

Fluittonen om gebouwen. Oorzaken en preventie.

Master Project 2

STUDENT: RINKA VAN DOMMELEN
STUDENTNUMMER: 0570861
DATUM: MAART 2012
BEGELEIDERS: PROF. IR. L.C.J. VAN LUXEMBURG
M.C.J. HORNIKX PHD.
R.H.C. WENMAEKERS MSC.
VERSIE: 4.0

Samenvatting

Dit verslag presenteert resultaten van literatuuronderzoek naar fluittonen om gebouwen. Het omvat het in kaartbrengen van oorzaken van fluittonen en vuistregels welke de kans op fluittonen verkleinen. De vuistregels volgen uit een model dat, wanneer doorlopen, een inschatting geeft van het risico op fluittonen.

Voor dit onderzoek is informatie verzameld over verschillende luchtstromingen om gebouwen en welke noodzakelijk zijn voor het ontwikkelen van fluittonen. Het blijkt dat fluittonen om gebouwen ontstaan door een versterkte periodieke wervelafschudding. Deze kunnen ontstaan wanneer een laminaire stroming onderbroken wordt. Of deze stroming ontstaat hangt af van de wind en daarmee de omgeving. Binnen de bebouwde omgeving bevinden zich vrijwel alleen turbulente stromingen met vrij lage snelheden. Met uitzondering van bebouwing aan de rand van een stad en bij extreme weersomstandigheden.

Verder is de vorm van het obstakel van invloed. Minder gestroomlijnde objecten creëren een groter drukverschil en daarmee meer wervels. Afronding van de randen tot een straal van slechts enkele millimeters kan al een significant verschil opleveren voor de productie van wervels. Ook de ruwheid van het oppervlakte is van invloed op de stroming om het object. Een ruwe of afwisselende structuur van het oppervlakte zorgt voor een turbulente stroming om het object met verschillende frequenties van afschudden. Voor de bebouwde omgeving betekent dit dat in een gevel roosters of een herhaling van spijlen vaak de oorzaak zijn van fluittonen. Uit de studie blijkt dat het af te raden is om een herhaling van spleten (in bijvoorbeeld roosters of spijlen) te hebben, spleten kleiner dan 5cm en/of scherpe hoeken en randen. Verder blijkt het aan te raden om de stromingen te verstoren door objecten of het gebruik van ruwe oppervlakte structuur, door afronden van randen, en door keuze voor onregelmatige onderlinge afstanden van spijlen e.d. in de gevel.

Summary

This report presents the results of a literature study on whistling buildings. It discusses the origins of whistles and presents basic rules to minimize the change of whistles. With these rules a Model is created which gives an estimate of the change of whistles.

Information is collected about various flows around objects and which of these flows can lead to whistles. Whistles can occur when a periodic vortex shedding is strengthened. These periodic vortices can occur when a laminar flow is interrupted by a body. It depends on wind and surroundings, whether a laminar flow can occur. The flows in the build environment are usually turbulent and with relatively low velocities. The exception is at the outskirts of a city and with extreme weather conditions.

The flow around a body depends on the flow upstream and the shape of the body. Less streamlined bodies create larger pressure variations resulting in larger vortices. Rounding of edges, even with a radius of a couple of millimeters, can have a significant difference in the production of vortices. Also the surface structure of a body influences the flow around it. A rough and various structure will create a turbulent flow around the object, resulting in a various range of vortex shedding frequencies.

If this is seen in the light of the build environment, grids or a repetition of spires is often the cause of whistles. To decrease the chance of whistles for facades containing repetitions of openings (as is the case in grids) the following options apply: openings should be larger than 5cm, use rounded edges, disturb the flow around critical elements by using rough surfaces, and vary opening sizes between spires and grids in the facade.

Inhoudsopgave

Samenvatting	ii
Summary	iv
1 Inleiding	1
1.1 Probleemstelling	1
1.2 Aanleiding van het onderzoek	2
1.3 Doelstelling	3
1.4 Onderzoeksvragen	3
1.5 Leeswijzer	4
2 Luchtstroming	5
2.1 Definitie fluittonen	6
2.2 Reynoldsgetal	7
2.3 Resonantie	9
2.4 Strouhalgetal	11
3 Windklimaat in Nederland	13
3.1 Bebouwde omgeving	15
4 Aerodynamica van eenvoudige vormen	17
4.1 Stroomlijning	17
4.2 Cilinder	18
4.3 Cilinder met ruwe oppervlaktestructuur	19
4.4 Kubus	19
4.5 Kubus met kleine plaat aan de zijzijde	20
4.6 Verstoring van de stroming	21
4.7 Spleten	22
5 Wind om gebouwen	23
5.1 Spijlen	23
5.2 Spleten	24

5.3	Roosters	24
6	Geluidsreductie	29
6.1	Methoden voor geluidsreductie	29
6.1.1	Voorkomen van periodieke wervelafschudding	30
6.1.2	Voorkomen van grote drukverschillen	30
6.2	Gekozen oplossingen van methoden voor geluidsreductie	31
7	Ontwerpregels	32
8	Model	35
9	Toetsing	39
9.1	Strijkijzer, Den Haag (2007)	39
9.2	Hoftoren, Den Haag (2003)	41
9.3	Paviljoen, Hoek van Holland (1993)	42
9.4	Beetham Tower, Manchester (2006)	44
9.5	City Spire, New York (1987)	45
9.6	Taipei 101, Taiwan (2004)	47
9.7	Brug Oranje laan, Den Bosch (2011)	47
10	Conclusies	51
10.1	Antwoorden op onderzoeksvragen	51
10.2	Aanbevelingen voor vervolg onderzoek	52
	Bronnen	56

Hoofdstuk 1

Inleiding

1.1 Probleemstelling

Na het opleveren van gebouwen en bouwwerken komen soms problemen naar voren met betrekking tot geluid, in het bijzonder fluittonen. Momenteel is er geen praktisch toepasbare methode om vooraf in te schatten of een gebouw fluittonen kan gaan produceren. De storende fluittonen worden meestal achteraf waargenomen en verholpen. Er zijn ook geen vuistregels of richtlijnen om een indicatie te kunnen geven wat betreft fluittonen. Middels dit onderzoek is getracht een bijdrage te leveren aan dit probleem.

Het bepalen van de oorzaak van geluidproductie aan gebouw is moeilijk. Dit komt door de combinatie van de grootte van het gebouw en de veelal kleine details in een onbekende fluctuerende luchtstroming. Bestaande wetenschappelijke modellen beslaan nog niet de geheel complexiteit van de stroming zijn te complex [9], waardoor de bruikbaarheid beperkt is. Er zijn twee belangrijke redenen te benoemen [28]:

1. akoestische modellen zijn te simpel om de complexe realiteit te omvatten,
2. Computational Fluid Dynamics (CFD) modellen hebben te maken met de grote schaal van de stroming en de kleine schaal van de details waardoor tonen veroorzaakt worden.

Het gebruik van schaalmodellen van gebouwen om metingen aan te doen is problematisch. Details moeten in dezelfde verhouding mee geschaald worden als de gebouwen en de omgeving. Bovendien moeten de eigenschappen van de stroming, zoals de viscositeit en de dichtheid, ook mee geschaald worden. Om de eigenschappen van de stroming te kunnen schalen zou een ander medium

gebruikt moeten worden, bijvoorbeeld water in plaats van lucht. Echter voor het bepalen van de geluidsproductie lijkt het gebruik van water in plaats van lucht niet geschikt [36].

1.2 Aanleiding van het onderzoek

Stromingsleer en geluidsproductie zijn actieve onderzoeksgebieden. Bij deze onderzoeken ligt meestal de nadruk op specifieke toepassingen: de beweging van stromingen op grote schaal waarbij het detailniveau achterwegen wordt gelaten, of de interactie op kleine schaal van een bekende stroming met een specifiek object.

Op dit moment wordt storende geluidsproductie door gebouwen, onder invloed van luchtstroming, achteraf waargenomen en verholpen. Aanpassingen worden doorgevoerd nadat het probleem is opgetreden. In enkele gevallen zijn de aanpassingen bepaald aan de hand van metingen aan een 1:1 model. Aan het aangepaste gevelement wordt dan gemeten in een windtunnel of, vanwege de afmeting, achter een vliegtuigmotor. Projecten hebben vrijwel nooit budget beschikbaar om preventief onderzoek te doen.

Niet al het geluid is even storend. Charles Taylor schreef hierover in 1992 het volgende: “[The] human brain is always one step ahead and takes into account so many factors other than the simple physical parameters” [32]. Hij geeft aan dat de fysieke parameters geen lineair verband hebben met de beleving van het geluid. Zacht geluid kan storend zijn, terwijl het laag frequente “huilen” van de wind een geaccepteerd geluid is [24]. De bron van het geluid speelt een belangrijke rol, mensen zijn geneigd heftiger te reageren op door de mens geproduceerde geluiden dan op natuurlijke geluiden [11].

Om onderzoek te stimuleren en problemen te voorkomen kan regelgeving helpen. In de Nederlandse wet wordt in enkele gevallen rekening gehouden met de bron van het geluid, zo is vastgesteld dat kinderlawaaai officieel geen geluidsoverlast is. Er is echter geen aparte rubriek voor geluid opgewekt door gebouwen. Fluittonen zullen, ongeacht hun geluidniveau, erg storend zijn. Het is wenselijk ze geheel te vermijden.

1.3 Doelstelling

Het doel van het onderzoek is het ontwikkelen van een praktische methode waarmee vooraf ingeschat kan worden of een gebouw in de gevarenzone valt om fluittonen te produceren.

Deze praktische methode zal bestaan uit het bepalen van richtlijnen door middel van een literatuurstudie. De richtlijnen omvatten vuist- en ontwerpregels waarmee een inschatting kan worden gemaakt van het risico van hinderlijk windgeluid. Daarnaast kan de invloed van wijzigingen aan een gebouw in een model worden geanalyseerd, waarna er eventueel besloten kan worden tot verder onderzoek naar de geluidsproductie.

1.4 Onderzoeksvragen

Welke vuistregels kunnen opgesteld worden om een schatting te kunnen maken van potentiële fluittonen opgewekt door gebouwen?

Verder zijn de volgende vier deelvragen gedefinieerd:

1. Wat voor stromingen kunnen fluittonen veroorzaken?
 - (a) Wat voor stromingen leiden gemakkelijk tot fluittonen?
 - (b) Welke factoren veranderen dit gedrag?
2. Wanneer worden fluittonen opgewekt door gebouwen als gevolg van wind?
 - (a) Bij welke windsnelheden kunnen geluideffecten optreden?
 - (b) Welke bouwkundige vormen/obstakels zijn ongunstig als het gaat om het optreden van windgeluid?
3. Wat kan er gedaan worden om windgeluid te voorkomen?
4. Is het geluidsniveau op basis van eenvoudige wiskundige relaties te voorspellen?

1.5 Leeswijzer

Voor het gebruik en het doorlopen van het ontwikkelde model, dienen hoofdstuk 8 en 7 bestudeerd te worden. Informatie over verschillende stromingen (om objecten) en ontstaansmechanismen van fluittonen is te vinden in hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 geeft een inleiding in het windklimaat in Nederland. Het beschrijft wanneer we voor fluittonen gevaarlijke stromingen en windsnelheden kunnen verwachten. In hoofdstuk 4 wordt luchtstroming om verschillende vormen en de relatie met mogelijke geluidsproductie van fluittonen beschreven. Hoofdstuk 5 beschrijft specifiek onderzoek naar gebouw elementen die kunnen fluiten. Hoofdstuk 6 gaat in op geluidsreductie. Beschreven onderzoeken worden vertaald naar een schema en vuistregels voor het verstoren van fluittonen rond gebouwen in de praktijk. In hoofdstuk 9 worden zeven praktijk voorbeelden behandeld van gebouwen die fluittonen produceren. Er wordt gesteld dat het gebruik van het schema en de vuistregels had kunnen helpen bij het voortijdig signaleren van het probleem en het laat zien dat de gekozen oplossing te verklaren is met het schema. Tot slot in hoofdstuk 10 de conclusies, antwoorden op de onderzoeksvragen en aanbevelingen voor toekomstig onderzoek.

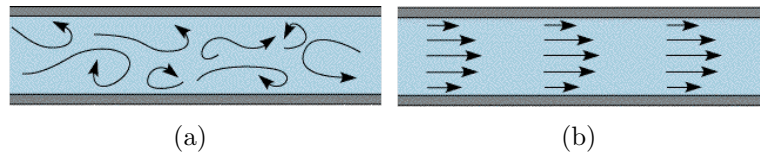
Hoofdstuk 2

Luchtstroming

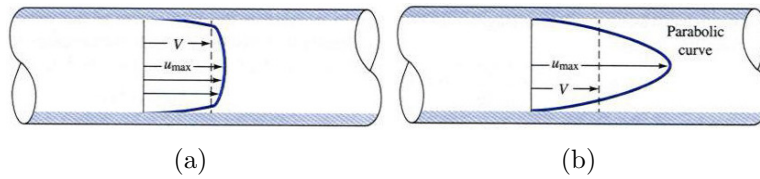
Om het risico op fluittonen te bepalen is het van belang de oorzaak, hoe fluittonen zich ontwikkelen, te analyseren. Verder is het belangrijk om vast te stellen welk windgeluid onder fluittonen valt. De fluittonen geproduceerd door gebouwen ontwikkelen zich onder invloed van de wind. Eerst zal worden ingegaan op mogelijke stromingen en welke stromingen een risico vormen voor fluittonen.

Twee soorten luchtstroming kunnen worden onderscheiden: laminaire en turbulente stroming, zie figuur 2.1. Er is ook een overgangsfase tussen deze twee typen stromingen [25].

Een turbulente stroming bestaat uit onregelmatig fluctuerende wervels en lijkt chaotisch en onvoorspelbaar. Hoge snelheden komen tot dicht bij het oppervlak voor [16, 25], zie figuur 2.1. De oppervlakte structuur heeft dan ook invloed op de snelheid van de stroming, zie figuur 2.2. De turbulente stroming bestaat uit verschillende frequenties die, wanneer dit tot hoorbaar geluid leidt, hetzelfde brede frequentiespectrum heeft als het geluid die de stroming opwekt. Dit is hoorbaar als ruis. Bij een laminaire stroming beweegt elk deeltje zich in dezelfde richting, parallel De vloeistof bestaat uit vele oneindig dunne laagjes met dezelfde richting en snelheid die als het ware overelkaar heen schuiven [34] [25]. Wanneer zich echter in deze stroming een object bevindt, wordt de laminaire stroming onderbroken en kunnen er achter het object regelmatige wervels ontstaan. Het zijn de laminaire stromingen die vermeden dienen te worden omdat deze bij verstoring tonen kunnen genereren.



Figuur 2.1: Turbulente (a) en laminaire (b) stroming



Figuur 2.2: Snelheidsprofielen voor turbulente (a) en laminaire (b) stromingen

2.1 Definitie fluittonen

Het Standaard Woordenboek Nederlands definieert fluittoon als: “hoge, piepende toon, als ongewenst bijgeluid geproduceerd door elektrische apparaten”.

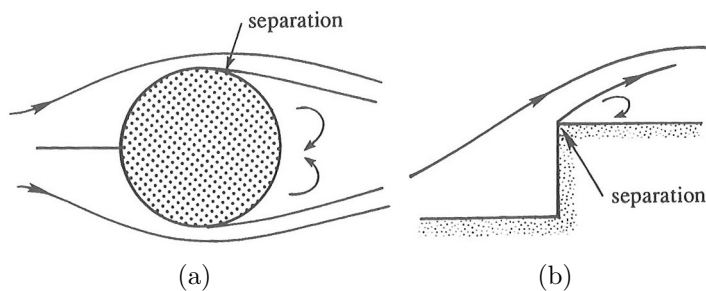
Fluittonen die ontstaan om gebouwen zijn een vorm van aerodynamisch geluid. Aerodynamisch geluid is een akoestisch fenomeen dat een bijproduct is van een stroming. Ze ontstaan expliciet niet door het trillen van objecten, hoewel deze het geluid wel beïnvloeden [19, 26]. Fluittonen opgewekt door trillende objecten, bijvoorbeeld draden, worden dan ook buiten beschouwing gelaten. De geluidproductie is onafhankelijk van de elasticiteitsconstante. Daarmee is het onafhankelijk van het materiaal, maar wel afhankelijk van de afwerking daarvan. [19]

De fluittoon is geluid met een tonaal karakter. Geluid van verschillende frequenties, ontstaan door de wind, wordt gedefinieerd als ruis. Ruis, een complexe toon, wordt in dit verslag buiten beschouwing gelaten. Met fluittoon of tonaal wordt in dit rapport bedoeld: *een aerodynamisch geluid met een hoge frequentie (>500Hz).*

2.2 Reynoldsgetal

Wanneer een object zich in een stroming bevindt is de stromingssnelheid achter het object lager dan om het object. Hierdoor ontstaat een lager drukgebied achter het object. Objecten in een niet viskeuze¹ stroming ($Re \ll 1$) ondervinden geen viskeuze effecten. Echter op enige afstand tot het object ondervindt de stroming een verandering ten gevolge van het object. Lokaal spelen viskeuze effecten dan wel een rol. De afstand tot het object waar de stroming verandering ondervindt wordt ook wel de grenslaag genoemd. Het is het gebied dat zorgt voor een "gladdeövergang van stilstaand stroming op het oppervlak tot hoofdstroomsnelheid op enige afstand van het object [34]. Bij een niet viskeuze stroming wordt een deel van de stroming aan de lijzijde het object teruggezogen naar het object. Dit is het geval bij een vertragende stroming aan het oppervlak van het object. In dat geval is de drukgradient van de hoofdstroming groter dan nul ($dp/dx > 0$). Bij een negatieve drukgradient over richting van de stroming kan 'loslating' van de stroming optreden, waardoor wervels ontstaan, zie figuur 2.3. Hoe groter het drukverschil hoe groter de kans op wervels.

De drukverschillen die zorgen voor de productie en het afbreken van wervels kunnen geluid produceren [25]. De lift² fluctuaties zijn verantwoordelijk voor de grondfrequentie, de drag³ fluctuaties kunnen enkel voor harmonische frequentie('s) zorgen, die, als ze voorkomen, van een veel lagere intensiteit zijn dan de grondfrequentie. [19, 25]



Figuur 2.3: Productie van wervels. 'Separation' is het punt van loslating van de stroming

¹Viscositeit: de mate van plakkerigheid van het medium, de mate van weerstand tegen vervorming.

²Lift: Engelse term gebruikt om het omhoog stromen van lucht te beschrijven.

³Drag: Engelse term gebruikt om de weerstand te beschrijven.

Niet in alle gevallen is zo'n wervelafschudding tonaal. Osborn Reynolds ontdekte in de 19e eeuw dat de soort wervelafschudding afhankelijk is van de volgende factoren:

- snelheid van de aanstroming,
- diameter van de karakteristieke dimensie van het object in de stroming,
- viscositeit van het medium.

Hij stelde hieruit de volgende formule samen [16]:

$$Re = \frac{U \times d}{\nu} \quad (2.1)$$

waarin

U	= snelheid van de aanstroming	(m/s)
d	= diameter van de karakteristieke dimensie	(m)
ν	= viscositeit	(m^2/s)

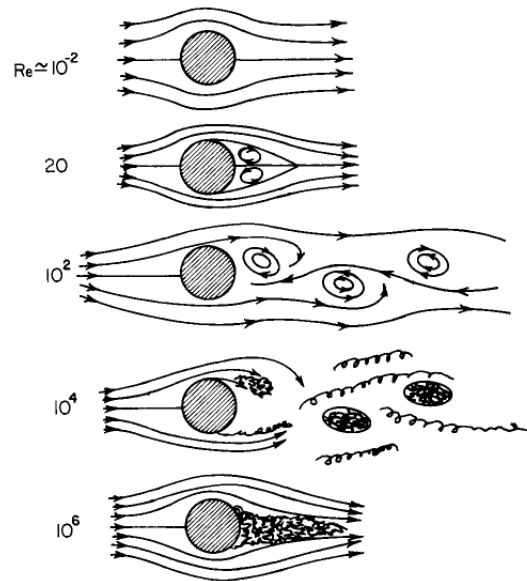
Hoe groter de snelheid en / of hoe groter het object, hoe groter het Reynoldsgetal. Een hoog Reynoldsgetal geeft een hoge mate van turbulentie achter het object aan. De volgende indeling kan er gemaakt worden [19]:

	$Re < 2000$	laminaire stroming
$2000 < Re < 4000$		overgangsgebied laminaire- naar turbulente wervelafschudding
$4000 < Re < 10^5$		turbulente wervels
	$Re > 10^5$	geheel turbulent

Bij een Reynoldsgetal tussen de 40 en de 150 treedt er een apart verschijnsel op. Het afschudden van de wervels gebeurt in deze laminaire stroming geheel periodiek, en wordt de 'Von Karman straat' genoemd. De 'Von Karman straat' kan in een medium van lucht in een hoorbare frequentie resulteren. In figuur 2.4 is te zien hoe deze Von Karman straat in het platte vlak kan ontstaan.

Vanaf een Reynoldsgetal van 150 kunnen er 'bursts' van turbulentie ontstaan verderop in de stroming, zie figuur 2.5 [19, 25], en tot een Reynoldsgetal van 10^5 kunnen er nog hoorbare frequenties in combinatie met ruis optreden.

Wanneer zich in een laminaire stroming een object bevindt kan dit voor een passieve of actieve onderbreking zorgen. Bij een passieve onderbreking

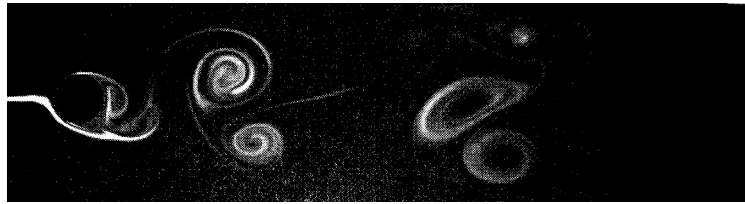


Figuur 2.4: Reynolds getal van de stroming, middelste stroming betreft ‘Von Karman straat’

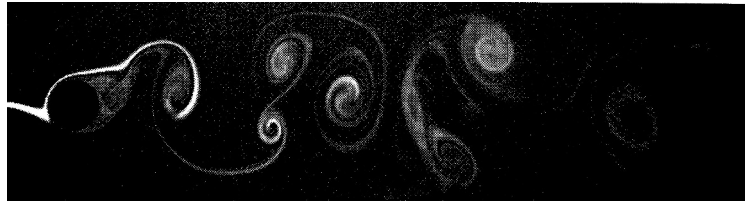
bevindt een object zich in de stroming en kunnen daarachter wervels ontstaan. Bij een actieve onderbreking reageert het object op de periodieke wervelafschudding door mee te trillen in de frequentie van afschudden. Deze trilling veroorzaakt extra wervels wat de periodieke wervelafschudding versterkt [35]. Of dit principe optreedt, hangt er onder andere van af of er resonantie optreedt in de eigenfrequentie van het object.

2.3 Resonantie

Een object in een laminaire stroming zorgt voor een verstoring van deze stroming achter het object. Door een regelmatige aanstroming, kan ook de verstoring achter het object regelmatig zijn. Een periodieke wervelafschudding kan dan ontstaan. Al in de jaren 20 werd ontdekt dat de tonen die ontstaan dezelfde akoestische frequentie hebben als de frequentie van wervelschudden [14, 26]. Wanneer de eigenfrequentie van het object in de buurt ligt van de eigenfrequentie van de periodieke wervelafschudding, zal deze in de eigenfrequentie mee gaan trillen en de wervelafschudding versterken. De eigenfrequentie van een object is bijvoorbeeld zichtbaar bij een slinger. Ongeacht de uitwijking (amplitude) zal de periode die de slinger over 1 beweging doet gelijk zijn. Een slinger met een andere lengte zal een andere periode



(a)



(b)

Figuur 2.5: Twee momentopnames van stroming achter een cilinder bij $Re=1000$

ofwel een andere eigenfrequentie hebben. Ook een holte heeft een eigenfrequentie. Wanneer een kurk uit een fles wordt getrokken geeft dit een geluid in een bepaalde frequentie. Het oorspronkelijk volume in de fles wordt samen gedrukt door de extra lucht die nu de fles in stroomt. Het geluid dat hoorbaar is, is de lucht die heen en weer in de buis / holte beweegt. Deze luchttrilling geschiedt in de eigenfrequentie van de buis [32].

Resonantie is het meetrillen van een object in de eigenfrequentie. Wanneer het object wordt aangetrild door een bepaald frequentiegebied heeft het vrijwel geen weerstand en gaat meetrillen. Bij resonantie krijgt de trilling impuls op het juiste moment [4, 32]. Het onderdrukken van resonantie is erg lastig. Het is een uiting, geen oorzaak. Wanneer het resoneren op een plek wordt tegengegaan, zal de achterliggende bron blijven trillen en hiermee op andere plekken weer materialen laten meetrillen.

Omdat het drukverschil voor hoorbare frequenties groot genoeg moet zijn, speelt resonantie vaak een rol. Een trillende snaar verplaatst weinig lucht, maar door een klankkast in de buurt van deze snaar gaat de lucht in deze klankkast meetrillen. Het drukverschil is nu groter en daardoor het geluidsniveau hoger. Hetzelfde geldt voor een stemvork. Aangeslagen produceert hij een laag geluidsniveau. Wordt de stemvork echter op een tafel of andere klankkast, geplaatst dan zal het blad gaan meetrillen. Het blad met een groot

oppervlak, zorgt voor een groot drukverschil, en daarmee een luide toon. De totale energie die de stemvork produceert zal niet veranderen. Wanneer het geluidsniveau toeneemt, zal de tijdsduur waarover hij klinkt korter zijn [32]. Dit effect treed ook op bij een muziekdoosje. In de hand is deze amper hoorbaar. Wordt het muziekdoosje op tafel gedraaid, dan zal de tafel meetrillen en de tonen versterken. De oplettende luisteraar zal echter horen dat niet alle tonen evenveel versterkt worden, verschillende tonen worden namelijk in verschillende mate versterkt door resonantie [32]. Dit wordt ook wel “improving effect” genoemd. Dit versterkende effect treedt niet direct op, het kost tijd om het versterkende object in trilling te brengen. Dit wordt ook wel ‘starting transient’ genoemd [32].

Wanneer de eigenfrequentie van een object in de buurt ligt van de frequentie van wervelafschudden, zullen deze elkaar gaan versterken. Resonantie kan op verschillende manieren optreden. Holtes in de buurt van wervelafschudding fungeren als klankkast. Versterking kan ook optreden door herhaling van dezelfde objecten bij elkaar. Achter elke rib van een rooster ontstaat dezelfde periodieke wervelafschudding, deze wervels versterken elkaar tot grotere amplitudes.

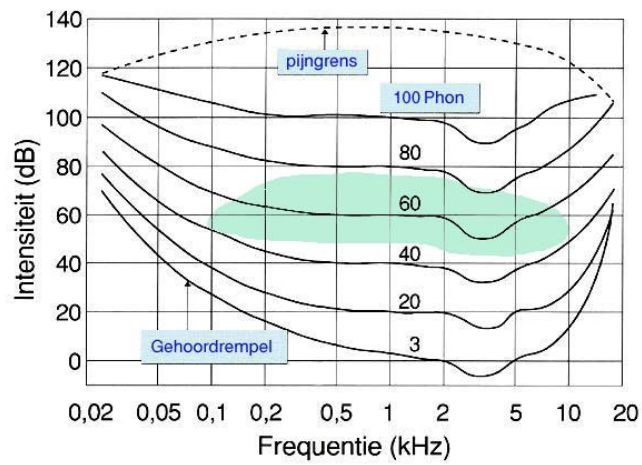
2.4 Strouhalgetal

Of periodieke wervelafschudding hoorbaar geluid produceert hangt, naast dat er genoeg drukverschil moet zijn, af van de frequentie van afschudden. Deze moet in het voor mensen hoorbare gebied liggen. Het menselijke oor is gevoelig voor frequenties (groveweg) tussen de 100 Hz en 10.000 Hz, zie figuur 2.6. Een parameter waarmee de frequentie bepaald kan worden is het Strouhalnummer. Deze akoestische parameter geeft het verband tussen frequentie, stromingsnelheid en dimensie van een object via [28]:

$$St = f \frac{d}{U} \quad (2.2)$$

waarin		
f	= frequentie	(Hz)
St	= Strouhalgetal	(-)
U	= lichtsnelheid	(m/s)
d	= dimensie van het object	(m)

De frequentie van wervelafschudding is gelijk aan de akoestische frequentie, en kan via het Strouhalgetal bepaald worden. Het Strouhalgetal kan



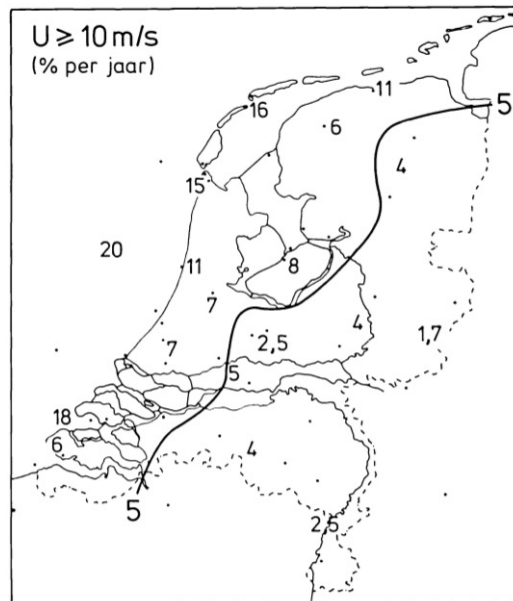
Figuur 2.6: Gevoeligheid van het menselijk oor

gebruikt worden om stromingen te vergelijken. In plaats van oplopende frequenties, worden verschillende Strouhalgetallen vergeleken. Factoren zoals lichtsnelheid en object dimensie worden in het Strouhalgetal meegenomen. Er hoeft niet meer voor deze factoren gecorrigeerd te worden.

Hoofdstuk 3

Windklimaat in Nederland

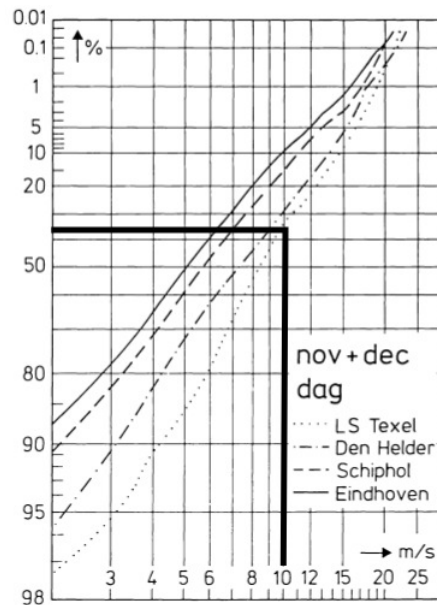
Om fluittonen te kunnen produceren is het van essentieel belang dat er naast een laminaire aanstroming een hoge luchtsnelheid is. Dit heeft alles te maken met de bebouwing en de structuur van het landschap.



Figuur 3.1: Percentage winduren >10 m/s

De kritische grens om fluittonen te produceren, 10 m/s, wordt in Nederland gemiddeld 5% van het jaar overschreden, zie figuur 3.1. Dit loopt op tot 40% van de tijd in november en december, zie figuur 3.2. 10 m/s is windkracht 6 en wordt door het KNMI aangeduid als ‘krachtig, wind fluit in draden’ [37]. De windkracht is echter een gemiddelde windsnelheid gemeten

over 10 min, op 10 meter hoogte in het open veld [10]. Pieken van 10 m/s kunnen al bij lagere windkrachten ontstaan. Bovendien beïnvloed ook de lokale omgeving de windsnelheid, zie figuur 3.3 [11]. Over het algemeen is de windsnelheid in de stad, tussen gebouwen en aan de gevel, lager dan in het open veld. Plaatselijk kan echter ook een hogere windsnelheid ontstaan in de stad. Dit kan gebeuren wanneer lucht door smallere openingen wordt gedwongen en er “windstraten” ontstaan. Wanneer tussen obstakels de afstand minimaal 12x de obstakel hoogte betreft, kan weer gesproken worden van een open ruimte [37].



Figuur 3.2: Percentage van de tijd met windsnelheden >10m/s overdag in de winter

Alle gevelelementen die zich op plekken bevinden waar windsnelheden boven 10 m/s niet kunnen optreden, bevinden zich buiten de gevarezone voor fluittonen.

3.1 Bebouwde omgeving

Gevelementen¹ *buiten de bebouwde omgeving* zijn gevelementen die vallen in ruwheidsklasse 1 (zee) t/m 6 (zeer ruw) van het KNMI. De ruwheidsklasse geeft aan hoe ruw het landschap is. Buiten de bebouwde omgeving vallen grofweg alle gebouwen omgeven door open ruimten van 12 maal de obstakelhoogte of meer, in minimaal één windrichting. De heersende windsnelheid heeft hier een afwijking van niet meer dan 20% vergeleken met het open veld. Zowel bebouwing aan het strand als hoogbouw vallen hier (deels) onder.

Gevelementen die zich *tussen de bebouwde omgeving* bevinden, zijn gevelementen die vallen in ruwheidsklasse 7 (gesloten) en 8 (stadskern). De windsnelheid tussen de bebouwde omgeving is gemiddeld 35% lager dan de heersende windsnelheid in het open veld.

Bebouwing en natuurlijke obstakels hebben grote invloed op de windsnelheid, zie figuur 3.3. Er zijn gebieden in Nederland waar de gemiddelde windsnelheid tot 30% lager ligt dan boven geheel vlak terrein [10]. “Een geheel open vlakte” zijn de meest open gebieden aan land (zoals weilanden) met een beschuttingsfactor 1,00. Via de beschuttingsfactor kan een indicatie verkregen worden van de heersende lokale windsnelheid [10].

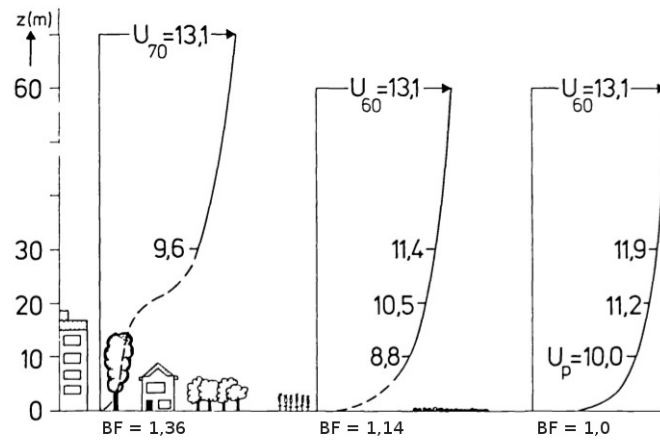
$$U_{lokaal} \approx \frac{U_{windkracht}}{BF} \quad (3.1)$$

waarin

$$\begin{aligned} U_{lokaal} &= \text{de heersende lokale windsnelheid} && (\text{m/s}) \\ U_{windkracht} &= \text{heersende windsnelheid in open veld} && (\text{m/s}) \\ BF &= \text{beschuttingsfactor} && (-) \end{aligned}$$

De meest windstille gebieden (rond de 30% lagere windsnelheden) zijn stedelijke, of in het zuiden heuvelachtige, gebieden. Zoals eerder benoemd kan de lokale windsnelheid in een stedelijk gebied ook toenemen. Dit gebeurt tot 30% in de buurt van de smalste opening tussen loodrecht ten opzichte van elkaar geplaatste bebouwing [12,13]. In steden met een gemiddeld 30% lagere windsnelheid kan plaatselijk dus een 30% hogere windsnelheid optreden ten gevolge van bebouwing. Hieruit volgt dat aan de hand van pure geografische locatie geen uitsluiting kan worden gegeven voor windgeluid. Echter tussen de bebouwde omgeving zijn er zoveel obstakels dat nabij de grond alleen nog luwtegebieden en wervels optreden. Dit wordt ook wel gesloten ruwheid

¹Bouwwerken kunnen zich deels binnen en deels buiten de bebouwde omgeving bevinden (bv hoogbouw). Er wordt dan ook besproken waar een gevelement zich bevindt.



Figuur 3.3: Beschuttingsfactor

genoemd [37]. Er is hier vrijwel geen laminaire stroming. Fluittonen kunnen dan alleen nog ontstaan bij bebouwing aan de rand van de bebouwing en bij extreme windsnelheden.

Hoofdstuk 4

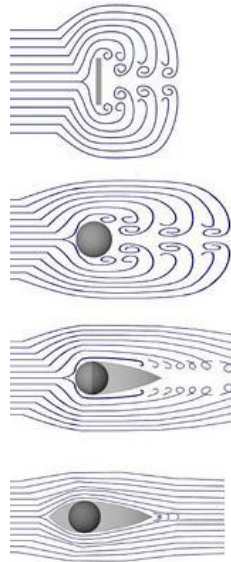
Aerodynamica van eenvoudige vormen

Periodieke wervelafschudding, zoals in hoofdstuk 2.2 beschreven, kan voor fluittonen zorgen. Het is van belang te weten wat naast een laminaire aanstroming van invloed is voor deze wervelafschudding. Het is van belang te weten bij welke vormen deze wervelafschudding optreedt en welke factoren dit beïnvloeden. Hiervoor is het van belang om te weten welke basis vormen voor periodieke wervelafschudding kunnen zorgen. Vanuit dat punt kan verder worden gekeken welke gevelement beken welke een potentieel risico vormen voor fluittonen.

4.1 Stroomlijning

Drukverschillen zorgen voor productie van wervels, zie figuur 2.3. De loslating van de stroming en de vorm van de zog worden sterk bepaald door het reynoldsgetal. Slanke en gestroomlijnde objecten veroorzaken een kleiner snelheids verschil en daardoor een kleiner drukverschil. Bij een kleiner drukverschil is de kans op loslating van de storming kleiner. Een stroming achter een gestroomlijnd object ondervindt minder drukverschil dan een stroming achter een object met scherpe hoeken of randen. Hierdoor ontstaan er minder en kleinere wervels en daarmee vermindert de kans op ontwikkeling van de tonale 'Von Karman straat'. Over het algemeen geldt: hoe groter het drukverschil hoe sneller er wervels zullen ontstaan en hoe sneller deze wervels elkaar ook opvolgen [31]. Figuur 4.1 laat zien dat de wervels die ontstaan achter minder gestroomlijnde objecten een groter drukverschil, ofwel amplitude, creëren (hoogte van de wervel). Langere objecten, zoals de on-

derste twee figuren, creëren naast minder drukverschil ook wervels die elkaar minder snel opvolgen (lagere frequentie) (in de figuur 4.1 en figuur 4.7 zijn ze zichtbaar als langere wervels).



Figuur 4.1: Ontstane wervels bij verschillende vormen in een laminaire stroming. De aard van de wervels is afhankelijk van het Reynoldsgetal. Voor kleine Reynoldswaarden (gestroomlijnde objecten zoals de onderste figuren) is het wervelgebied kleiner. Deze objecten creëren minder wervels.

4.2 Cilinder

Via experimenten is aangetoond dat het Strouhalgetal gelijk is aan 0,21 voor cilinders met een Reynoldsgetal tussen de 80 en 200. Verder geldt voor cilinders als bepalende dimensie de diameter van het object.

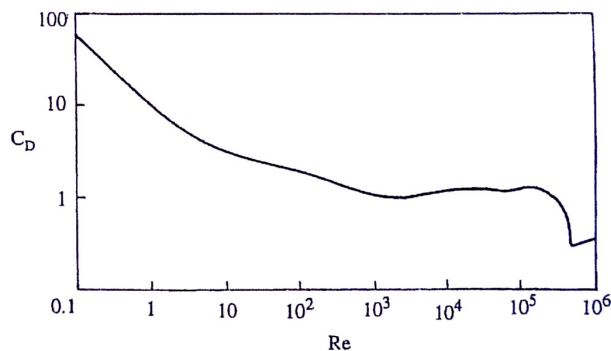
$$f = 0,2 \frac{U}{d} \quad (4.1)$$

Om een frequentie van afschudding van boven de 500Hz te krijgen, is een windsnelheden van $>10\text{m/s}$ (windkracht 9) nodig in combinatie met een diameter van de draad van 4mm of kleiner. Het afronden van randen tot een straal van enkele millimeter zal dan ook de meeste fluittonen stoppen. Een draad in de wind kan echter ook door trilling geluid produceren maar valt

niet onder de in dit onderzoek onderzochte fluittonen.

4.3 Cilinder met ruwe oppervlaktestructuur

De stroming om een object heeft te maken met een grenslaag. Bij een ruw object wordt de stroming om het object turbulent. De stroming en de grenslaag blijven langer om het object ‘plakken’. De loslating van de grenslaag vindt later plaats, zie figuur 4.4. Er ontstaan vele kleine drukfluctuaties om en achter het object in plaats van enkele grote drukverschillen achter het object in de zog, zie figuur 4.3. Een turbulente stroming bezit in de buurt van de wand meer impuls in de richting van de stroming. Dit leidt tot meer en kleinere wervels. Het geluid dat nog kan ontstaan heeft een lagere intensiteit (minder drukverschil) en bestaat (vrijwel) geheel uit ruis (turbulente stroming).

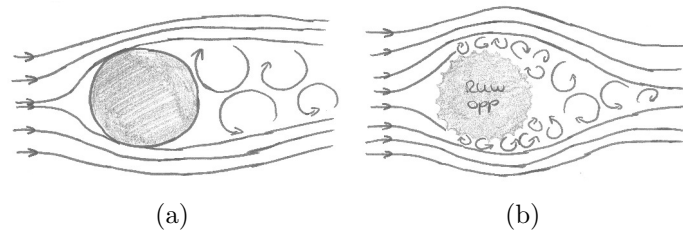


Figuur 4.2: Weerstandscoefficient C_D als functie van Re voor een cilinder.

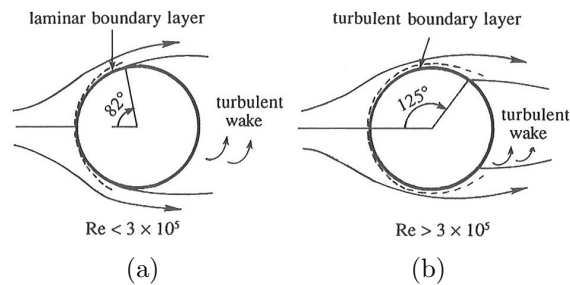
Dat een turbulente stroming om een cilinder voor minder drukverschil zorgt toont figuur 4.2. Bij een Reynoldsgetal van rond de 3×10^5 meer dan halveert de luchtweerstand ten gevolge van het turbulent worden van de stroming.

4.4 Kubus

Hoe minder gestroomlijnd een object of kubus is hoe hoger het Strouhalgetal, zie figuur 4.5. Een hoger Strouhalgetal zorgt, onder verder gelijke omstandigheden als diameter en stroming, voor een hogere frequentie van afschudden, zie hoofdstuk 2.2 en figuur 4.6. Ook het kantelen van de kubus

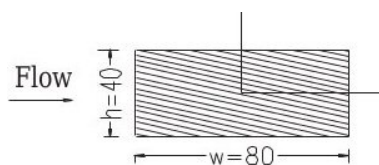


Figuur 4.3: Cilinder met een glad (a) en een ruw (b) oppervlak in een laminaire stroming. Een (kunstmatig) gedeukt oppervlak geeft minder drukverschil.



Figuur 4.4: Cilinder in laminaire en turbulente stroming

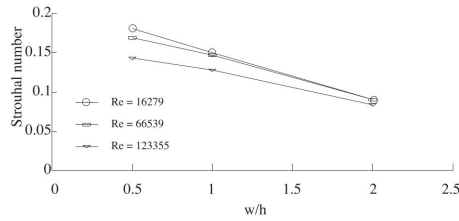
heeft effect op de ontstane drukverschillen. Een kubus onder een hoek van 10° ondervindt meer wrijving dan bij een rechte aanstroming, en produceert grotere wervels [31].



Figuur 4.5: Van een kubus met verschillende afmetingen wordt het Strouhalgetal bepaald

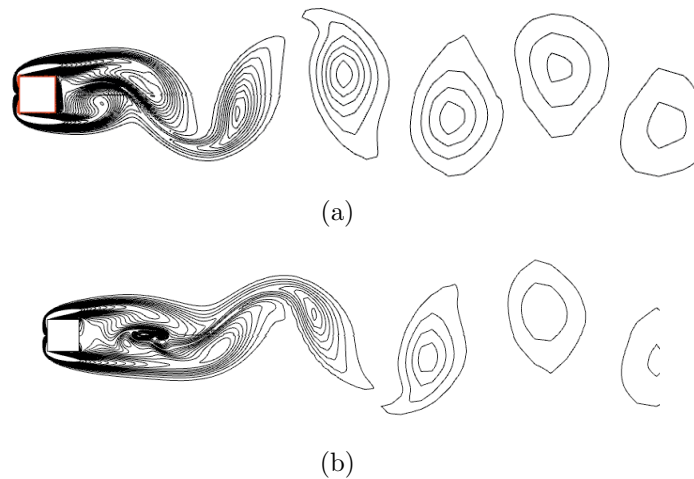
4.5 Kubus met kleine plaat aan de zijde

Aangezien het van belang is periodieke wervelafschudding te voorkomen worden methoden bekeken om deze te ontregelen. Wanneer een klein object zich



Figuur 4.6: Stroomlijning vs Strouhalgetal, hoe hoger ($\frac{w}{h}$) hoe gestroomlijnder het object

aan de zijzijde van het object bevindt, zal het de wervelafschudding niet geheel verstoren. De stroming kan echter niet direct tot een periodieke wervelafschudding komen. De verstoring van een klein object zal leiden tot een lagere frequentie van afschudden (zie figuur 4.7).

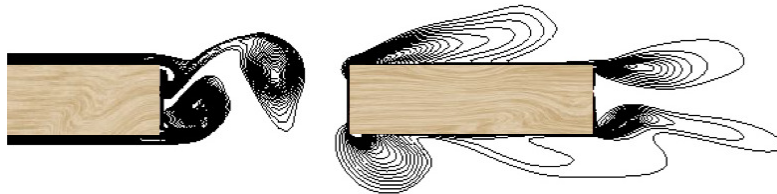


Figuur 4.7: Kubus in laminaire stroming (a) en een kubus met een kleine plaat aan de zijzijde in dezelfde stroming (b). Figuur b leidt tot een lagere frequentie en een lagere intensiteit.

4.6 Verstoren van de stroming

Wanneer twee objecten van gelijke afmeting zich in elkaars stroming bevinden, zullen deze elkaars stroming beïnvloeden. Bij een laminaire aanstroming zal achter de eerste kubus periodieke wervelafschudding ontstaan. Op de plek waar periodieke wervelafschudding wil plaatsvinden zit echter nog

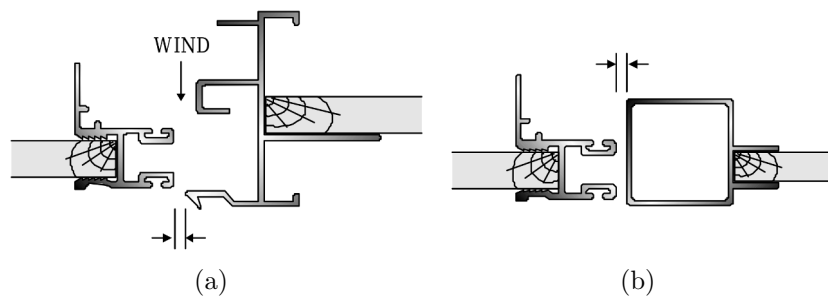
een object. De periodieke wervelafschudding kan daardoor niet voortgezet worden, zie figuur 4.8. Het rechter object beïnvloedt de afschudding van het linker object. Deze wordt echter direct verstoord door de tweede kubus. De tweede kubus heeft geen laminaire aanstroming, het aanstroombroefiel is verstoord. Doordat het object nu onregelmatig aangestroomd wordt, is ook de wervel afschudding onregelmatig. Zie figuur 4.8, het rechter object. [17]



Figuur 4.8: Twee objecten verstoren elkaars stroming

4.7 Spleten

Bij spleten in gevelelementen ontstaan drukverschillen achter deze spleten. Wanneer de spleet over de lengte doorloopt kunnen de drukverschillen elkaar versterken. Of deze wervels fluittonen produceren hangt af van onder andere de dikte van het materiaal van de spleet en de afwerking van de randen. Voor spleten met een materiaaldikte van enkele centimeters en scherpe randen blijkt de geproduceerde frequentie voorspelbaar aan de hand van het Strouhalgetal. Via het Strouhalgetal (fd/u) geldt hoe groter de diameter van de spleet hoe hoger de windsnelheid moet zijn voor het creëren van fluittonen. Ook geldt hoe smaller de spleet hoe hoger de frequentie. Bij het afronden van de hoeken van de spleet met enkele mm verdwijnen de fluittonen. [30]



Figuur 4.9: Kozijn met scherpe randen (a) en kozijn met afgeronde randen (b). Alleen de spleten met scherpe randen produceren fluittonen.

Hoofdstuk 5

Wind om gebouwen

Gebouwen kunnen elementen bevatten waarachter bij wind wervels kunnen ontstaan. Nu de fysische principes bekend zijn, gaat in dit hoofdstuk gekeken worden wat dit voor gebouwen en bouwwerken betekent.

5.1 Spijlen

Een cilinder in een laminaire stroming is het schoolvoorbeeld voor het ontstaan van de tonale ‘Von Karman straat’ (zie hoofdstuk 2.2 en figuur 5.1). In een windtunnel werd 1 spijl van 6mm aan het fluiten gebracht bij snelheden van 15 m/s, 19 m/s en 26 m/s. De piekfrequenties die optraden waren meer dan 20dB luider dan het ontstane achtergrond geluid. Bij meerdere spijlen die elkaars wervelafschudding versterken zal dit niveau hoger liggen. [33]



Figuur 5.1: Periodieke wervelafschudding

Wanneer er drie dimensionaal gekeken wordt naar het afschudden van wervels rond een cilinder blijkt dat de afschudding niet over de gehele lengte in fase verloopt. Aan de ene kant begint het afschudden een fractie eerder dan aan de andere zijde. Dit blijft periodiek hetzelfde. [19]

5.2 Spleten

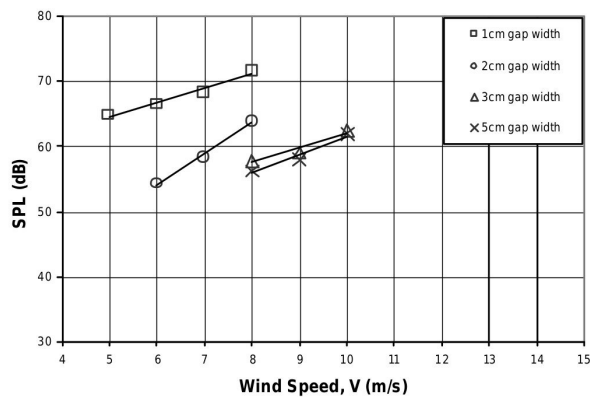
Spleten zijn een ideale plek om drukverschillen te creëren. Wanneer de spleet over enige lengte doorloopt kunnen de drukverschillen elkaar versterken. Bij onderzoek naar fluittonen door kozijnspleten is het Strouhalgetal (fd/u) gevarieerd van 0,6 - 1,6 door het veranderen van de spleetbreedte en de windsnelheid waarbij een Strouhalgetal van 0,8 voor de luidste tonen zorgde. Wanneer randen werden afgerond (zie figuur 4.9) verdwenen de fluittonen. Bij het kozijn met scherpe randen zorgde een spleet van 1cm al bij een windsnelheid van 5m/s voor fluittonen. Hoe groter deze spleet werd gemaakt hoe hoger de benodigde windsnelheid voor het ontstaan van fluittonen (zie figuur 5.2). Ook is een omgekeerd exponentieel verband te vinden tussen de geproduceerde frequentie en de breedte van de spleet. Hoe smaller de spleet hoe hoger de frequentie (zie figuur 5.3). [30]

Dit verband is ook te vinden bij geperforeerde platen. Figuur 5.4(a) laat zien dat bij 8mm diameter de luidste tonen van ruim 70dB ontstaan bij een windsnelheid van 15m/s met een frequentie van rond de 2000Hz. Figuur 5.4(b) heeft de hoogste geluidproductie ook bij de hoogste windsnelheid. Echter is deze geluidproductie bij vrijwel alle frequenties even hoog, en daarmee hoorbaar als ruis. Een fluittoon ontstaan bij een windsnelheid van 9m/s met een frequentie van rond de 1000Hz en een luidheid van 60dB. Dit komt overeen met de theorie. Hoe groter het gat, hoe lager de frequentie van afschudden en hoe kleiner de amplitude en daarmee het geluiddrukkniveau. Bij perforaties met een diameter >2 cm werd alleen nog geluid geproduceerd in de vorm van ruis, het zelfde gold voor een windsnelheid <9 m/s. In een enkel geval ontstonden er zachte fluittonen (ongeveer 45dB), bij een windsnelheid van 6m/s.

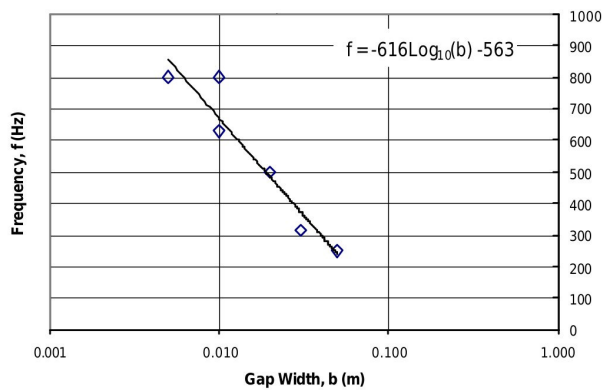
5.3 Roosters

Bij overlast door fluittonen, zijn hiervan vaak roosters de oorzaak. Verschillende adviesbureaus zijn in de loop van de jaren ingeschakeld om naar aanleiding van overlast onderzoek te doen. Het afstudeerverslag van J. Ploemen [29] en onderzoeken van de ingenieursbureaus Peutz en DGMR komen tot conclusies over hoe tonaal geluid ontstaat en waardoor het beïnvloedt wordt.

Tonaal geluid ontstaat:



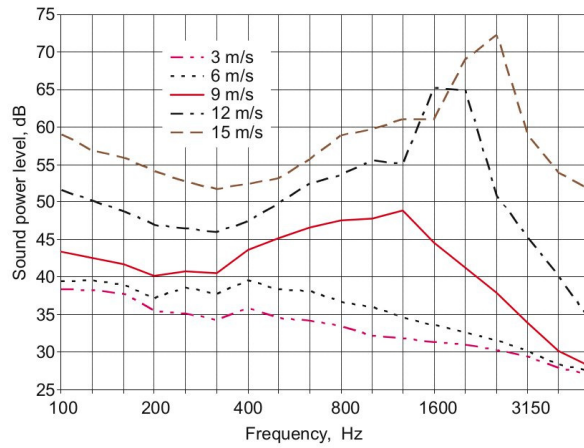
Figuur 5.2: Per spleet-breedte wordt de kritische windsnelheid gegeven vanaf wanneer er fluittonen ontstaan. Hoe groter de windsnelheid hoe groter de windsnelheid moet zijn voordat er fluittonen ontstaan.



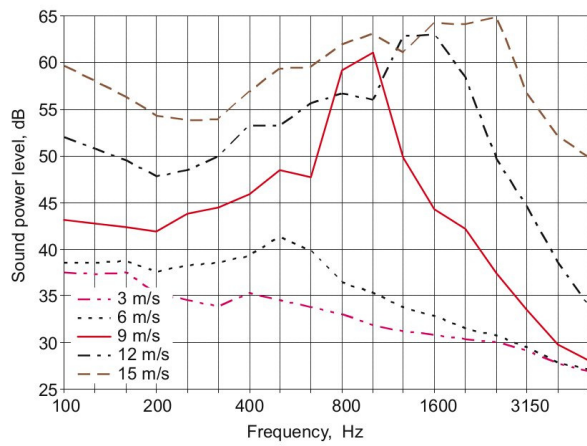
Figuur 5.3: Spleet breedte versus frequentie voor een windsnelheid van 8m/s. Voor de ontstane fluittonen geldt hoe smaller de spleet hoe hoger de frequentie.

- vanaf een **luchtsnelheid** van 8 m/s [21]
- bij een **herhaling** van minimaal 9 lamellen [21]; herhaling lijkt verantwoordelijk voor fluittonen [20]
- het luidst bij **langsscherende lucht** aan het rooster, $26^\circ < \alpha < 38^\circ$ (tot 112 dB bij 1 m² rooster oppervlak) [20, 28, 36]
- bij een **hart op hart afstand** van de lamellen van maximaal 50 mm, kunnen fluittonen ontstaan [20, 21, 36]

Het geluid wordt beïnvloed door:



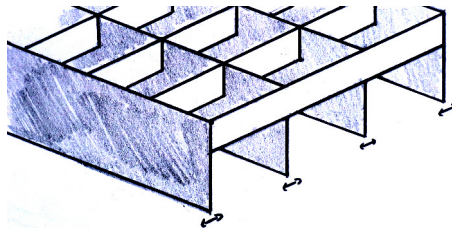
(a)



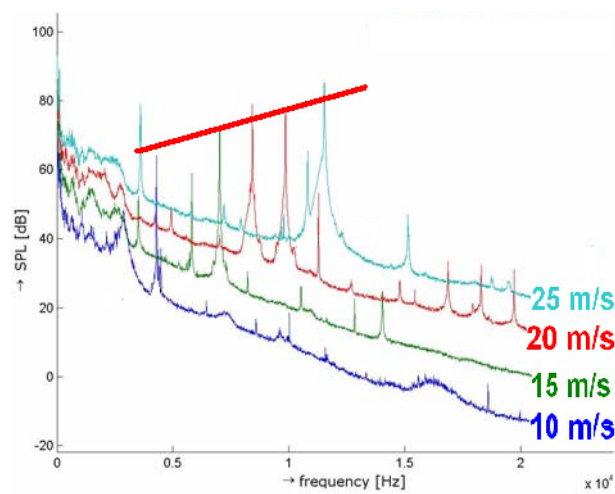
(b)

Figuur 5.4: Ontstane geluidproductie bij een plaat met perforaties van 8mm diameter (a). Ontstane geluidproductie bij een plaat met perforaties van 12mm diameter(b). Elke spleet-breedte heeft een specifieke luchtsnelheid waarbij fluittonen het meest efficiënt ontstaan. Een hogere luchtsnelheid zorgt dan nog niet per definitie voor een luidere fluittoon.

- de hoogte van de **draagstaven**; door hun hoogte steken ze uit het rooster en trillen ze mee met het geluid, zo beïnvloeden ze de luidheid zie figuur 5.5 [21, 36].
- de luchtsnelheid; in bepaalde omstandigheden geldt hoe hoger de windsnelheid hoe hoger het geluidniveau. Echter bij sommige **verhogingen van de snelheid** bleef het **geluiddrukniveau constant** maar verhoogde de frequentie door andere harmonische trillingen tussen het staal, zie figuur 5.6 [20, 21, 36].
- de **scherpte** van de randen aan het rooster; het afplakken, schuren, of verven van de randen van het rooster verlaagde het geluidsniveau of stopte de fluittonen geheel [20, 36].
- **verstoring** van het aanstroomprofiel; door het verstoren door middel van een net of object voor het rooster, verminderde de luidheid sterk of verdwenen de fluittonen geheel [20, 21, 28].
- de **snelheid** en de **frequentie** van de tonen; de piekfrequentie (fluittoon) is vrijwel even luid bij elke aanstroomsnelheid, zie figuur 5.6. Het Strouhalgetal is voor deze piek frequenties niet van toepassing. [20, 21]
- het doorbreken van de **regelmaat** stopt de fluittonen [36]; omgekeerd worden tonen versterkt door regelmaat [24].
- de **totale energie** voor als achter het rooster moet gelijk zijn [36]; een verandering in snelheid moet daarom zijn omgezet in een andere vorm van energie zoals warmte, trilling of geluid.
- **aanstroomhoek**; het veranderen van de stromingsrichting doet de tonen dempen of geheel stoppen [36].



Figuur 5.5: Hoogte van de draagstaven beïnvloed wervelafschudding. Door mee te trillen kunnen ze de wervels versterken.



Figuur 5.6: Verhoging van de windsnelheid kan of voor een verhoging van het geluiddrukkniveau zorgen of voor een verhoging van de frequentie. Bij de stappen in windsnelheid hier, vindt zowel de verhoging in geluiddrukkniveau als een verhoging in frequentie plaats (zie de rode lijn door de piekfrequenties). Ook is hier duidelijk zichtbaar dat de fluittoon (de rode lijn) een veel efficiëntere geluidsproducent is dan de turbulente ruis, zoals de rest van de lijn aangeeft.

Hoofdstuk 6

Geluidsreductie

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op methoden om fluittonen te voorkomen of in geluidssterkte te verminderen. Er wordt gekeken naar de mogelijkheden die er zijn, en welke van deze mogelijkheden er momenteel in de praktijk gebruikt worden.

6.1 Methoden voor geluidsreductie

In het algemeen geldt voor geluidsreductie (in volgorde van effectiviteit) [4, 27]: (1) bron wegnemen, (2) bron afschermen, (3) ontvanger afschermen.

De bron van fluittonen wegnemen betekent de wind of de periodieke wervelafschudding wegnemen [4, 24, 38].

Het afschermen van de bron vermindert het geluidniveau. Het verminderen van het geluidniveau omvat methoden om te voorkomen dat de wervels die ontstaan worden versterkt. Dit betekent het voorkomen van resonantie, het creëren van een lagere lichtsnelheid en het voorkomen van grote drukverschillen.

Het afschermen van de ontvanger is geen onderwerp van dit onderzoek - het is immers haalbaar om bouwwerken fluitstil te krijgen- en zal niet verder worden behandeld.

Om fluittonen te voorkomen moeten de dominerende oorzaken (periodieke wervelafschudding en groot drukverschil) voorkomen worden. Dit kan door verschillende ingrepen.

6.1.1 Voorkomen van periodieke wervelafschudding

Er zijn verschillende methoden om periodieke wervelafschudding te voorkomen of te onderdrukken. Alle hebben als doel de laminaire stroming om te zetten naar een turbulenter stroming. Drie toepasbare methoden zijn:

- het verruwen van de oppervlaktestructuur. Het verruwen zorgt voor een turbulente stroming om het object (zie hoofdstuk 4.1). De grove en wisselende structuur dient in de orde van grootte te zijn van de ruwheid van een rugby- of golfbal.
- het verstoren van het aanstroomprofiel (zie hoofdstuk 4.2). Verstoring kan gedaan worden door direct voor het fluitende object andere objecten te plaatsen. Aangezien dit voor alle objecten moet gebeuren is een net of gaas het meest toegepast.
- het verstoren van de achterzijde van de stroming (zie hoofdstuk 4.2). Verstoring kan gedaan worden door direct achter het fluitende object andere objecten te plaatsen. Aangezien dit voor alle objecten moet gebeuren is een net of gaas het meest toepasbaar. Voordeel van verstoring aan de achterzijde is dat het vaak minder zichtbaar is.

6.1.2 Voorkomen van grote drukverschillen

Een groot druk verschil versterkt de wervelafschudding, en dit versterkt weer de amplitude van het geluid. Om grote drukverschillen te voorkomen zijn vier toepasbare methoden belangrijk om te benoemen. Deze methoden zijn:

- zorgen voor een onregelmatige rooster afmeting. Door regelmaat versterken dezelfde wervels elkaar in dezelfde mate, wat eerder en tot fluittonen leidt en tot hogere geluiddrukkniveaus. Het doorbreken van regelmaat kan de tonen zelfs geheel stoppen.
- Een regelmaat van minder dan 9 keer dezelfde afstand stoppen de fluittonen. Het is om die reden aan te bevelen om gelijkmatige repetitie te vermijden. Door het opvullen van holten vermijd je de repetitie geheel. Bovendien kunnen opgevulde holten in de buurt van fluitende objecten het geluid ook niet meer versterken.
- het vergroten van de diameter van spleten en van objecten. Door het vergroten van de hart op hart afstand vinden de wervelafschuddingen achter de objecten verder uit elkaar plaats. Op deze manier versterken ze elkaar in mindere mate. Er geldt: hoe grotere de diameter hoe

minder kans op versterking van de wervels. Voor spijlen geldt: hoe groter de diameter hoe lager de frequentie van afschudden. Voor ronde spijlen ontstaan bij diameters groter dan 8mm al geen hoogfrequente afschuddingen meer.

- het stroomlijnen van obstakels. Doordat de windrichting in de praktijk niet constant is, is het niet mogelijk een object geheel te stroomlijnen. Toch kunnen veranderingen van de stroomlijn, zoals het afronden van hoeken, de periodieke wervelafschudding onderdrukken.

6.2 Gekozen oplossingen van methoden voor geluidsreductie

In de praktijk worden fluitende elementen van gebouwen pas na oplevering geïdentificeerd. Deze elementen, veelal roosters, worden daarna geheel afgedekt door plaatmateriaal of netten. Ze worden pas na het constateren van hinder geplaatst en zijn daardoor over het algemeen niet de meest esthetische oplossing. Bovendien bieden netten als stromingsverstoorder geen volledige garantie tegen fluittonen. Ze verstoren het aanstroomprofiel van grotere objecten, maar bij hogere windsnelheden (≥ 25 m/s, \geq windkracht 10) kan er periodieke wervelafschudding achter de richels van het net ontstaan. Echter in de praktijk komen deze windsnelheden in combinatie met de juiste aanstroomhoek zelden voor waardoor het voor fluitbeperking toch een effectieve methode is.

Echter, het afdekken van elementen die fluittonen verstoren is niet de enige mogelijke oplossing. Enkele van de eerder beschreven methoden worden toegepast bij windturbines. Rotorbladen hebben smalle en afgeronde punten om het drukverschil en de wervels te verkleinen [39]. Bovendien zijn bij enkele windturbines stoorstrips toegepast voor een turbulente stroming om de bladen heen, wat het geluidniveau verlaagt [15]. Het toepassen van beschreven methoden op bouwwerken zal beschreven worden in het schema in hoofdstuk 8.

Hoofdstuk 7

Ontwerpregels

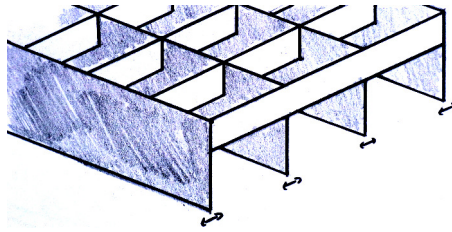
Er zijn twee soorten stromingen, turbulente- en laminairestroming. De turbulente stroming bestaat uit verschillende frequenties die, wanneer dit tot hoorbaar geluid leidt, hoorbaar zijn als ruis. Een laminaire stroming beweegt parallel. Fluittonen kunnen ontstaan wanneer een laminaire stroming onderbroken wordt en dit tot periodieke wervels leidt. Het is zaak deze periodieke wervels te voorkomen, te ontregelen of in ieder geval te voorkomen dat ze versterkt worden.

Algemeen kan gesteld worden dat fluittonen aan gevelelementen ontstaan door een combinatie van het volgende

- een windsnelheid van minimaal 6m/s (windkracht4), maar in de praktijk vanaf 10m/s (windkracht 6)
- herhaling van openingen (zoals bij roosters, zie figuur 7.1, of spijlen)
- scherpe hoeken en randen
- Hoe kleiner de spleten hoe meer kans op, en hoe luider de tonen. Het omslagpunt voor het produceren van tonen ligt bij roosterafstanden rond de 5cm. bij grotere spleten produceren ze alleen nog ruis.

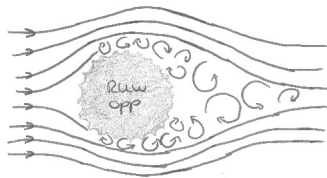
Het is hierdoor aan te bevelen:

- de stroming te verstoren door een ruwe en afwisselende oppervlakestructuur, zie figuur 7.2
- de stroming te verstoren door netten of object direct voor of achter het fluitend object te plaatsen, zie figuur 7.3

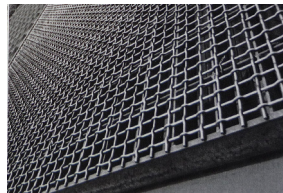


Figuur 7.1: Roosters.

- hoeken en randen af te ronden tot een afrondingsstraal van enkele millimeters
- een onregelmatige grootte van de openingen te kiezen, zoals een wisselende hart op hart afstand tussen de ribben in roosters of spijlen.



Figuur 7.2: Een ruw oppervlakte zorgt voor een turbulente stroming om het object.



Figuur 7.3: Netten over een object zorgen voor een verstoorte stroming.

In het algemeen kan de kans op windsnelheden ingedeeld worden in: in de stad, aan de rand van de stad, en buiten de bebouwde omgeving. Hieronder wordt beschreven wanneer op deze plekken kans op fluittonen aanwezig is.

In de stad:

In de bebouwde omgeving bestaat de wind voornamelijk uit wervels met lage windsnelheden. De kans op windsnelheden boven de 10m/s (windkracht 6, krachtige wind) in combinatie met een laminair aanstromingsprofiel is daardoor minimaal. Bij gebouwen die in 1 windrichting een open ruimte hebben

van ongeveer 10 maal de gebouw hoogte, kunnen bij hoge windsnelheden toch enigszins recht aangestroomd worden. Bij storm (vanaf 20-25m/s, windkracht 9-10) kunnen hier tonen ontstaan in combinatie met ruis. In de stad tussen de bebouwing hoeft geen rekening te worden gehouden met fluittonen.

Aan de rand van de stad:

Bebouwing aan de rand van de stad, zoals hoge torens en bebouwing op de grens van stedelijk en open gebied, vangt door zijn ligging gemiddeld 30% meer wind dan in de bebouwde omgeving. Wanneer het object en de aanstroom richting van de wind op zijn gunstigst zijn voor fluittonen, kunnen zachte fluittonen van rond de 45dB ontstaan bij windsnelheden van 6m/s (windkracht 4, matige wind). Harde fluittonen kunnen verwacht worden vanaf 10m/s (windkracht 6) in combinatie met een herhaling van openingen in de gevel met een diameter in ieder geval kleiner dan 5cm en met een scherpe afwerking van de randen. Bij extreme wind (windkracht 7-8) kunnen tonen ook verwacht worden bij grotere onderlinge afstand of afgeronde randen.

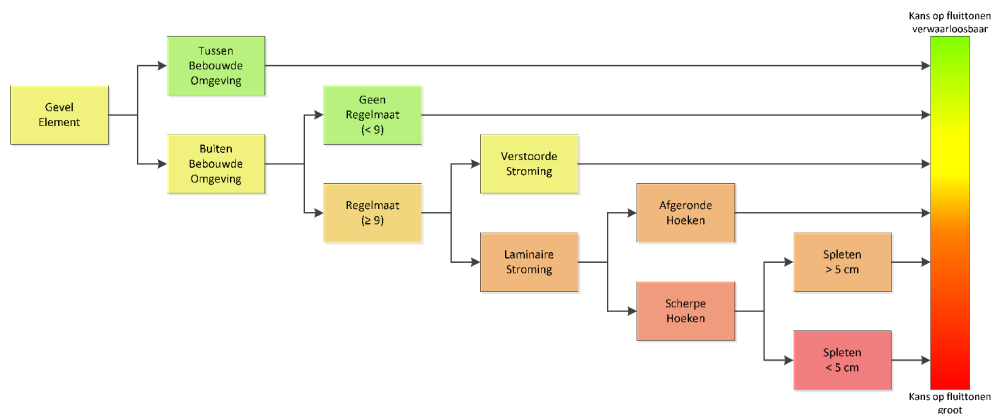
Buiten of ver boven de bebouwde omgeving:

Op plekken waar extreme windsnelheden van 20-25m/s (windkracht 9-10) geregeld voorkomen kunnen tonen langs alle spleten en scherpe randen ontstaan. Herhaling zal zorgen voor versterking van de luidheid. Extreme hoogbouw en bebouwing direct aan de kust kunnen geregeld met zulke windsnelheden te maken krijgen. Spleten met scherpe randen, en vooral een herhaling hiervan, moet te allen tijde vermeden worden.

Hoofdstuk 8

Model

Fluittonen kunnen ontstaan wanneer een laminaire (parallele) stroming wordt onderbroken en dit tot periodieke wervels leidt. Het is zaak deze periodieke wervels te voorkomen, te ontregelen of in ieder geval te voorkomen dat ze versterkt worden. In het volgende Model zijn invloedrijke factoren geordend. Het model verdeelt de gevelelementen van gebouwen in 4 zones, lopend van verwaarloosbare kans op fluittonen tot grote kans op fluittonen. Bij een grote kans op fluittonen zijn deze fluittonen te verwachten vanaf krachtige wind. Door de stappen te doorlopen wordt inzicht verkregen in de mogelijkheid tot het creëren van fluittonen om een gevelelement. De volgende vragen zijn de



Figuur 8.1: Model voor het bepalen van de kans op fluittonen. Groen: kans op fluittonen is verwaarloosbaar, rood: fluittonen zijn te verwachten.

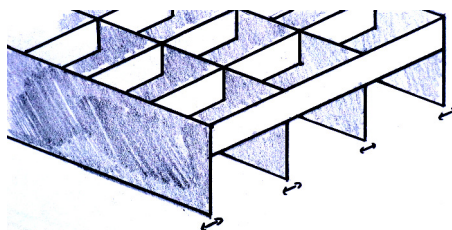
basis van het Model:

Vraag 1: Bevinden gevelelementen van het gebouw zich buiten de bebouwde omgeving?

In de bebouwde omgeving zijn er zoveel obstakels dat nabij de grond alleen nog luftegebieden en wervels optreden, er is hier vrijwel geen laminaire stroming. Fluittonen kunnen alleen nog ontstaan bij bebouwing aan de rand van de bebouwing en bij extreme windsnelheden. Buiten de bebouwde omgeving is bebouwing die vrij aangestroomd kan worden door wind en hierin weinig tot geen hinder ondervindt van andere bebouwing. Hieronder vallen gebouwen langs de kust of in een open veld. Ook bebouwing aan de rand van de stad en de bovenste delen van hoogbouw in de bebouwde omgeving vallen hieronder. In geval van twijfel kies de optie 'buiten de bebouwde omgeving'.

Vraag 2: Bestaan deze gevelementen uit een herhaling van minimaal 9 spleten van gelijke breedte?

Bij spleten in gevelementen ontstaan drukverschillen achter deze spleten. Wanneer de spleet over de lengte doorloopt kunnen deze drukverschillen elkaar versterken. Hetzelfde fenomeen treedt op bij een rij spijlen of roosters. Met herhaling wordt hier bedoeld 'een afwisselingen tussen open en gesloten delen in een gevelement'. Dit is het geval bij roosters, spijlen of gaas, zie figuur 8.2. De herhaling dient minimaal 9 maal met dezelfde diameter plaatst te vinden, langsscherend op een mogelijke windrichting. Een mogelijke windrichting is altijd parallel aan het grondvlak. Bij bruggen in nederland geldt over het algemeen dat een mogelijke windrichting alleen horizontaal is.



Figuur 8.2: Rooster.

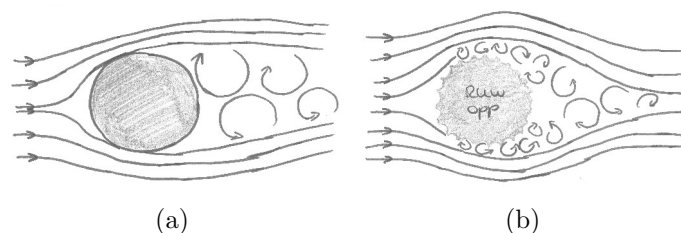
Vraag 3: Kan het gevelement laminair aangestroomd worden?

Alleen wanneer de wind recht op het object kan aanstromen zonder verstoring, kan een laminaire stroming ontstaan. Wanneer de stroming verstoord wordt is een van de benodigheden voor fluittonen, de laminaire stroming, afwezig. Fluittonen kunnen niet meer ontstaan. Om een laminaire aanstroming te verstoren moet de verstoring direct om het object plaatsvinden. Bij een ruw oppervlak van een object wordt de stroming om het object turbulent. Er ontstaan vele kleine drukfluctuaties om en achter het object in plaats van enkele grote drukverschillen. Het verruwen van het oppervlak leidt tot meer en kleinere wervels, zie figuur 8.3. Het geluid dat nog kan ontstaan

heeft een lagere intensiteit (minder drukverschil) en bestaat (vrijwel) geheel uit ruis (turbulente stroming).

Wanneer twee objecten van gelijke afmeting zich in elkaars stroming bevinden, zullen deze elkaars stroming beïnvloeden, zie figuur 4.8. De periodieke, fluittoonveroorzakende, wervels kunnen niet ontstaan.

Netten, of stoorstrips voor het verruwen van het oppervlak zijn voor de hand liggende methoden voor het verstoren van de stroming.



Figuur 8.3: Cilinder met een glad (a) en een ruw (b) oppervlak in een laminaire stroming

Vraag 4: Zijn scherpe randen op hoeken van de elementen afgerond?

Het stroomlijnen van objecten heeft invloed op de wervelproductie en daarmee de productie van fluittonen. Hoekige objecten creëren grotere drukverschillen (groter amplitude en luidheid) dan gestroomlijnde objecten. Aangezien wind geen constante factor is, is het vrijwel onmogelijk elementen geheel te stroomlijnen. Echter een afronding van hoeken tot een straal van slechts enkele millimeters beïnvloedt de geluidsproductie significant, en kan fluittonen zelfs geheel stoppen. Zonder extra bewerking heeft plaatmateriaal scherpe randen en hoeken.

Vraag 5: Zijn de spleten breder dan 5cm?

Hoe kleiner de spleten hoe luider de fluittonen en hoe hoger de geproduceerde fluittonen. Ook geldt hoe groter de spleet hoe hoger de windsnelheid moet zijn om fluittonen te kunnen produceren. Een grotere diameter is daarom altijd positief als het gaat om fluittonen te vermijden. Vanaf een diameter van 5cm verdwijnen de tonen geheel bij de meeste spleten en roosters. Het gaat hierbij om de spleet afstand in een mogelijke windrichting, zie figuur brugXXX Voor deze stap is het van belang of de kleinste regelmaat van spleten kleiner dan 5cm in een mogelijke windrichting, voor mogelijke windrichting zie figuur brug.

Door het doorlopen van de vragen in het Model wordt duidelijk in welk van de 4 'gevaarzones' voor het optreden van fluittonen een bepaald gebouw valt. Per categorie kunnen ook bij wat lagere windsnelheden kunnen fluittonen ontstaan, deze zijn echter van korte duur (enkele sec) doordat ze ontstaan door windstoten.

Groene Zone

De kans op fluittonen in de groene zone is verwaarloosbaar, zelfs onder extreme weersomstandigheden.

Uitzondering is een gevel aan een windstraat (openruimte van minimaal 10x de gebouwhoogte). Wanneer deze gevel als 'buiten de bebouwde omgeving' geclassificeerd zou zijn en dan in de rode zone terecht zou komen, kunnen er bij extreme weersomstandigheden (windkracht 9-10) fluittonen ontstaan in combinatie met ruis.

Gele Zone

Alleen bij extreme windsnelheden (vanaf windkracht 9-10), kunnen hier fluittonen ontstaan in combinatie met ruis.

Oranje Zone

Bij hoge windsnelheden (grotendeels windkracht 7-8), kunnen luide fluittonen ontstaan. De oranje zone dient voor wolkenkrabbers vermeden te worden.

Rode Zone

Fluittonen tot ruim 100dB zijn te verwachten vanaf windkracht 6.

Hoofdstuk 9

Toetsing

Verschillende bouwwerken en projecten bleken na oplevering fluittonen te produceren. Enkele van deze zullen hier besproken worden. Voor alle voorbeelden wordt het Model doorlopen. In welke gevarenzone voor fluittonen vallen deze gebouwen: in welke gevarenzone vallen ze na de aanpassing tegen fluittonen? Waren de fluittonen vooraf te verwachten op basis van het Model, en hoe is of kan het probleem opgelost worden? Al deze vragen zullen per praktijkvoorbeeld beschreven worden.

In de modellen wordt een rode route gegeven. Dit zijn de gebouwen zonder aanpassingen tegen fluittonen. Gebouwen waar al aanpassingen zijn gedaan tegen fluittonen hebben ook een groene route. Hierin zijn de aanpassingen tegen fluittonen meegenomen in het model.

9.1 Strijkijzer, Den Haag (2007)

Het Strijkijzer (zie figuur 9.2), de hoogste toren in Den Haag, bleek na oplevering fluittonen te produceren van rond de 4000 Hz, bij windkracht 6.

Voor deze toren kan het model doorlopen worden.

Bevinden gevelementen van het gebouw zich buiten de bebouwde omgeving? Ja, grofweg de bovenste helft van het Strijkijzer bevindt zich boven en daarmee buiten de bebouwde omgeving.

Bestaan deze gevelementen uit een herhaling van minimaal 9 spleten van gelijke breedte? De kroon bestaat uit roosters met een regelmatig grid die over de hele kroon herhaald worden, zie 9.2(b), er is sprake van regelmaat

van meer dan 9 maal.

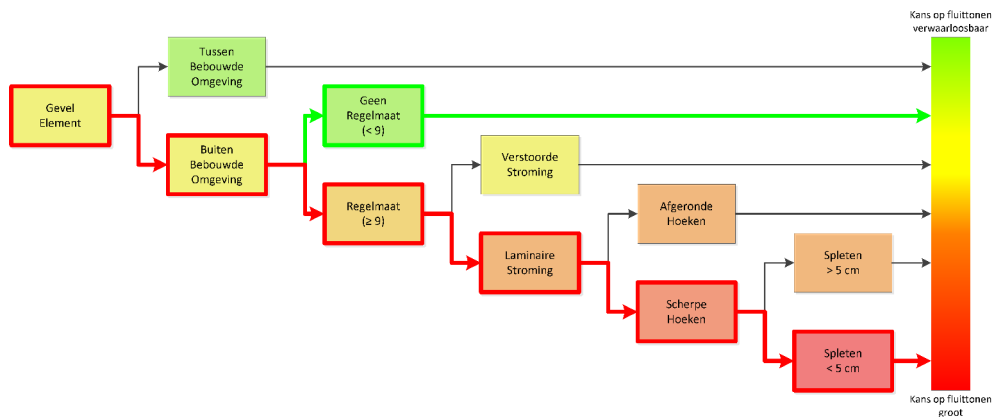
Kan het gevelelement laminair aangestroomd worden? Vlak om de kroon bevinden zich geen andere objecten die de stroom kunnen verstoren, er kan dus een laminaire stroming optreden.

Zijn scherpe randen op hoeken van de elementen afgerond? Het rooster bestaat uit normale platen met scherpe randen [29].

Zijn de spleten breder dan 5cm? Nee, de spleten in het rooster zijn kleiner dan 5cm [29].

Wanneer deze vragen in het model doorlopen worden, zie rode route, valt het Strijkijzer in de rode en hoogste gevarenszone voor fluittonen. Fluittonen kunnen hier vanaf windkracht 6 verwacht worden, zie figuur 9.1.

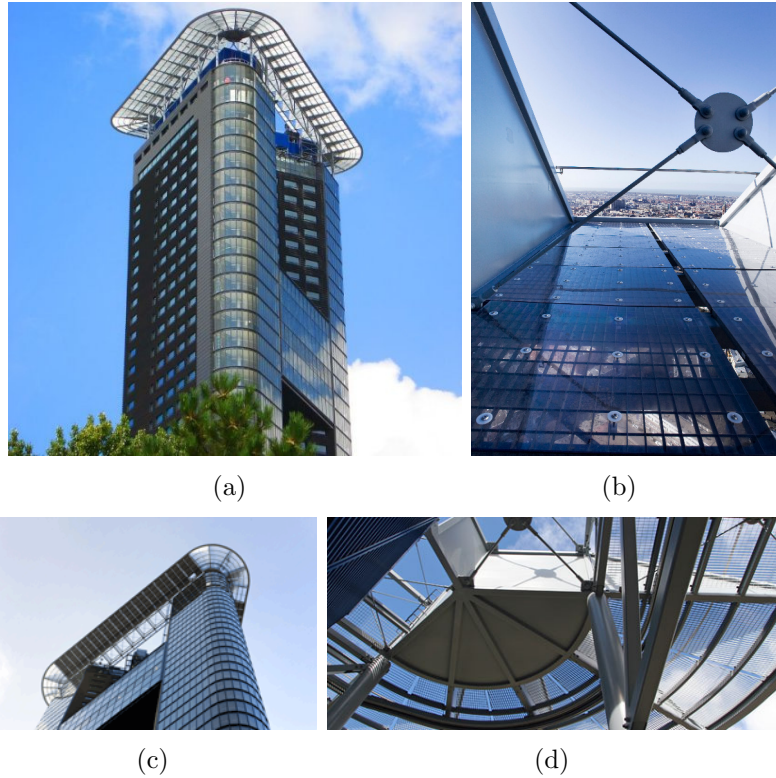
De roosters produceerden een geluid tot 75 dB op 80 m afstand, bij een windsnelheid vanaf 12 m/s (windkracht 6).



Figuur 9.1: Uitgewerkt schema voor het Strijkijzer, Den Haag

De tijdelijke aanpassing tegen de fluittonen bestond in eerste instantie uit het afdekken van de rechthoekige delen van de roosters. Door een gedeeltelijke afdekking van de kroon verandert er niets in het Model. Wel is dan minder regelmaat, waardoor de geproduceerde tonen minder luid zullen zijn, Maar er zijn dan nog genoeg roosters over om tonen te kunnen produceren. Daarna is de kroon geheel afgedekt door 380multiplex platen. De kroon wordt daardoor een object zonder herhaling. In het model, zie groene route, valt hij nu in de Groene Zone. Uiteindelijk zijn de multiplex platen

vervangen door lexaanplaten om een visueel aantrekkelijker beeld te krijgen: voor fluittonen veranderd er dan niets.



Figuur 9.2: Strijkijzer, Den Haag

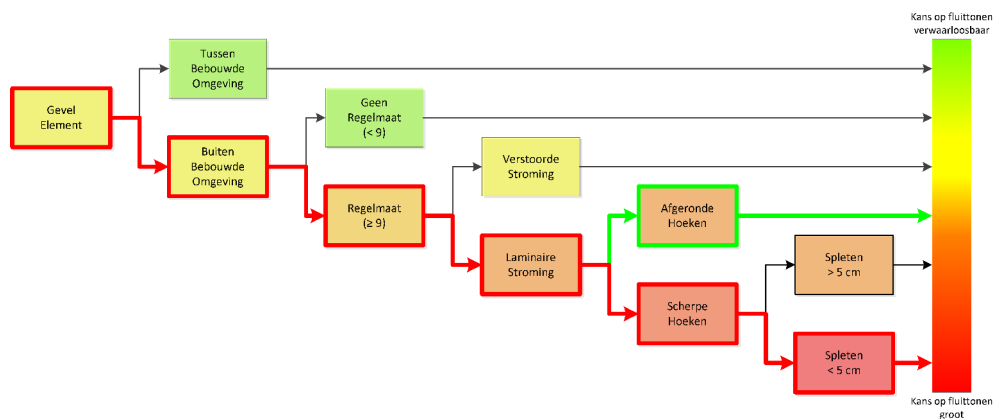
9.2 Hoftoren, Den Haag (2003)

Om deze toren uit 2003 (zie figuur 9.4) bleken fluittonen te ontstaan vanaf windkracht 7.

De punt van de toren bevindt zich boven en daarmee buiten de bebouwde omgeving. Gevelelementen waar zich hier regelmatige openingen in bevinden zijn zowel de roosters op het dak, om de installaties aan het zicht te onttrekken, als de stijlen boven aan de zijkant van de gevel. De stijlen boven in de gevel liggen vanaf een kant vrij voor wind. Achter de stijlen door lopen echter verschillende draden die de stroming achter de spijlen verstoren (zie figuur

9.4(b)). De spijlen vallen daardoor in de Gele Zone voor fluittonen. Zonder extreme weersomstandigheden zullen de spijlen niet fluiten. Een anderegevel element waar regelmaat optreedt zijn de roosters op het dak. De stroming wordt hier echter niet verstoord. Onder de roosters liggen wel installaties maar deze bevinden zich op enige afstand onder de roosters waardoor de wervelafschudding niet tijdig verstoord kan worden. In eerste instantie hadden de randen geen afwerking en waren ze scherp. De roosters bestaan uit een fijn grid met een onderlinge afstand van minder dan 5cm. Daarmee valt de Hoftoren in de rode en hoogste gevarenszone voor fluittonen, zie figuur 9.3, fluittonen kunnen hier vanaf windkracht 6 verwacht worden.

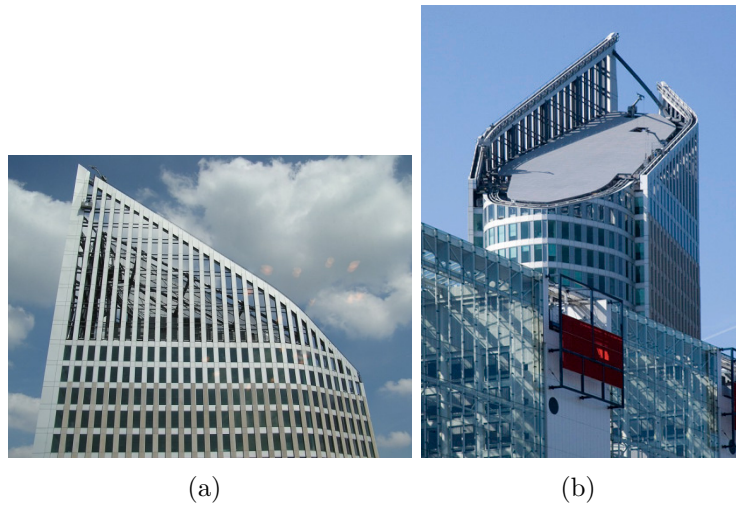
Om de ontstane fluittonen tegen te gaan zijn de roosters gecoat met een zware verf om de scherpe randen af te ronden [5]. De hoftoren valt daarmee in de oranje gevarenszone voor fluittonen. Hier kunnen vanaf een windkracht 7-8 fluittonen verwacht worden. De Hoftoren bevindt zich door zijn hoogte aan de rand de bebouwde omgeving. Aan de rand van de bebouwde omgeving treden lagere windsnelheden op dat buiten de bouwde omgeving en is door (geringe) omliggende bebouwing meer kans op wervels. In de praktijk blijft de toren met de huidige aanpassing stil.



Figuur 9.3: Uitgewerkt schema voor de Hoftoren, Den Haag

9.3 Paviljoen, Hoek van Holland (1993)

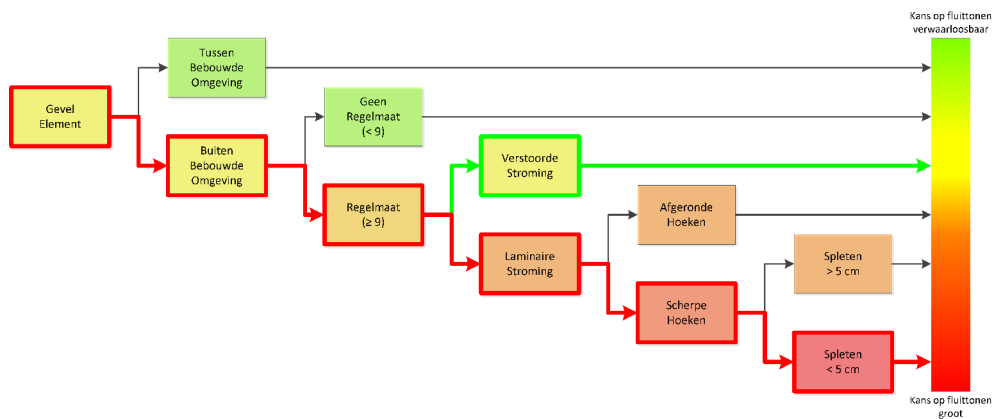
Dit paviljoen (zie figuur 9.6) bestaat vrijwel geheel uit roosters met een oppervlakte van $250 m^2$. Voor de hoofdribben komt dit neer op 6 km plaatstrip.



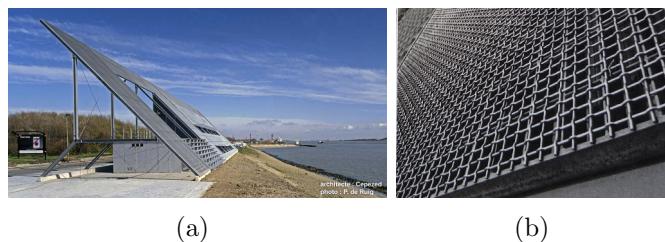
Figuur 9.4: Hoftoren, Den Haag

Het paviljoen is gelegen in een zeer open gebied aan de kust, en produceerde bij een zuidwesten wind vanaf windkracht 7 fluittonen tot 100 dB [22,23]. Er is duidelijk regelmaat van spleten zichtbaar (zie figuur 9.6(b)). Ook vlak voor of achter de roosters zijn geen objecten die de stroming beïnvloeden, er kan een laminaire stroming optreden. De plaatstrips zijn niet bewerkt en hebben scherpe randen. De hart op hart afstand van de ribben is onbekend. Daarmee valt het paviljoen in de rode of oranje gevarenzone voor fluittonen, zie figuur 9.5. Door de ligging met veel kans op hoge windsnelheden kunnen hier fluittonen verwacht worden.

Om de fluittonen tegen te gaan zijn netten over de roosters bevestigd, waardoor luide tonen nu uitblijven. Met de netten wordt de stroming verstoord, en valt het paviljoen in de gele gevarenzone voor fluittonen. Echter aan de kust, met 20% van de tijd een windkracht 6 of hoger, kunnen nog steeds tonen ontstaan. Ze ontstaan wel pas vanaf windkracht 10. Daaruit kan aangenomen worden dat er een verstoring rond de spijlen optreedt van lagere intensiteit. Omwonenden ondervinden geen hinder meer van fluittonen.



Figuur 9.5: Uitgewerkt schema voor het Paviljoen, Hoek van Holland



Figuur 9.6: Paviljoen, Hoek van Holland

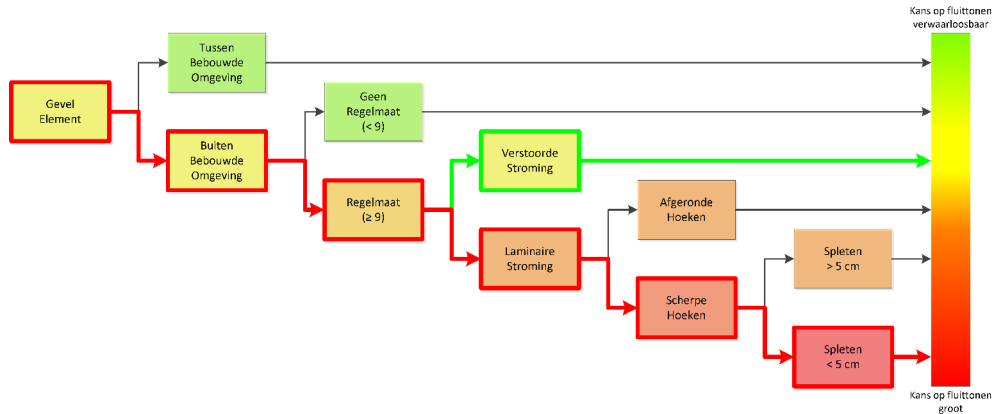
9.4 Beetham Tower, Manchester (2006)

Deze toren met een totale hoogte van 155m heeft een uitsteeksel van 14m op het dak (zie figuur 9.8). Al voor de oplevering in het najaar van 2006 werd er door omwonenden geklaagd over fluittonen [3].

De toren bevindt zich door zijn hoogte buiten de bebouwde omgeving en bevat onder andere een uitstekende constructie van dwarsliggende staal- en glasplaten. Er is een vrije aanstroming naar dit gevelement, welke bestaat uit een herhaling van spleten. Aangezien het staal en glas betreft kan worden aangenomen dat deze scherpe randen hebben. De hart op hart afstand van de staal- en glasplaten is onbekend. Hiermee valt de Beetham Tower in de Rode of Oranje Zone voor het produceren van fluittonen, zie figuur 9.7.

Als tijdelijke oplossing zijn de spleten opgevuld, hierdoor wordt de uitstekende constructie een object zonder herhaling van spleten. Later zijn aluminium strips op de platen bevestigd om de wind af te buigen [6–8]. Naast

het afbuigen van de wind zullen ze de laminaire stroming ook verstoren. Het gevelelement valt nu onder de Gele Zone voor het produceren van fluittonen.



Figuur 9.7: Uitgewerkt schema voor de Beetham Tower, Manchester



Figuur 9.8: Beetham Tower, Manchester

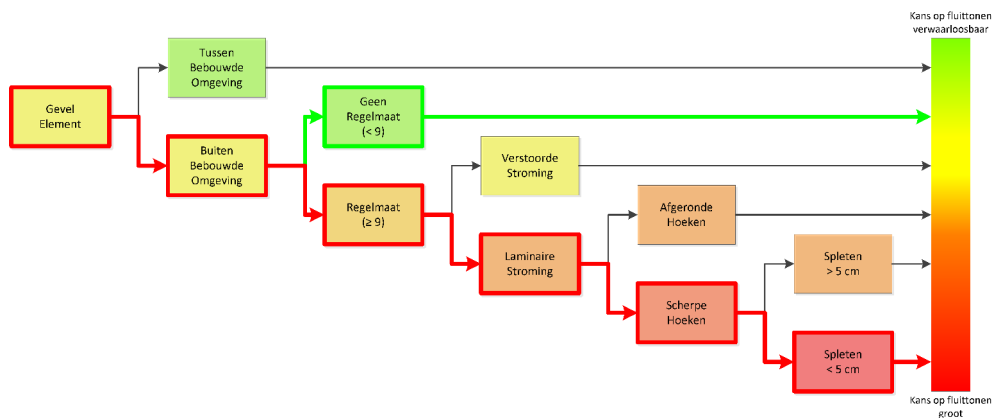
9.5 City Spire, New York (1987)

Deze toren uit 1987 (figuur 9.10) was ten tijde van oplevering met 248m hoogte de op een na hoogste betonnen toren ter wereld. David Dunlap schrijft op 13 juni 1993 over de City Spire in de New York Times: “It began to whistle so loudly that people 10 blocks away lost their sleep on windy nights”.

Deze koepel valt door zijn hoogte buiten de bebouwde omgeving en bestaat uit een regelmaat van spleten met smalle openingen. Vanaf de buitenzijde kan de wind laminair aanstromen. Of er direct achter de spijlen aan de binnenzijde een verstoring optreedt is onbekend. Afwerking van de spijlen is ook onbekend. De decoratieve koepel van het gebouw bezorgde omwonenden overlast [18]. De Koepel van de City Spire valt in de Rode of Oranje Zone

voor het produceren van fluittonen, zie figuur 9.9.

Pas een jaar na oplevering werd een oplossing gevonden om de toren stil te krijgen. Door het om en om wegnemen van de spijlen werden de tussenruimten groter [2, 18]. Ook blijft er nog maar een beperkte herhaling van spleten onder dezelfde hoek over. De City Spire valt nu in de Groene Zone voor het produceren van fluittonen, zie figuur 9.9.



Figuur 9.9: Uitgewerkt schema voor het City Spire, New York



Figuur 9.10: City Spire, New York

9.6 Taipei 101, Taiwan (2004)

Met een hoogte van 449m (508 met antenne) was dit gebouw tot en met 2007 het hoogste gebouw ter wereld [1] (figuur 9.12).

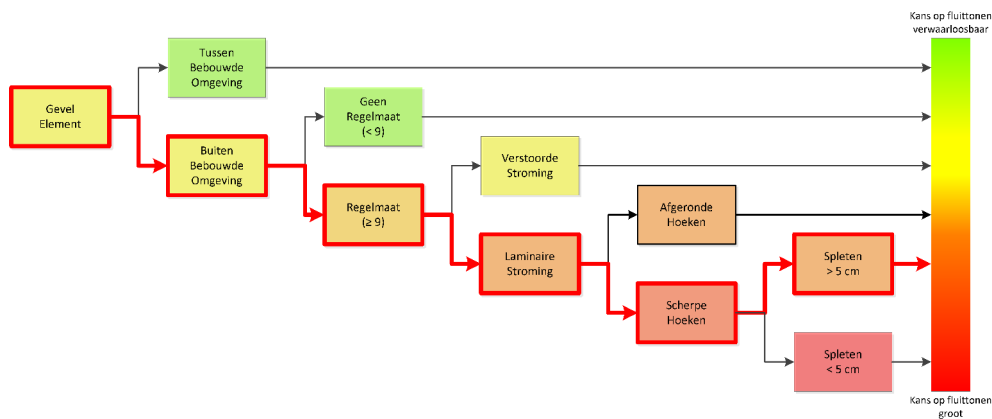
De toren bevindt zich door zijn hoogte vrijwel geheel buiten de bebouwde omgeving. Bovenaan op het uitzichtplatform bestaat de afscheiding uit een herhaling van spijlen (zie figuur 9.12(b)). In de buurt van deze spijlen zitten vrijwel geen objecten die de stroming verstoren. De spijlen kunnen daardoor laminair aangestroomd worden. De ruimte tussen de spijlen is ongeveer 20cm en heeft scherpe randen. Daarmee valt de Taipei 101 in de Oranje Zone voor het produceren van fluittonen, zie figuur 9.11.

Om zeker van de fluittonen af te zijn, kan het hele uitzichtplatform omringd worden door glazen platen of een andere opvulling van de spleten. De toren valt dan in de Groene Zone. Door de hoge windsnelheden zullen platen niet de voorkeur hebben. Een andere oplossing is het omringen met netten. Door het verstoren van de stroming kunnen er pas bij hoge stromingssnelheden fluittonen optreden. Door de hoogte van de toren, zullen deze hoge stromingssnelheden niet uitzonderlijk zijn. Er kunnen daardoor nog steeds fluittonen optreden, al zijn deze wel van een lagere intensiteit.

Voordat de toren gebouwd was, waren er verschillende mogelijkheden het geluid wat betreft fluittonen te verbeteren. Door de ronde vorm kunnen bij elke windrichting een hele rij spleten maximaal gunstig worden aangestroomd. Een vierkante vorm met een lange zijde loodrecht op de dominerende windrichting is gunstiger. Om bij alle windrichtingen fluittonen te voorkomen zou de onderlinge afstand tussen de spijlen wisselend kunnen zijn om zo de regelmaat te doorbreken. Bovendien zouden ronde vormen met een wisselende ruwheid gunstiger zijn. Ronde vormen hebben minder randen waarachter wervels kunnen ontstaan, en wisselende ruwheid verstoort de stroming. Op deze manier behoudt het gebouw zijn esthetische buitenkant. Om deze veranderingen nu nog door te voeren zal echter een kostbaar karwei zijn.

9.7 Brug Oranje laan, Den Bosch (2011)

Deze brug (zie figuur 9.14), afgelopen zomer opgeleverd, blijkt volgens omwonenden bij windkracht 4 al fluittonen te produceren. Bij bezoek aan de brug laat deze inderdaad bij windkracht 4-5 twee maal een zachte fluittoon



Figuur 9.11: Uitgewerkt schema voor Taipei 101, Taiwan



Figuur 9.12: Taipei 101, Taiwan

horen van rond de 45dB gedurende enkele seconden.

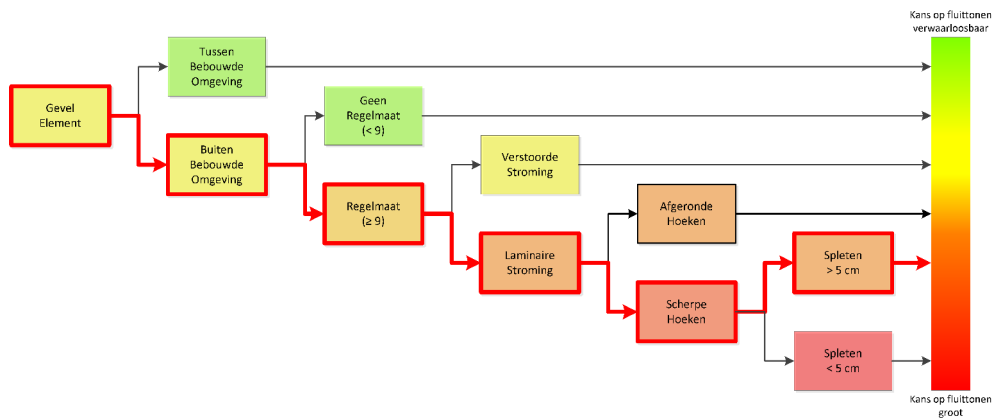
De brug bevindt zich aan de rand van de bebouwde omgeving. De zijkant van de brug bestaat uit een rooster met honderden herhalingen (zie figuur 9.14(b)). De wind komt meestal uit westelijke richting en zal dan deze roosters onder een hoek van 30 aanstromen. De wind kan recht op het rooster aanstromen, en ook om het rooster heen zit geen verstoring. De spijlen in de horizontale richting zijn afgerond en hebben een hart op hart afstand van 3cm (zie figuur 9.14(b)), de verticale windrichting is zo dicht bij het grondoppervlak echter geen mogelijke windrichting voor hoge windsnelheden. De verticale spijlen hebben scherpe randen en hebben een hart op hart afstand van 7cm. Daarmee valt de brug aan de Oranjelaan in de Oranje Zone voor het produceren van fluittonen, zie figuur 9.13.

Een oplossing achteraf is het verstoren van de strooming in de vorm van een net over het rooster. Aangezien het om vrij lage geluidsniveaus gaat is

wellicht het afronden van de randen door middel van verven ook een oplossing.

Wanneer de brug nog gebouwd zou moeten worden, had gekozen kunnen worden voor grotere afgeronde spijlen, eventueel in combinatie met een onregelmatige onderlinge afstand of een ruw oppervlak. De brug had dan in de Groene of Gele Zone voor fluittonen gevallen.

Een vergelijkbare brug aan de Bruistelsingel in Den Bosch, zie figuur 9.15, heeft een grotere hart op hart afstand van de spijlen, en deze hebben afgeronde hoeken. Deze brug produceert geen fluittonen.



Figuur 9.13: Uitgewerkt schema voor de Brug Oranje laan, Den Bosch



Figuur 9.14: Brug Oranje laan, Den Bosch



Figuur 9.15: Brug aan de Bruistensingel, Den Bosch

Hoofdstuk 10

Conclusies

10.1 Antwoorden op onderzoeksvragen

Kunnen vuistregels opgesteld worden om een schatting te kunnen maken van fluittonen opgewekt door gebouwen?

Via vuistregels kan succesvol een inschatting worden gemaakt van het risico op fluittonen. Deze risico's zijn direct gekoppeld aan de windsnelheid (ofwel de windkracht). Hoe harder de wind hoe makkelijker fluittonen ontstaan, hoe luider ze zullen zijn en hoe hoger de frequentie van deze tonen. Zowel frequentie als geluidsdrukkniveau hangen echter van teveel factoren of om via vuistregels een inschatting ervan te geven.

Algemeen kan gesteld worden,

- Vermijden:
 - herhaling (in bijvoorbeeld roosters of spijlen)
 - spleten kleiner dan 5cm
 - scherpe hoeken en randen
- Doen:
 - verstoren van de stroming door ruwe en afwisselende oppervlaktestructuur
 - verstoren van de stroming door netten of een object direct voor of achter het fluitend object te plaatsen
 - afronden van hoeken en randen
 - keuze voor onregelmatige onderlinge afstanden tussen de elementen

Deelvragen

1. *Wat voor stromingen kunnen fluittonen veroorzaken?*

Een versterkte periodieke wervelafschudding met een frequentie in het hoorbare gebied veroorzaakt fluittonen.

a) *Wat voor stromingen leiden gemakkelijk tot fluittonen?*

Een laminaire aanstroming is nodig voor het ontstaan van fluittonen. Wanneer zich in deze stroming een object bevindt, kan een periodieke wervelafschudding ontstaan.

b) *Welke factoren veranderen dit gedrag?*

De periodieke wervelafschudding wordt versterkt door meerdere van deze periodieke wervelafschuddingen naast elkaar.

Door het verstoren van de laminaire stroming of de periodieke wervelafschudding kan de intensiteit van de fluittoon verlaagd worden.

2. *Wanneer worden fluittonen opgewekt door gebouwen als gevolg van wind?*

a) *Bij welke windsnelheden kunnen geluidseffecten optreden?*

Vanaf 10m/s kunnen vrij gunstige omstandigheden, als aanstroomhoek en obstakel, fluittonen ontstaan.

b) *Welke bouwkundige vormen/obstakels zijn ongunstig als het gaat om het optreden van fluittonen?*

Een fluittoon die ontstaat om een object heeft meestal niet genoeg drukverschil om hoorbaar te zijn. Een herhaling van spleten of spijlen is hier noodzakelijk voor het ontstaan van fluittonen. Ook scherpe randen en spleten <5cm vergroten de kans op fluittonen.

3. *Wat kan er gedaan worden om fluittonen te voorkomen?*

Om fluittonen te voorkomen is het van belang voor de bouw te controleren of het gebouw in de gevarenzone valt voor fluittonen. Door kleine ingrepen zoals onregelmatige of grotere afstand van spleten en/of het afronden van hoeken, kunnen fluittonen voorkomen worden.

4. *Is het geluidsniveau op basis van eenvoudige relaties te voorspellen?*

Nee. Wel geldt: hoe meer herhaling hoe luider de fluittonen.

10.2 Aanbevelingen voor vervolg onderzoek

Vele vragen kwamen bij dit onderzoek naar boven, verschillende zijn onderworpen aan verder onderzoek. Vragen die onbeantwoord zijn gebleven, zijn:

- Wat is de verhouding, stromingssnelheid afstand object, waarbij deze objecten elkaars stroming beïnvloeden?
- Vanaf welke afrondingsstraal ontstaan er geen fluittonen meer aan roosters; waar moeten deze afrondingen zitten?
- Is een afrondingsstraal van $>1\text{mm}$ genoeg om fluittonen te voorkomen tot windkracht negen?
- Is het mogelijk in CDF eerst lokale stromingsmogelijkheden te bepalen, vervolgens deze als input te gebruiken voor kleinschalige modellen voor geluidproductie?
- Fluiten roosters met minder of verschillende herhaling erin?
- Wanneer ontstaan laagfrequente tonen en hoe kunnen ze voorkomen worden?
- Volgens het Strouhalgetal ontstaat bij een diameter $>8\text{mm}$ geen frequentie van afschudden boven de 500Hz meer tot windsnelheden van 20m/s . In de praktijk blijkt een afronding van enkele mm vaak ook genoeg om fluittonen te stoppen. Kunnen fluittonen niet meer ontstaan bij een afronding van hoeken van 4mm ?

Bronnen

- [1] http://www.taipei-101.com.tw/en/tower/buildind_01-1.html.
- [2] <http://www.youtube.com/watch?v=otxhuqqi6ye>.
- [3] Whistling beetham tower. *Manchester evening news*, 11 February 2010.
- [4] Lawaai en lawaaibestreidijding in de werktuigkundige sector. *TH Eindhoven, groep Fabrieks- en apparatenbouw voor de procesindustrie en Koninklijk instituut van ingenieurs sectie Milieutechniek*, 1973.
- [5] Haagsche courant, April 21 2004.
- [6] Manchester evening new, 24 mei 2006.
- [7] New scientist tech, 4 augustus 2006.
- [8] Manchester evening new, 27 augustus 2007.
- [9] J. B. Barlow, W. H. Rae JR., and A. Pope. *Low-speed wind tunnel testing*. John Wiley & sons, inc., 1999.
- [10] H. Benschop. Representatieve windmetingen, in het bijzonder op luchthavens. *KNMI, Technisch rapport TR-277*, May 2005.
- [11] J.P.A. Berhault. Wind noise in buildings. *Southampton University, Institute of Sound and Vibration Research*, 1977.
- [12] B. Blocken, Carmeliet, and Stathopoulos. Cfd evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings - effect of wall - function roughness modifications for he atmospheric boundary layer flow. eindhoven university of technology, katholieke universiteit leuven, concordia university. *Elsevier*, 2007.
- [13] B. Blocken, Stathopoulos, Asce, and Carmeliet. Wind environmental conditions in passages between two long narrow perpendicular buildings.

- eindhoven university of technology, concordia university, swiss federal institute of technology ethz. *ASCE*, 2008.
- [14] N. curle. the influence of solid boundaries upon aerodynamic sound. *Department of Mathematics, The University of Manchester*, 13 April 1955.
- [15] W.B. de wolf. Aerodynamische geluidsbronnen bij wind turbines, een overzicht en aanbevelingen voor nader onderzoek. *Nationaal lucht- en ruimtevaartlaboratorium*, NLR TR 84041L, 26 April 1984.
- [16] N.H. Dekkers and Wijnen. *Eenvoudige stromingsleer, grondbegrippen, onsamendrukbare fluida, modelregels, impuls Theorie, samendrukbare fluida (5e druk)*. Delta press, 2007.
- [17] C. Doolan. Bluff body noise reduction using aerodynamic interference. *University of Adelaide, Australia*, 2008.
- [18] D. Dunlap. Whistle silenced city spire. *New York Times*, 13 June 1993.
- [19] J.H. Gerrard. Measurements of the sound from circular cylinders in an airstream. *Fluid Motion Laboratory, University of Manchester*, 19 July 1954.
- [20] J.H. Granneman, M. Trooster, E. de Beer, and T. van Diepen. Whistling building objects, origins and solutions. *NAG//DAGA*, Rotterdam, 2009.
- [21] M. Trooster J. Granneman. Fluittonen door roosters - peutz. *Metaal & Techniek*, March 2010.
- [22] Hoffmans and Looijmans. Stromingsgeluid ten gevolge van wind rond bouwwerken. *NAG-journal*, 146, 1999.
- [23] <http://www.expounicum.nl>.
- [24] M.L.C. Kole. Windgeluid in gebouwen. *Eindhoven University of Technology*, 2005.
- [25] Pijush K. Kundu and Ira M. Cohen. *Fluid Mechanics*. 2000.
- [26] M.J. Lighthill. On sound generated aerodynamically, i. general theory. *Department of Mathematics, The University of Manchester*, 13 November 1951.
- [27] H.J. Martin. *Stedebouwfysica / Geluid*. Eindhoven University of Technology, march 1999.

- [28] L. Nijs, ploemen, Pleijsier, and Schippers. Wind-induced sound on buildings and structures. 2010.
- [29] J.C.F. Ploemen. Wind - geïnduceerd geluid aan gebouwen en constructies. *TU Delft*, 2010.
- [30] A.W. Rofail and Tonin. An exploration of wind-noise in buildings. *Surry Hills, NSW*.
- [31] M. Sarioglu and Yavuz. Vortex shedding from circular and rectangular cylinders placed horizontally in a turbulent flow. *Karmandeniz Technical University, Turkey*, 7 March 1999.
- [32] C. Taylor. Exploring music, the science and technology of tones and tunes. *Institute of Physics Publishing*, Bristol and Philadelphia, 1992.
- [33] T. Uda, Nishikawaand Someya, and Iida. Prediction of aeroacoustic sound using the flow field obtained by time-resolved particle images velocity. *Tokyo, Japan*, 26 May 2011.
- [34] G.J.F. van Heijst. *Fysische transportverschijnselen voor W (3B470)*. Technische Universiteit Eindhoven, faculteit technische natuurkunde, 2007.
- [35] L.W.A. van schie, van Tol, and de Bruijn. Windgeluid bij bomen en gebouwen. *TPD Technisch Fysische Dienst*, THO-TH 308.408/3-geluid, 28 September 1984.
- [36] G.M. van Uffelen. het voorkomen vanwindgeluid bij gebouwen - peutz. In *het voorkomen vanwindgeluid bij gebouwen - Peutz*, 12 May 2011.
- [37] J. Wieringa and Rijkoort. *Windklimaat van Nederland*. Staatsuitgeverij Den Haag, 1983.
- [38] New Zealand wind energy association. The new zealand wind farm noise standard. www.windenergy.org.nz, february 2010.
- [39] A.L. Rogers J.F. Manwell S. Wright. Wind turbine acoustic noise. *University of Massachusetts, Department of Mechanical and Industrial Engineering*, january 2006.