

Fluitende objecten, oorsprong en oplossingen

ir. J.H. Granneman, ing. M.A. Trooster, ing. E.H.A. de Beer, ing. T.J.M. van Diepen
Peutz bv
Postbus 696
2700 AR Zoetermeer
j.granneman@zoetermeer.peutz.nl

Samenvatting

Het komt regelmatig voor dat geluidsoverlast wordt veroorzaakt door fluitgeluiden die objecten op gebouwen en viaducten produceren onder bepaalde meteorologische omstandigheden, vooral bij bepaalde windsnelheden en –richtingen. In veel gevallen staat deze geluidsoverlast in relatie met de toepassing van stalen roosters. Vanwege de vele metingen die al door ons bureau zijn gedaan in de praktijk en in ons laboratorium, is al veel bekend over de relevante parameters die voor dit fenomeen een rol spelen. Om meer structurele kennis op te doen over dit onderwerp en in staat te zijn al in de ontwerpfase van een dergelijk object te prognosticeren of en in welke mate een dergelijk fenomeen zal optreden, is onder laboratoriumcondities systematisch onderzoek gedaan. Hiervoor zijn het geluidvermogeniveau en de frequentiekenarakteristiek van de fluitgeluiden, afhankelijk van de windsnelheid, hoek van inval en roosterconfiguratie onderzocht. Ook zijn verschillende mogelijkheden onderzocht om de geluidproductie van fluitgeluiden van dergelijk roosters te reduceren. Het volgende presenteert de resultaten van dit onderzoek.

Inleiding

Tijdens periodes met hoge windsnelheden blijken wanneer hoge tonale geluiden te worden geproduceerd door bepaalde delen van objecten, vaak stalen roosters, met geluidklachten als gevolg. Een aantal praktijkgevallen zijn onderzocht, mede in het akoestisch laboratorium van Peutz. Vervolgens is een specifiek meetprogramma opgesteld om meer kennis op te doen van dit fenomeen. Bovendien zijn voorzieningen onderzocht om dit fluitachtige geluid te reduceren [1].

Theorie

Een eolische toon is een tonaal geluid dat wordt veroorzaakt door een luchtstroom rond een object door aldaar optredende luchtwervels. De frequentie van een eolische toon is gerelateerd aan het dimensieloze Strouhal getal S :

$$f = S \cdot \frac{v}{D} \quad (1)$$

met:

- f (oscillatie) frequentie [s^{-1}]
- D karakteristieke dimensie van het object loodrecht op de luchtstroom [m]
- v snelheid van de luchtstroom voor het object [m/s]

Deze formule laat direct een verband zien tussen frequentie en lichtsnelheid, welke een goede beschrijving geeft van eolische tonen. Vaker wordt deze formule toegepast bij laag frequente eolische tonen (globaal tussen 80 en 100 Hz) bij vergelijkbare gevallen van objecten in een luchtstroom, zoals wordt beschreven in een Japans onderzoek waarin een blokvormig object onder verschillende hoeken in een luchtstroom wordt geplaatst [2]. De tonen die in het volgende worden beschreven, liggen vooral in het hoog frequente gebied en zijn minder afhankelijk van de lichtsnelheid.

Praktijksituaties

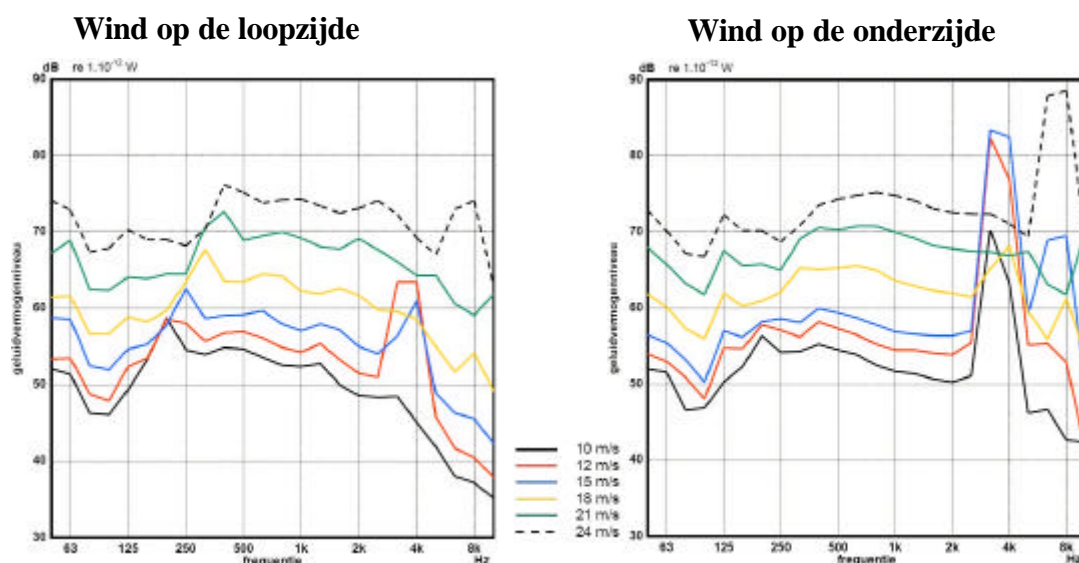
In verschillende praktijksituaties zijn bij bepaalde windcondities geluiden waargenomen met een hoog geluidniveau en een tonaal karakter. In veel gevallen bleken (verzinkte) stalen roosters hiervan de oorzaak te zijn. Dit is op juistheid onderzocht door met het betreffende rooster metingen uit te voeren in de nagalmkamer van het akoestisch laboratorium van Peutz. Het volgende voorbeeld laat het onderzochte fenomeen zien onder laboratoriumcondities. De roosters worden in het onderzoek altijd dusdanig opgesteld dat de luchtstroom loodrecht op de lengterichting van de draagstaven staat en onder die aanstromingshoek waarbij de hoogste geluidniveaus worden waargenomen.

Praktijkvoorbeeld: roosters langs spoorlijn

De hier onderzochte roosters zijn afkomstig van een pad naast een spoorwegviaduct dat wordt gebruikt als vluchtroute en inspectiepad. De roosters hebben de volgende geometrische eigenschappen:

Draagstaafdikte/hoogte (diepte):	3,5 mm / 30 mm
Vulstaafhoogte (diepte):	11 mm
Hart op hart (h.o.h.) afstand: - draagstaven: 30 mm	
- vulstaven: 30 mm	

Figuur 1 laat het spectrum zien van de geluidvermogen niveaus gemeten in het akoestisch laboratorium van Peutz bij verschillende lichtsnelheden. De hoogste geluidvermogen niveaus worden gemeten wanneer het rooster aan de onderzijde wordt angeblazen.

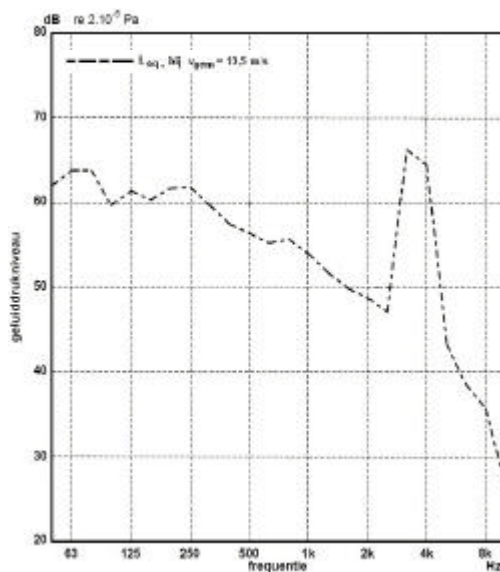


Figuur 1: Spectrale geluidvermogen niveaus van het rooster bij verschillende luchtstroomsnelheden

Dit rooster genereert niet de laag frequente tonen zoals die zijn waargenomen bij een blokvormig object van het eerder genoemde Japanse onderzoek [2], maar met name hoog frequente tonen. De frequenties van de tonen zijn duidelijk verschillend voor verschillende windsnelheden.

Een meting in de praktijk van deze roosters (op ca. 80 m afstand van het roosterpad) geeft het spectrum zoals weergegeven in figuur 2.

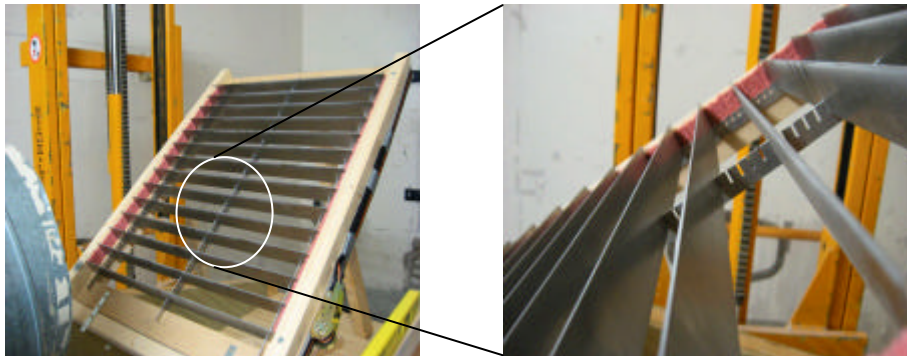
Meting in de praktijk



Figuur 2: Spectrum van het geluiddrukkniveau van de roosters langs een spoorwegviaduct, gemeten op circa 80 meter afstand. Het geluidniveau tot een frequentie van circa 500 Hz betreft windgeruis.

Onderzochte parameters

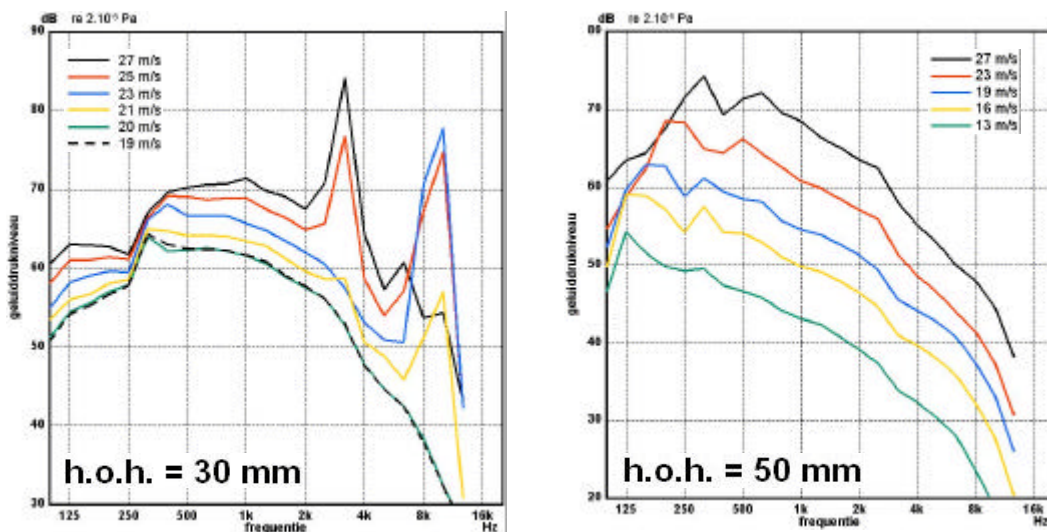
In dit onderzoek spelen diverse aspecten van een rooster een (mogelijk) belangrijke rol in het ontstaan van eolische tonen. Een afgewogen keuze is gemaakt om met name de afhankelijkheid van maaswijdte en draagstaafhoogte te onderzoeken op het ontstaan van eolische tonen. Ook zijn mogelijke maatregelen onderzocht ter voorkoming van eolische tonen. In figuur 3 is weergegeven op welke manier in maaswijdte en draagstaafhoogte is gevarieerd. Voor het onderzoek zijn draagstaafhoogtes onderzocht van 20, 30 en 40 mm hoog. In maaswijdte (afstand wordt bepaald door h.o.h. afstand) is gevarieerd met 20, 30, 40, 50 en 60 mm. Alle roosterstaven hebben in dit onderzoek een dikte van 2 mm.



Figuur 3: Het onderzoeksrooster waarvan de roosterstaven uitneembaar en op verschillende afstanden van elkaar te plaatsen zijn (maaswijdte). Verschillende hoogtes roosterstaven zijn gebruikt. De ‘stille’ luchtstroom, die de wind simuleert, komt met te variëren snelheden uit de buis links onder op de linker foto.

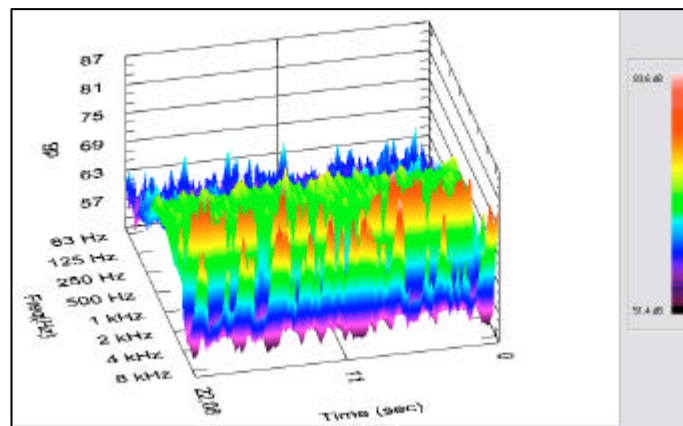
Onderzoeksresultaten

Als voorbeeld zijn in figuur 4 voor een draagstaafhoogte van 40 mm de meetresultaten gegeven voor een h.o.h. afstand van 30 en 50 mm, bij verschillende lichtsnelheden.



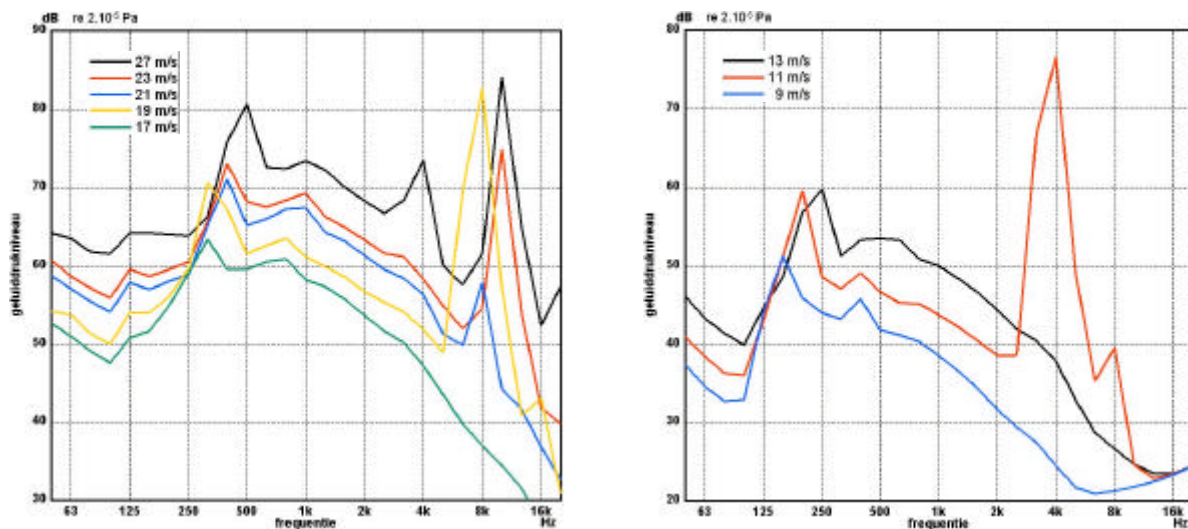
Figuur 4: resultaten voor een draagstaafhoogte van 40 mm en h.o.h. afstanden van 30 (links) en 50 mm (rechts) bij verschillende lichtsnelheden.

Uit de resultaten in figuur 4 blijkt dat voor een h.o.h. afstand van 50 mm geen tonen meer worden waargenomen. In figuur 4-links worden bij een luchtstroomsnelheid van 25 m/s twee pieken waargenomen in de 3150 en 10000 Hz tertsbanden. Deze twee tonen alterneren in de tijd, zoals te zien is in figuur 5, waar het geluidsspectrum als functie van de tijd is weergegeven (bij een luchtstroomsnelheid van 25 m/s).



Figuur 5: Spectrale geluidrukniveaus als functie van de tijd voor een draagstaafhoogte/-afstand van 40 mm/30 mm bij een luchtsnelheid van 25 m/s.

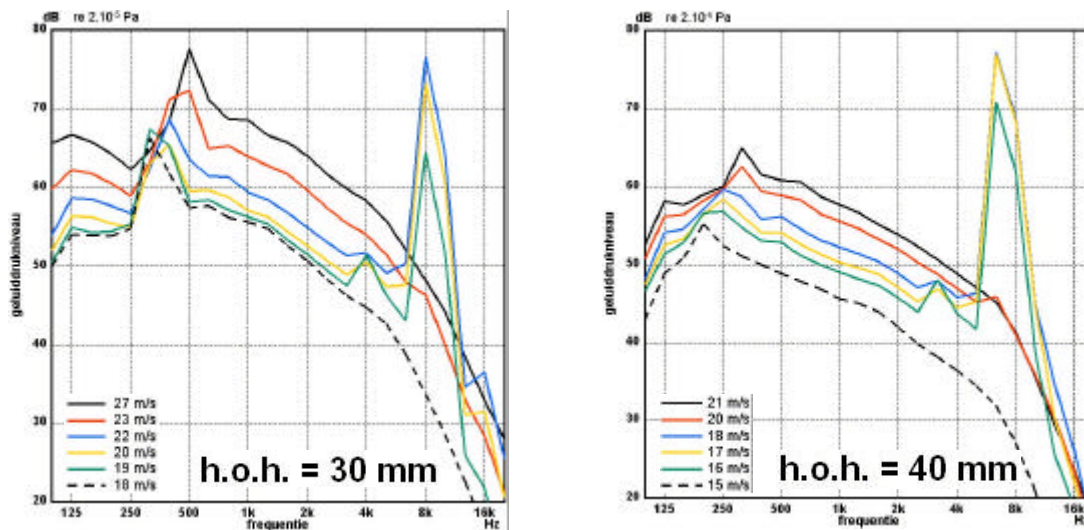
In figuur 6 zijn de resultaten weergegeven van het onderzoeksrooster met draagstaven van 30 mm op een h.o.h. afstand van 30 mm van elkaar.



Figuur 6: resultaten voor een draagstaafhoogte van 30 mm en h.o.h. afstand van 30 mm bij verschillende luchtsnelheden. De rechter afbeelding geeft het vervolg van de linker afbeelding (lagere windsnelheden).

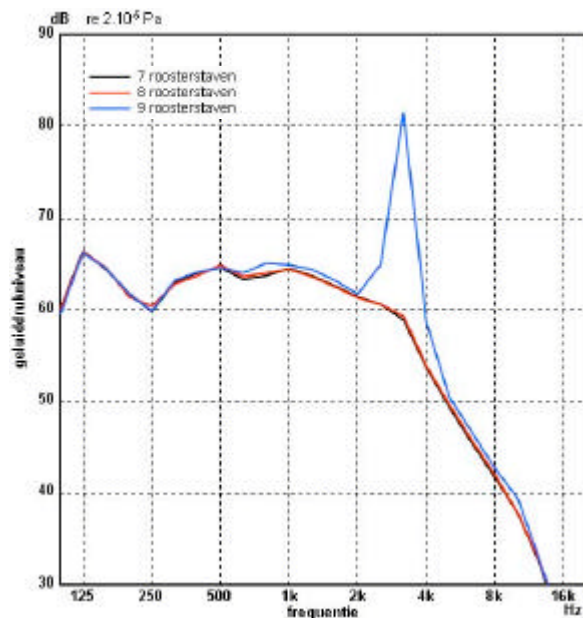
Opvallend aan deze resultaten is dat zowel voor hoge als lage luchtstroomsnelheden eolische tonen worden waargenomen. Bij luchtstroomsnelheden van 17 tot 11 m/s worden geen tonen waargenomen. Wanneer deze snelheid verder afneemt, is bij 11 m/s wel weer een duidelijke toon waarneembaar. Voor een h.o.h. afstand van 50 mm en meer worden geen eolische tonen meer waargenomen.

In figuur 7 zijn de resultaten weergegeven voor het onderzoeksrooster met een draagstaafhoogte van 20 mm op een h.o.h. afstand van 30 en 40 mm van elkaar. Bij draagstaven van 40 mm hoog onstonden tonen tussen luchtstroomsnelheden van 21 en 27 m/s. Bij deze configuratie van 20 mm hoge draagstaven is het opvallend dat tonen waarneembaar zijn bij relatief lage windsnelheden, tussen 14 en 22 m/s. Ook bij deze configuratie werden bij een h.o.h. afstand van 50 mm en meer geen hoog frequente eolische tonen meer waargenomen. Wel zijn in figuur 7 bij de verschillende luchtstroomsnelheden laag frequente pieken te zien. Dit zijn tonen die worden veroorzaakt door het verschijnsel dat wordt beschreven met formule 1, alleen wordt de wervelvorming nu beïnvloed door het repeterende karakter van de roosterstaven.



Figuur 7: resultaten voor een draagstaafhoogte van 20 mm en h.o.h. afstanden van 30 (links) en 40 mm (rechts) bij verschillende lichtsnelheden.

Voor de configuratie met de draagstaven van 40 mm is tevens onderzocht hoeveel staven nodig zijn om een eolische toon op te wekken. In figuur 8 zijn hiervoor de resultaten gegeven. Begonnen is met het plaatsen van één roosterstaaf in de luchtstroom. Vervolgens is het rooster aangevuld tot negen roosterstaven (het midden van het rooster bleef hierbij in het midden van de luchtstroom), waarbij uiteindelijk een eolische toon ontstond.



Figuur 8: Spectrum van het geluidsniveau door het stuk voor stuk bijplaatsen van roosterstaven in de luchtstroom. Bij negen roosterstaven is een eolische toon hoorbaar.

Voorzieningen ter voorkoming van eolische tonen

Tevens zijn enkele voorzieningen onderzocht die moeten voorkomen dat (met name de hoog frequente) eolische tonen ontstaan. Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt dat de scherpte van de randen van de draagstaven deel uitmaakt van de oorzaak van het ontstaan van eolische tonen. Door de randen af te dekken met bijvoorbeeld ronde strips of tape, worden de randen minder scherp en ontstaat er geen, of pas bij een zeer hoge windsnelheid, een eolische toon. Het afronden van de randen zonder gebruik te maken van andere materialen (door het staal te slijpen) heeft mogelijk effect in het voorkomen van eolische tonen, maar zal nog onderzocht worden.

Ook kunnen eolische tonen worden voorkomen door het luchtstromingsprofiel te verstoren voordat de luchtstroom het rooster treft. Door bijvoorbeeld gaas of een net over het rooster te spannen, wordt de luchtstroom dusdanig verstoord dat geen eolische tonen meer zijn waargenomen.

Conclusies

Hoog frequente eolische tonen ontstaan globaal tussen luchtstroomsnelheden van 10 en 27 m/s (vergelijkbaar met windkracht 5 tot 10 Beaufort). Binnen een bepaald windsnelheidsbereik verandert de toonhoogte van de eolische toon niet. Alleen het geluidsniveau verandert. Bij een bepaalde luchtstroomsnelheid verspringt de eolische toon van de ene naar de andere frequentie, waarna deze weer constant blijft binnen een bepaald windsnelheidsbereik. In sommige situaties worden twee frequenties waargenomen. Deze treden niet gelijktijdig op, maar alterneren in de tijd.

Het repeterende karakter van de draagstaven van een rooster blijkt een belangrijke rol te spelen in het ontstaan van de hoog frequente eolische tonen, omdat geen van deze eolische tonen ontstaat bij een klein aantal draagstaven, maar pas vanaf een bepaald aantal (in de configuratie van dit onderzoek waren dit negen staven).

De luchtstroomsnelheden waarbij eolische tonen ontstaan is, naast andere aspecten, afhankelijk van de hoogte van de draagstaven; tot nu toe is daarvoor geen bruikbare relatie gevonden. Voor een draagstaafhoogte van 30 mm bestaat het grootste bereik voor luchtstroomsnelheden (11 tot en met 27 m/s) waarbij eolische tonen ontstaan.

Tot nu toe is er tevens nog geen relatie gevonden tussen de frequenties van de eolische tonen en de afmetingen (hoogte en dikte) en de afstand van de draagstaven ten opzichte van elkaar (maaswijdte). Meer onderzoek hiernaar is noodzakelijk.

Voor alle onderzochte configuraties werden geen eolische tonen meer waargenomen bij een h.o.h. afstand van 50 mm of meer. Wel zijn bij die configuratie eolische tonen waargenomen in het lagere frequentiebereik, waarbij de frequentie afhankelijk is van de luchtstroomsnelheid volgens formule 1.

Het ontstaan van eolische blijkt sterk samen te hangen met de scherpte van de draagstaafranden. Door deze randen af te ronden, met bijvoorbeeld strips of tape, wordt het ontstaan van eolische tonen sterk verhinderd.

Ook het profiel van de lucht die het rooster treft, is van invloed op het ontstaan van eolische tonen. Wanneer dit profiel wordt verstoord door bijvoorbeeld gaas of een net wordt de kans op het ontstaan van eolische tonen sterk verkleind.

Referenties

- [1] Jan Granneman, Mark Trooster, Eugène de Beer and Theo van Diepen
Whistling Building Objects, Origins and Solutions
Internoise, Shanghai, China, 2008
- [2] Hajime Fujita, Yasumasa Suzuki, Tatsunori Itou and Yuuki Hashimoto
The Radiation Characteristics of the Aeolian Tone from A Square
Cylinder, Internoise, Istanbul, Turkey, 2007