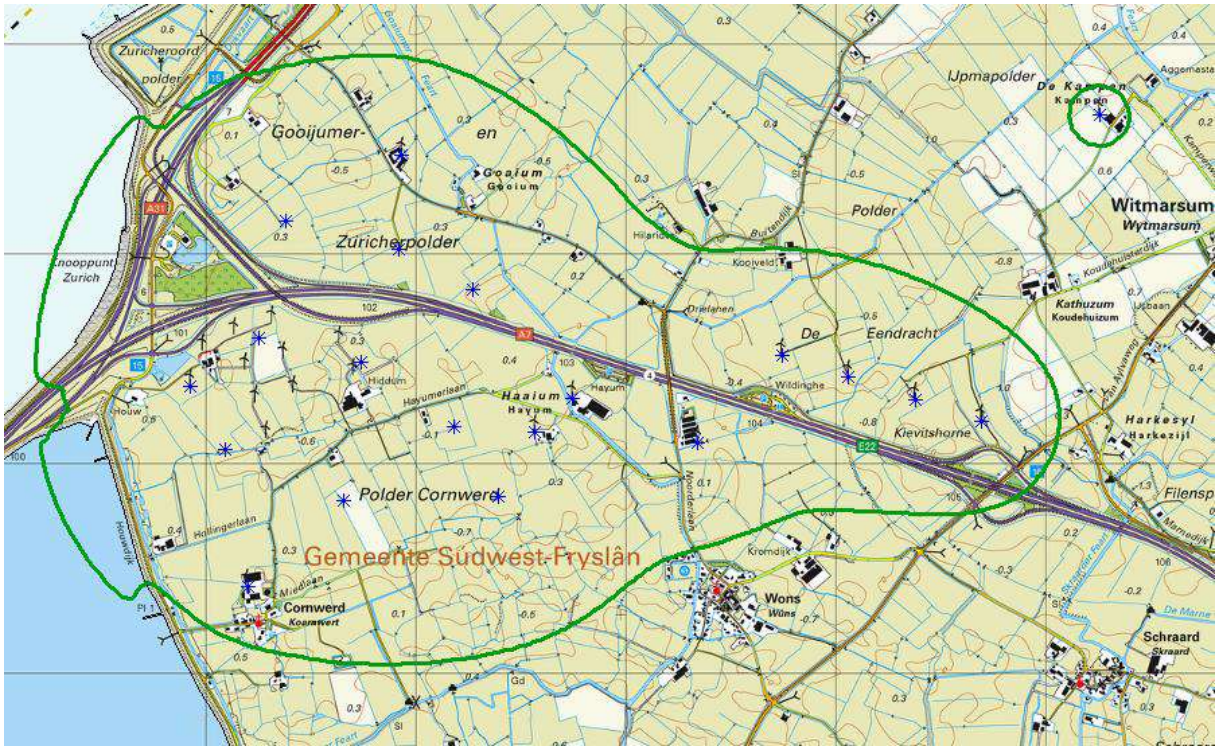
[72] RIVM rapport 200000001/2013, blad 24
[73] EU Richtlijn 2002/49/EG, inzake de evaluatie en beheersing van omgevingslawaai
[74] www.mp.nl/sites/all/files/publicaties/Nieuwenhuizen_Euronoise_2015.pdf
[75] Ir. H.D. Koppen, Arcadis, Deense wetgeving laagfrequent geluid windturbines; geluid nummer 2, 2013

Onderstaande tabel maakt dat duidelijk. Duitsland is het standaard voorbeeld hoe goed zij daar windturbines kunnen plaatsen, maar bedenk dat zij dan heel veel turbines in groepen kunnen zetten in landsdelen met een lage bevolkingsdichtheid.

land	oppervlak	Inwoners[76]	dichtheid bevolking	totaal opgesteld wind vermogen[77]	opgesteld vermogen per km²	opgesteld per inwoner	Gewogen opstelling / bevolkingsdichtheid
	km²	10^6 × aantal	inw/km²	MW	10^{-3} × MW/km²	10^{-6} × MW/inw	10^{-3} × inw × MW/km^4
EU: 28 leden	4.324.782	508,2	116,0	168.729	38,5	332,0	4,47
Nederland	41.526	17,1	411,4	4.341	104.5	254,1	43,01
Duitsland	357.021	80,6	225,7	56.123	157,2	696,5	35,49
Denemarken	43.094	5,6	130,1	5.476	127,1	976,8	16,53
België	32.545	11,5	353,1	2.843	87,4	247,4	30,84
Frankrijk	547.030	62,8	114,8	13.759	25,2	219.0	2,89
Spanje	504.782	49,0	96,8	23.170	45,8	473,3	4,43
Hongarije	93.024	9,9	105,9	329	3,5	33,4	0,37
Gem. SWF	842	0,1	106,5	329	390,9	3.670,3	41,64

Duitsland heeft nu, anno 2017, per km² 157 kW; Nederland heeft 104 kW/km².
Bovenstaande tabel geeft ook het opgestelde vermogen per inwoner en toont Duitsland met ruim 3 keer zoveel vermogen per inwoner, maar nemen we de bevolkingsdichtheid en de opstelling per km² in ogenschouw, dan toont de rechterkolom dat Nederland nu al ~ 50% meer doet dan Duitsland.

Voor de geplande 6.000 MW op land, groeit de waarde 43,01 tot 59,45, dus met 38%.
Denemarken is hèt voorbeeld van gebruik van windenergie, maar in de gewogen opstelling van windturbines is Nederland onbetwist de koploper.



In de plattegrond hierboven[78] is het windpark Nij Hiddum Houw met enig kunst en vliegwerk tussen de dorpen „ingepast". De groene lijn geeft de geluidscontour aan voor de Lden 47 dB(A). Dit geeft aan

[76] Bron: Wikipedia
[77] Bron: NWEA gegevens

hoe precies de geluidscontouren vanuit de fabrieksgegevens vorm moeten krijgen om toch nog aan de geluidseisen te kunnen voldoen.
In bovenstaand actuele voorbeeld past het juist eigenlijk niet meer, want een dorp als Cornwerd (linksonder) zit er vol in, en de contour gaat maar juist langs Wons (midden onder).
Vanuit de bevolking ontstaat daardoo een steeds feller verzet tegen plannen als deze, en daarom is een *second opinio*n geluidsonderzoek gevraagd door de omwonenden.

Op andere plaatsen, zoals de Veenkoloniën in Drenthe, is de situatie al niet beter, en soms schrijnender.

Overigens staan in Denemarken veel van de windturbines niet op land; voor de gemeente Súdwest Fryslân is de oppervlakte inclusief het IJsselmeer, met de daar te verwachten 89 windturbines.

[78] MER Hoofdrapport windpark Nij Hiddum Houw

Normering van geluidsmeting in Nederland

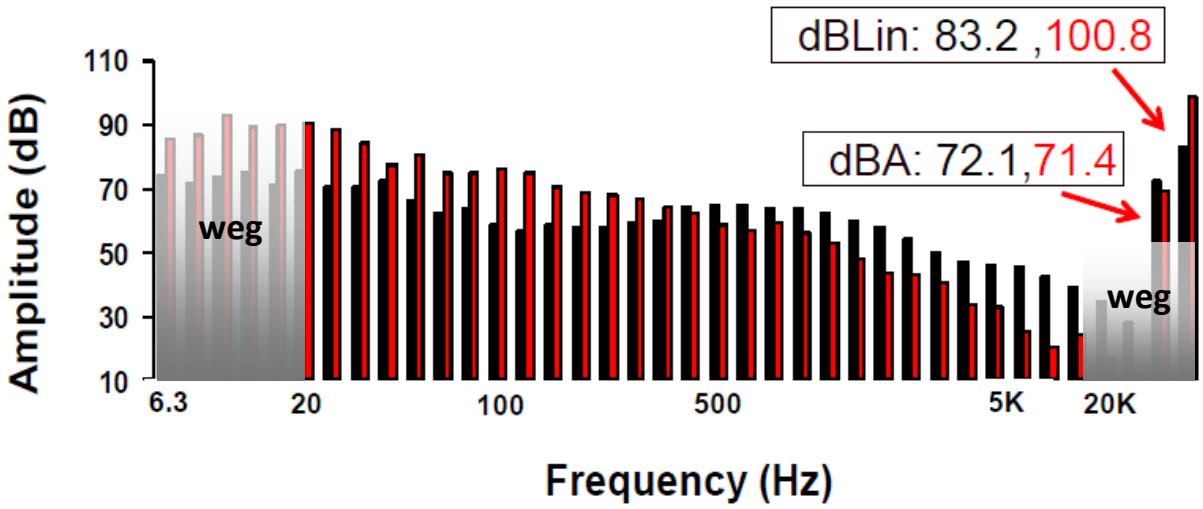
De Nederlandse staat kent nu een tweetal eisen: de L_{den}[79] mag overdag niet hoger zijn dan 47 dB(A) en 's nachts niet hoger dan 41 dB(A).

$$L_{den} = 10 \cdot {}^{10}\log \frac{12 \cdot 10^{\frac{Lday}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{Levening+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{Lnight+10}{10}}}{24} \quad [dB(A)]$$

Deze formule, het rekenvoorschrift, neemt in de teller de gemeten geluidsdruk gedurende 12 uur overdag,'s avonds 4 uur met een correctie van 5 dB en voor de nacht gedurende 8 uur met een correctie van 10 dB. Op deze manier is de L_{den} norm het logaritmisch gemiddelde van de dag-, avond- en nachtwaarde van het geproduceerde geluid, een soort 'energetische' middeling over de drie onderscheiden periodes van de dag: de dag, de avond en de nacht.

Middenfrequentie octaafband (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000

Deze formule, die de hoeveelheid geluid over de dag logaritmisch samenstelt, neemt alleen de gemeten waarden in de hierboven staander octaafbanden van 31,5 tot 8000 Hz.



In bovenstaande – op zich willekeurige - meetgrafiek is te zien hoe dit ingeperkte meten uitwerkt. De laagste frequenties spelen geen rol in de waarneming en dus ook niet in de beoordeling van het geluid. In het bijzonder dragen de laagste frequenties de meeste energie, waarbij de stelling is dat geluid dat de mens niet hoort, geen verstoring in het welbevinden van een individu kan geven, zie Richtlijn 2002/49/EG van 25 juni 2002[80].

Bovendien mag het bevoegd gezag ten behoeve van de handhaving, de gemeten waarden over een heel jaar middelen. Dat heeft weer tot gevolg dat overschrijding van de maximale waarde van zowel de 41 dB of de 47 dB, tot bijvoorbeeld 80 dB gewoon is toegestaan. In de praktijk leidt dit tot het berekenen van de „verbruikte" geluidsruimte aan het eind van het kalenderjaar, om de eventueel resterende ruimte maximaal uit te nutten.

[79] Lden staat voor L – geluidsniveau en de den staat voor day-evening-night

[80] Deze richtlijn dient onder andere een grondslag te bieden voor de verdere ontwikkeling en aanvulling van het bestaande geheel van communautaire maatregelen betreffende van de belangrijkste bronnen afkomstig geluid, in het bijzonder weg- en spoorwegvoertuigen en -infrastructuur, vliegtuigen, materieel voor gebruik buitenshuis en in de industrie en verplaatsbare machines, en voor de uitwerking van aanvullende maatregelen op korte, midden- en lange termijn.

De formule op zich ziet er redelijk uit, maar is bedoeld voor het beoordelen van geluid van wegen, industrie en treinverkeer, niet voor excessief hoge windturbines[81].

Twee rekenvoorbeelden

Stel dat op een bepaalde plaats gedurende precies één uur 20 seconden lang een geluidsniveau van 80 dB wordt gemeten. Gedurende 2,0 minuten wordt een geluid van 70 dB gemeten. De rest van de tijd is het rustig, zeg 45 dB. Hoe groot is het equivalente geluidsniveau ?

Dus over één uur is:

- gedurende 20 s is L = 80 dB,
- gedurende 120 s is L = 70 dB
- de rest van het uur (3460 s) is L = 45 dB.

Uit de definitie van geluidsintensiteit volgt dit:

$$E_{tot} = \sum (A \cdot I \cdot \Delta t) = A \cdot I \cdot (10^8 \cdot 20 + 10^7 + 10^{4,5} \cdot 3460)$$

Als je gedurende het hele uur een constant geluidsniveau Leq zou opvangen is de energie:

$$E_{tot} = A \cdot I_0 \cdot 10^{Leq/10} \cdot 3600$$

• Dus $A.I_o(10^8.20 + 10^7. 120 + 10^{4,5}. 3460) = A . I_o . 10^{Leq/10}. 3600$

• Dus $10^{Leq/10}. 3600 = (10^8.20 + 10^7. 120 + 10^{4,5}. 3460)$

$$Leq = 10.\log\left(\frac{10^8.20 + 10^7.120 + 10^{4,5}.3460}{3600}\right) = 59,6dB = 60\,dB$$

voorbeeld 2:

Gedurende één uur passeren er bij een bepaald meetpunt 10 vliegtuigen met 70 dB en 20 met 65 dB en de rest van de tijd is er 45 dB. Elke vliegtuigpassage duurt 15 seconden. Hoe groot is Leq?

$$Leq = 10.\log\left(\frac{10.15.10^{7} + 20.15.10^{6,5} + 3150.10^{4,5}}{3600}\right)$$

$$= 10.\log(1,5.10^{9} + 9,5.10^{8} + 1,0.10^{8}) - 10.\log(3600)$$

•Dus Leq = $10.\log(2,5.10^9) – 35,5 = 58$ dB.

Deze twee berekeningen tonen dat de toegelaten geluidsdruk aanzienlijk op kan lopen, wanneer het middelen over langere tijd plaats vindt. Hier is de middeling over slechts één uur, maar middeling over een jaar laat de waarden nog een stuk verder oplopen, terwijl metingen tonen dat het voorschrift voortdurend blijft voldoen aan de gestelde eisen.

Dit laat onverlet dat deze geluidspieken in het totaal van de geluidsruimte verdwijnen: ze vallen eenvoudig buiten het beoordelingsgebied.

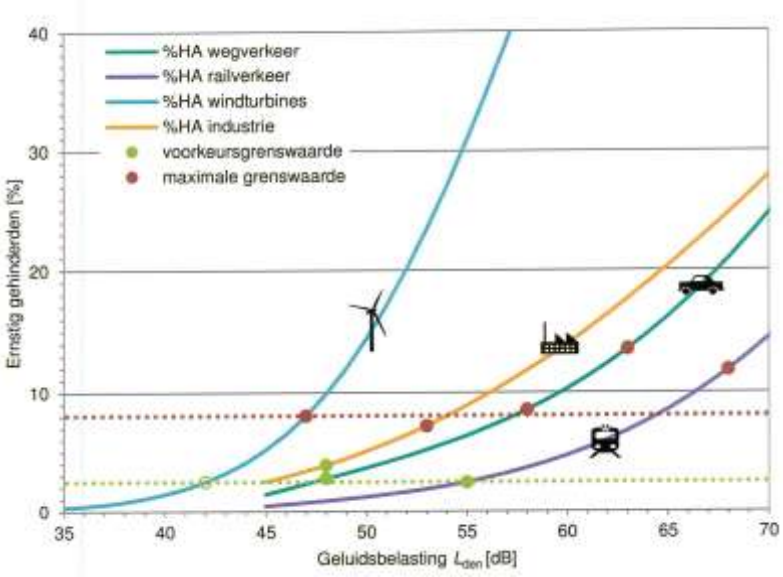
Op dit ogenblik is de Nederlandse geluidsnorm voor buitenopstelling van windturbines gebaseerd op een politieke keuze en het gerucht gaat dat de norm zo is opgesteld dat dit voor de kust van de Noordoostpolder de grootste turbines toelaat.

De norm zoals hierboven opgesteld, is geënt op de hinderbeleving voor industrie, autowegen en railverkeer, maar niet voor windturbines: het karakter van het typische sjoef-sjoef-sjoef geluid[82] van een windturbine is een ander dan dat van een passerende trein.
Of auto. Of vliegtuig.

[81] Richtlijn 2002/49/EU stelt dat naast het hanteren van deze formule het soms nuttig kan zijn naast L_{den} en L_{night} en eventueel L_{day} en $L_{evening}$ speciale geluidsindicatoren en bij behorende grenswaarden te gebruiken. Een in de Richtlijn genoemd voorbeeld is het impuls karakter van het geluid – zie punt 3 bijlage 1 in de Richtlijn. Sterker: de richtlijn stelt tot doel schadelijke gevolgen, hinder inbegrepen, van blootstelling aan omgevingslawaai te voorkomen of te verminderen (art 1)

[82] Een alternatieve waarneming als zjoefs zjoefs zjoefs is ook geldig

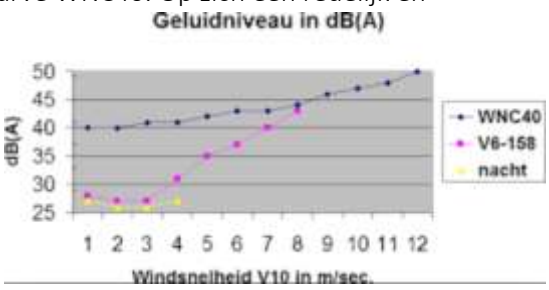
In de eerste en belangrijkste plaats is het geluid van een windmolen totaal anders van karakter dan het geluid van een weg. Het ieder bekend, dat een weg een continu-achtig soort geruis geeft en als er zo nu en dan een auto langs komt, dan zwelt dit geluid aan gedurende een aantal seconden en verdwijnt dan weer. Mensen ervaren dit ook zo: even wachten en het is weer weg. Bij trein en vliegtuig is die ervaring eender, maar bij een windmolen gaat het om het voortdurend herhalen en ervaren van de drukpiek. In het voorgaande is aangegeven dat juist dit eindloos en eindeloos herhalen mensen werkelijk over de rand kan duwen.



Het kan tot een (al eeuwenoude) vorm van marteling leiden: slaapt in een hotelkamer een hoorbaar snurkend persoon in een belendende kamer, dan is de nachtrust naar de vaantjes.
Alleen al om die reden is de L_{den} norm, die het geluid over een jaar middelt, niet juist.

Ook de Europese richtlijn[83] stelt dat naast het hanteren van de op zich correcte formule, dat juist voor installaties, die pulserende vorm van geluid[84] voortbrengen, geluidsindicatoren met bijbehorende grenswaarden nuttig bij kunnen dragen aan een correcte weging van L_{den} en L_{night} en eventueel ook aan L_{day} en $L_{evening}$.

Hier rechts staat nu die beroemde of beruchte windnormcurve WNC40. Op zich een redelijk en redelijk hanteerbaar verhaal maar doet (ook) geen recht aan de werkelijke situatie bij windmolens.



De werkelijke toestand is meer als in bijgaande figuur:

Duidelijk zichtbaar is het verschil tussen de werkelijke hoeveelheid geluid.

Nog aanvullen – zo niet goed

Normering van geluidsmeting in Denemarken

De Deense wetgeving stelt eisen aan de berekening van de toelaatbare geluidsdruk.
Dit voorschrift is gebaseerd op ISO 9613-2 en luidt:

$$L_p = L_{WA} - 20\ dB \cdot {}^{10}\log\left(\frac{d}{1\ m}\right) - 11\ dB - \alpha \cdot d + 1{,}5\ dB$$

Hierin is:

- L_p = vrije-veld geluidsdruk
- L_{WA} = $L_w + D_C$, de schijnbare geluidsdruk
- L_W = geluidsdruk
- D_C = richtingsfactor
- A_{atm} = demping door atmosferische omstandigheden, vastgesteld op 1,5 dB en vaste toevoeging in de berekening
- d = de schuine afstand tussen hart rotor en waarneempunt

[83] 2002/49/EU stelt dat naast het hanteren van deze formule het soms nuttig kan zijn naast L_{den} en L_{night} en eventueel L_{day} en $L_{evening}$ speciale geluidsindicatoren

[84] Zie Richtlijn 2002/49/EU, punt 3 bijlage 1: doel is schadelijke gevolgen, hinder inbegrepen, van blootstelling aan omgevingslawaai te voorkomen of te verminderen (art 1)

α = dempingsconstante

De tweede betreft het laagfrequent geluid: bij frequenties tussen 10 en 160 Hz is het maximaal toelaatbare geluidsniveau 20 dB.

De Deense richtlijnen geven speciaal aan dat de metingen in het geval van laagfrequent geluid binnenshuis, bij geopende vensters plaats moeten vinden, en in geval van klachten, daar waar de klagers aangeven dat gemeten zou moeten worden. Bovendien is het dan nodig de klagers uitgebreid te bevragen over de omstandigheden waaronder de maximale hinder optreedt.
Ter zijde diene dat ook in het Verenigd Koninkrijk dergelijke eisen gelden en dat daar het meten binnenshuis plaats vindt, naar keuze van de gehinderden met al dan niet gesloten of geopende vensters.

Het kan nog zijn dat het meetresultaat nog afhankelijk is van de plaats van meting en dan zijn we in Denemarken, waar ze het LFG binnenshuis meten, met een maximum van 20 dB(A), en ook nog afhankelijk van de plaats van meting binnenshuis.

Normering van geluidsmeting in Duitsland

Die gegevens zijn nog niet compleet, al heeft in november 2014 de Landesregierung van Bayern bepaald in afwijking van de norm vast te stellen dat de afstand tot woonbebouwing minimaal 10 maal de hoogte van de windturbine moet zijn. Dus bij een turbine van 200 m hoog, 2 kilometer.

Discussie

Het vaak geciteerde RIVM-rapport[85] stelt ook dat amplitudemodulatie een variatie van ongeveer 5 dB op de gewone 'ruis' van de windturbine veroorzaakt. Het RIVM rapport noemt dit 'piekjes', maar per verhoging met 3 dB betekent dit een verdubbeling van het geluidsdruk. Metingen wezen uit dat drukvariaties in de ordegrootte van ongeveer 7dB zijn (M+P - Edwin Nieuwenhuizen)
LPB|Sight meldt pieken van 3 dB, die ook naarmate de turbines groter worden, toe nemen.
In Duitsland heeft het Beierse Hogere Regionale Hof vastgesteld meetwaarden van windturbinegeluid standaard met 3dB te verhogen.

Neem je de Duitse beperking over, dan zit je op 44 dB, en dan nog zijn de pieken in de geluidsproducties niet benoemd.
De Denen stelden bovendien vast door metingen dat de geluidsproductie meer dan proportioneel toeneemt met de grootte van de turbine, en waarbij metingen aangeven dat bij de vermogenstoename van ca 0,5 tot 5 MW het geluid toeneemt met 5 dB. Zij stellen ook dat bij een maximale waarde van 35 dB, je over 't algemeen geen problemen hebt.
Dit stemt ook overeen met de waarden die Pedersen en Nielsen aangeven om een zodanige afstand tot turbines te kiezen dat de geluidsdruk beperkt is tot minder dan 33 - 38 dB. In Zweden geldt bijvoorbeeld voor de rustige gebieden een maximale waarde van 35 dB.
Voorts is van belang dat naarmate de turbine hoger wordt, het geluidspectrum naar lagere frequenties verschuift.

Meten van geluid

Gebruik van geluid

Dat is in de eerste plaats waarnemen van gevaar in de directe omgeving.
In onze tijd is dat niet (meer) het belangrijkste doel van het waarnemen, hierbij komt spraak, genieten van muziek en ook het contact met je omgeving, het (onmisbare) gesprek.

Bij Estec in Noordwijk is het toepassen van excessief geluid een middel om het lostrillen van onderdelen te testen en bij het vervormen van kunststof, en ook wel aluminium is geluid een middel

[85] zie §3.5 van het RIVM rapport 200000001/2013

om de inwendige spanningen zo te overschrijden dat materiaal plastisch wordt en een las ontstaat: ultrasoon lassen. In een aluminium kan een staande golf ontstaan, waardoor het materiaal verweekt. Nog een andere toepassing is het vernielen van hechting: ultrasoon reinigen (van brilglazen), of het verpompen van materiaal bij het produceren van kroketten. Ook kunnen trillingen brugvorming in silo's met poeder opheffen of in zanderige omgevingen een talud laten instorten.

Te meten componenten

Geluid is een vorm van druk, drukverandering eigenlijk.
Gewone, dwz constante, druk is voor mens en dier onhoorbaar, vergelijk de atmosfeer om ons heen, want die hoor je nooit. De drukverschillen in lucht en water, zijn zeker waarneembaar; of ze hoorbaar zijn, hangt af van de intensiteit.
Het trillen van luchtdeeltjes is de basis van de meting. Hoe harder een luchtdeeltje trilt, hoe meer ervaren wij dit als geluid, een toename van het geluidsvolume is dus een toename van de trillingen, de uitwijking of amplitude. Voor trillingen in water geldt hetzelfde.

Is de uitwijking te klein, dan horen we niks: de gehoordrempel is nog niet overschreven.
Is de uitwijking, de beweging, te heftig, dan is de pijngrens bereikt. We stellen dan dat de amplitude de maximale waarde overschrijdt, het is een vorm van amplitudemodulatie. Frequentie modulering leidt tot verschillende toonhoogtes.

Voor het numeriek maken van de meting staat de logaritmische verhouding van gehoorgrens tot de werkelijk ingestraalde hoeveelheid energie in het oppervlak. De tweede numerieke weergave gaat uit van de geluidsdruk in Pa. De eenheid van de verhouding van de W/m² is de dB en levert hetzelfde resultaat.

Gemeten wordt de geluiddruk P in Pa, omgevormd tot de logaritmische grootheid geluidsniveau L in dB, de decibel.
De mens ervaart echter de luidheid, uitgedrukt in sone. Om die reden worden er dempingsfactoren aan toegevoegd, die uiteindelijk het ervaringsbeeld vertekenen. De luidheid en het ontstaan van eventuele gehoorschade, verschilt tussen mens en dier.

Doel van geluidmeting.

Oorspronkelijk was het doel gericht op het voorkomen van gehoorschade, naderhand kwamen er door de toename van de kennis en ervaring in het gebruik van de apparatuur (meest van Bruell&Kjaer) meerdere mogelijkheden bij.

Gebruik van geluid is niet zomaar en overal vrijelijk toepasbaar: mens èn dier zijn er gevoelig voor, soms te gevoelig zoals de ervaring leert.

Vastleggen van de hoeveelheid geluid, van geluiddruk of –niveau in een numeriek getal is een goede basis om waarden vast te leggen en een vergelijk te maken met een vast te stellen norm.
Daarbij is het gebruik van de geluidmeting gericht op een af te spreken methodiek, die het draagvlak vindt in een wetenschappelijk te verantwoorden opzet.
Degene die het geluid presenteert, is meest geïnteresseerd in de indruk die de mens van geluid krijgt. Die interesse kan een technische, commerciële, medische of psychologische achtergrond hebben

Daarmee ontstaan een aantal doelen van geluidsmeting:

1. Het testen van akoestische eigenschappen van een ruimte of installatie
2. Onderzoek naar het geluidsniveau in woon- of werkruimte
3. Onderzoek naar de geluidwerende of geluiddempende eigenschappen van materialen in de bouw
4. Nagaan hoeveel lawaai een bepaald object voortbrengt, dat in samenhang met trillingsmeting aan het oppervlak met van het object zelf, bij een woning binnen en buiten de gevel, tot een goede beoordeling van de situatie kan leiden.

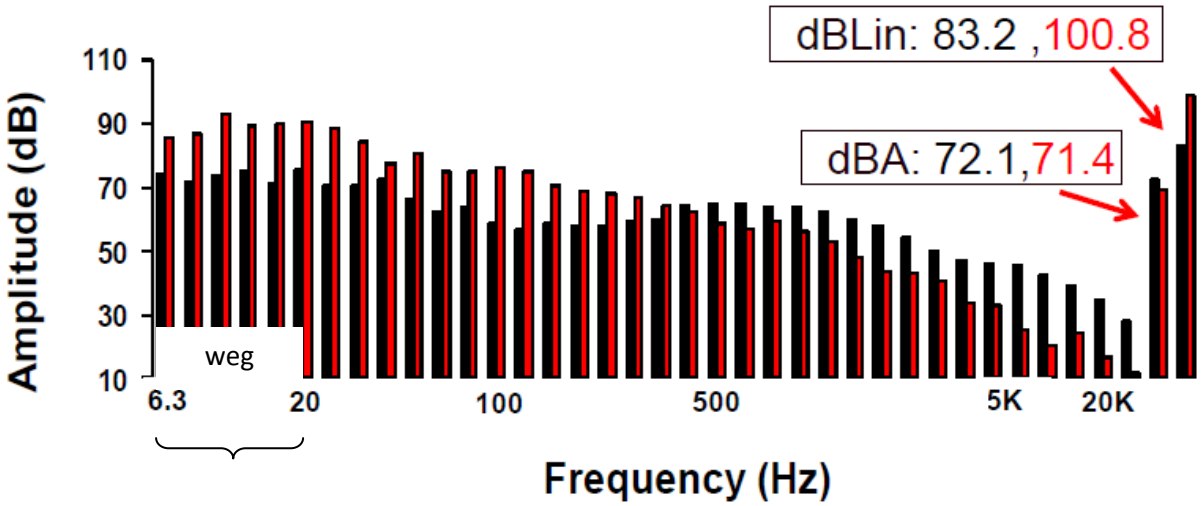
Juist de banden met de laagste frequentie bezitten de hoogste energie-inhoud, gerelateerd aan de verhouding van de intensiteiten in W/m². Juist waar die verhouding de pijngrens het eerst bereikt, eist de wetgeving dat die resultaten van die meting te dempen, zij het dat ze daarmee niet verdwijnen

Onderstaande, gemeten, frequentieverdeling meting toont de onderscheiden geluidsniveaux over de verschillende octaafbanden.
Deze meting is van geluidsniveau in een trein en in de stuurcabine van de trein.
Aan de rechterzijde van deze verdeling is het gemiddelde over **alle** frequentiebanden samen genomen: het lineaire gemiddelde: dBLin.

De mens hoort in meerdere opzichten, gebruikelijk slecht en in het bijzonder bij de lagere frequenties. Dus is dan de stelling: waar de mens ophoudt te horen, is geen geluidsdruk in Pa (N/m^2) of geluidsintensiteit in W/m^2 aanwezig. Onderzeebootbemanningen zullen een dergelijke stelling geheid niet overnemen: zij ondergaan met zo'n beleid een rechtstreekse kill.

Hierboven zijn verschillende wegingen, beoordelingen, van het horen opgegeven. Het menselijk gehoor lijkt een logaritmische karakteristiek te hebben, en gelet op het hoge bereik, een factor 10^{12}, ligt het logaritmisch weergeven van de hoorkarakteristiek voor de hand. Merk voorts op dat deze beoordelingen onder de frequentie van 20 Hz afwezig zijn: daar hoort de mens geen geluid.

De A-weging, het weglaten van de gemeten trillingen onder de 20 Hz (boven de accolade hieronder),

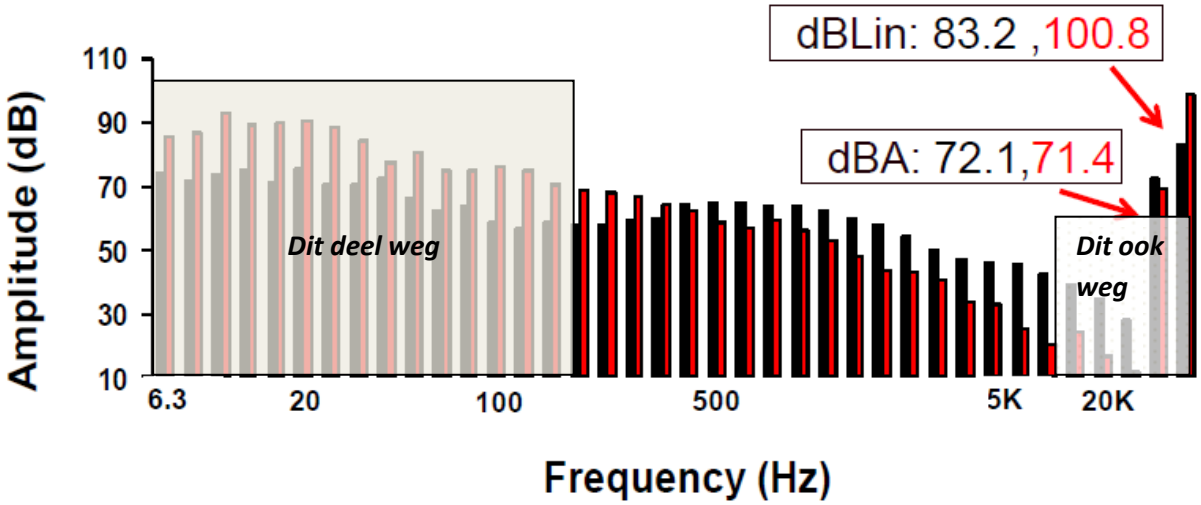


levert dus ook een lager geluidsniveau in dB op: het aangegeven gemiddelde in dB(A) van bovenstaande grafiek is al lager dan het lineaire resultaat in dBLin.

Om die reden is de waarneming van geluidsintensiteit niet voor alle frequenties overal dezelfde.
Het zij nogmaals gesteld dat dit niet betekent, dat geluid in de lage frequenties er niet is, door een onbegrepen fysisch feit plotseling demping ondergaat, of zomaar een lagere intensiteit bezit.
Wel geeft deze grafiek aan dat de mens – voor dieren gelden andere waarden – het beste trillingen in het oor kan waarnemen in de frequentie van zo'n 1.000 tot 5.000 Hz. Sommige schrijvers geven wat grotere marges aan (veel zien we 500 – 8000 Hz); grosso modo komt het hier wel op neer.

Nogmaals: ieder geluid is een trilling, maar is pas geluid, als het (gezonde) gehoor het waarneemt.

De reclamemakers kennen dit ook:
Mensen zijn het gevoeligst voor geluid met frequentie tussen 500 en 8.000 Hz. Voor marketing doeleinden zijn de frequenties daaronder en daarboven het minst geschikt. Door nu de lage frequenties, zeg onder de 200 Hz en boven de 10.000 Hz weg te laten, blijft de totale geluidsintensiteit



J in W/m² gelijk, maar neemt de geluidsdruk in Pa toe!
De gebruikelijke klacht is vervolgens dat de reclameboodschappen altijd zo luid zijn.
Dat is een correcte stelling.
Evenzeer is juist dat het totaal volume van de geluidsintensiteit beneden de afgesproken waarde blijft, door de minst hoorbare frequenties weg te nemen.

Duidelijk is dat reclamemakers met de regels in de hand toch meer volume aan hun boodschappen geven dan oorspronkelijk de bedoeling van de regelgeving geweest is.
De algemene klacht is dat contrair aan het gebruik van alleen die middenfrequenties, waardoor de einden nul zijn, nu alleen de frequenties in de meting betrokken worden, waarvan men vaststelt dat de mens die niet met zijn oren kan horen, die dieren wel degelijk waarnemen en dus voor de menselijke beleving geen rol mogen spelen.

Hierbij past nogmaals de opmerking dat het vaststellen van de gemiddelde geluidsintensiteit J over een periode T geldt voor de hele periode en alle frequenties, zie ook blad 8:

$$J = T^{-1} \int_0^T \left(\frac{(p_g)^2}{z} \right) dt = {p_{eff}}^2/_z \left[W/_{m^2} \right]$$

Het is wiskundig niet toegestaan om zomaar een deel van de frequenties weg te laten, als dat voor een politieke redenatie beter uitkomt.
Evenzo toont deze formule dat het oprekken van de tijdspanne naar een onrealistisch lange waarde als bijvoorbeeld een jaar, de geluidintensiteit naar de omgevingswaarde doet tenderen, met uitdemping van de pieken.

Bovenstaande grafieken komen overeen met frequentiespectra, zoals die ook uit metingen bij onze zuiderburen naar voren komen. In Australië zijn dergelijke metingen ook bekend.

Regelgeving voor de geluidsmeting

Een aantal methoden zijn voor het vastleggen en beoordelen van de hoeveelheid geluid gangbaar, waarbij de berekening en meting in de EU niet overal op dezelfde wijze in regelingen en wetten staan.

Afwijkend van de NEN-ISO, dat meting van het frequentiespectrum voorstaat als nauwkeurigste methode[86], gelden voor windturbines de absolute waarden.

[86] Zie www.arbokennisnet.net, dossier geluid, p22

Voor het controleren van gehoorbescherming is de octaafbandmethode de nauwkeurigste en onduidelijk is waarom hier die methode niet van toepassing is.

Bovendien eist de wetgever dat voor werknemers voldoende bescherming in industriële omstandigheden met waarnodig correcte aanpassingen, gelet op het recht op gezondheid.
Voor omwonenden van windturbines geldt dat niet: hun omgeving wordt naar een industriële omgeving omgevormd, zonder de wettelijke bescherming van werknemers: zij werken er niet, zij wonen er.

Berekening van de geluidsbelasting

De beste methode is niet erg transparant, is gebaseerd op de theoretische waarden die de turbine leveranciers opgeven.
Daarna zijn de statistische gegevens van de windsnelheden de maat voor de afstanden waarop de gestandaardiseerde geluidsbelasting (over)last veroorzaakt.

Een andere methode is de 'Miedemamethode', zie:
http://www.geluidnieuws.nl/2010/okt2010/cumul.html

In het kort houdt die in dat:

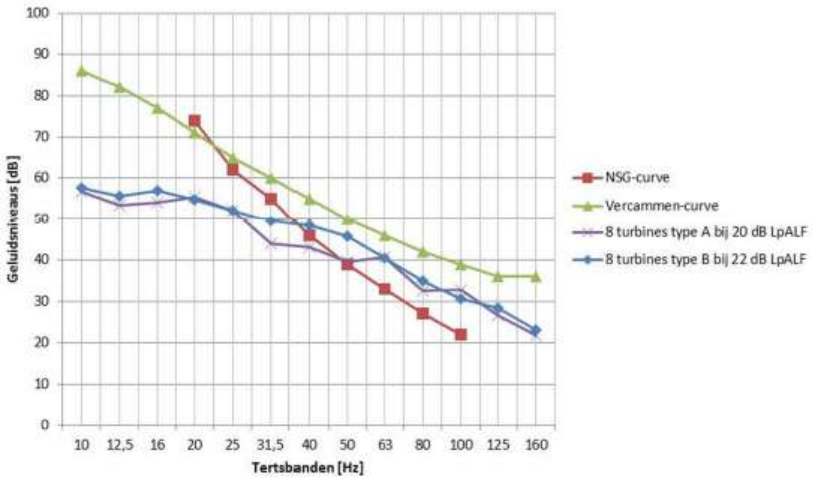
- deze de geluidsbelasting van de deelbronnen wordt (wel) gecorrigeerd conform artikel 110g Wet geluidhinder (wegverkeer)[87];
- de geluidsbelasting van de deelbronnen wordt hinderequivalent omgezet volgens de methode Miedema;
- de zo verkregen waarden worden opgeteld volgens de in de akoestiek gebruikelijke energetische sommatie;
- het aldus verkregen gecumuleerd niveau wordt niet gecorrigeerd conform artikel 110g Wet geluidhinder.

Nog toe te voegen:

NL voorschift van meten
Dk voorschrift van meten
D voorschrift van meten
B voorschrift van meten
Aflevering van energie
Produceren van geluid

Aanvullen van div paragrafen.

Enz



[87] art. 110g WGH: Onze Minister stelt regels op grond waarvan telkens voor een bepaalde periode, al naar gelang de geluidproductie van motorvoertuigen in de betrokken periode hoger ligt dan voor de toekomst redelijkerwijs is te verwachten, bij de berekening en meting van de geluidsbelasting van de gevel van woningen of van andere geluidsgevoelige gebouwen of aan de grens van geluidsgevoelige terreinen op het resultaat een door hem bepaalde aftrek van niet meer dan 5 dB wordt toegepast.

Invloed op geluid en geluidsbeleving

Van geluid kunnen mens en dier genieten, of zich er mateloos aan ergeren. Het genieten

Een enkel opgestelde windturbine fungeert in de productie van geluid als een puntbron.
Staan echter windturbines ineen lijnopstelling, dan vormt het geluid een vlak geluidsfront, zoals bij een golfgenerator in een stromingsbad.

Kortom:

Er moet nog een en ander aan toegevoegd, maar al vast met dank voor de belangstelling

Groet, Wouter

[i] https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/windenergie-op-land/techniek/opbrengst