

TONALITEIT EN IMPULSIVITEIT VAN WINDTURBINEGELUID

N.J.C.M. VAN DER BORG

**DIT RAPPORT IS GEPRESENTEERD OP DE 5e NATIONALE WINDENERGIE CONFERENTIE,
LUNTEREN, 21-22 FEBRUARI 1990.**

Tonaliteit en impulsiviteit van windturbinegeluid

N.J.C.M. van der Borg

SAMENVATTING

Geluidhinder vormt vaak een beperking bij de toepassing van windturbines. De mate van geluidhinder wordt bepaald door het geluidniveau en door het type geluid. Er wordt veel onderzoek verricht met als doel het verminderen van het geluidniveau van windturbines. Echter het belang van het type geluid moet niet onderschat worden: als het geluid een duidelijk hoorbaar tonaal of impulsachtig karakter heeft, dan is het toegestane geluidniveau 5 dB(A) lager dan in de situatie dat het geluid niet tonaal of impulsachtig is. De in Nederland algemeen gehanteerde handleiding voor het meten en rekenen aan industrielawaai geeft geen objectief criterium voor het al dan niet tonaal of impulsachtig zijn van geluid. In het voorliggende document worden criteria voorgesteld voor het beoordelen van tonaliteit en impulsiviteit. Uit metingen is gebleken dat windturbinegeluid vaak tonaal of impulsachtig is. Een aantal mogelijke oorzaken daarvan worden genoemd en toegelicht aan praktijkvoorbeelden. Tonaliteit blijkt in de praktijk meestal veroorzaakt te worden door de tandwielkast en in sommige gevallen ook door uitlijnfouten in de aandrijftrein. Ook komt het soms voor dat het aerodynamisch geluid tonaal is. Impulsiviteit kan veroorzaakt worden zowel door de bijdrage van het aerodynamisch geluid als door de bijdrage van het mechanisch geluid tot het totale windturbinegeluid.

1. INLEIDING

Wingturbinegeluid kan een belangrijke belemmering vormen in de realisatie van nieuwe windturbineprojecten. Tevens kan windturbinegeluid beperkingen opleggen aan de bedrijfstijd van bestaande windenergieprojecten. De belemmering doet zich voor als het door de windturbine(s) veroorzaakte geluidniveau op een bepaalde plaats de toegestane waarde overschrijdt. De toegestane waarde is afhankelijk van de plaats (landelijke omgeving, rustige woonwijk, woonwijk in de stad), van het moment (dag, avond, nacht) en van het type geluid (wel of niet tonaal en wel of niet impulsachtig). De in Nederland algemeen gehanteerde handleiding voor het meten en rekenen aan industrielawaai (ref. [1/]) geeft aan dat het toegestane geluidniveau voor geluid met een tonaal of impulsachtig karakter 5 dB(A) lager is dan het toegestane geluidniveau voor geluid zonder tonaal of impulsachtig karakter. Vertaald naar het toegestane aantal windturbines in een windpark betekent deze straftoeslag van 5 dB(A) dat een windpark ruim drie maal zoveel turbines mag bevatten zonder tonaal of impulsachtig geluid dan het toegestane aantal turbines met een dergelijk geluid. Hieruit blijkt dat het niet alleen van belang is om het door de windturbine(s) veroorzaakte geluidniveau zoveel mogelijk te beperken maar dat het ook van belang is om tonaliteit en impulsiviteit bij windturbinegeluid te voorkomen. Uit diverse metingen die in het kader van de certificatie door ECN uitgevoerd zijn aan verschillende windturbines, is gebleken dat tonaliteit en impulsiviteit bij windturbinegeluid in veel gevallen duidelijk hoorbaar is. De handleiding (ref /1/) geeft helaas geen eendui-

dig criterium voor het al dan niet tonaal zijn van geluid en ook niet voor het al dan niet impulsachtig zijn van geluid. In het hoofdstuk "Criteria" worden daarom objectief hanteerbare criteria voorgesteld. In het hoofdstuk "tonaliteit" worden mogelijke oorzaken van tonaliteit van windturbinegeluid besproken en zoveel mogelijk toegelicht aan de hand van praktijkvoorbeelden. In het hoofdstuk "Impulsiviteit" worden mogelijke oorzaken van impulsiviteit van windturbinegeluid besproken en ook dit wordt zoveel mogelijk toegelicht aan de hand van praktijkvoorbeelden. De door ECN gehanteerde procedure voor het uitvoeren van geluidmetingen aan windturbines is beschreven in ref [2].

2. CRITERIA

2.1. Impulsiviteit

Volgens de handleiding (ref [1]) is geluid impulsachtig als het bestaat uit een of meerdere geluidstoten die minder dan een seconde duren. De handleiding geeft bij deze definitie echter geen criterium voor het niveau van de geluidstoten. Er wordt in ref [1] wel een criterium met betrekking tot het geluidsniveau gegeven bij de definitie van continu geluid: continu geluid is geluid met een spreidingsbreedte kleiner dan ongeveer 6 dB(A). In het voorliggende document wordt daarom voorgesteld om de definitie van impulsachtig geluid uit te breiden tot: Impulsachtig geluid is geluid dat bestaat uit een of meerdere geluidstoten, die minder dan een seconde duren waarbij de variatie in geluidsniveau per geluidstoot 6 dB(A) of meer bedraagt.

2.2. Tonaliteit

Met betrekking tot tonaliteit wordt in ref [1] opgemerkt dat geluid een hoorbaar karakter kan bezitten maar dat er geen meettechnische definitie van gegeven kan worden. In het buitenland worden soms wel objectieve criteria gebruikt. Een voorbeeld daarvan is het criterium dat beschreven wordt in de Joint Nordic Method (ref [3]). Bij deze methode wordt enerzijds het geluidsniveau van de onderzochte toon (L_t) bepaald door een smalle band frequentie-analyse. Ander-

zijds wordt het geluidsniveau van een brede frequentieband rondom de frequentie van de onderzochte toon bepaald (L_n), waarbij de bijdrage van de toon zelf in mindering wordt gebracht. De breedte van deze brede frequentieband bedraagt 100 Hz voor toonfrequenties tot 500 Hz en voor hogere toonfrequenties bedraagt de breedte van de brede frequentieband 20% van de betreffende toonfrequentie. Het verschil ($L_t - L_n$) wordt vergeleken met een frequentie-afhankelijk criterium (de Limietcurve). Bij overschrijding wordt de straftoeslag van 5 dB(A) toegekend. Als de brede frequentieband meerdere tonen bevat, schrijft de methode voor dat de waarde van L_t bepaald wordt door de geluidsniveau's van de verschillende tonen in dezelfde brede frequentieband te sommeren. Hierbij moet de brede frequentieband zodanig in het spektrum geplaatst worden dat de band een zo groot mogelijk aantal tonen bevat. In het voorliggende document wordt voorgesteld om deze methode te hanteren.

3. TONALITEIT

3.1. Algemeen

Uit metingen aan diverse windturbines is gebleken dat windturbinegeluid vaak tonaal is. Mogelijke oorzaken daarvan zijn:

- uitlijnfouten in de aandrijftrein,
- tand-ingrijping in de tandwielkast,
- aerodynamisch fluiten van de bladen,
- elektro-magnetische krachten in de generator en
- mechanische resonanties in de constructie.

De eerste drie genoemde mogelijke oorzaken zijn bij uitgevoerde metingen een of meerdere keren opgemerkt als de werkelijke oorzaak van tonaliteit. Deze oorzaken worden hierna kort toegelicht aan de hand van praktijkvoorbeelden. De twee overige mogelijke oorzaken zijn (nog) niet opgemerkt bij de uitgevoerde metingen en zullen verder niet besproken worden.

de stompe achterrand ongeveer gelijk aan de aanstroomsnelheid gedeeld door tien maal de achterranddikte. Het is waarschijnlijk dat de piek bij ongeveer 1.4 kHz door dit effect wordt veroorzaakt. Nadat het spektrum van figuur 5 gemeten was heeft de fabrikant van de turbine een spoiler bevestigd naast de achterrand van elk blad om het achterrandgeluid te verminderen. Hierna is het spektrum gemeten zoals weergegeven in figuur 6. Hieruit blijkt dat de piek die zich oorspronkelijk bij ongeveer 1.4 kHz bevond en door de modifikatie verschoven is naar ongeveer 500 Hz. Omdat de spoiler naast de achterrand bevestigd was is de effectieve achterranddikte toegenomen waardoor de frequentie afgenomen is. Hiermee is het vrijwel zeker geworden dat de bedoelde piek veroorzaakt is door de stompe achterrand. De piek is echter tamelijk breed zodat niet gezegd kan worden dat stompe achterrandgeluid aanleiding geeft tot tonaliteit.

4. IMPULSIVITEIT

4.1. Algemeen

Uit metingen aan diverse windturbines is gebleken dat het geluidniveau vaak varieert met een frequentie die gelijk is aan de rotatiefrequentie van de rotor of met een frequentie die gelijk is aan het aantal rotorbladen maal de rotatiefrequentie. Deze impulsiviteit kan zowel optreden in het aerodynamisch aandeel als in het mechanisch aandeel tot het totale geluidniveau. Beide verschijnselen worden hierna besproken en zoveel mogelijk toegelicht aan de hand van praktijkvoorbeelden.

4.2. Impulsiviteit van aerodynamisch geluid

Impulsiviteit in de bijdrage van aerodynamisch geluid tot het totale geluidniveau kan onderzocht worden door meetresultaten te gebruiken van een windturbine met een verwaarloosbare bijdrage van mechanisch geluid. Een voorbeeld van het geluidsspektrum van een dergelijke turbine is gegeven in figuur 7. Het totale geluidniveau in de buurt van deze tweebladige turbine is gemeten gedurende aaneengesloten kort durende tijdsintervallen. De tijdsduur van een

interval bedroeg $1/8$ deel van de omwentelings-tijd van de rotor. Het geluidniveau is als functie van de tijd weergegeven in figuur 8. Hieruit blijkt dat het geluid duidelijk impulsachtig is en dat de modulatiefrequentie gelijk is aan het aantal bladen maal de rotatiefrequentie. De reden van de waargenomen impulsiviteit kan zijn:

- eventuele variaties in de bijdrage van het aerodynamisch geluid tot de akoestische bronsterkte door bijvoorbeeld windschering of mast/blad-passage,
- eventuele richtingsafhankelijkheid van het afgestraalde aerodynamische geluid in combinatie met de beweging van de bladen ten opzichte van de waarnemer.

Het is onbekend welk van deze effecten de waargenomen impulsiviteit veroorzaakt heeft.

4.3. Impulsiviteit van mechanisch geluid

Om te onderzoeken of mechanisch geluid van een windturbine aanleiding geeft tot impulsiviteit kan het geluidniveau van discrete pieken in het geluidsspektrum die toegeschreven kunnen worden aan tandwielkastgeluid gemeten worden als functie van de tijd. Als voorbeeld hiervan is het geluidniveau van een piek (1650 Hz, zie figuur 3), veroorzaakt door de tandwielkast van een drie bladige turbine, gemeten gedurende opeenvolgende tijdsintervallen. De tijdsduur van een interval bedroeg $1/8$ deel van de omwentelings-tijd van de rotor. Het resultaat hiervan is gepresenteerd in figuur 9. Het blijkt uit deze figuur dat het mechanisch geluid gemoduleerd is met een frequentie overeenkomt met het aantal bladen maal de rotatiefrequentie (de zogenaamde 3P-frequentie). Om te beoordelen of deze niveauvariaties aanleiding geven tot impulsiviteit volgens het voorgestelde criterium moet het effect van de niveauvariaties zoals weergegeven in figuur 9 op het totale geluidniveau (de integraal van het spektrum van figuur 3) berekend worden.

Variaties in het geluidniveau van tandwielkastgeluid is ook bij metingen aan andere turbines waargenomen waarbij soms modulatiefrequenties waargenomen waarvan de waarden gelijk zijn aan de rotatiefrequenties (de zogenaamde 1P-frequentie).

3.2. Uitlijnfouten in de aandrijftrein

De aandrijftrein van een windturbine bestaat uit de rotor, de hoofdas, de tandwielkast, de snelle as en de generator. Als de onderdelen van de aandrijftrein niet goed uitgelijnd zijn of als er sprake is van een kromme as, dan zal een periodieke kracht uitgeoefend worden op de constructie, waardoor er periodieke bewegingen op kunnen treden van onderdelen van de constructie. Hierdoor kan geluid afgestraald worden met een frequentie die gelijk is aan de rotatiefrequentie van de betreffende as en de hogere harmonischen daarvan. Als voorbeeld hiervan wordt verwezen naar figuur 1. In deze figuur is een gedeelte van het geluidspektrum gegeven in 1/24 oktaafbanden zoals dat gemeten is bij een bepaalde windturbine. De rotatiefrequentie van de snelle as bedroeg bij deze turbine 25 Hz. In het geluidspektrum is een duidelijke piek bij 25 Hz te zien en ook bij de hogere harmonischen (50, 75, 100, 125 en 150 Hz). Deze pieken worden veroorzaakt door een uitlijnfout in de aandrijftrein. Volgens het voorgestelde criterium is het geluid niet tonaal.

3.3. Tandingrijping in de tandwielkast

In de meeste gevallen hebben windturbines tandwielkasten met twee of drie trappen. Elke trap bestaat uit tandwielen waarvan de tanden met een bepaalde frequentie in elkaar grijpen. Als de windturbine een vast toerental heeft, is er per trap sprake van een vaste tandingrijp-frequentie. Het in elkaar grijpen van tanden gaat gepaard met periodieke variaties in plaatselijke krachten die niet sinus-vormig variëren. Hierdoor kan geluid afgestraald worden met een frequentie die gelijk is aan de tandingrijp-frequentie en de hogere harmonischen daarvan. Als voorbeeld hiervan wordt verwezen naar de figuren 2 en 3. In deze figuren zijn de berekende tandingrijp-frequenties en de hogere harmonischen per trap aangegeven bij de pieken in de spektra die met deze frequenties corresponderen. Bij deze voorbeelden blijkt dat haast alle significante pieken in de geluidspektra toegeschreven kunnen worden aan de tandingrijping in de tandwielkast. Volgens het voorgestelde criterium is zowel het geluid van figuur 2 als van figuur 3 tonaal.

3.4. Aerodynamisch fluiten van de bladen

Een roterend blad kan een fluitend geluid te weegbrengen doordat de lucht langs spleten (bv bij remtippen) of holtes (bv ontwateringsgaatjes) strijkt. Deze bron van geluid kan eenvoudig herkend worden door naar het geluid te luisteren omdat er meestal duidelijke variaties in toonhoogte mee gepaard gaan. Dit wordt veroorzaakt door het Doppler-effect dat ontstaat doordat de geluidsbron zich beurtelings naar de waarnemer toe en van de waarnemer af begeeft. Als voorbeeld hiervan dient een meting die uitgevoerd is aan een driebladige windturbine met slechts één fluitend blad. Het geluidspektrum bij deze windturbine is door middel van een tijdvenstertechniek geanalyseerd voor vier verschillende rotorstanden (45, 135, 225 en 315 graden ten opzichte van een willekeurig gekozen rotorstand). Het frequentiegebied van de 1/12 oktaaf band spektra rond de frequentie van de waargenomen fluittoon is voor de vier rotorstanden weergegeven in figuur 4. Hieruit kan afgeleid worden dat de frequentie van de fluittoon door het Doppler-effekt varieerde tussen ongeveer 3070 Hz en 3650 Hz (variatie van ongeveer 19%). De tipsnelheid van het rotorblad bedroeg 33 m/s. Als verondersteld wordt dat de geluidbron zich aan de tip van het blad bevindt volgt hieruit een te verwachten variatie in frequentie van 22% hetgeen goed overeenkomt met de waargenomen variatie. Als de toon een vaste frequentie zou hebben dan zou het geluid volgens het voorgestelde criterium tonaal zijn. De Joint Nordic Method echter doet geen uitspraak over een criterium voor tonen met een variërende frequentie. Aangenomen mag worden dat een toon met een variërende frequentie minstens zo goed hoorbaar is als een toon met een vaste frequentie onder overigens dezelfde condities. Daarom is het geluid van dit voorbeeld ook tonaal te noemen.

Een ander aerodynamisch mechanisme dat volgens theoretische beschouwingen (ref [4]) een piek in het geluidspektrum kan veroorzaken, is het geluid als gevolg van de stompe achterrand van de bladen. Een geluidspektrum van een turbine waar dit effect waarschijnlijk optrad is gegeven in figuur 5. Volgens de theorie is de frequentie van de piek die veroorzaakt wordt door

6. REFERENTIES

- [1] H.E.A. Brackenhoff, P.M. Buis, A. von Meier; Handleiding meten en rekenen industrieindustrielawaai. Interdepartementale Commissie Geluidhinder; IL-HR-13-01.
- [2] N.J.C.M. van der Borg, W.J. Stam; Acoustic noise measurements on windturbines. Proceedings EWE'89; Glasgow, 10 - 13 juli 1989.
- [3] Torben Holm Pedersen; Methods for evaluating the prominence of audible tones in noise. Technical report LI 333/88, Danish Danish Acoustical Institute.
- [4] W.B. de Wolf; Aerodynamisch geluid van windturbines. NLR rapport MP 87004 U; 12-01-1987.

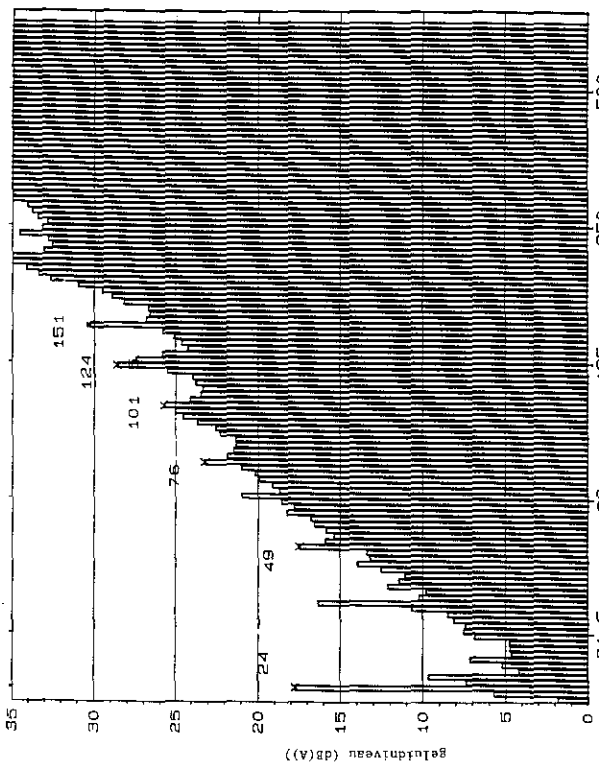
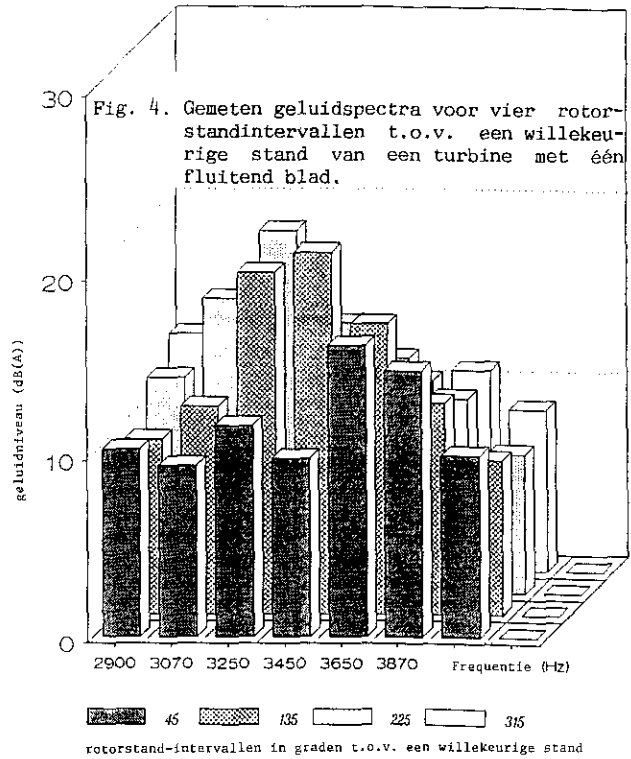


Fig. 1. Gemeten geluidsspectrum van een turbine met een slecht uitgelijnde aandrijftrein

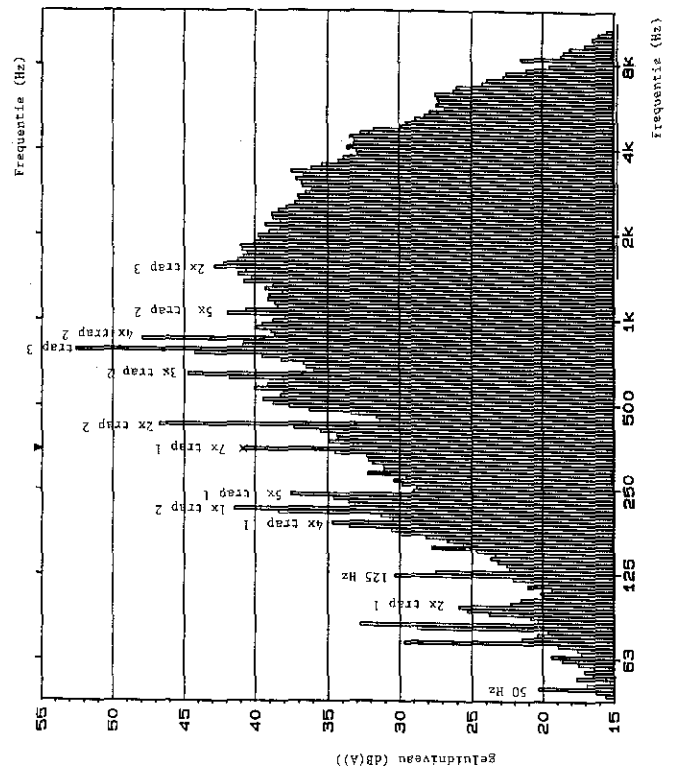


Fig. 2. Gemeten geluidsspectrum van een turbine met veel tandwielkastgeluid.

Mogelijke oorzaken van impulsiviteit van mechanisch geluid bij windturbines zijn:

- eventuele variaties in de bronsterkte van het mechanisch geluid,
- eventuele richtingsafhankelijkheid van het door de bladen afgestraalde mechanisch geluid in combinatie met de beweging van de bladen ten opzichte van de waarnemer,
- eventuele variaties in de geluidsoverdracht van de turbinegondel naar de waarnemer door afscherming of reflectie van geluid door de roterende bladen.

Variaties in de bronsterkte van het mechanisch geluid zouden veroorzaakt kunnen worden door buigende momenten in de assen. Dit zou veroorzaakt kunnen worden door uitlijnfouten in de aandrijftrein hetgeen aanleiding kan geven tot 1P-modulatie of door windschering hetgeen aanleiding kan geven tot 2P- of 3P-modulatie bij 2 resp. 3-bladige rotoren. Ook kunnen onnauwkeurigheden bij de fabricage van de tandwielkast een modulatie van de mechanische bronsterkte veroorzaken. Om deze beschouwing wat meer kwantitatief te maken is een experiment uitgevoerd in het Laboratorium voor Elektrische Conversie Systemen (LECS) van het ECN. Hier is een tandwielkast aan de RotorAs Aandrijf Faciliteit (RAAF) bevestigd en met een vast toerental onbelast bedreven. Een versnellingsopnemer was op de wand van de tandwielkast bevestigd. Het versnellings signaal is één maal geïntegreerd en het zo ontstane snelheids signaal is per 1/24 oktaafband geanalyseerd gedurende opeenvolgende korte tijdsintervallen. Het niveau van de piek in het spektrum dat overeenkomt met de tandwielgrijsfrequentie van de derde trap van de tandwielkast is als functie van de tijd weergegeven in figuur 10. Hieruit blijkt dat er sprake is van een duidelijke modulatie van het trillingsniveau met de 1P-frequentie zodat geconcludeerd kan worden dat variaties in de bronsterkte van de tandwielkast niet denkbeeldig zijn. Bronsterktevariaties zijn echter niet de oorzaak van de impulsiviteit bij de meting waarvan de resultaten weergegeven zijn in figuur 9. Dit is vastgesteld door de meting (die uitgevoerd was op een bepaalde afstand voor de turbine) 30 minuten later te herhalen op dezelfde afstand naast de turbine onder overigens dezelfde condities. Uit de resultaten van deze

meting is figuur 11 verkregen. Door figuur 9 en figuur 11 te vergelijken wordt vastgesteld dat de beide modulatiepatronen verschillend zijn met betrekking tot verhouding tussen de tijdsduur van hoog en van laag geluidniveau. Dit is niet te verklaren door variaties in de bronsterkte zodat de reden van de waargenomen impulsiviteit gezocht moet worden in andere mogelijke oorzaken van impulsiviteit in het mechanisch geluid.

5. CONCLUSIES

Windturbinegeluid blijkt in de praktijk vaak duidelijk hoorbaar tonaal of impulsief te zijn. Dit kan de ervaren hinder in een belangrijke mate verhogen, waardoor de genoemde verschijnselen een belemmering kunnen vormen bij de toepassing van windenergie. In Nederland wordt geen algemeen aanvaard eenduidig criterium gebruikt ter beoordeling van eventuele tonaliteit of impulsiviteit. Onderzoek naar het verband tussen de ervaren hinder door windturbinegeluid en tonaliteit of impulsiviteit (perceptieonderzoek) is geweest om daarmee eenduidige criteria voor windturbinegeluid vast te leggen.

Uit metingen is gebleken dat tonaliteit in de meeste gevallen veroorzaakt wordt door tandwielkastgeluid en in sommige gevallen ook door uitlijnfouten in de aandrijftrein en door spleten of openingen in bladen. Impulsiviteit van windturbinegeluid kan zowel door aerodynamisch als door mechanisch geluid veroorzaakt worden. In beide gevallen kan de oorzaak van de impulsiviteit gelegen zijn in periodieke variaties in de geluidbronsterkte en ook in periodieke variaties in de geluidsoverdracht tussen de geluidbron en de waarnemer.

6. REFERENTIES

- [1] H.E.A. Brackenhoff, P.M. Buis, A. von Meier; Handleiding meten en rekenen industriële industriëlelawaai. Interdepartementale Commissie Geluidhinder; IL-HR-13-01.
- [2] N.J.C.M. van der Borg, W.J. Stam; Acoustic noise measurements on windturbines. Proceedings EWEC'89; Glasgow, 10 - 13 juli 1989.
- [3] Torben Holm Pedersen; Methods for evaluating the prominence of audible tones in noise. Technical report LI 333/88, Danish Danish Acoustical Institute.
- [4] W.B. de Wolf; Aerodynamisch geluid van windturbines. NLR rapport MP 87004 U; 12-01-1987.

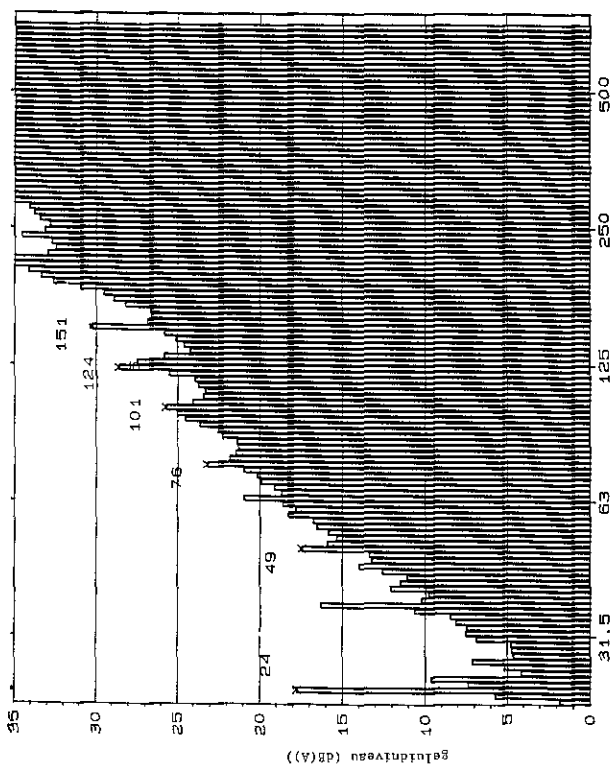
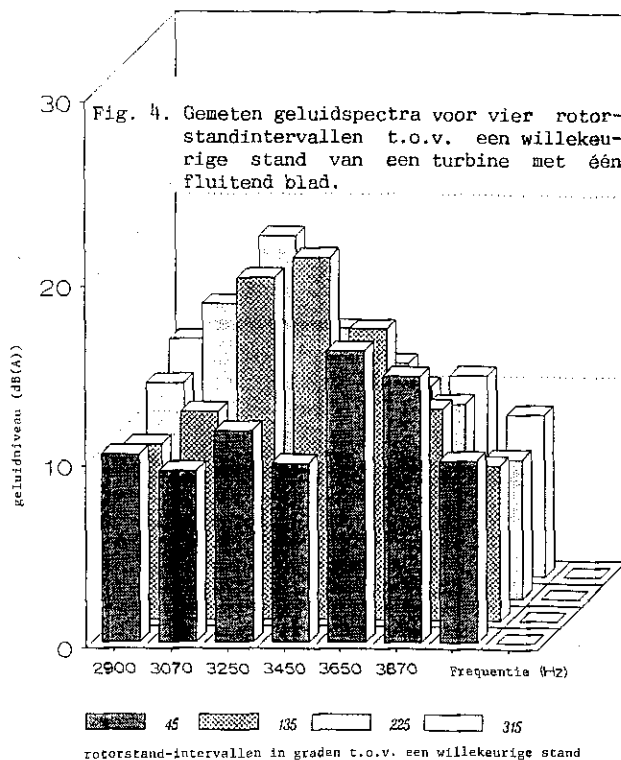


Fig. 1. Gemeten geluidspectrum van een turbine met een slecht uitgelijnde aandrijftrein

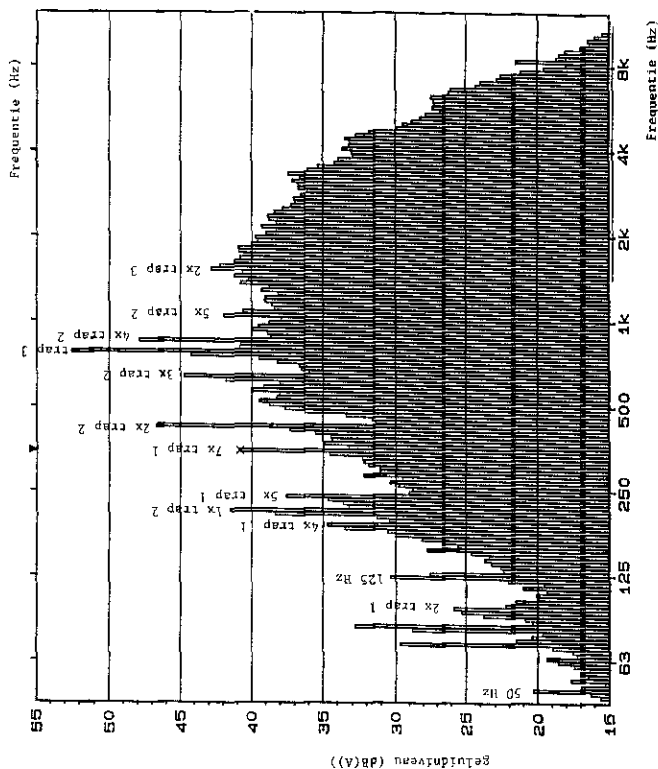


Fig. 2. Gemeten geluidspectrum van een turbine met veel tandwielkastgeluid.

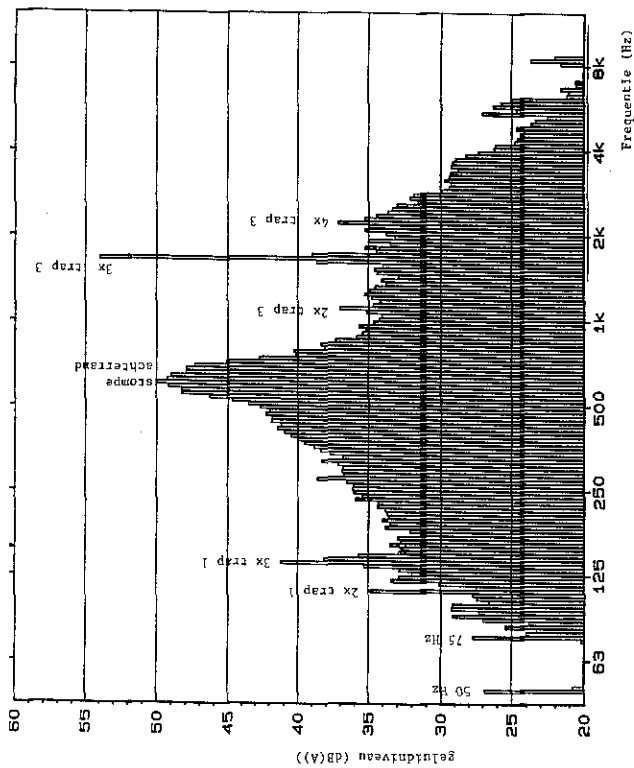


Fig. 3. Gemeten geluidsspectrum van een turbine met geluid van de tandwielkast en van de stompe achterrand van de bladen.

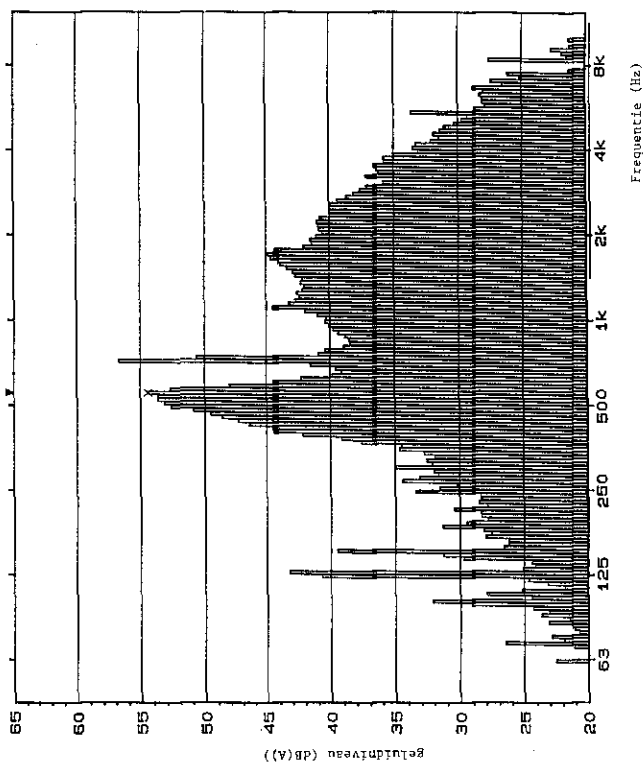


Fig. 6. Gemeten geluidsspectrum van een turbine met een stompe achterrand van de bladen

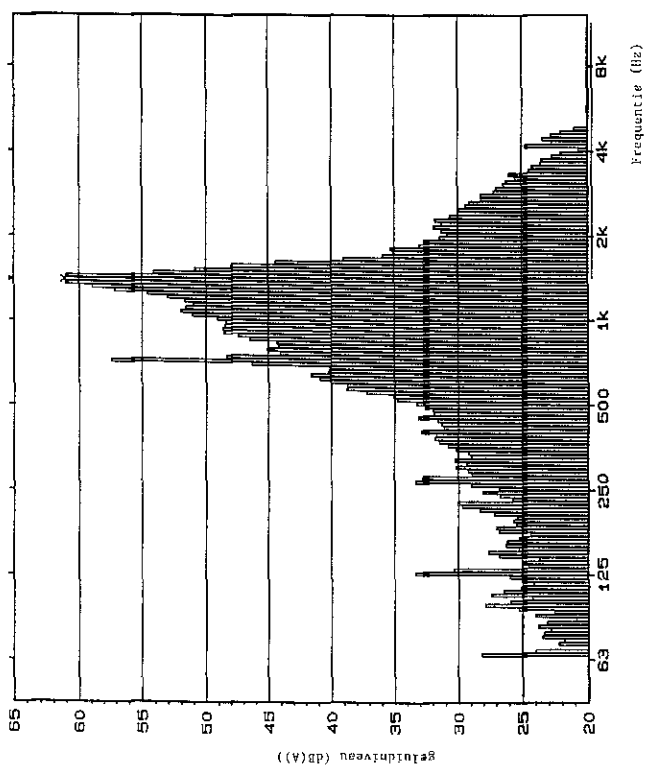


Fig. 5. Gemeten geluidsspectrum van een turbine met een stompe achterrand van de bladen

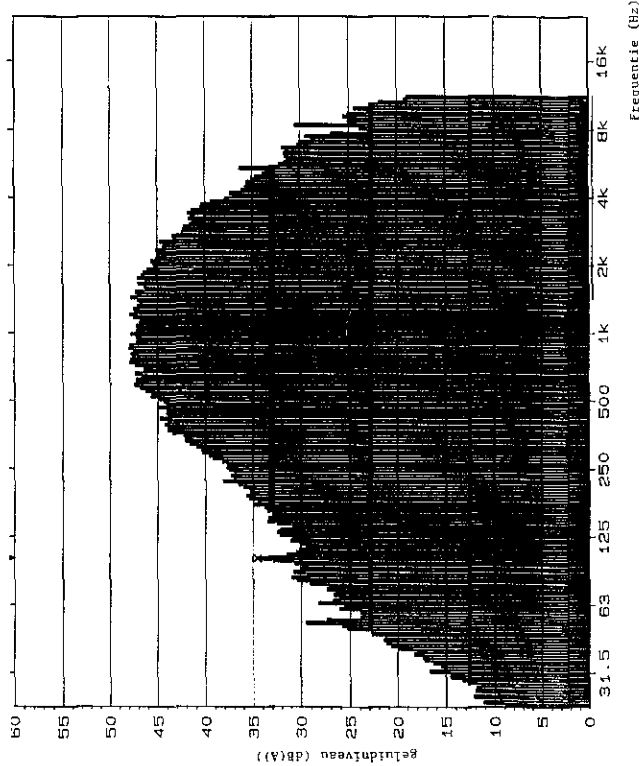


Fig. 7. Gemeten geluidsspectrum van een turbine met voornamelijk aerodynamisch geluid.

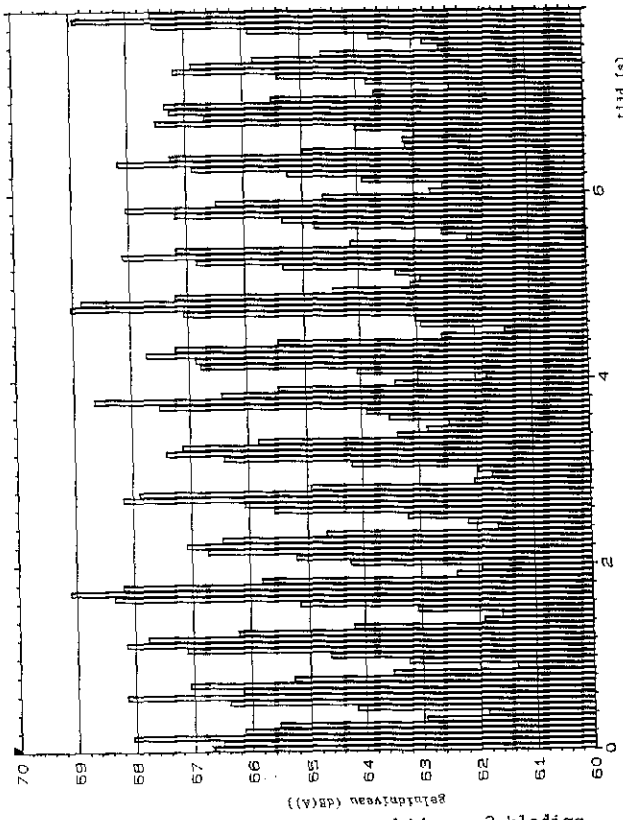


Fig. 8. Gemeten geluidniveau bij een 2-bladige turbine met voornamelijk aerodynamisch geluid (2P-modulatie).

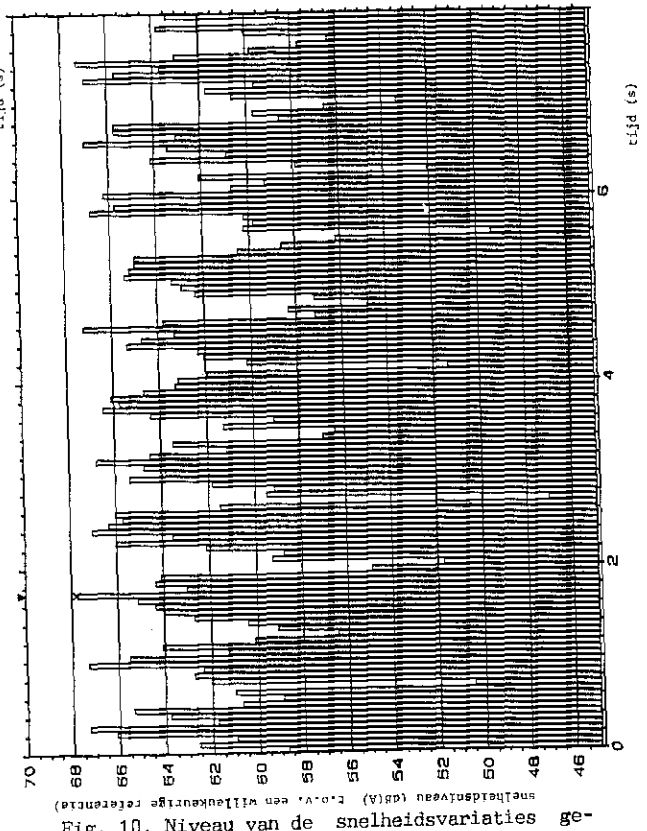


Fig. 10. Niveau van de snelheidsvariaties gemeten op de wand van een tandwielkast (1P-modulatie).

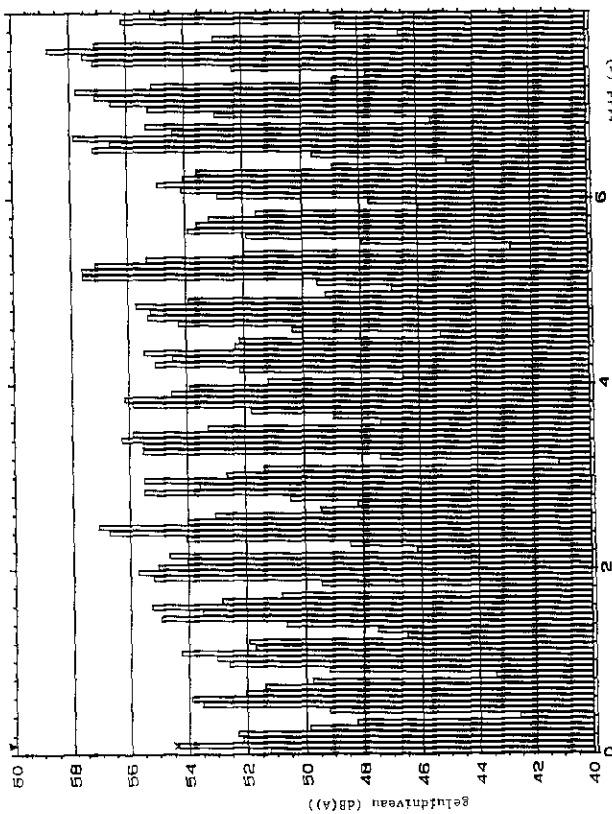


Fig. 9. Niveau van tandwielkastgeluid, gemeten voor een 3-bladige turbine (3P-modulatie).

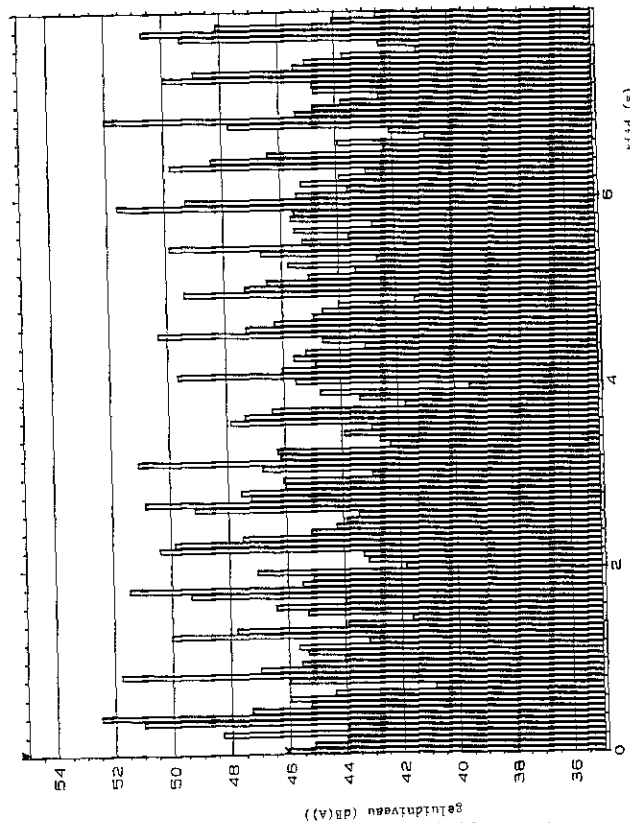


Fig. 11. Niveau van tandwielkastgeluid, gemeten naast een 3-bladige turbine (3P-modulatie).