Aan: SnowWorld Leisure
de heer W. Moerman
Buytenparklaan 30
2717 AX ZOETERMEER

ingenieurs
asbest
civiel&sport
opleidingen
arbo&veiligheid
milieuadvies
bodem
professionals
geluid&trillingen
caribbean
bouwfysica
certijn vastgoed-beheer
project-management
duurzaamheid

Betreft: **akoestisch onderzoek SnowWorld te Zoetermeer**
Projectnummer: 150995
Ons kenmerk: ANRE/150995.04/MAWU
Behandeld door: ing. A.D. van Reen

Plaats, datum: IJmuiden, 24 juni 2015

Geachte heer Moerman,

Hiermee ontvangt u de rapportage van het akoestisch onderzoek dat door BK Geluid en Trillingen B.V. (BK) is uitgevoerd voor de locatie

SnowWorld te Zoetermeer,

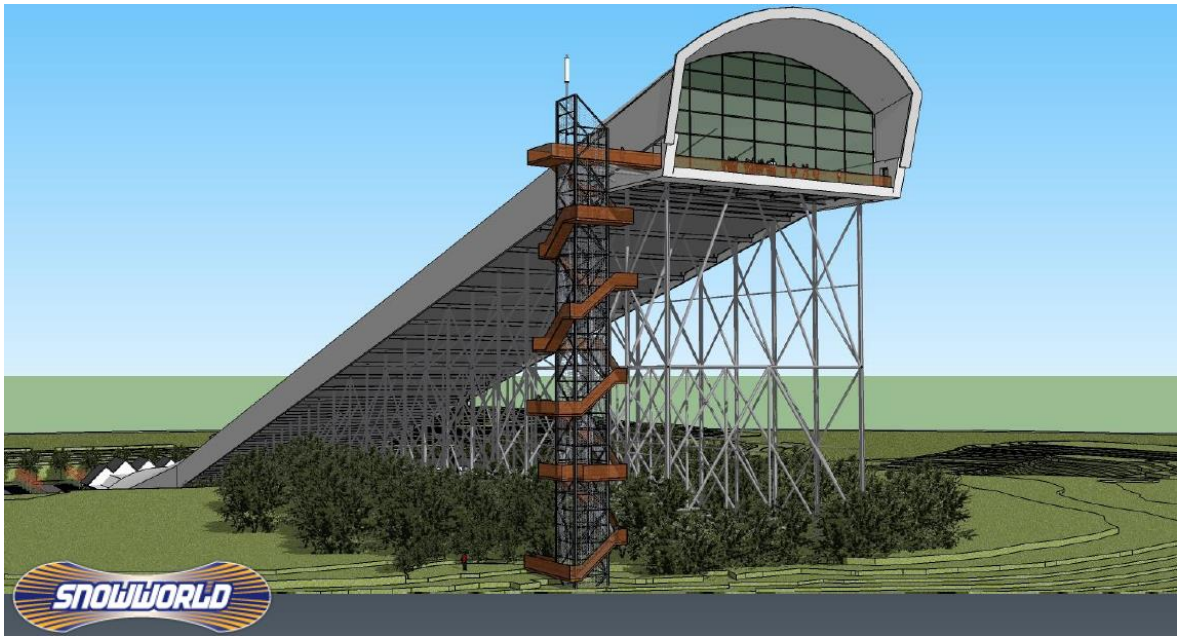
(hierna: locatie). Het onderzoek is uitgevoerd naar aanleiding van de voorgenomen uitbreiding van de derde skipiste van SnowWorld te Zoetermeer. Het onderzoek heeft als doel op basis van literatuurstudie een beschouwing te maken van het risico op fluittonen ten gevolgde van wind rondom de voorgenomen uitbreiding van de derde piste bij SnowWorld te Zoetermeer.

bk geluid&trillingen
Daltonstraat 1
Postbus 3064
3301 DB Dordrecht
T 078 630 65 55

info@bkgeluidentrillingen.nl
www.bkgeluidentrillingen.nl
BK Geluid&Trillingen B.V. te Dordrecht is gecertificeerd volgens ISO 9001, CO_2-prestatieladder

BK Bouw & Milieuadvies B.V.
IBAN: NL45 ABNA 0586 8407 29
K.v.K. nr. 24459961

figuur 1: impressie van de uitgebreide derde skipiste (bron: Presentatie definitief schetsontwerp)



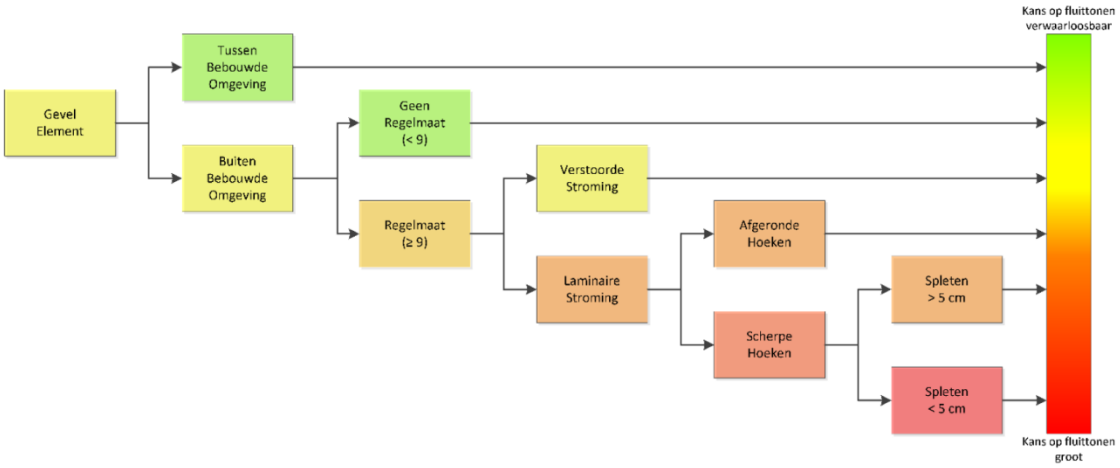
Resultaten literatuurstudie

Voor de literatuurstudie zijn de volgende documenten geraadpleegd.

(1) SnowWorld Zoetermeer, Uitbreiding Baan 3, Presentatie definitief schetsontwerp, 28 oktober 2013 (bijlage 1):
Hierin wordt de voorgenomen uitbreiding gepresenteerd (zie figuur 1).

(2) Fluittonen om gebouwen. Oorzaken en preventie. Master Project 2, opgesteld door Rinka van Dommelen, d.d. maart 2012 (bijlage 2):
In deze rapportage van het Master Project wordt op basis van literatuuronderzoek een model beschreven waarbij door het beantwoorden van een reeks vragen en/of het volgen van een stroomschema (zie figuur 2) kan worden ingeschat of een gebouw zich in de gevarenzone bevindt met betrekking tot de kans op fluittonen rond gebouwen.

figuur 2: stroomschema (Bron: Fluittonen om gebouwen. Oorzaken en preventie. Master Project 2, opgesteld door Rinka van Dommelen, d.d. maart 2012)



(3) Briefrapport 'Beoordeling van de kans op fluittonen vanwege verstoring van het laminaire windveld bij de staalconstructie van SkiWorld Zoetermeer' opgesteld door Greten Raadgevende Ingenieurs, gedateerd 12-02-2015 (bijlage 3):
Deze rapportage heeft met name betrekking op de uitbreiding van de baan. In deze brief wordt aan de hand van de antwoorden op de vragen uit het rapport Master Project 2, opgesteld door Rinka van Dommelen (2) de kans op het optreden van fluittonen vastgesteld. De conclusie van het onderzoek is dat, volgens het model , SnowWorld zich bevindt in de 'oranje zone' . Dit betekent dat bij hoge wind- snelheden (grofweg windkracht 7-8) luide fluittonen kunnen ontstaan. Als vergelijkbaar object in dit onderzoek is gebouw Taipei 101, gelegen in Taiwan, genomen. SnowWorld onderscheidt zich van het gebouw in Taiwan door:
1. Een aanzienlijk grotere spleetafstand (afstand tussen de kolommen).
2. De aanwezigheid van storende elementen tussen de kolommen zoals windverbanden, tussenliggers, et cetera.

Beide elementen zullen naar verwachting de kans op fluittonen verlagen. Samenvattend: de belangrijkste voorwaarden voor het optreden van fluittonen zijn aanwezig. Het optreden van fluittonen bij hogere windsnelheden is niet uitgesloten. Omdat geen sprake is van een geluidgevoelige bestemming of een geluidgevoelige bestemming in de directe omgeving lijkt het realiseren van voorzieningen om fluittonen op voorhand te verhelpen een zware ingreep.

(4) Eindrapport, Wind-geïnduceerd geluid aan gebouwen en constructies, opgesteld door Jeroen Ploemen, TU Delft, gedateerd januari 2010 (bijlage 4):
Deze rapportage gaat met name in op de problematiek van de trap. Dit rapport is geschreven naar aanleiding van de regelmatig terugkerende problematiek rond windgeluid, en specifiek de problemen op dat gebied bij het Strijkijzer te Den Haag. Als gevolg van stroming langs gebouwen ontstaat geluid, dat als zeer hinderlijk kan worden ervaren wanneer het een toon betreft. Dit tonaal geluid ontstaat onder andere door regel- matige wervelvorming achter constructiedelen, staande golven, en zogenaamde Helmholtzre sonatoren.

Probleemgevallen op dit gebied haalden de afgelopen jaren de pers. Uiteraard is deze problematiek niet aan de beroepspraktijk voorbijgegaan. Een veelvoud aan problemen op dit gebied is bekend; roosters blijken bovengemiddeld vaak de oorzaak van het probleem te vormen. In het kader van dit onderzoek zijn in de Open Jet Facility van de TU Delft windtunnelmetingen aan een aantal Dejo-roosters gedaan, die onderling verschilden in afwerking, maaswijdte en de dimensies van de draagstaven. Alle proefstukken leverden resultaat op in de vorm van tonaal geluid, soms al bij 8 à 9 m/s (windkracht 5 Bf). Bij hogere snelheden bleef bij het verhogen van de windsnelheid vrijwel altijd onafgebroken een of meerdere tonen hoorbaar. De luidste fluittoon kende een geluidniveau van ruim 110 decibel bij 25 m/s, met slechts 1 m^2 roosteroppervlakte. Een doorsnee proefstuk produceerde slechts onder enkele zeer specifieke hoeken tonaal geluid; een kleine wijziging van de hoek was dan voldoende om de toon volledig te laten verdwijnen waarna slechts nog ruis resteerde. Dit houdt dus in dat de exacte windrichting van grootbelang is. Een kleine wijziging kan al leiden tot het afnemen van het tonaal geluid. Daarbij is ook de opstelling/montage van belang. Door een iets andere montage kan één deel van een trap wel geluid veroorzaken terwijl door een iets andere montage van een naastgelegen deel het niet optreedt. De optredende tonen bleken verklaarbaar vanuit ten minste twee verschillende mechanismen. Bij het ene deel van de metingen neemt de frequentie geleidelijk toe bij het toenemen van de windsnelheid, en volgt daar een relatie volgens Strouhal. Een ander deel hangt sterk samen met de afmetingen van de roostermazen, waarbij de maaswijdte en dikte van een rooster (of mogelijkerwijs combinaties daarvan zoals een diagonaal) bepalend zijn voor de toonhoogte. De relevante afmeting is steeds gelijk aan meervouden van een halve golflengte; meerdere van dergelijk tonen kunnen tegelijkertijd optreden; het mechanisme is herkenbaar aan de constante toonhoogte over een range van windsnelheden. Waarschijnlijk betreft het zogenaamde Parker-modes.

(5) Over het voorkomen van windgeluid bij gebouwen, opgesteld door PEUTZ BV, Ir. G.M. van Uffelen, gedateerd 2011:
Stromende lucht veroorzaakt bijna altijd geluid. Rondom huizen en andere gebouwen is sterke wind meestal hoorbaar als "loeien". Hogere gebouwen vangen meer wind en windgeluid treedt daar dan ook eerder op. Windgeluid heeft gewoonlijk geen duidelijke toonhoogte, maar toch klinkt het geluid hoger als de wind toeneemt en lager als de wind afneemt. Dit loeien van de wind is zelden echt hinderlijk.
Wel treedt regelmatig geluidoverlast op die wordt veroorzaakt door objecten op gebouwen viaducten bij bepaalde windsnelheden en -richtingen. Dit geluid kan meer duidelijke toonhoogtes hebben, harmonisch of vals en schril. Geluid met een hoge frequentie wordt waar genomen als een hoge fluittoon. Het kan onder optreden bij kleine kieren rondom ramen of deuren. Bij buizen en openingen, bij balkonhekken en roosters.
Hoogfrequente tonen ontstaan globaal tussen luchtstroomsnelheden van 10 en 27 m/s, vergelijkbaar met een windkracht 5 tot 10 Beaufort. Binnen een bepaald windsnelheidsbereik verandert de toonhoogte niet.

(6) Een analyse van het windklimaat in Nederland, opgesteld door de Universiteit van Amsterdam (zie ook bijlage 6).
Voor de skibaan geldt dat windgeluid kan optreden bij windkracht 7-8. Onderzoek van de Universiteit van Amsterdam uit 2012 waarbij het windklimaat in Nederland is geanalyseerd laat een trend zien dat winkracht 7-8 steeds (de windkracht waarbij luide fluittonen kunnen optreden) minder voorkomt bij intermediaire weerstations (waaronder Rotterdam). In 2008 werd gemiddeld minder dan twee uur per maand windkracht 7-8 gemeten. Landelijk is dit 4 uur per maand. Dit betekent dat minder dan 1 % van de maand deze windkracht of hoger van toepassing is. Daar de fluittonen bij windkracht 7-8 en hoger alleen optreden indien de wind onder een bepaalde hoek op de treden waait wordt de kans op geluidhinder minimaal geacht.

Voor de uitkijktoren (trap) geldt dat windgeluid kan optreden bij windkracht 5 en hoger. Het onderzoek van de Universiteit van Amsterdam uit 2012 laat een trend zien dat winkracht 5-6 steeds (bij deze winkracht en hoger kunnen fluittonen optreden indien de wind in een juiste hoek op de treden gericht staat) minder voorkomt bij intermediaire weerstations (waaronder Rotterdam). In 2008 werd gemiddeld 95 uur per maand winkracht 5-6 gemeten. Dit betekent dat circa 12% van de maand deze windkracht of hoger van toepassing is. Daar de fluittonen bij windkracht 5-6 en hoger alleen optreden indien de wind onder een bepaalde hoek op de treden waait wordt de kans op geluidhinder minimaal geacht.

Effecten van fluittonen op geluidgevoelige bestemmingen
Geluidgevoelige bestemmingen zijn op grote afstand tot de planlocatie gelegen. Het geluidniveau zal ter plaatse van de geluidgevoelige bestemmingen ten hoogste 40 dB(A) bedragen. Dit zal niet leiden tot hinder omdat het omgevingsgeluid tijdens harde wind 55 dB(A) bedraagt.

Effecten van fluittonen op Fauna in naastgelegen Buytenpark
Het naastgelegen Buytenpark is een voormalige puinstort. Deze puinstort is gesloten en afgedekt met een leeflaag. Het geaccidenteerde terrein waarbij de opgebrachte leeflaag, hoogteverschillen tot 20 meter, vochthuishouding en het microklimaat de voorwaarden hebben geschapen voor een bijzondere flora en fauna.

In het park zijn kerkuil, ransuil, bosuil en velduil waargenomen. De steenuil broedt in de buurt van het park. In het park komt een stabiele populatie van de ransuil voor. Ook dagroofvogels als buizerd, bruine kiekendief, torenvalk en sperwer broeden in of in de onmiddellijke nabijheid van het park. Geluid is voor deze uilen van belang voor communicatie (zang, territorium afbakening en het opsporen van prooidieren).

Voor verstoring van dieren wordt doorgaans uitgegaan van een grenswaarde van 42-45 dB(A). Van belang is echter het heersende omgevingsgeluid, type stoorgeluid, de diersoorten en het gehoorvermogen van de dieren.

Het is niet waarschijnlijk dat de fluittonen die ontstaan als gevolg van windbelasting voor de uilen, die in het naastgelegen Buytenpark leven, een nadelig effect hebben. De fluittonen zullen naar verwachting optreden bij hoge windsnelheden. Bij windkracht 9 (storm) durven alleen nog zwaluwen en eenden te vliegen. Bij windkracht 10 (zware storm) blijven alle vogels aan de grond. De kans dat het optreden van fluittonen een nadelig effect zal hebben op de uilen is niet waarschijnlijk, omdat bij hoge windsnelheden vogels niet vliegen. Daarnaast wordt op een afstand groter dan 75 meter het geluid gecamoufleerd door de wind.

Vanuit de flora en fauna wetgeving wordt gekeken of nieuwe elementen een bedreiging kunnen vormen voor de aanwezige flora en fauna. Extra geluidbelasting door fluittonen of ander soortig geluid afkomstig van het gebouw bij harde wind kunnen zoals in het bovenstaande opgemerkt. Bij storm of harde wind zorgen ook de bomen en andere objecten (natuurlijke en onnatuurlijke) voor geluid. Gezien het incidentele en natuurlijke karakter van wisselende weersomstandigheden wordt geen verstoring verwacht. Op basis hiervan kan worden gesteld dat de kans op hoge windsnelheden klein is. Daarbij is geluid geen bedreiging conform de Flora en Fauna wetgeving.

<u>Conclusie literatuurstudie</u>
Met betrekking tot de voorgenomen uitbreiding van de derde piste SnowWorld te Zoetermeer kan op basis van de geraadpleegde literatuur de volgende conclusie worden getrokken.

de skibaan:
Op basis van de beschikbare gegevens is het model uit het Masterproject van Rinka van Dommelen (2) ingevuld door Greten Raadgevende Ingenieurs (3). Hieruit volgt dat SnowWorld zich bevindt in de 'oranje zone' van het model. Wat betekent dat bij hoge windsnelheden (grofweg windkracht 8 en hoger) fluittonen kunnen ontstaan. De belangrijkste voorwaarden voor het optreden van fluittonen zijn aanwezig, te weten de aanwezigheid van een (grote) spleetafstand en de aanwezigheid van storende elementen tussen de kolommen als windverbanden , tussenliggers, et cetera., die naar verwachting de kans op het optreden van fluittonen zullen verlagen. Het optreden van fluittonen bij hogere windsnelheden is niet uitgesloten.

In deze studie wordt uitgegaan van een staalconstructie bestaande uit niet-buisvormige profielen, met scherpe hoeken.
Windkracht 8 of hoger treedt slecht 4 uur maand op. Dit betreft alle windrichtingen terwijl bij slechts een beperkt deel van de richtingen fluittonen zullen ontstaan. 4 uur kan dus worden beschouwd als worst-case. In de praktijk zal de tijd korter zijn. Op voorhand is echter niet aan te geven bij welke windrichting dat zal zijn.
Uit onderzoeken blijkt dat bij deze windsnelheid uilen niet vliegen en dus ook niet foerageren. De windkracht is voor uilen te hoog om te kunnen vliegen. Geluid is voor uilen van de belang om prooidieren op te sporen. Daarbij worden fluittonen vanaf een afstand van 75 meter van de baan gecamoufleerd door het geluid van de wind. De kans op hinder als gevolg van windgeluid wordt hierdoor minimaal geacht. Op basis van het bovenstaande wordt het niet zinvol geacht om op voorhand aanpassingen aan het ontwerp door te voeren.

uitkijktoren / trap:
Uit zowel de studie Masterproject van Rinka van Dommelen (2), als de studie Wind-geïnduceerd geluid aan gebouwen en constructies van Jeroen Ploemen (4), volgt dat het gebruik van roosters veelal de oorzaak is van het optreden van fluittonen rond bebouwing. De beschikbare impressie van de voorgenomen uitbreiding van piste 3 van SnowWorld te Zoetermeer (1) laat zien dat er een trap naar het Panoramaterras staat gepland. Deze bestaat uit een kolom voorzien van roosters waaromheen de trappen worden bevestigd. Uit de literatuur blijkt dat de roosters, met een herhaling van

spleten of spijlen en scherpe randen < 5 cm de kans op het ontstaan van fluittonen kunnen vergroten. De trap is dus een aandachtspunt voor het ontstaan van de fluittonen.
Fluittonen kunnen optreden vanaf windkracht 5. Of fluittonen optreden is afhankelijk van de windhoek en de montage hoek. Windkracht 5 komt gemiddeld 95 uur per maand voor. Door de zeer specifieke situatie en de benodigde combinatie kan op voorhand niet worden aangegeven hoelang fluittonen op zullen treden. 95 uur betreft alle windrichtingen terwijl bij slechts een beperkt deel van de richtingen fluittonen zullen ontstaan. 95 uur kan dus worden beschouwd als worst-case. In de praktijk zal de tijd korter zijn. Op voorhand is echter niet aan te geven bij welke windrichting dat zal zijn.
Op een afstand van 75 meter zullen fluittonen worden gecamoufleerd door windgeluid. Gesteld kan worden dat het foerageergebied hooguit beperkt zal worden tot een zone van 75 meter buiten de uitkijktoren. Er blijft echter voldoende gebied over. De kans op hinder als gevolg van windgeluid wordt hierdoor beperkt geacht.
Op basis van het bovenstaande wordt het niet zinvol geacht om op voorhand aanpassingen aan het ontwerp door te voeren. Overigens kunnen voor de trap/uitkijktorren na realisatie indien nodig maatregelen worden getroffen (bijvoorbeeld door de roosters te voorzien van transparante platen). Door deze na realisatie heel specifiek uit te voeren, kunnen de kosten ook worden beperkt.

Oplossingen

Uit het bovenstaande blijkt dat de kans op hinder ten gevolge van fluittonen minimaal is. Indien hinder optreedt kunnen na realisatie op specifieke punten maatregelen worden getroffen. Hiervoor zijn in dat stadium meerdere oplossingen denkbaar zoals kunststof afrondingen en beplating.

Het vermijden van roosters rond de kolom van de trap naar het Panoramaterras kan het veroorzaken van fluittonen voorkomen. Indien roosters worden gebruikt, kunnen deze mogelijk worden voorzien van (transparante) platen waardoor de wind geen kans krijgt fluittonen te veroorzaken. Ook het gebruik van roosters met onregelmatige en/of grotere afstand van spleten en/of het afronden van hoeken kan fluittonen voorkomen. Deels betreft dit dus eenvoudige maatregelen welke ook nog na realisatie getroffen kunnen worden.

Met vriendelijke groet,
BK Geluid & Trillingen

D.C. Blokland
directeur

Bijlage 1.

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Presentatie definitief schetsontwerp

28 oktober 2013

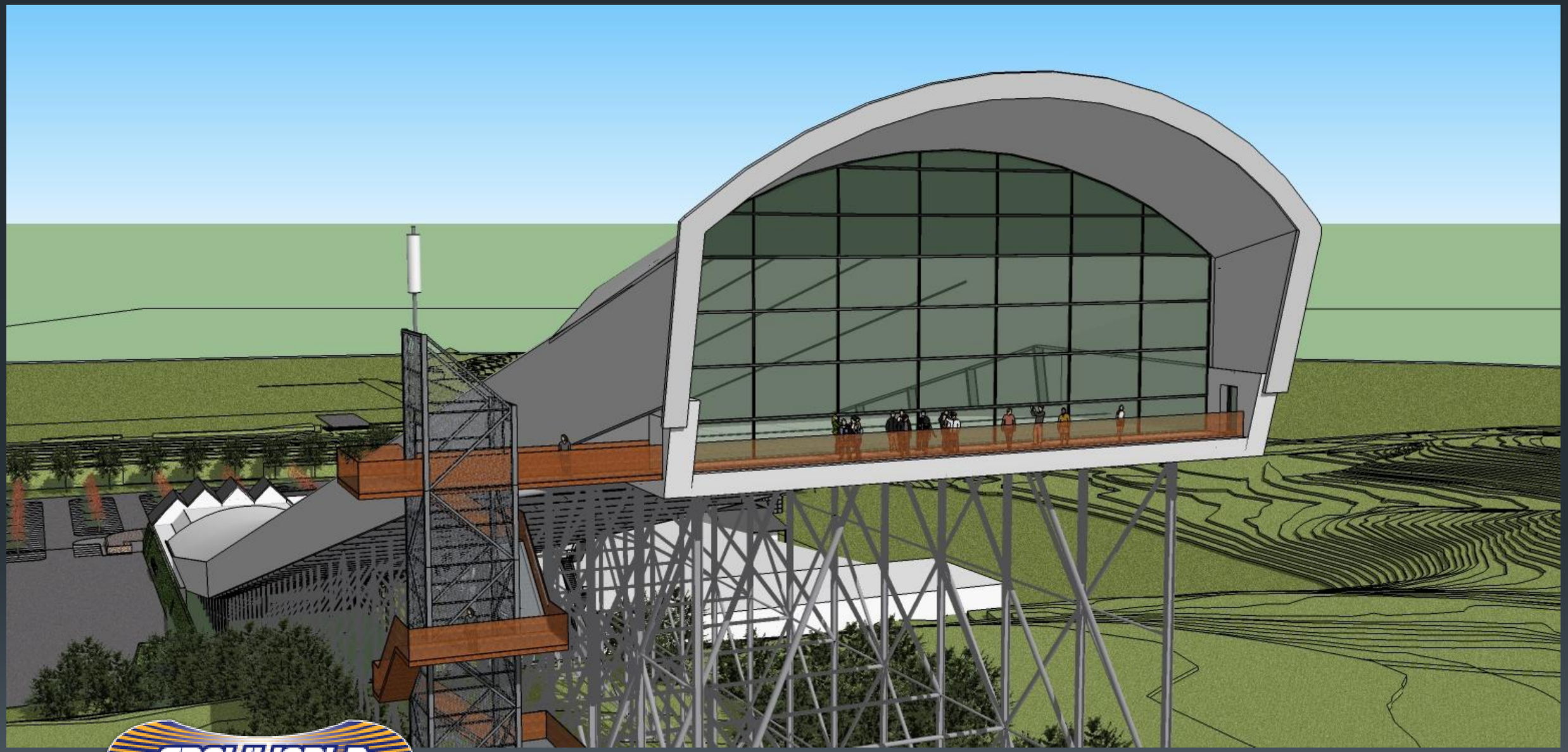
SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Inhoud presentatie definitief schetsontwerp

1. Toelichting Definitief schetsontwerp: plattegrond, gevels en 3D impressies
2. Viewpoints polderlandschap bestaand en nieuw
3. Viewpoints Buytenpark bestaand en nieuw

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

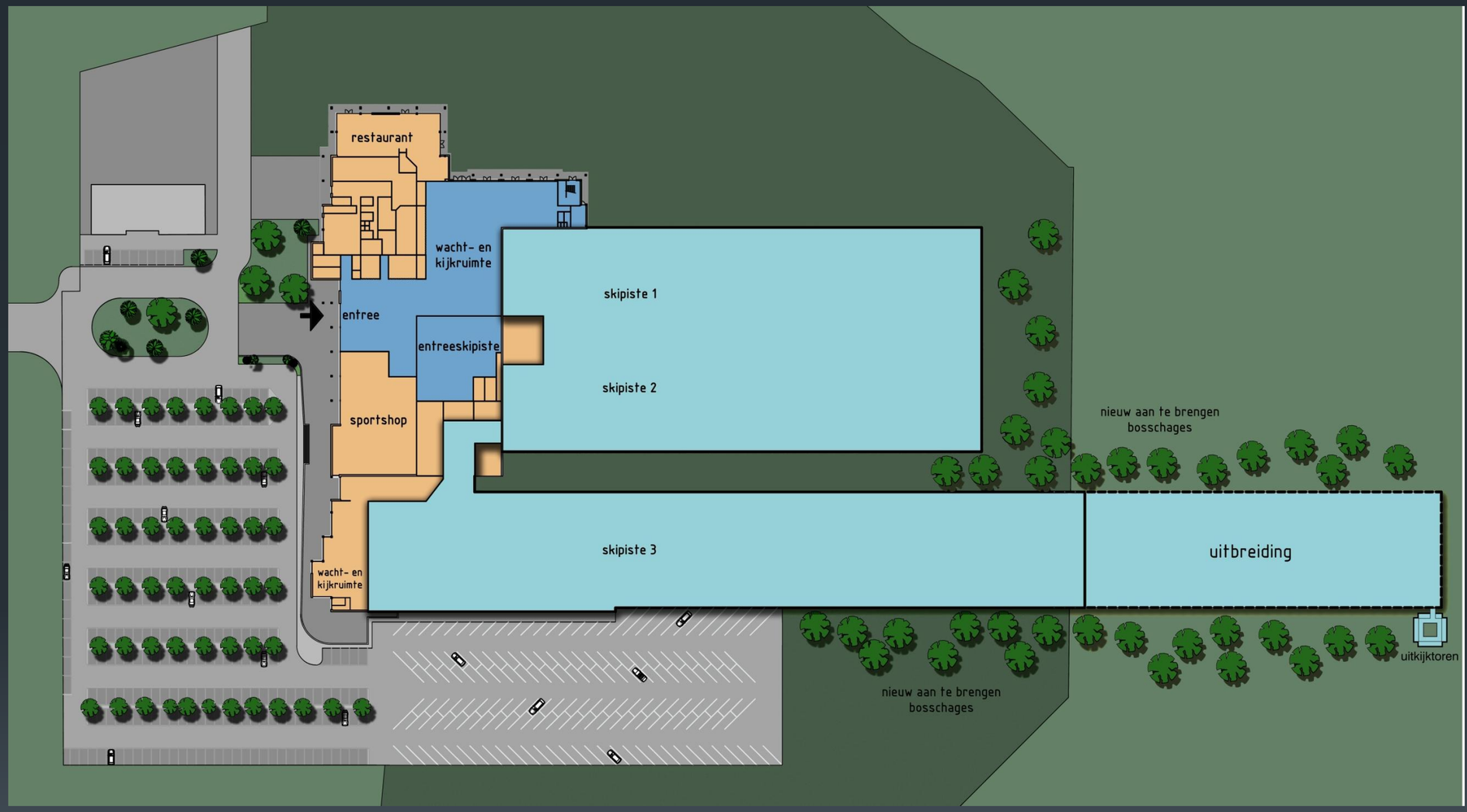
SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3



SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

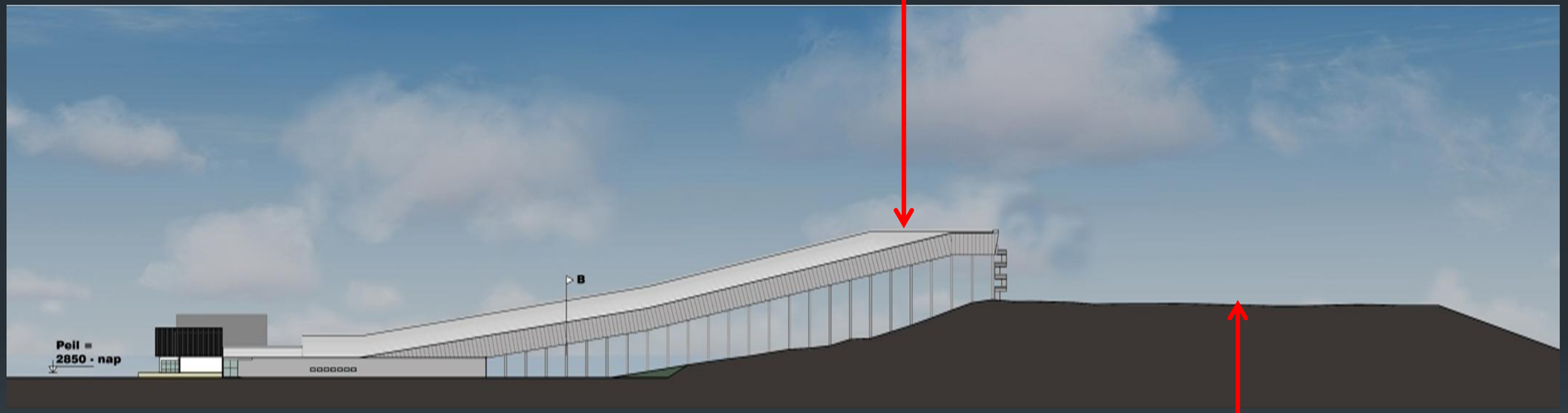
Plattegrond bestaand

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3



Plattegrond nieuw

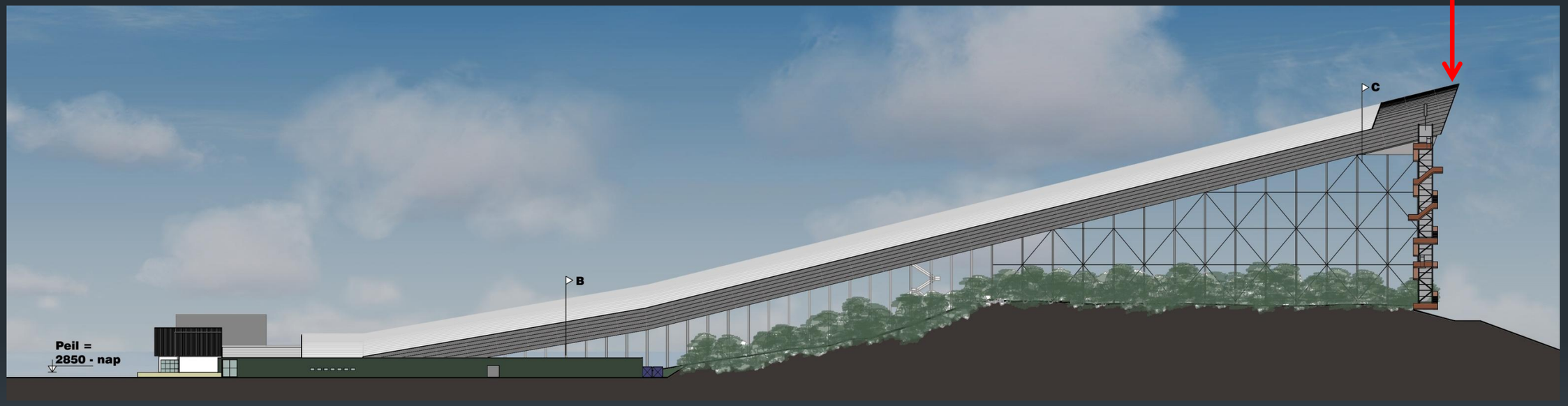
SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3



Oostgevel bestaand

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Top uitbreiding ca. 68,2 meter + NAP



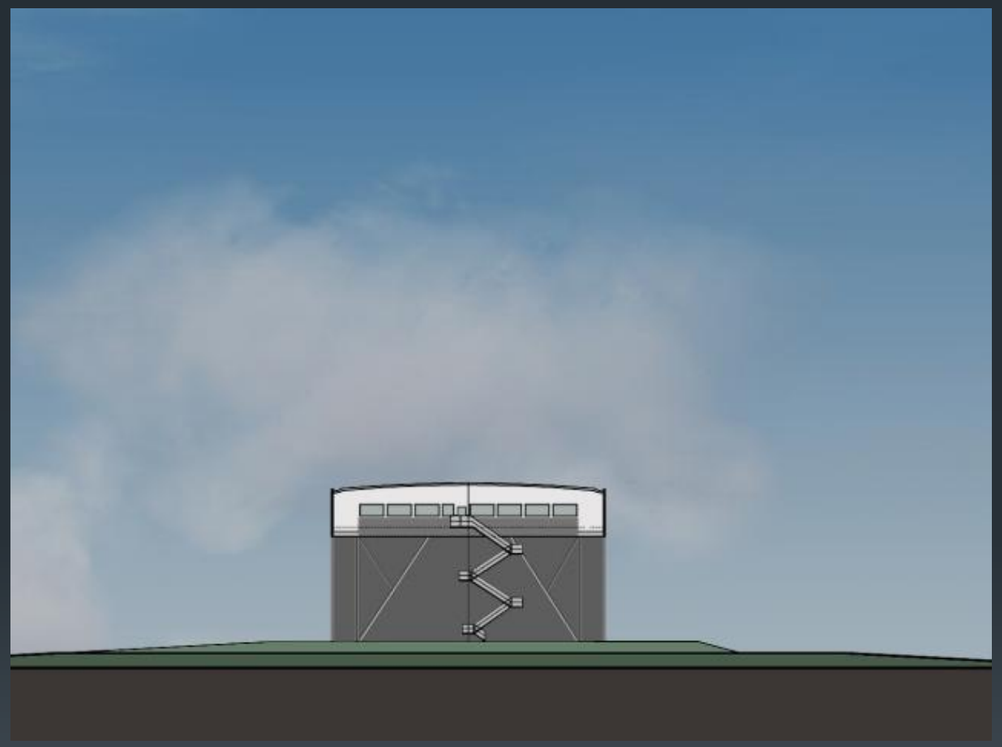
Parkeerterrein ca. 4,0 meter - NAP

Panoramaterras 52,5 meter + NAP

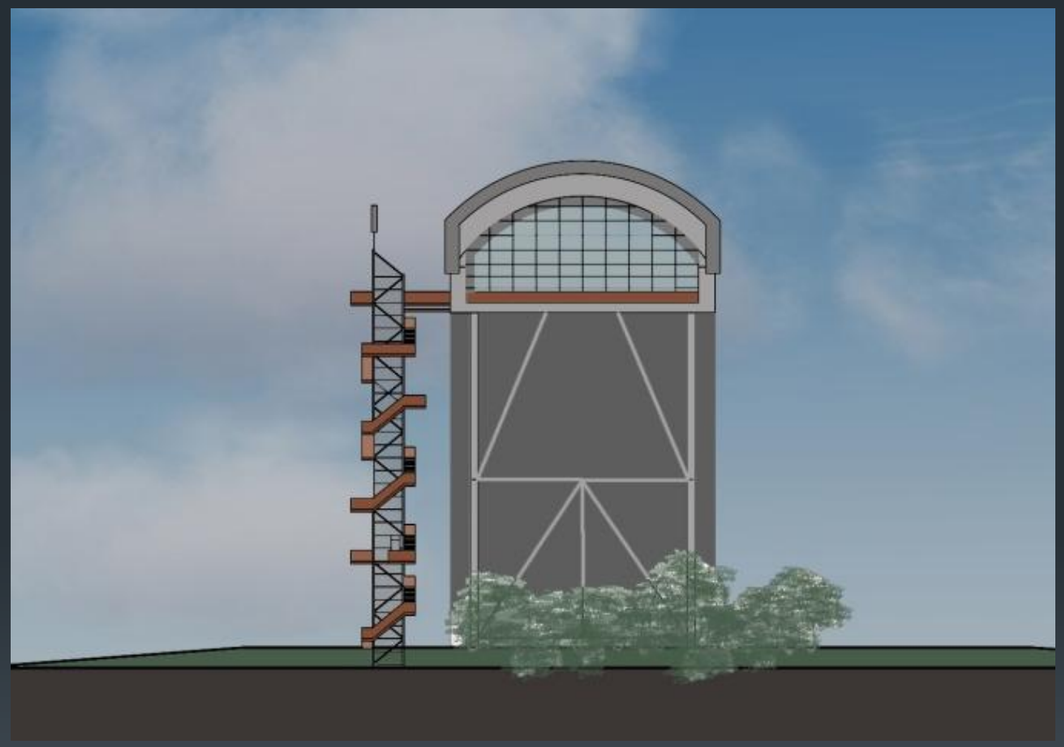
Oostgevel nieuw

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Top bestaand ca. 32,2 meter + NAP



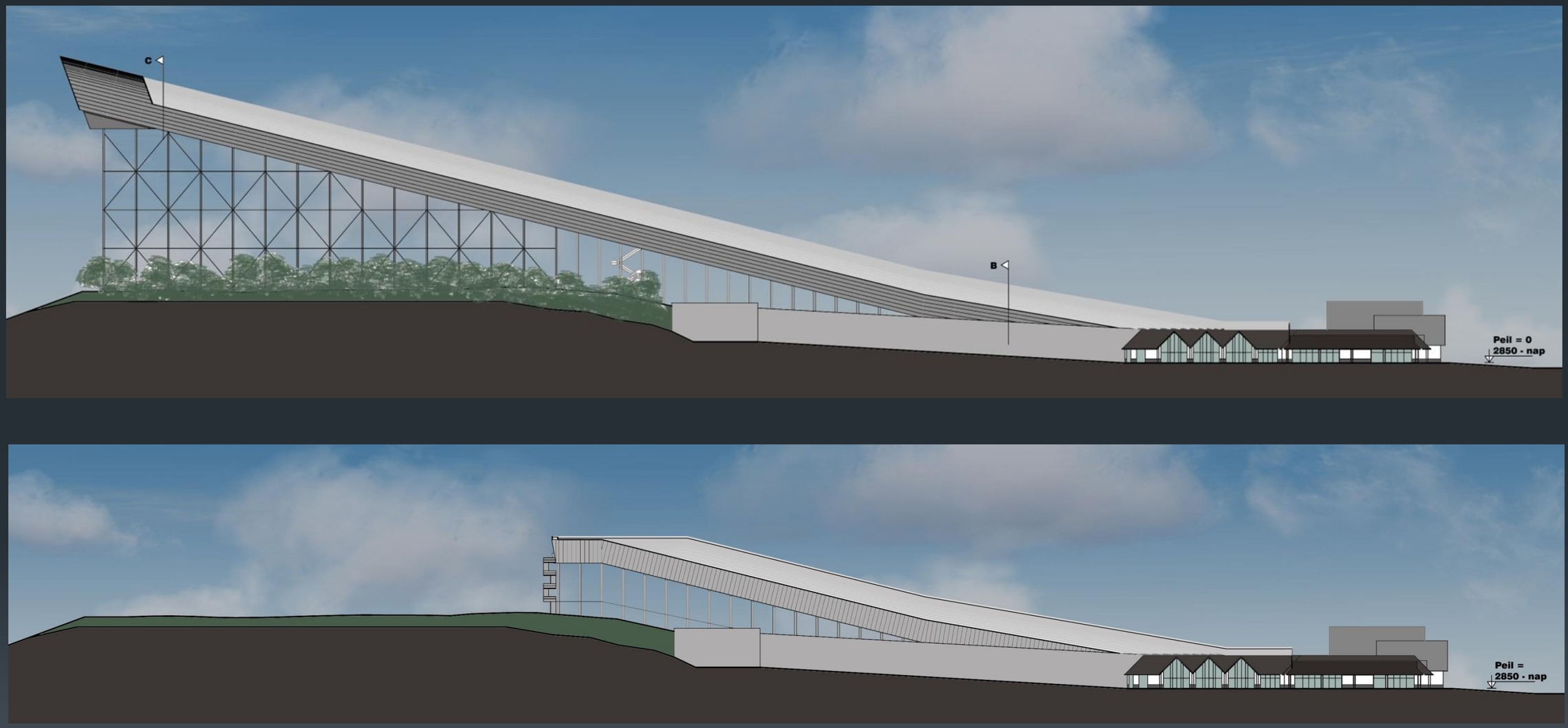
Top uitbreiding ca. 68,2 meter + NAP



Panoramaterras 52,5 meter + NAP

Noordgevel bestaand en nieuw

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

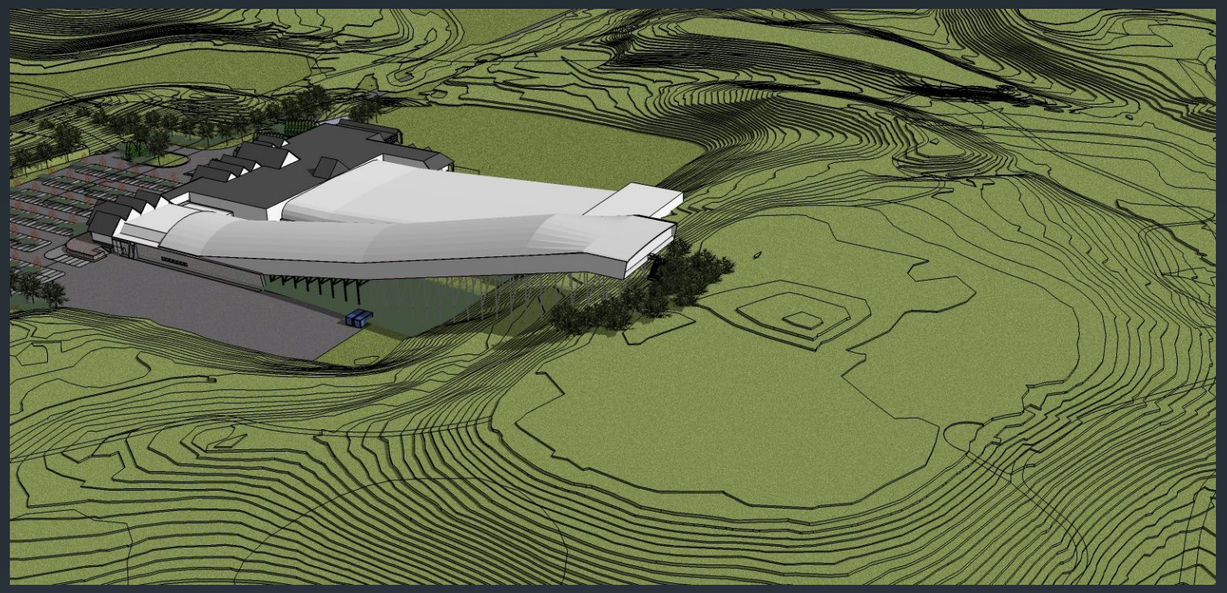


Westgevel bestaand en nieuw

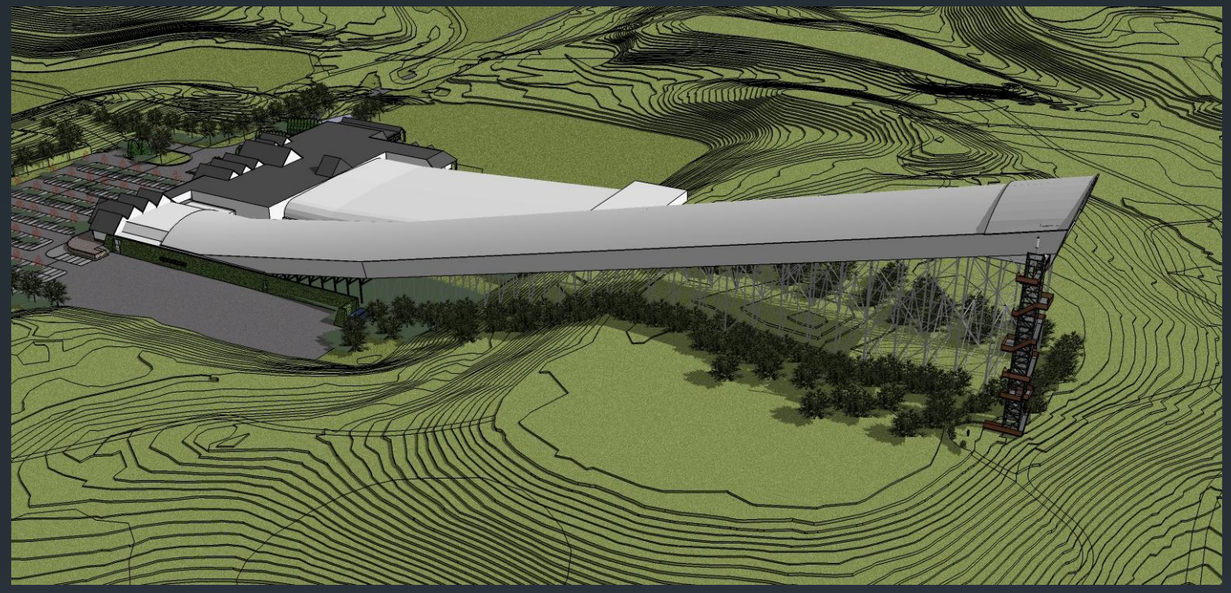
SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Zuidgevel bestaand en nieuw

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3



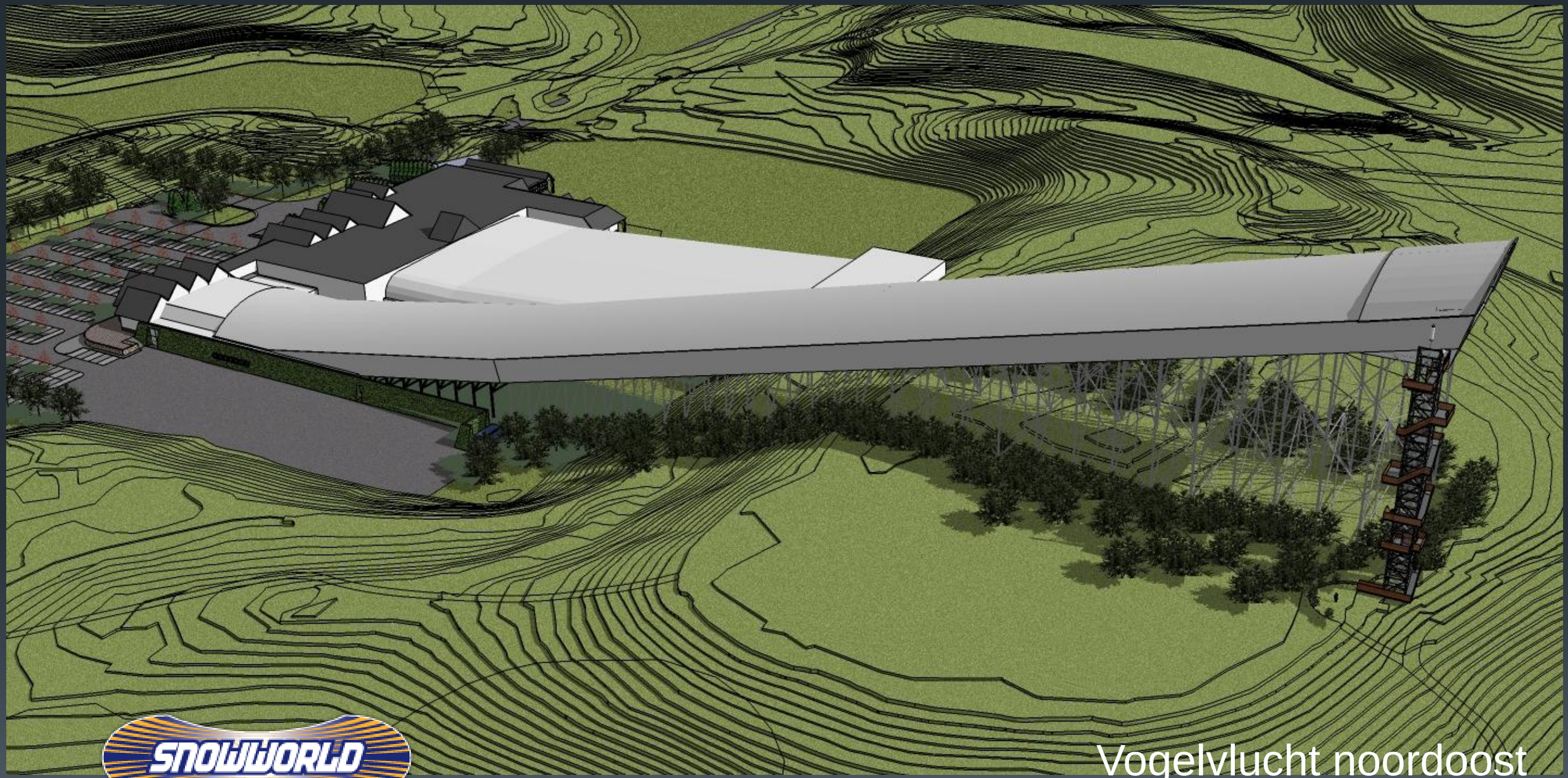
Bestaand



Nieuw

Vogelvlucht noordoost

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3



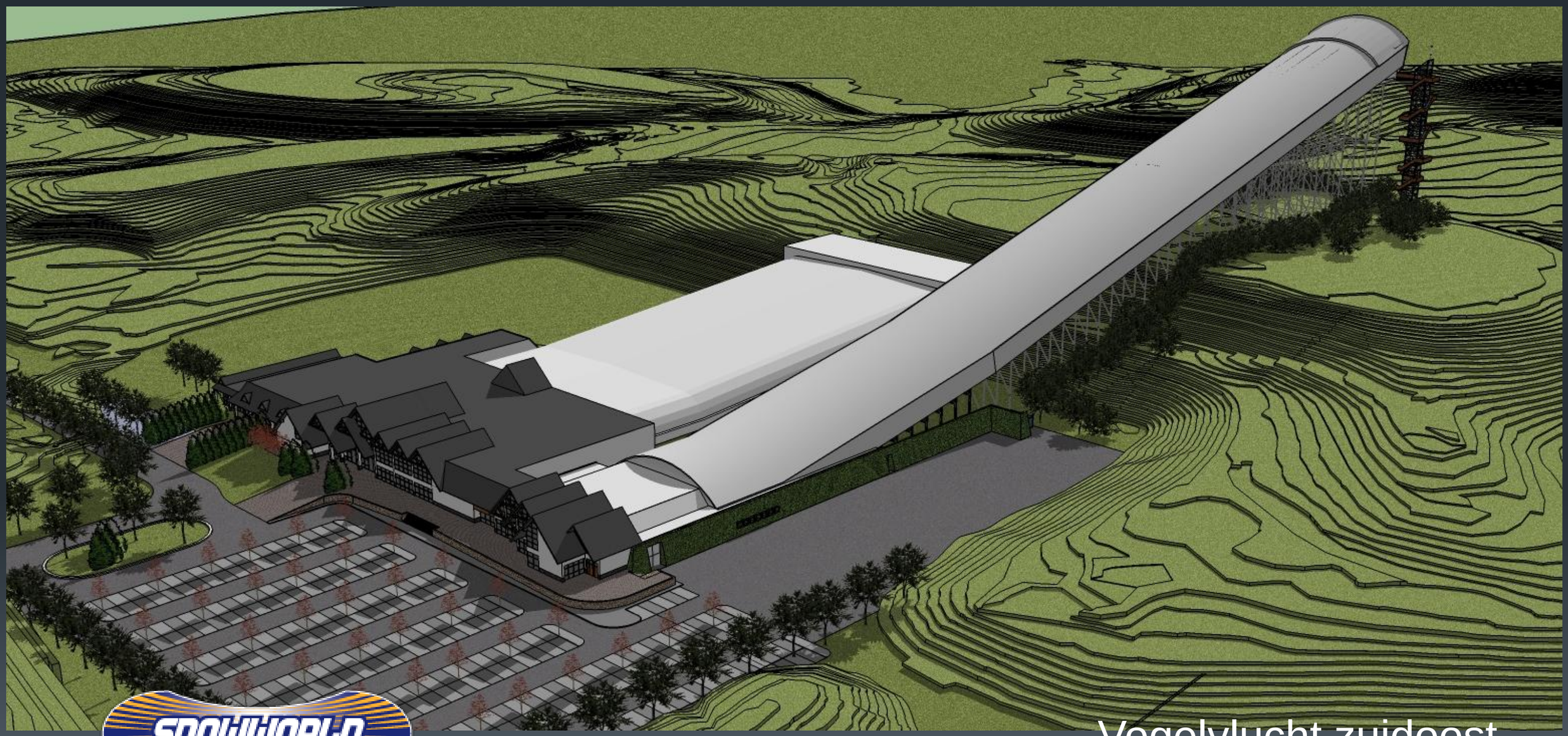
Vogelvlucht noordoost

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Vogelvlucht noordwest

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

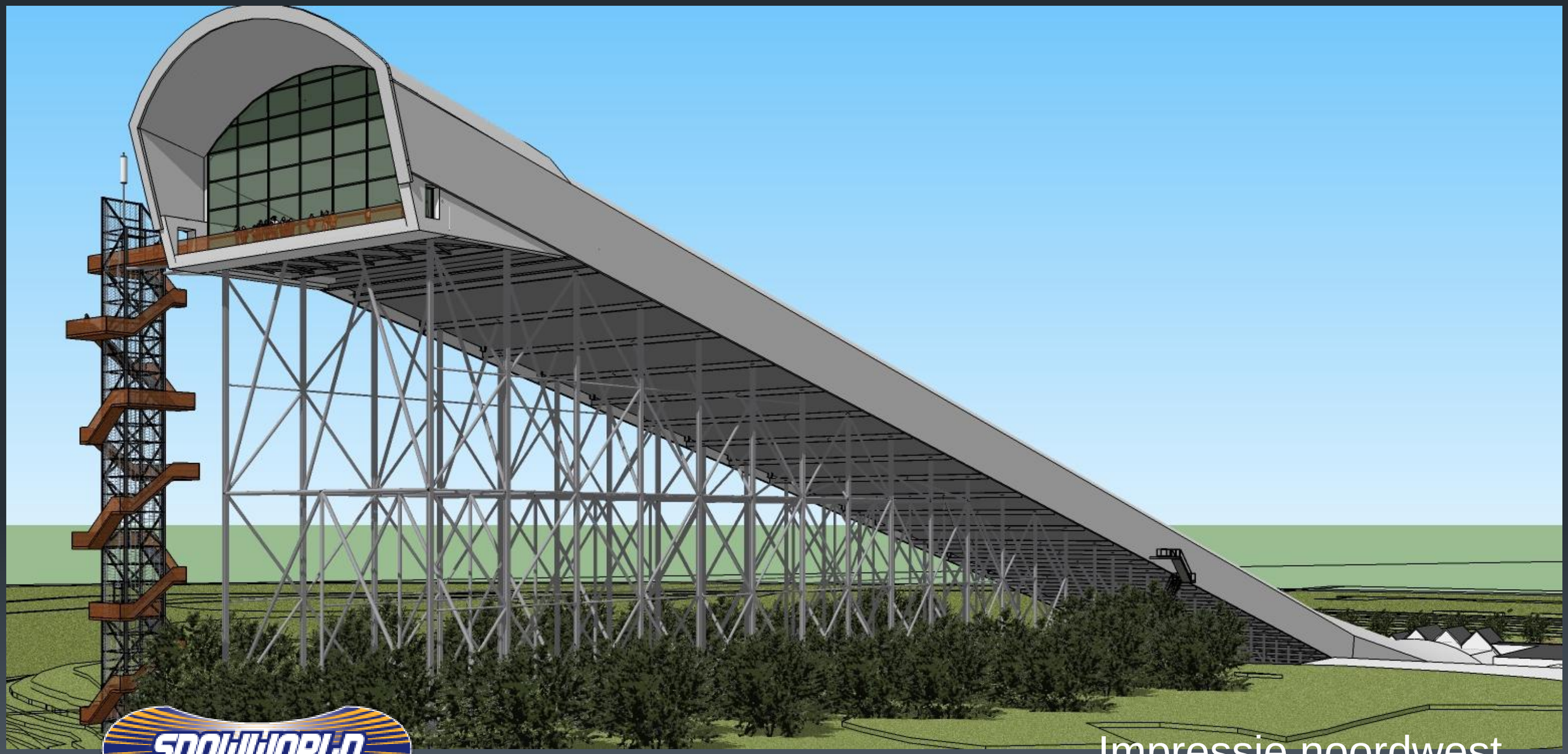


Vogelvlucht zuidoost

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Vogelvlucht zuidwest

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

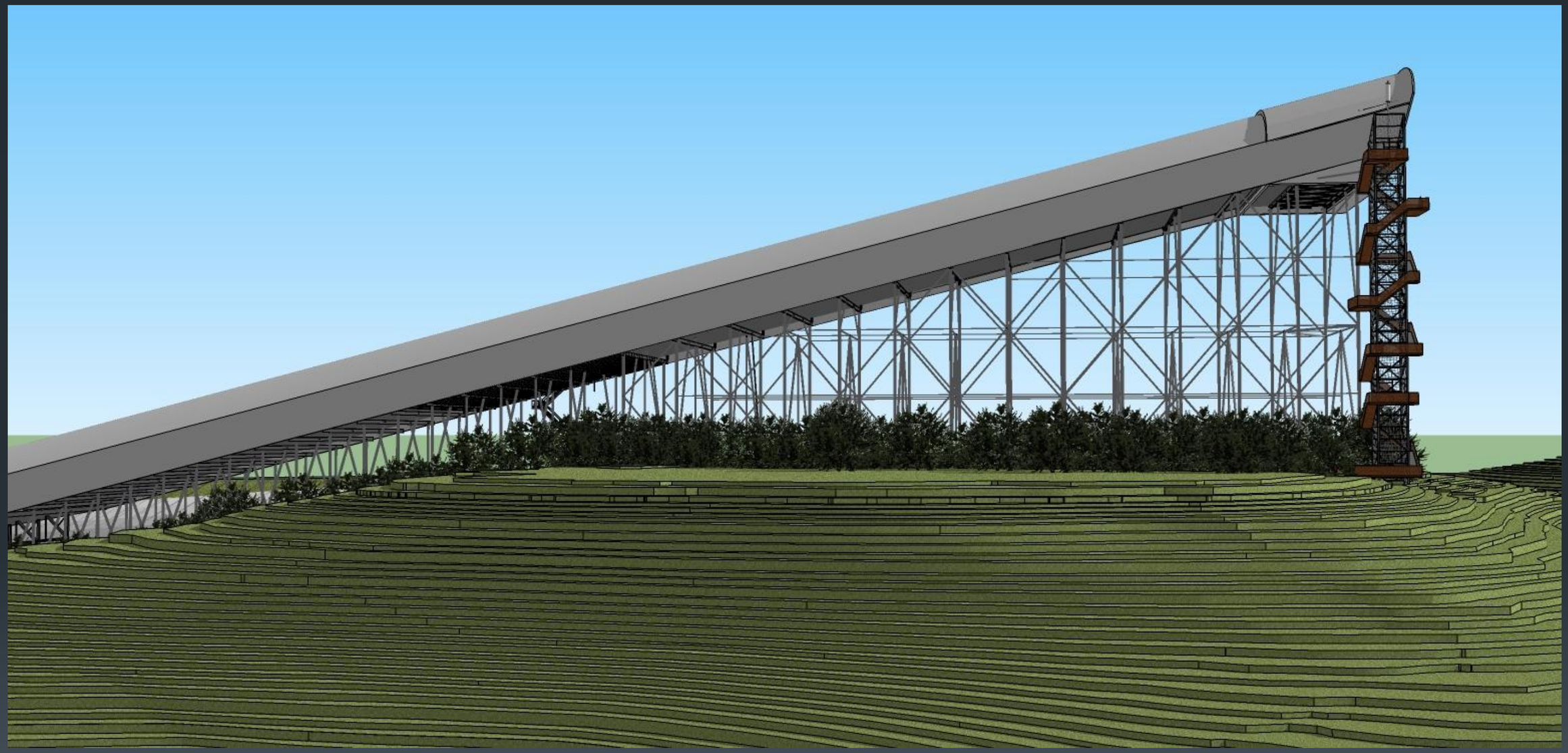


Impressie noordwest

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie noordoost

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

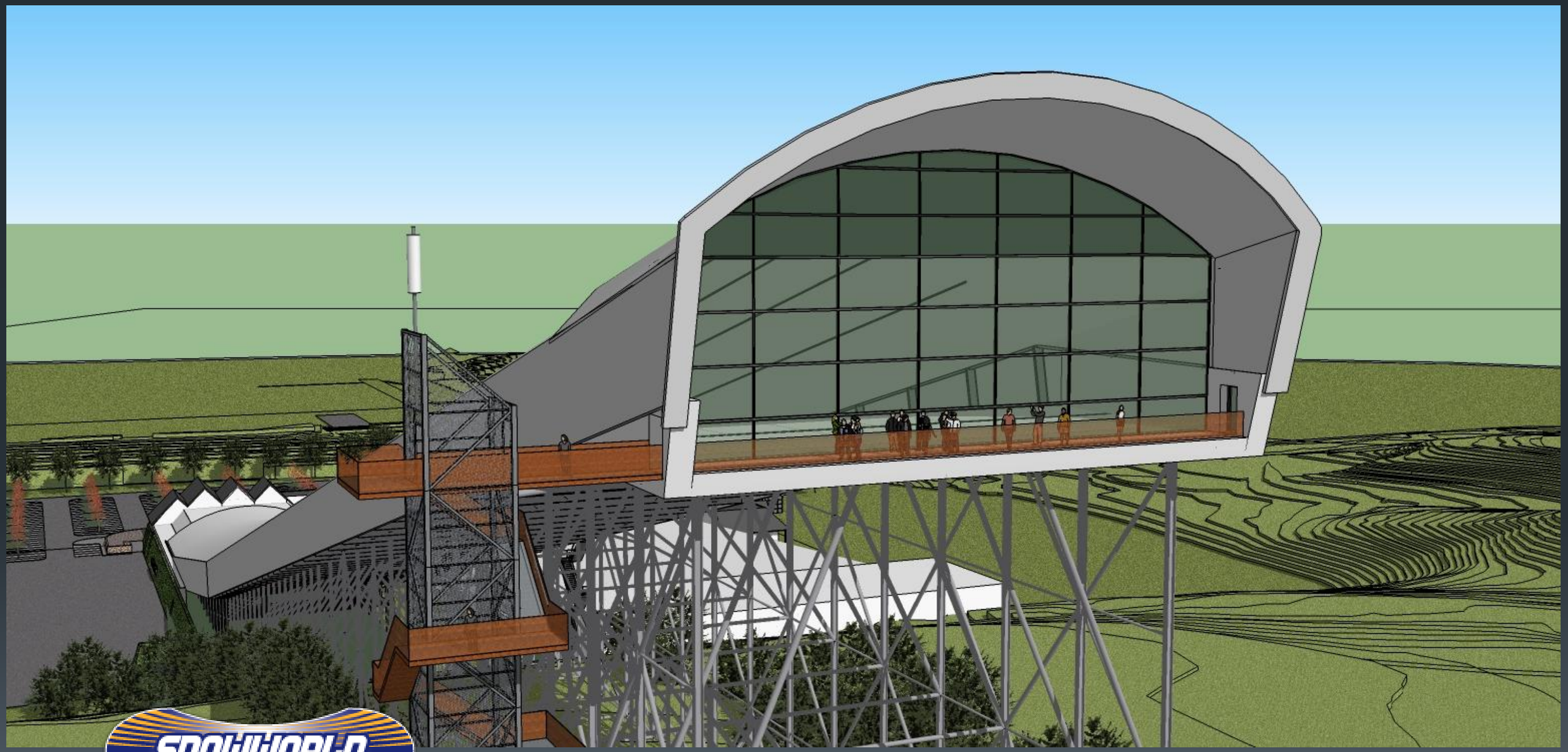


Impressie oost

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

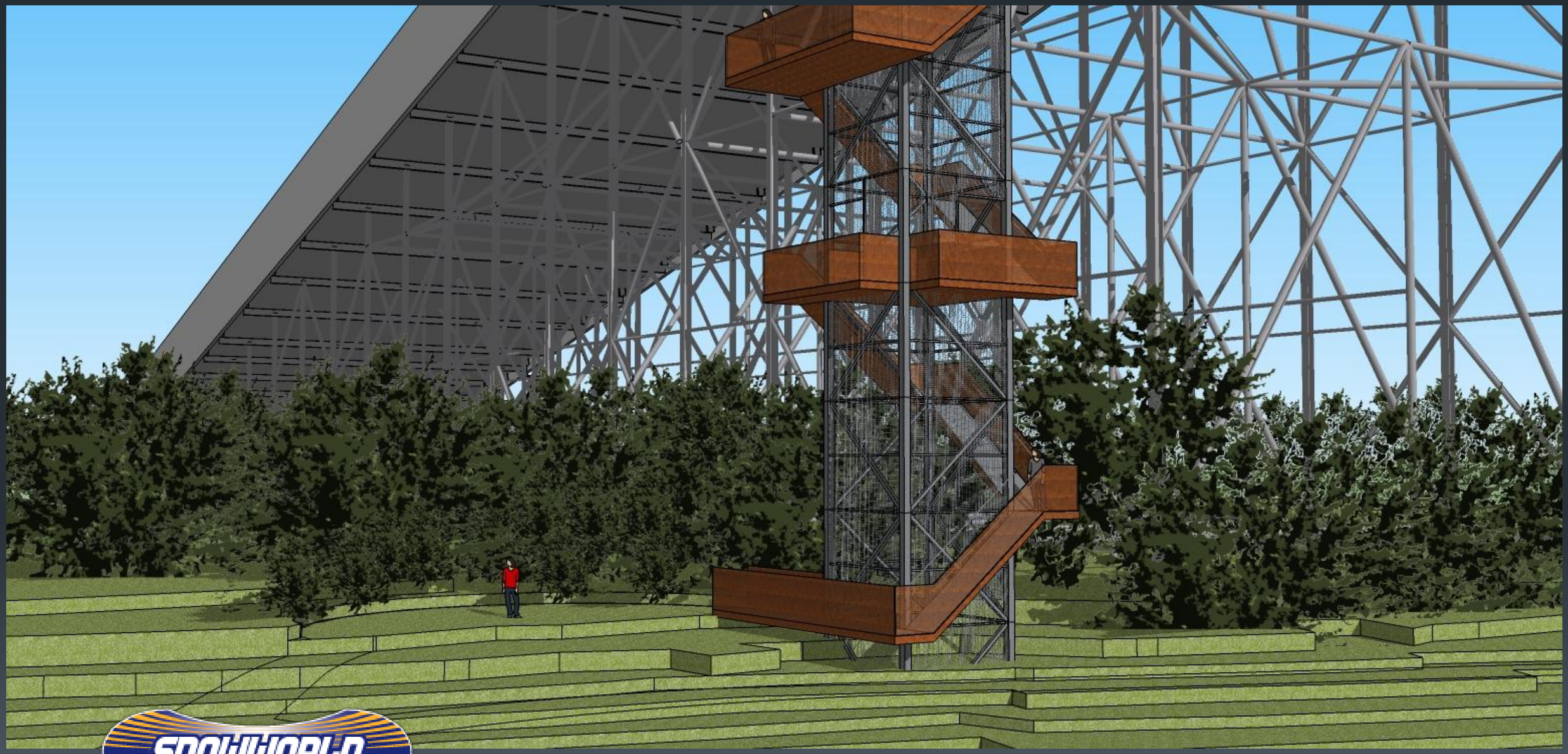
Impressie noord

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3



Panoramaterras en uitkijktoren

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3



Toegang uitkijktoren en panoramaterras

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Viewpoints omringend polderlandschap bestaand en nieuw

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaande Skyline vanuit Drooggemaakte Grote Polder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw Skyline vanuit Drooggemaakte Grote Polder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaand beeld vanuit Drooggemaakte Grote Polder / Nieuwe Driemanspolder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw vanuit Drooggemaakte Grote Polder / Nieuwe Driemanspolder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaand Skyline Zoetermeer vanuit Nieuwe Driemanspolder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw Skyline Zoetermeer vanuit Nieuwe Driemanspolder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaand beeld vanuit Nieuwe Driemanspolder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw vanuit Nieuwe Driemanspolder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaand beeld vanuit Zoetermeersche Meerpolder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw vanuit Zoetermeersche Meerpolder

polderlandschap

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaand

Entree SnowWorld

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw

Entree SnowWorld

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaand

Parkeerterrein SnowWorld

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw

Parkeerterrein SnowWorld

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaand

Buytenpark

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw

Buytenpark

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaand

Buytenpark

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw

Buytenpark

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Bestaand

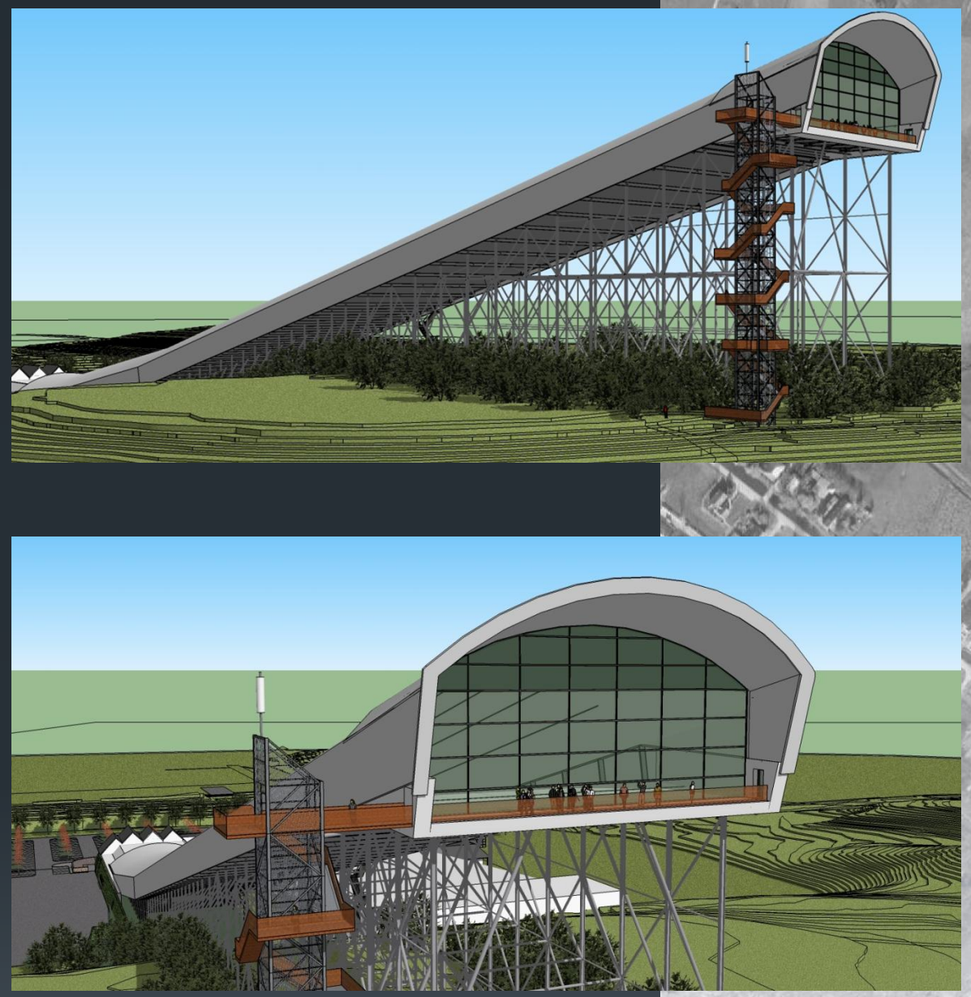
Buytenpark

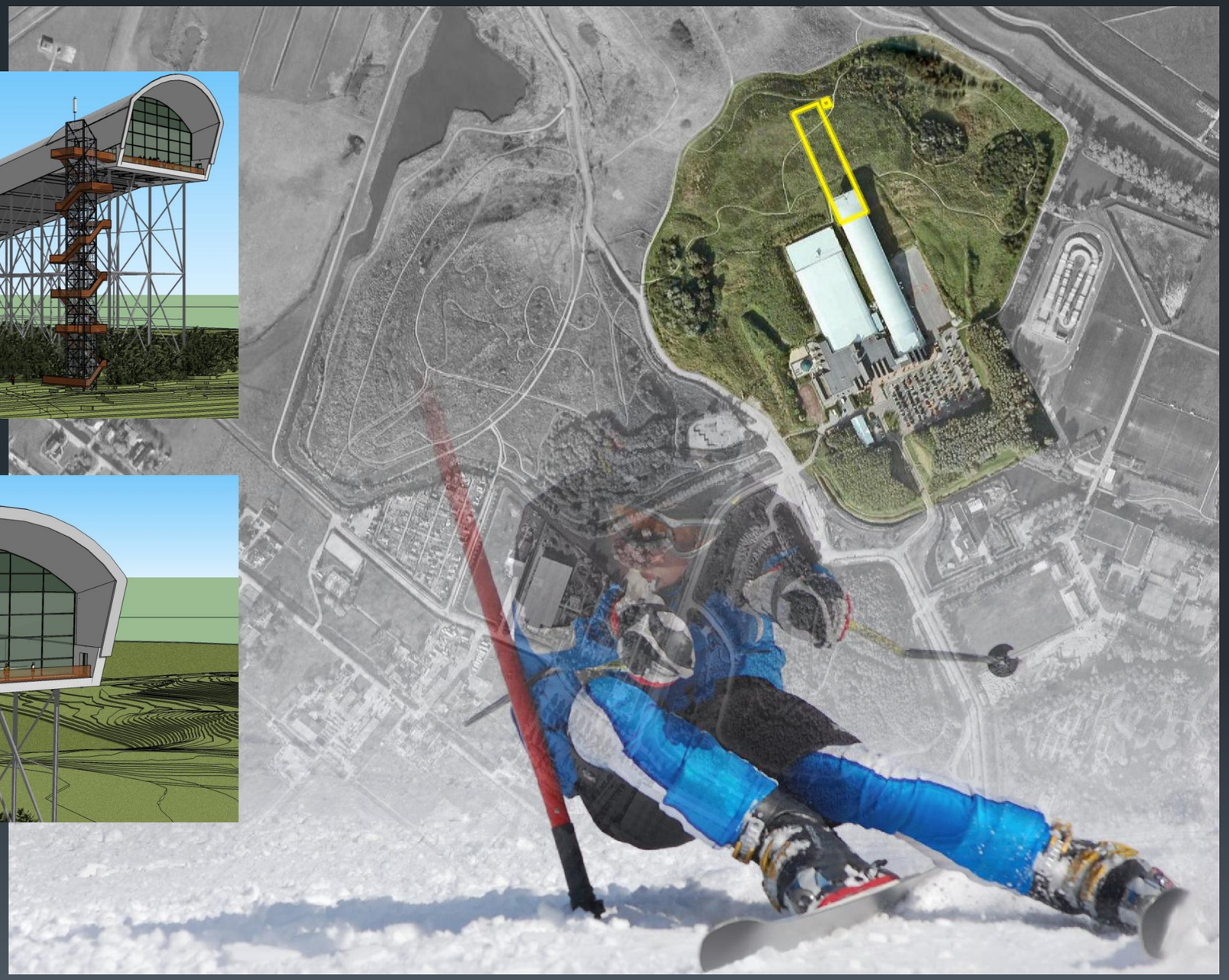
SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3

Impressie nieuw

Buytenpark

SnowWorld Zoetermeer
Uitbreiding Baan 3





Bijlage 2.

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 betekend 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 outskirt 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 significance 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 lijzijde 20
4.6 Verstoren 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 wiskundige modellen beslaan nog niet de gehel 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 gevelelement 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 kinderlawaai 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 potentiele 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.

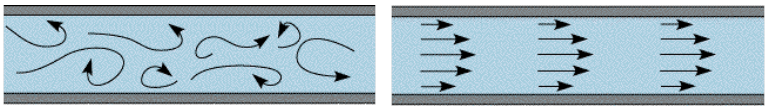
Hoofdstuk 2

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.

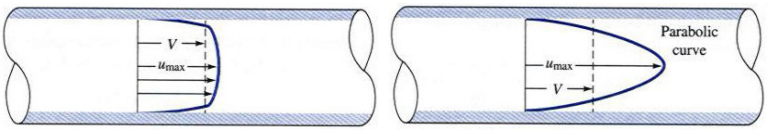
Twee soorten luchtstroming kunnen worden onderscheiden: laminaire en turbulente stroming, zie figuur 2.1. Er is ook een overgangsfase tussen deze twee typen stromingen [25].

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.



(a) (b)

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



(a) (b)

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".

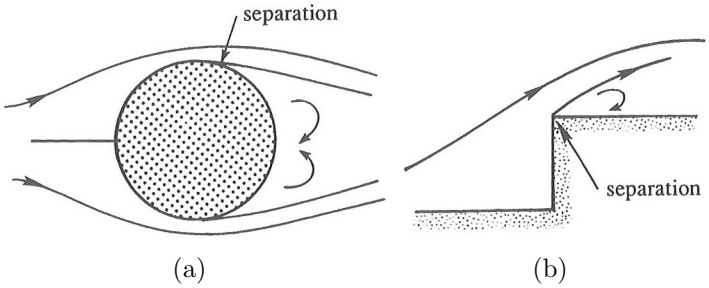
Fluittonen die ontstaan om gebouwen zijn een vorm van aerodynamisch geluid. Aerodynamisch geluid is een akoestisch fenomeen dat een bijproduct is van een stroming. Ze ontstaan expliciet niet door het trillen van objecten, hoewel deze het geluid wel beïnvloeden [19, 26]. Fluittonen opgewekt door trillende 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 daarvam. [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 viskeuze[1] stroming (Re ¿¿ 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 lift[2] fluctuaties zijn verantwoordelijk voor de grondfrequentie, de drag[3] 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

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

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

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

Niet in alle gevallen is zo'n wervelafschudding tonaal. Osborn Reynolds ondekte 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]:

$$Re = \frac{U \times d}{v} \tag{2.1}$$

waarin

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

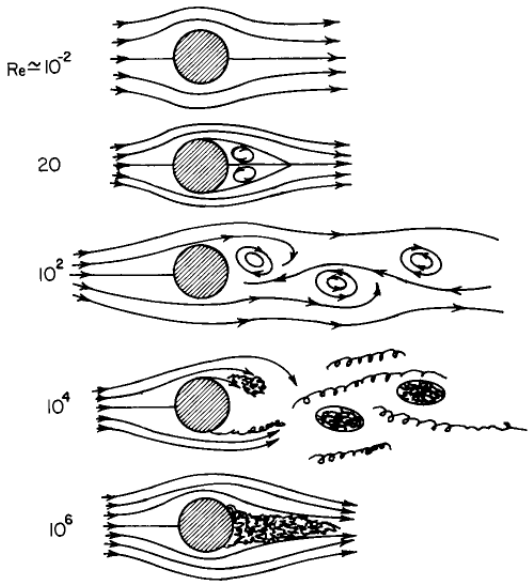
Hoe groter de snelheid en / of hoe groter het object, hoe groter het Reynoldsgetal. Een hoog Reynoldsgetal geeft een hoge mate van turbulentie achter het object aan. De volgende indeling kan er gemaakt worden [19]:

	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 gebeurd 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 Reynolds getal 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

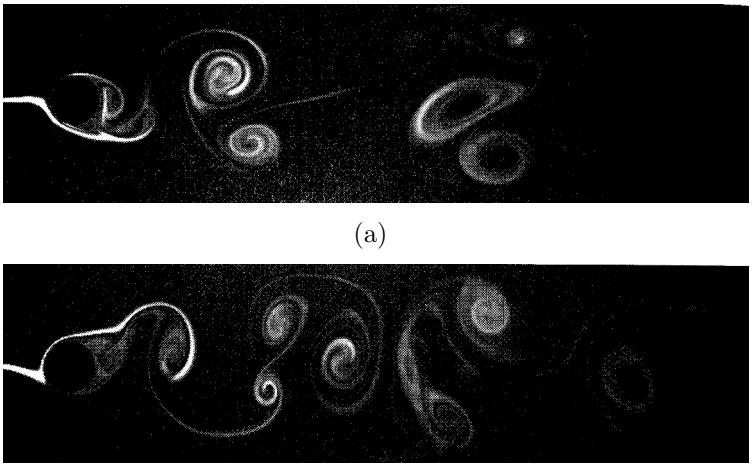


Figuur 2.4: Reynolds getal van de stroming, middelste stroming betreft 'Von Karman straat'

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 momentopenames 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 frequentiebied 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 wervelschudding, deze wervels versterken elkaar tot grotere amplitudes.

2.4 Strouhalgetal

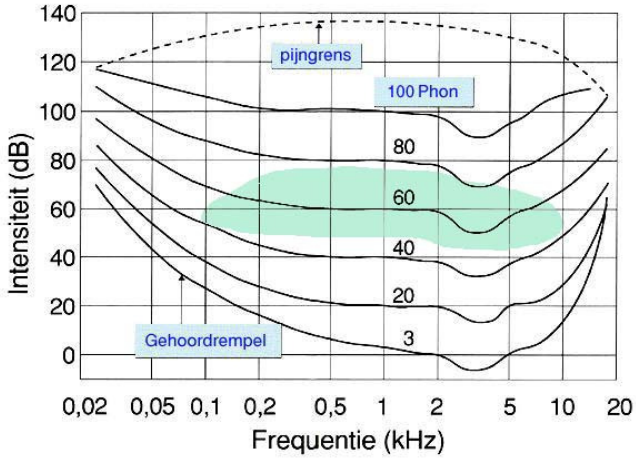
Of periodieke wervelafschudding hoorbaar geluid produceert hangt, naast dat er genoeg drukverschil moet zijn, af van de frequentie van afschudden. Deze moet in het voor mensen hoorbare gebied liggen. Het menselijke oor is gevoelig voor frequenties (grofweg) tussen de 100 Hz en 10.000 Hz, zie figuur 2.6.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

$$St = f\frac{d}{U} \tag{2.2}$$

waarin

f	= frequentie	(Hz)
St	= Strouhalgetal	(-)
U	= luchtsnelheid	(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



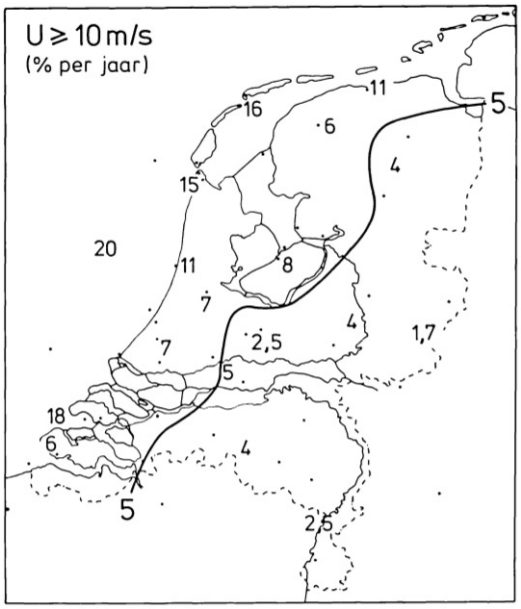
Figuur 2.6: Gevoeligheid van het menselijk oor

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

Hoofdstuk 3

Windklimaat in Nederland

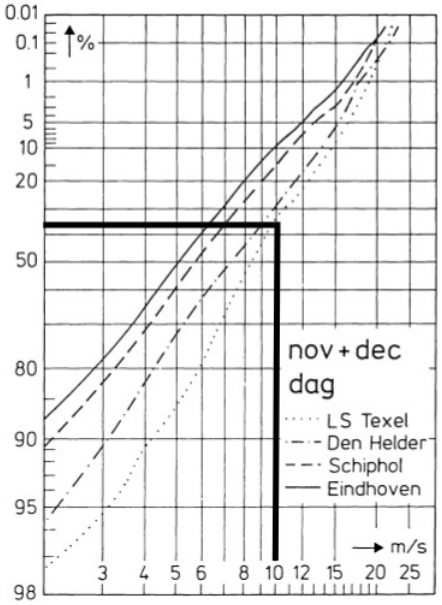
Om fluittonen te kunnen produceren is het van essentieel belang dat er naast een laminaire aanstroming een hoge luchtsnelheid is. Dit heeft alles te maken met de bebouwing en de structuur van het landschap.



Figuur 3.1: Percentage winduren >10m/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 word 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 gevarenzone voor fluittonen.

3.1 Bebouwde omgeving

Gevelelementen[1] *buiten de bebouwde omgeving* zijn gevelelementen 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.

Gevelelementen die zich *tussen de bebouwde omgeving* bevinden, zijn gevelelementen 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].

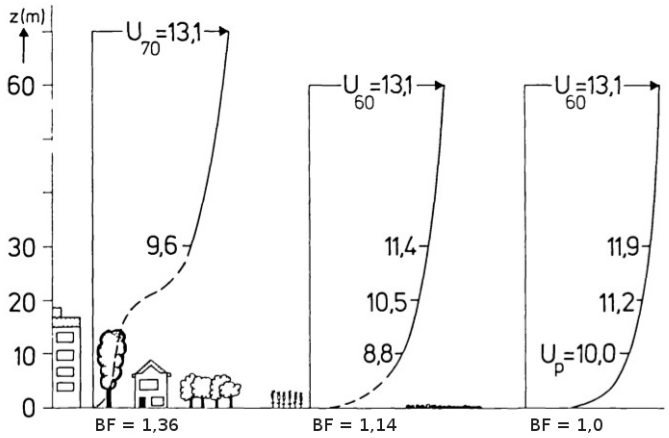
$$U_{lokaal} \approx \frac{U_{windkracht}}{BF} \tag{3.1}$$

waarin

U_{lokaal}	= de heersende lokale windsnelheid	(m/s)
$U_{windkracht}$	= heersende windsnelheid in open veld	(m/s)
BF	= beschuttingsfactor	(-)

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

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

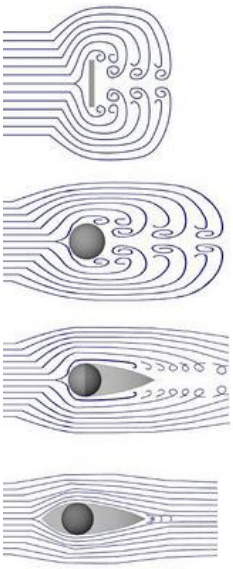
Aerodynamica van eenvoudige vormen

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 gevelelement 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 figuur4.1 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 eperimenten is aangetoond dat het Strouhalgetal gelijk is aan 0,21 voor cilinders met een Reynoldsgetal tussen de 80 en 200. Verder gedt voor cilinders als bepalende dimensie de diameter van het object.

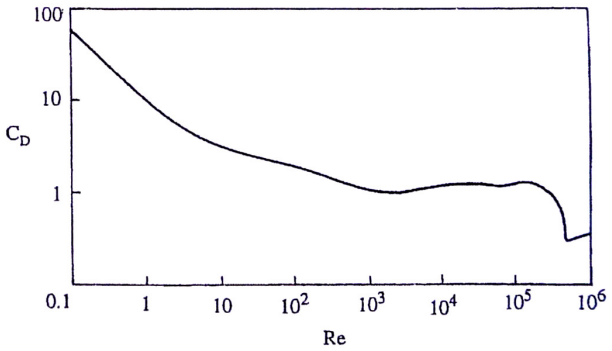
$$f = 0,2\frac{U}{d} \tag{4.1}$$

Om een frequentie van afschudding van boven de 500Hz te krijgen, is een windsnelheden van >10m/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).

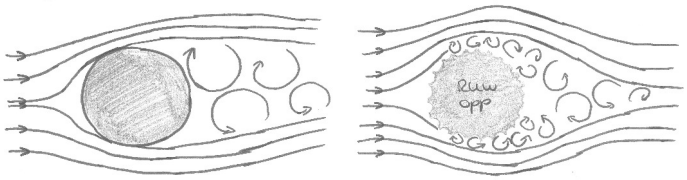


Figuur 4.2: Weerstandscoëfficient C_D als functie van Re voor een cilinder.

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.

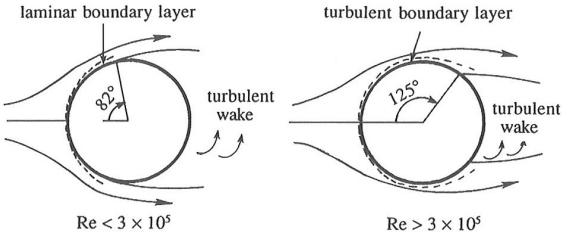
4.4 Kubus

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



(a) (b)

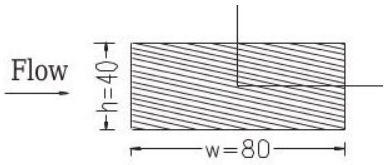
Figuur 4.3: Cilinder met een glad (a) en een ruw (b) oppervlak in een laminaire stroming. Een (kunstmatig) gedeukt oppervlak geeft minder drukverschil.



(a) (b)

Figuur 4.4: Cilinder in laminaire en turbulente stroming

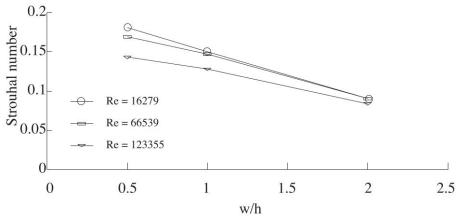
heeft effect op de ontstane drukverschillen. Een kubus onder een hoek van 10°ondervindt meer wrijving dan bij een rechte aanstroming, en produceert grotere wervels [31].



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

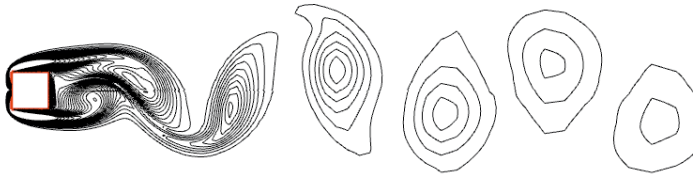
4.5 Kubus met kleine plaat aan de lijzijde

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

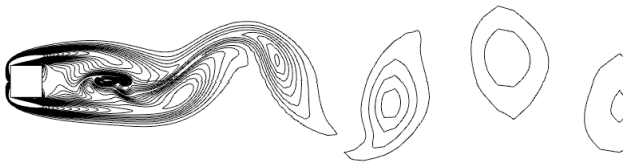


Figuur 4.6: Stroomlijning vs Strouhalgetal, hoe hoger ($\frac{w}{h}$) hoe gestroomlijnder het object

aan de lijzijde 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).



(a)



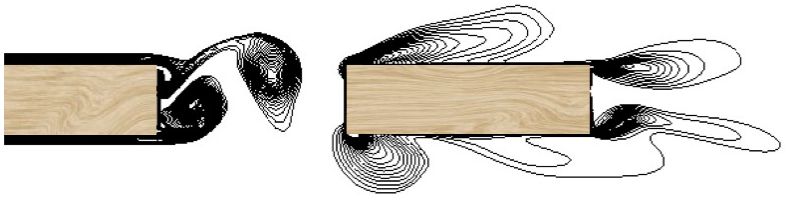
(b)

Figuur 4.7: Kubus in laminaire stroming (a) en een kubus met een kleine plaat aan de lijzijde 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

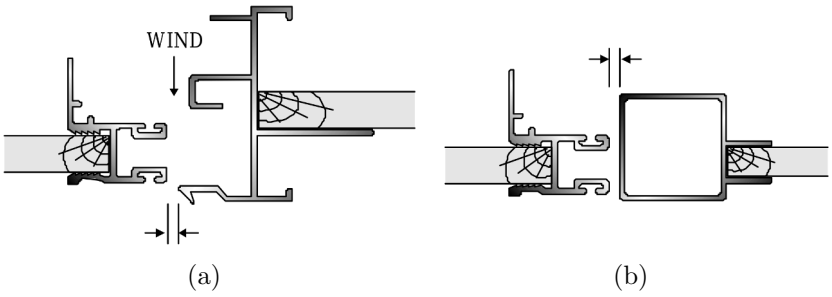
een object. De periodieke wervelafschudding kan daardoor niet voortgezet worden, zie figuur 4.8. Het rechter object beïnvloedt de afschudding van het linker object. Deze wordt echter direct verstoord door de tweede kubus. De tweede kubus heeft geen laminaire aanstroming, het aanstroomprofiel is verstoord. 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.

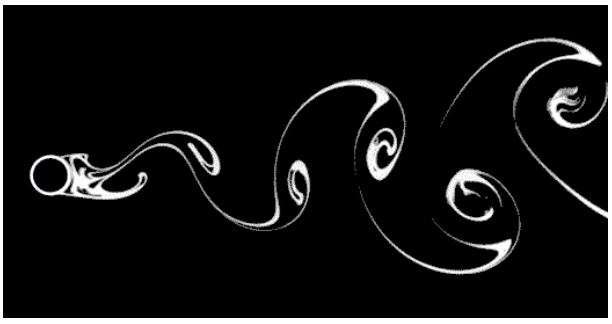
Hoofdstuk 5

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

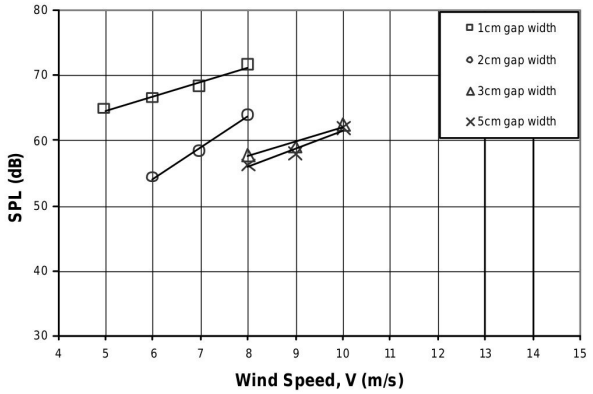
Spleten zijn een ideale plek om drukverschillen te creëren. Wanneer de spleet over enige lengte doorloopt kunnen de drukverschillen elkaar versterken. Bij onderzoek naar fluittonen door kozijnspleten is het Strouhalgetal (fd/u) gevarieerd van 0,6 - 1,6 door het veranderen van de spleetbreedte en de windsnelheid 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 geluiddrukniveau. Bij perforaties met een diameter >2cm werd alleen nog geluid geproduceerd in de vorm van ruis, het zelfde gold voor een windsnelheid <9m/s. In een enkel geval ontstonden er zachte fluittonen (ongeveer 45dB), bij een windsnelheid van 6m/s.

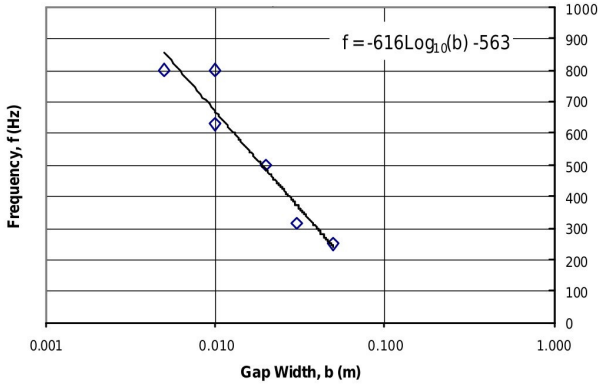
5.3 Roosters

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:



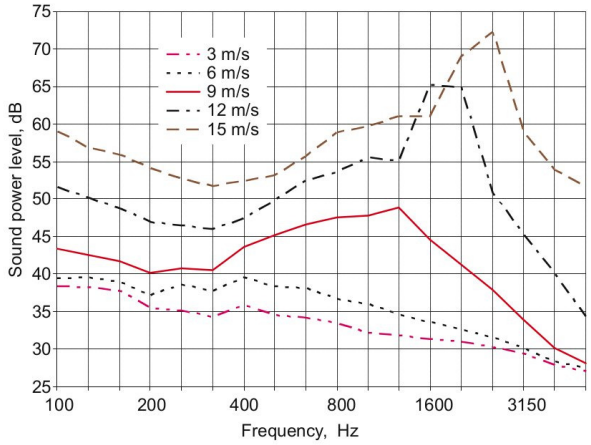
Figuur 5.2: Per spleet-breedte wordt de kritische windsnelheid gegeven vanaf wanneer er fluittonen ontstaan. Hoe groter de windsnelheid hoe groter de windsnelheid moet zijn voordat er fluittonen ontstaan.



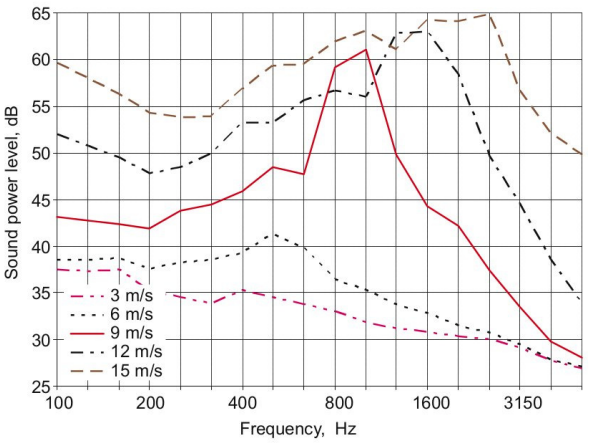
Figuur 5.3: Spleet breedte versus frequentie voor een windsnelheid van 8m/s. Voor de ontstane fluittonen geldt hoe smaller de spleet hoe hoger de frequentie.

- 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, $26° < \alpha < 38°$(tot 112 dB bij 1 m^2 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 efficient 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].

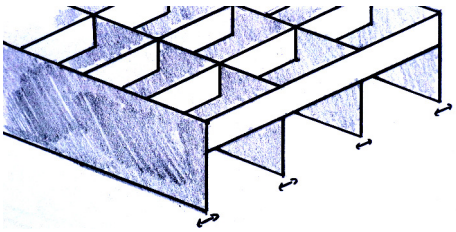
- **verstoring** van het aanstroomprofiel; door het verstoren door middel van een net of object voor het rooster, verminderde de luidheid sterk of verdwenen de fluittonen geheel [20, 21, 28].

- 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]

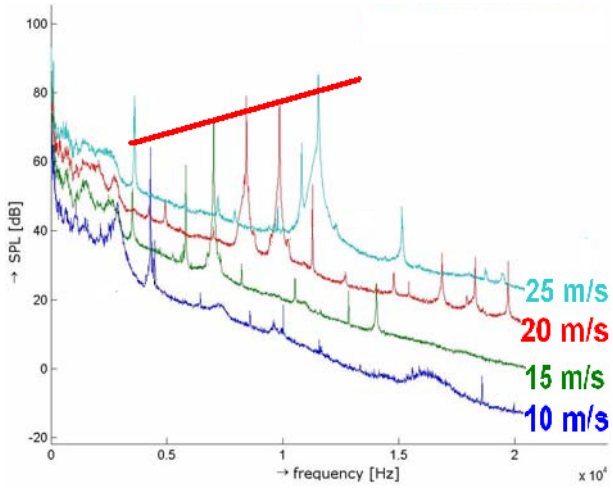
- het doorbreken van de **regelmaat** stopt de fluittonen [36]; omgekeerd worden tonen versterkt door regelmaat [24].

- 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 geluiddrukniveau zorgen of voor een verhoging van de frequentie. Bij de stappen in windsnelheid hier, vindt zowel de verhoging in geluiddrukniveau 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 betekendt het voorkomen van resonantie, het creëren van een lagere luchtsnelheid 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 turbulentere 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 wisselden 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 verstrekt 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 geluiddrukniveaus. 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 geidentificeerd. 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 ($\geq$ 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

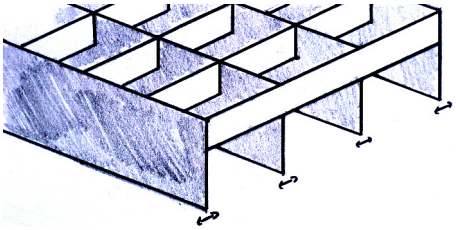
Er zijn twee soorten stromingen, turbulente- en laminairestroming. De turbulentestroming bestaat uit verschillende frequenties die, wanneer dit tot hoorbaar geluid leidt, hoorbaar zijn als ruis. Een laminaire stroming beweegt parallel. Fluittonen kunnen ontstaan wanneer een laminaire stroming onderbroken 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.

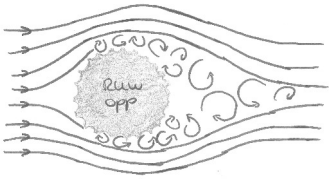
Het is hierdoor aan te bevelen:

- de stroming te verstoren door een ruwe en afwisselende oppervlaktestructuur, 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

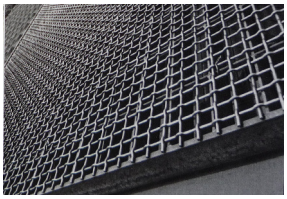


Figuur 7.1: Roosters.

- hoeken en randen af te ronden tot een afrondingsstraal van enkele milimeters
- 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 turbulent stroming om het object.



Figuur 7.3: Netten over een object zorgen voor een verstoorde 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.

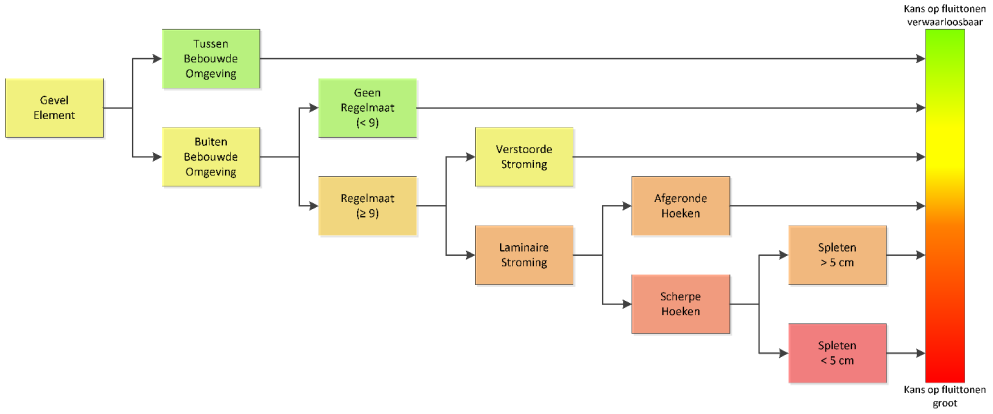
Aan de rand van de stad:
Bebouwing aan de rand van de stad, zoals hoge torens en bebouwing op de grens van stedelijk en open gebied, vangt door zijn ligging gemiddeld 30% meer wind dan in de bebouwde omgeving. Wanneer het object en de aanstroom richting van de wind op zijn gunstigst zijn voor fluittonen, 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 (parallelle) 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 verdeeld 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



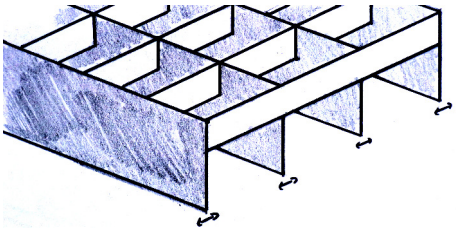
Figuur 8.1: Model voor het bepalen van de kans op fluittonen. Groen: kans op fluittonen is verwaarloosbaar, rood: fluittonen zijn te verwachten.

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 luwtegebieden 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'.

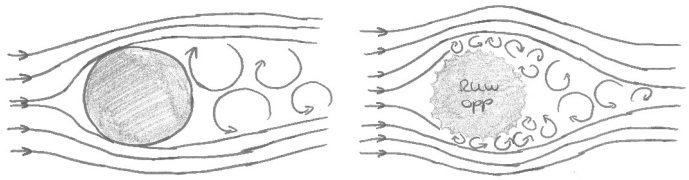
Vraag 2: Bestaan deze gevelelementen uit een herhaling van minimaal 9 spleten van gelijke breedte?
Bij spleten in gevelelementen ontstaan drukverschillen achter deze spleten. Wanneer de spleet over de lengte doorloopt kunnen deze drukverschillen elkaar versterken. Hetzelfde fenomeen treedt op bij een rij spijlen of roosters. Met herhaling wordt hier bedoeld 'een afwisselingen tussen open en gesloten delen in een gevelelement'. 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 windricthing is altijd parallel aan het grondvlak. Bij bruggen in nederland geld over het algemeen dat een mogelijke windrichting alleen horizontaal is.



Figuur 8.2: Rooster.

Vraag 3: Kan het gevelelement 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 benodigdheden 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.



(a) (b)

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 geld 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 'gevarenzones' 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 (grofweg 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 gevelelementen 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 gevelelementen 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.

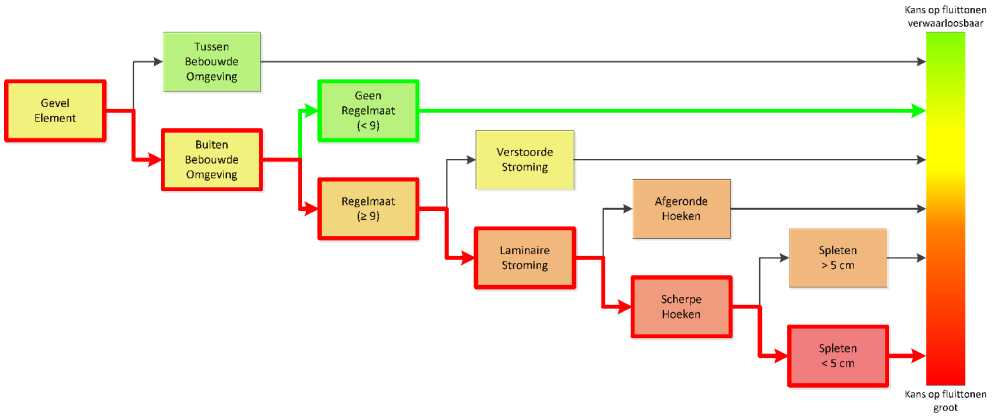
Kan het gevelelement laminair aangestroomd worden? Vlak om de kroon bevinden zich geen andere objecten die de stroom kunnen verstoren, er kan dus een laminaire stroming optreden.

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 gevarenzone voor fluittonen. Fluittonen kunnen hier vanaf windkracht 6 verwacht worden, zie figuur 9.1.

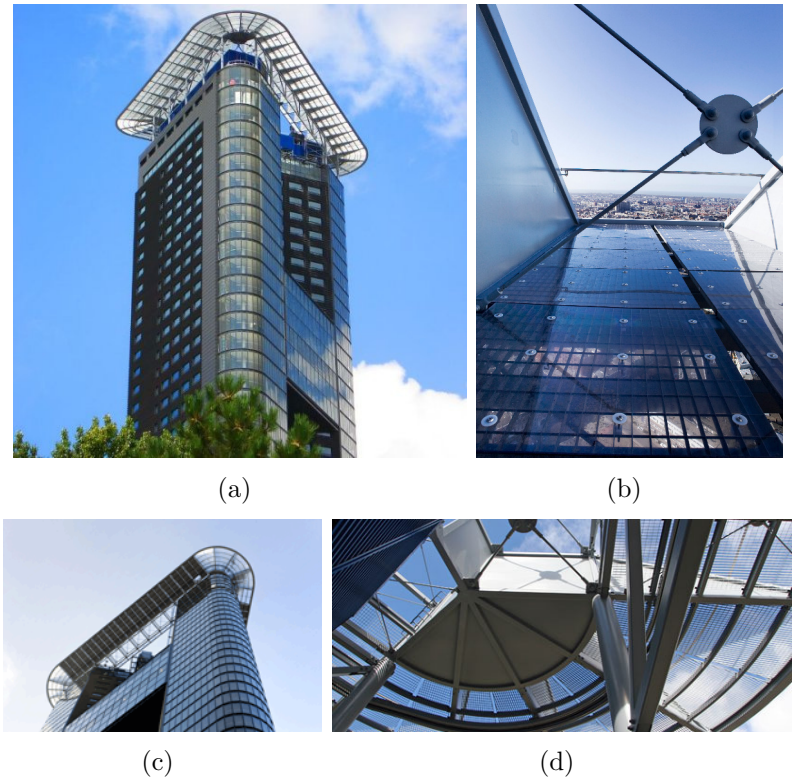
De roosters produceerden een geluid tot 75 dB op 80 m afstand, bij een windsnelheid vanaf 12 m/s (windkracht 6).



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.



(a) (b)

(c) (d)

Figuur 9.2: Strijkijzer, Den Haag

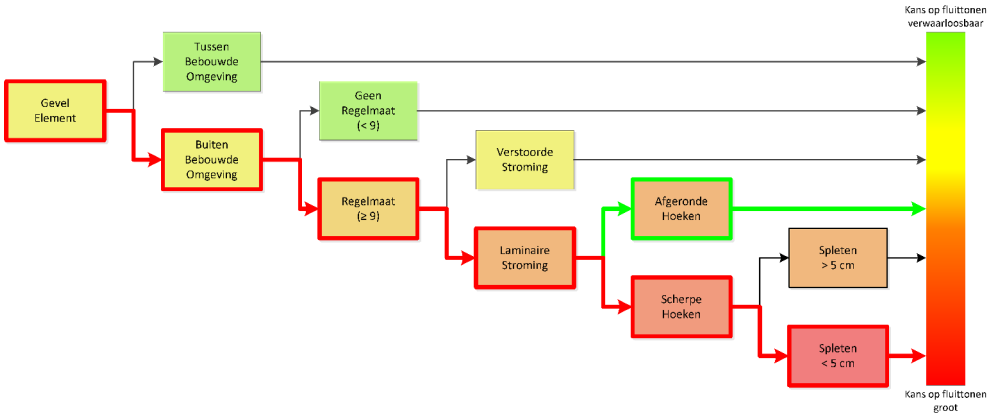
9.2 Hoftoren, Den Haag (2003)

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 gevarenzone 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 gevarenzone 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)

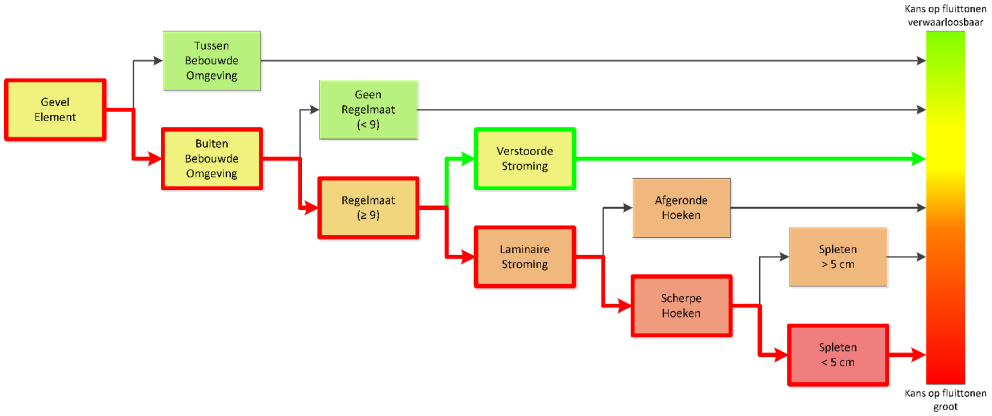
Dit paviljoen (zie figuur 9.6) bestaat vrijwel geheel uit roosters met een oppervlakte van 250 m^2. Voor de hoofdribben komt dit neer op 6 km plaatstrip.

(a) (b)

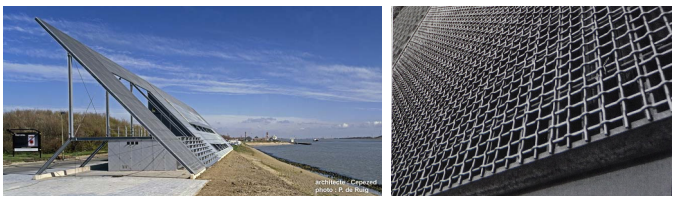
Figuur 9.4: Hoftoren, Den Haag

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



(a) (b)

Figuur 9.6: Paviljoen, Hoek van Holland

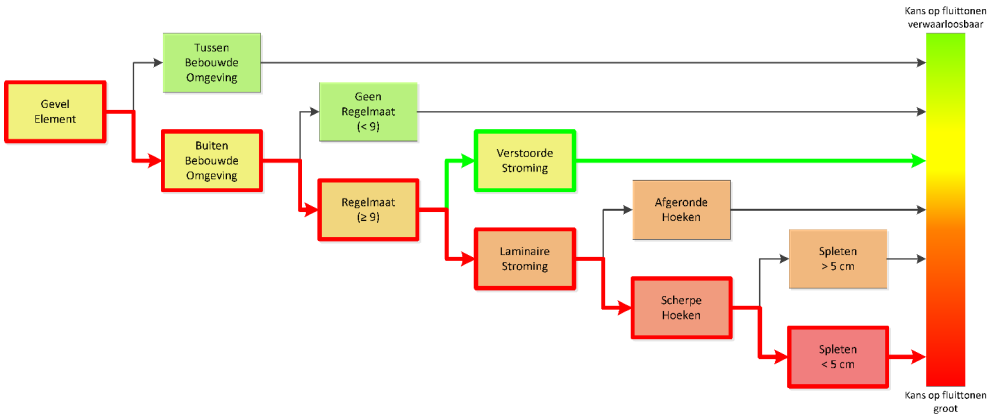
9.4 Beetham Tower, Manchester (2006)

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 gevelelement, 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

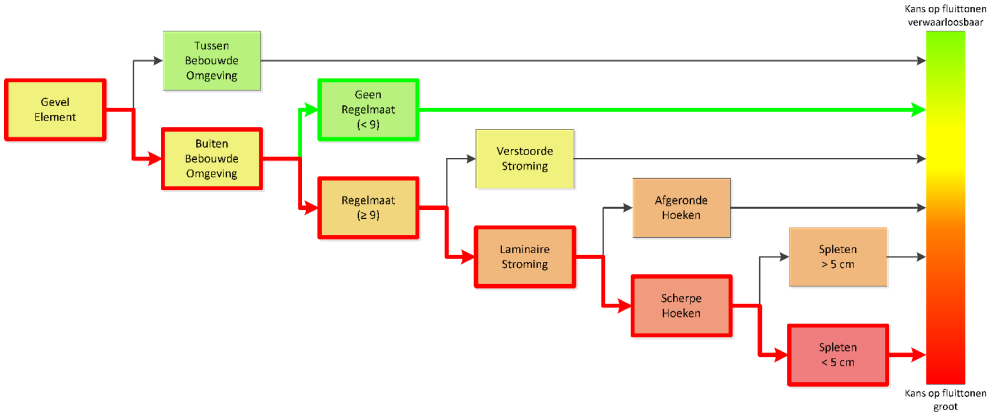
9.5 City Spire, New York (1987)

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).

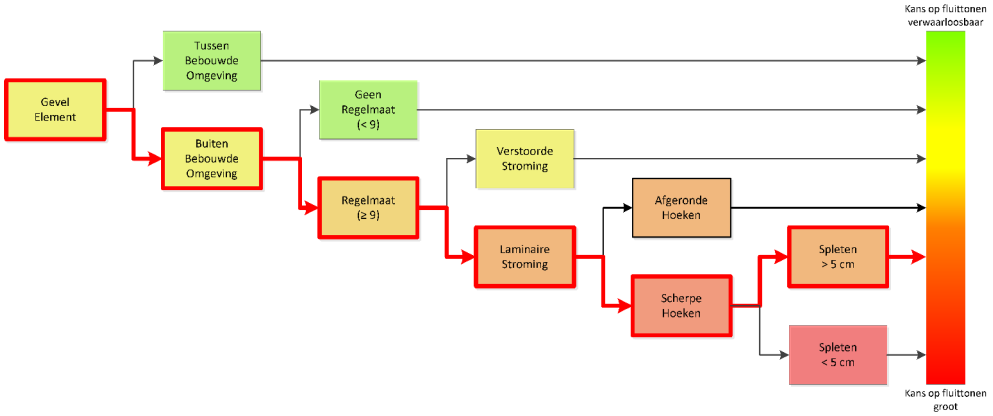
De toren bevindt zich door zijn hoogte vrijwel geheel buiten de bebouwde omgeving. Bovenaan op het uitzichtplatform bestaat de afscheiding uit een herhaling van spijlen (zie figuur 9.12(b)). In de buurt van deze spijlen zitten vrijwel geen objecten die de stroming verstoren. De spijlen kunnen daardoor 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

(a) (b)

Figuur 9.12: Taipei 101, Taiwan

horen van rond de 45dB gedurende enkele seconden.

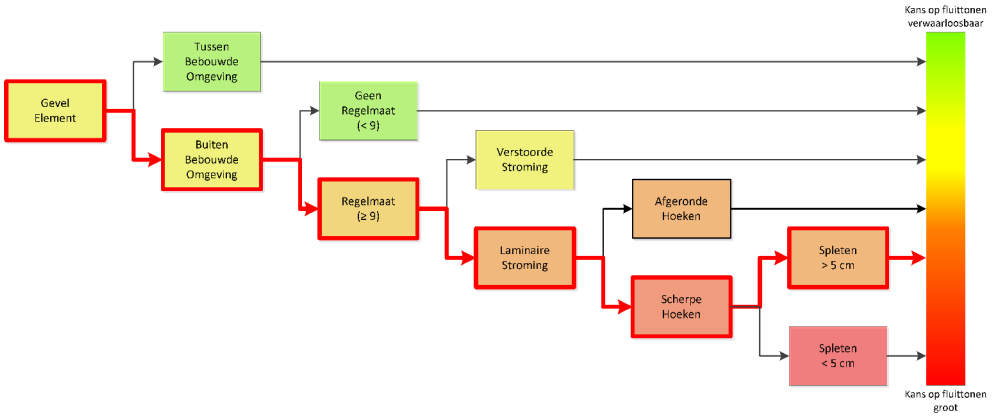
De brug bevindt zich aan de rand van de bebouwde omgeving. De zijkant van de brug bestaat uit een rooster met honderden herhalingen (zie figuur 9.14(b)). De wind komt meestal uit westelijke richting en zal dan deze roosters onder een hoek van 30 aanstromen. De wind kan recht op het rooster aanstromen, 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 stroming in de vorm van een net over het rooster. Aangezien het om vrij lage geluidniveaus 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

(a) (b)

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 geluiddrukniveau 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 geluideffecten 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 ontstaat 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 >1mm 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 onstaat bij een diameter >8mm 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 inginieurs 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. *Southhampton 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, impulstheorie, 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 - geinduceerd 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 Philadelpia, 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 Physische 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.

Bijlage 3.

GRETEN
RAADGEVENDE INGENIEURS

bezoekadres
Stationsplein 13D
4702 VZ Roosendaal

postadres
Postbus 1091
4700 BB Roosendaal

telefoon (0165) 56 52 58
telefax (0165) 56 61 68
e-mail info@greten.nl
internet www.greten.nl

ASK Romein
de heer J. Verbraak
Postbus 1013
4700 BA ROOSENDAAL

plaats en datum	briefnummer	kenmerk
Roosendaal, 12-02-2015	Bbfd259aaA0.hg	HG

betreft
Beoordeling van de kans op fluittonen vanwege verstoring van het laminaire windveld bij de staalconstructie van SkiWorld Zoetermeer.

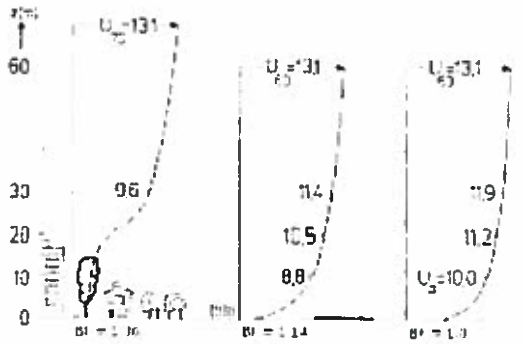
Geachte heer Verbraak,

Reageren op uw mondeling verzoek, hierbij onze beoordeling van de kans op fluittonen vanwege wind bij de realisatie van een staalconstructie van SkiWorld Zoetermeer. Bij de beoordeling of en in hoeverre er sprake zal zijn van fluittonen is gebruik gemaakt van een masterproject van Rinka van Dommelen (maart 2012, begeleider onder meer prof. ir. L.C.J. van Luxemburg). In dit master project wordt op basis van literatuuronderzoek een model beschreven waarbij door het beantwoorden van een reeks vragen kan worden ingeschat of het gebouw zich in de gevarenzone bevindt met betrekking tot de kans op fluittonen. In deze brief zullen deze vragen achtereenvolgens worden beantwoord waarna vervolgens de kans op fluittonen kan worden vastgesteld.

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

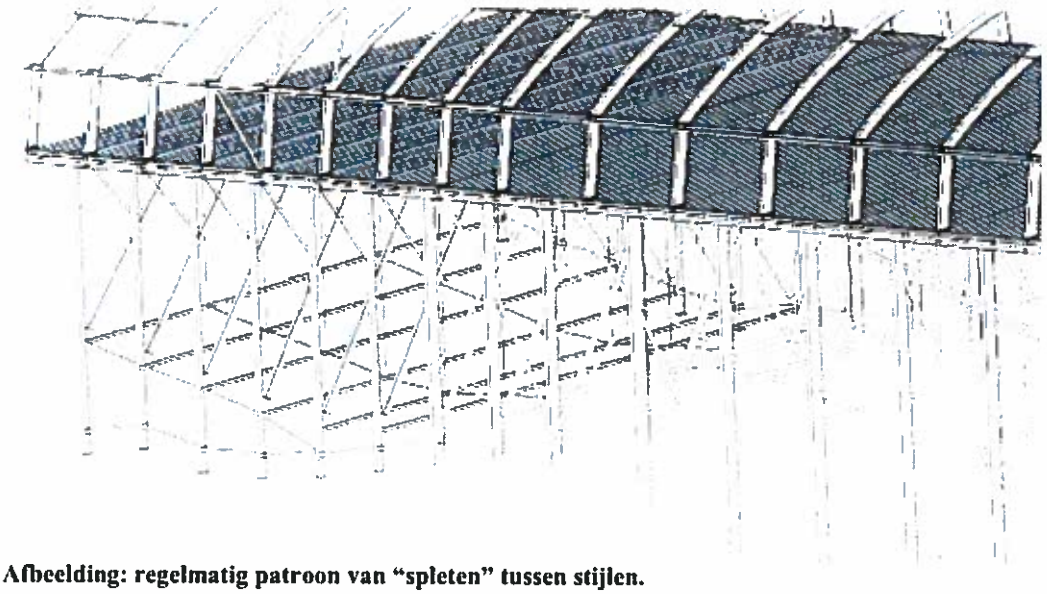
Met deze vraag wordt bedoeld of er sprake is van een zogenaamd laminair windveld. Een laminair windveld treedt op als er rondom het gebouw geen obstakels zijn op een afstand groter dan globaal 12x de obstakelhoogte. Dit is bij SnowWorld Zoetermeer het geval. Het gebouw bevindt zich in een open veld. Er is dus sprake van een laminaire stroming. Op 10 meter hoogte in het open veld wordt in Nederland *gemiddeld* een windsnelheid van 10 m/s overschreden met 5 % (jaargemiddelde voor geheel Nederland) tot 40 % in de maanden november en december. Dit geldt voor zogenaamde 10 minuten gemiddelden van de windsnelheid. Pieken van 10 m/s kunnen ook bij lagere windkrachten optreden.

Samenvattend geldt dat het gebouw in het open veld is gesitueerd en een zodanige hoogte heeft dat een laminaire stroming met een snelheid van 10 m/s regelmatig zal voorkomen. Dit zijn 2 randvoorwaarden voor het ontstaan van fluittonen. Het antwoord op vraag 1 is dus: JA.



Afbeelding: bij weinig beschutting kan een windsnelheid van 10 m/s zelfs op geringe hoogte al voorkomen.

Vraag 2: bestaan deze gevelelementen uit een herhaling van minimaal 9 spleten van gelijke breedte?



Afbeelding: regelmatig patroon van "spleten" tussen stijlen.

De bovenstaande afbeelding bevat een kolommen structuur waarbij er sprake is van een vaste stramienafstand. De "openingen" tussen de kolommen kunnen worden opgevat als brede spleten. Daar de constructie minimaal 9 spleten bevat is het antwoord op vraag 2 dus **JA**.

De volgende afbeelding bevat een stijlen structuur in Taiwan (Taipei 101) waarbij evenwijdige kolommen met een onderlinge afstand van 20 cm zorgen voor een fluittoon.

(a) (b)

Afbeelding: Taipei 101, Taiwan

Vraag 3: Kan het gevelelement laminair aangestroomd worden?

De wind kan zonder verstoring recht op de kolommen structuur aanstromen. Het antwoord op deze vraag is dus **JA**.

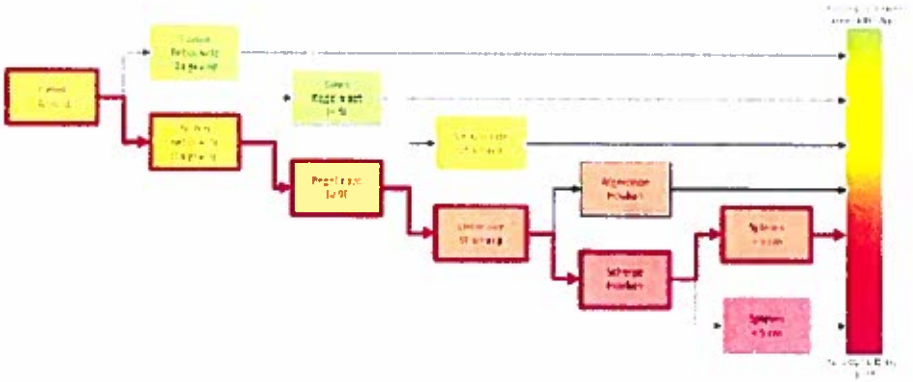
Vraag 4: Is er sprake van scherpe of afgeronde hoeken?

Daar het een staalconstructie betreft die niet uit buisvormige profielen bestaat is er sprake van scherpe hoeken.

Vraag 5: zijn de spleten breder dan 5 cm?

Het antwoord op deze vraag is JA.

In de volgende afbeelding is een uitgewerkt schema opgenomen, op basis van de beantwoording van de vragen met betrekking tot SnowWorld Zoetermeer:



Afbeelding: uitgewerkt model SnowWorld Zoetermeer.

GRETEN
RAADGEVENDE INGENIEURS

Volgens het model bevindt SnowWorld Zoetermeer zich in de oranje zone. Dit betekent dat bij hoge windsnelheden (grofweg windkracht 7-8) luide fluittonen kunnen ontstaan.

Of en in hoeverre fluittonen daadwerkelijk zullen optreden kan niet met zekerheid worden voorspeld. SnowWorld Zoetermeer onderscheid zich van bijvoorbeeld Tapei 101 (Taiwan) door:

- een aanzienlijk grotere spleetafstand (lees afstand tussen de kolommen);
- de aanwezigheid van storende elementen tussen de kolommen zoals windverbanden, tussenliggers e.d.

Beide elementen zullen naar de verwachting de kans op fluittonen verlagen.

Samenvattend geldt:

- de belangrijkste voorwaarden voor het optreden van fluittonen zijn aanwezig. Het optreden van fluittonen bij hogere windsnelheden is niet uitgesloten.

Daar er geen sprake is van een geluidgevoelige bestemming of geluidgevoelige bestemmingen in de directe omgeving lijkt het realiseren van voorzieningen om fluittonen op voorhand te beperken een te zware ingreep. Overleg met de opdrachtgever is gewenst.

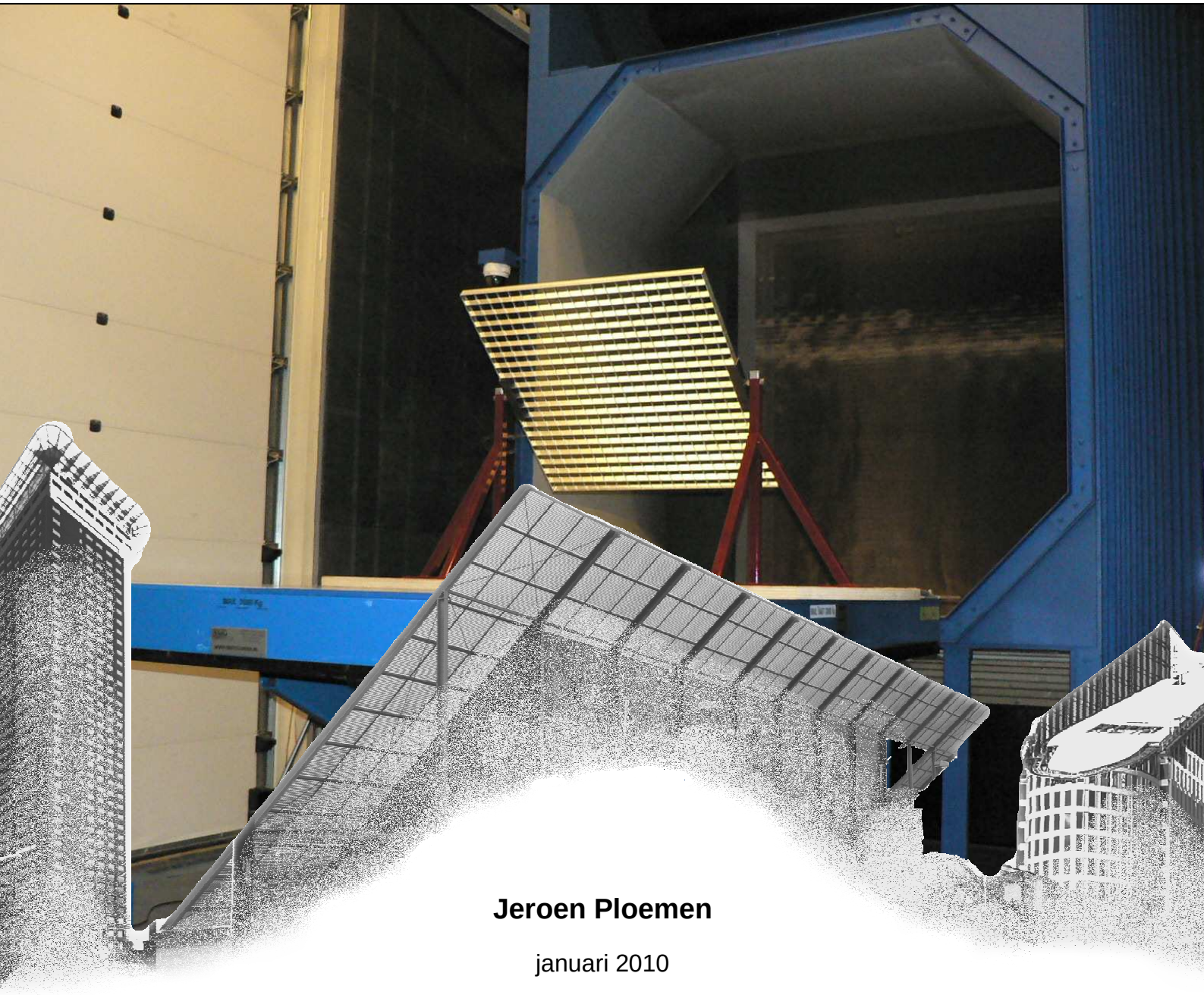
Hoogachtend,
Greten Raadgevende Ingenieurs

ir. Heins Greten

Bijlage 4.

Eindrapport

Wind-geïnduceerd geluid aan gebouwen en constructies



Jeroen Ploemen

januari 2010

TU Delft Delft University of Technology

Challenge the future

Inhoudsopgave

COMMISSIE **4**

AFSTUDEERDER **4**

VOORWOORD **5**

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN **6**

SAMENVATTING **7**

1 INLEIDING **9**

1.1 PROBLEEMSTELLING 9
1.2 DOELSTELLING 10

2 WINDGELUID **11**

2.1 GELUIDDRUK 11
2.2 ONTSTAANSMECHANISMEN 11
2.2.1 Constructiedelen *11*
2.2.2 Staande golf *12*
2.2.3 Helmholtz resonanties *12*
2.2.4 Vortex shedding en Eolische tonen *13*
2.2.5 Flutter *13*
2.3 WIND 14
2.3.1 Grenslaag *14*
2.3.2 Windklimaat *14*
2.4 HINDER EN PERCEPTIE 15
2.4.1 Gevoeligheid van het menselijk gehoor *15*
2.4.2 Tonaal karakter *16*
2.4.3 Impulsgeluiden *16*
2.4.4 Muziek *16*
2.4.5 Tijdstip en duur van hinder *16*
2.4.6 Overig *16*
2.4.7 Windgeluid = hinder? *16*
2.5 HUIDIGE NORMEN EN REGELGEVING 17
2.6 BEKENDE PROBLEEMGEVALLEN 19
2.6.1 Expo-paviljoen, Hoek van Holland *19*
2.6.2 Strijkijzer, Den Haag *20*
2.6.3 Hoftoren, Den Haag *21*
2.6.4 Beetham Tower, Manchester (Engeland) *21*
2.6.5 Cityspire Center, Manhattan (New York, V.S.) *22*
2.6.6 Brugleuning Kruithuisweg (Delft) *22*
2.7 PRAKTISCHE OPLOSSINGEN 23
2.8 INVENTARISATIE BEROEPSPRAKTIJK 25
Inleiding 25
2.8.1 Cauberg-Huygen *25*
2.8.2 Level Acoustics (TU/e) *26*
Detectie 26
Computational Fluid Dynamics 26
2.8.3 LBP *27*
Aanpak 27
Problematiek rond roosters 27
2.8.4 Peutz *28*
Strijkijzer 28
Uitvoeringstechnische aspecten 29

Overige projecten 29
Windtunnel 30
2.8.5 DMGR *30*
Algemene aanpak 30
CFD 30
Projecten 31
Roosters 31
2.9 SAMENVATTING 31

3 RELEVANT WETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK 33

3.1 TURBULENTIE 33
3.1.1 Grenslaag *33*
3.1.2 Loslaten van de grenslaag *34*
3.1.3 Standaardgeval: cilinder in stroming *36*
3.1.4 Arrays van cilinders, invloed geluid op wervels *37*
3.2 STROMING OVER HOLTEN 37
3.3 STROMING LANGS PLATEN 38
3.3.1 Parker *40*
3.3.2 Aanstroming onder een hoek *41*
Effect op het Strouhalgetal 41
3.4 ROOSTERS 42
3.4.1 Spruyt *43*
3.4.2 Efficiënte bron *44*
3.5 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS 45
3.5.1 Inleiding *45*
3.5.2 Ontwikkeling *45*
3.5.3 Direct numerical simulation *46*
3.5.4 RANS en LES modellen *46*
3.5.5 Computational Aero Acoustics *47*
3.5.6 Validatie *47*
3.5.7 Ontwikkelingen *48*

4 MEETPLAN 49

4.1 INLEIDING 49
4.2 WINDTUNNEL (OPEN JET FACILITY) 49
4.3 MONTAGE PROEFSTUKKEN 51
4.4 MEETPROCEDURE 52
4.5 APPARATUUR 53
4.6 OPSTELLING 53

5 RESULTATEN WINDTUNNEL 55

5.1 UITVOERING ONDERZOEK 55
Definitie voor- en achterzijde roosters 55
Definitie hoekverdraaiing 55
Meetsnelheden 56
5.1.1 Beproefde roosters *57*
5.1.2 Verschillen in afwerking tussen roosters 1 t/m 6 en 7 t/m 12 ..... *58*
5.1.3 Metingen per rooster *60*
5.2 VERWERKING MEETGEGEVENS 61
5.2.1 Matlab *61*
5.2.2 IJking geluidmeter *62*
5.3 GESCHIKTHEID TUNNEL VOOR AKOESTISCH ONDERZOEK 63
5.4 ALLE ROOSTERS GEVEN RESULTAAT 65
5.4.1 Verstoring tonaal geluid *65*
5.5 RELATIE STROOMSNELHEID 66
5.6 RELATIE AANSTROOMHOEK 67
Invloed op de frequentie 69

5.7 RELATIES GEOMETRIE 71
5.7.1 Afwerking van het bandstaal *71*
Roosters 1 en 7 71
Roosters 5 en 11 73
Roosters 6 en 12 73
Totaalbeeld 74
5.7.2 Dimensies van de draagstaaf *74*
Roosters 1 en 2 74
Roosters 1 en 3 74
Roosters 2 en 3 75
Roosters 4 en 5 76
Roosters 4 en 6 76
Roosters 5 en 6 76
Totaalbeeld 76
5.7.3 Maaswijdte *77*
Roosters 2 en 5 77
Roosters 7 en 10 78
Roosters 3 en 6 78
Totaalbeeld 79
5.8 VASTHOUDEN VAN FREQUENTIES BIJ TOENAME VAN DE SNELHEID 79
5.9 DIMENSIELOZE VERGELIJKING VAN DE MEETRESULTATEN 81
5.9.1 Vergelijking op basis van het Strouhalgetal *81*
5.9.2 Invloed van c/t *84*
5.9.3 Elimineren van de invloed van de maasafmetingen *85*
Dikte van de rooster 85
Maaswijdte 86

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN 87

6.1 CONCLUSIES 87
6.2 AANBEVELINGEN 89

REFERENTIES 90

BIJLAGEN

1. GRAFIEKEN PER MEETSERIE, MET PIEKEN
2. GRAFIEKEN BIJ "RELATIES GEOMETRIE"
   A) AFWERKING VAN HET BANDSTAAL
   B) DIMENSIES VAN DE DRAAGSTAAF
   C) MAASWIJDTE
3. DIMENSIELOZE VERGELIJKING, PER MEETSERIE

Commissie

De afstudeercommissie bestaat uit:

Prof. Dipl.-Ing. J.N.J.A Vamberský
Technische Universiteit Delft, faculteit CiTG
room S2 1.36, Stevinweg 1, 2628CN Delft
email: J.N.J.A.Vambersky@tudelft.nl
tel: +31 (0)15 27 85488

Ir. H.R. Schipper
Technische Universiteit Delft, faculteit CiTG
room S2 1.58, Stevinweg 1, 2628CN Delft
email: H.R.Schipper@tudelft.nl
tel: +31 (0)15 27 89933

Ir. J.A. Pleysier
Cauberg-Huygen Raadgevende Ingenieurs
Pettelaarpark 101, 5216 PR 's-Hertogenbosch
email: a.pleysier@chri.nl
tel: +31 (0)73-7517913

Ir. L. Nijs
Technische Universiteit Delft, faculteit Bouwkunde
room 01WEST110, Julianalaan 134, 2628BL Delft
email: L.Nijs@tudelft.nl

Afstudeerder

Jeroen Ploemen
e-mail: J.C.F.Ploemen@Student.TUDelft.nl
tel: +31 (0)6-22278767

Voorwoord

Dit rapport – mijn afstudeerwerk – is geschreven naar aanleiding van de regelmatig terugkerende problematiek rond windgeluid, en specifiek de problemen op dat gebied bij het Strijkijzer te Den Haag.

Ik wil van deze gelegenheid gebruik maken iedereen te bedanken die een bijdrage heeft geleverd aan het tot stand komen van dit werk, van commissieleden tot beroepspraktijk.

Daarbij mogen ook Dejo metaalindustrie, die de voor dit onderzoek benodige roosters leverde, en de Open Jet Facility van de TU Delft, waar meettijd ter beschikking werd gesteld, zeker niet onvermeld blijven. En last but not least: Cauberg-Huygen, die niet alleen kennis inbrachten in de commissie maar mij ook een zeer gewaarde blik in de keuken gunden.

Rest de auteur slechts u veel leesplezier te wensen.

Lijst van gebruikte symbolen

De volgende symbolen worden in dit rapport aangehouden:

A ▪ oppervlakte
c ▪ snelheid van het geluid (~346 m/s in lucht bij 25°C)
f ▪ frequentie
l ▪ kenmerkende afmeting
L_p ▪ geluiddrukniveau (‘*level of pressure*’)
m ▪ massa
p ▪ druk, drukverschil t.o.v. p_0
p_0 ▪ statische druk (circa 1 bar)
p_{rms} ▪ effectieve geluiddruk (‘*root mean square pressure’)*
St ▪ getal van Strouhal
U ▪ snelheid van de stroming
y ▪ gemeten signaal / set meetwaardes
η ▪ viscositeit
κ ▪ adiabatische constante, ~1.4
ρ ▪ soortelijk gewicht
ω ▪ hoeksnelheid

Samenvatting

Als gevolg van stroming langs gebouwen ontstaat geluid, dat als zeer hinderlijk kan worden ervaren wanneer het een toon betreft. Dit tonaal geluid ontstaat onder andere door regelmatige wervelvorming achter constructiedelen, staande golven, en zogenaamde Helmholtzresonatoren.

Een aantal notoire probleemgevallen op dit gebied haalden de afgelopen jaren uitgebreid de pers, waaronder de Hoftoren en het Strijkijzer, een tweetal hoogbouwprojecten in Den Haag. Uiteraard is deze problematiek niet aan de beroepspraktijk voorbijgegaan. Een veelvoud aan problemen op dit gebied is bekend; roosters blijken bovengemiddeld vaak aan de basis daarvan te staan. Van CFD wordt verwacht dat het, zeker op de langere termijn, ook nuttig kan zijn bij het oplossen van problemen met windgeluid.

Wetenschappelijk onderzoek op dit gebied baseert zich op stroming rond objecten; het optreden van geluid is daarbij in eerste instantie een nevenverschijnsel. Belangrijk werk op dit specifieke gebied is verricht door Parker en, zeker in het geval van roosters, door Spruyt begin jaren '70. Later relevant werk richt zich op het beschrijven van de stroming rond platen en het vinden van wetmatigheden aan de hand van het dimensieloze getal van Strouhal.

In het kader van dit onderzoek zijn in de Open Jet Facility van de TU Delft windtunnelmetingen aan een aantal Dejo-roosters gedaan, die onderlinge verschilden in afwerking, maaswijdte en de dimensies van de draagstaven. Alle proefstukken leverden resultaat op in de vorm van tonaal geluid, soms al bij 8 à 9 m/s. Bij hogere snelheden bleef bij het verhogen van de windsnelheid vrijwel altijd onafgebroken een of meerdere tonen hoorbaar. De luidste fluittoon kende een geluidsniveau van ruim 110 decibel bij 25 m/s, met slechts $1m^2$ roosteroppervlakte. Een doorsnee proefstuk produceerde slechts onder enkele zeer specifieke hoeken tonaal geluid; een kleine wijziging van de hoek was dan voldoende om de toon volledig te laten verdwijnen waarna slechts nog ruis resteerde.

De optredende tonen bleken verklaarbaar vanuit ten minste twee verschillende mechanismen. Bij het ene deel van de metingen neemt de frequentie geleidelijk toe bij het toenemen van de windsnelheid, en volgt daar een relatie volgens Strouhal. Een ander deel hangt sterk samen met de afmetingen van de roostermazen, waarbij de maaswijdte en dikte van een rooster (of mogelijkerwijs combinaties daarvan zoals een diagonaal) bepalend zijn voor de toonhoogte. De relevante afmeting is steeds gelijk aan meervouden van een halve golflengte; meerdere van dergelijk tonen kunnen tegelijkertijd optreden; het mechanisme is herkenbaar aan de constante toonhoogte over een range van windsnelheden. Waarschijnlijk betreft het zogenaamde Parker-modes.

Nog niet beproefd zijn roosters met een sterk afgeronde voorzijde, of maatregelen voor het tegengaan van het tonaal geluid bij roosters.

De combinatie van gestaag toenemende bouwhoogtes en het vooralsnog niet gemakkelijk voorspelbaar zijn van het gros van de mogelijke mechanismen achter hinderlijk windgeluid maakt dat dit probleem met enige regelmaat de krant zal blijven halen.

1 Inleiding

Hoge gebouwen fungeren in veel gevallen als landmark voor de plaats waar ze staan, en aan hun uiterlijke verschijning wordt dan ook veel aandacht besteed. Vaak worden aan het ontwerp van dergelijke gebouwen dan ook allerlei ornamenten toegevoegd. Dit kan in de vorm van externe functionele constructiedelen zoals roosters, zonnewering, ventilatieopeningen, of puur architectonische en decoratieve elementen.

Helaas komt het met enige regelmaat voor dat deze elementen onder invloed van wind lawaai, fluit-, of bromtonen produceren met een dermate hoge geluidssterkte dat er sprake is van aanmerkelijke overlast voor zowel gebruikers als omwonenden.

Enkele praktijkvoorbeelden van dergelijk problemen zijn:

- Strijkijzer, Rijswijkseplein, Den Haag (132m, 2007): roosters in de kroon veroorzaken harde tonen.
- Hoftoren, nabij Den Haag CS (142m, 2003): dakconstructie fluit onder invloed van harde wind.
- Expopaviljoen, Hoek van Holland: roosters in het schuine dak produceren geluid.
- Beetham Tower, Manchester, Engeland (155m, 2006).
- Cityspire Center, Manhattan, New York (248m, 1987).

Een grote bouwhoogte is daarvoor geen absoluut vereiste; een locatie die aan (voldoende sterke) wind bloot staat voldoet. Zo komt het fenomeen ook voor bij leuning van de brug over de Schie, onderdeel van de Kruithuisweg te Delft. Aangezien veel van de geluidproducerende elementen zich echter op grote hoogte bevinden, bijvoorbeeld op daken van hoogbouw, staan zij bloot aan veel hogere windsnelheden dan op maaiveldniveau en treft de veroorzaakte overlast bovendien een veel groter gebied. Het geproduceerde geluid en de daardoor veroorzaakte overlast geven aanleiding tot klachten en rechtszaken van omwonenden, doen afbreuk aan de status van het gebouw, veroorzaken negatieve publiciteit, en schrikken toekomstige gebruikers af.

1.1 Probleemstelling

Idealiter zou al in het ontwerpstadium kunnen worden bepaald of er bij een constructie sprake zal zijn van hinderlijke geluidsproductie onder invloed van wind, zodat het ontwerp daar tijdig op aangepast kan worden. Helaas zijn hiervoor in de relevante normen geen rekenregels of andere methoden voor opgenomen, buiten de zeer algemene bepalingen dat er geen (geluids)overlast veroorzaakt mag worden. Ook de bestaande empirische kennis blijkt niet toereikend om tot een betrouwbare prognose van de kans op geluidhinder te komen.

Dit blijkt wel bij redelijk prominente projecten als het Strijkijzer, waar het gezien de eerdere problemen in de gemeente Den Haag met door wind veroorzaakte geluidsoverlast en de opvallende, grote, buiten de gevel stekende kroon op het gebouw, in de lijn der verwachting ligt dat dit aspect terdege is onderzocht. Zelfs in de Haagse gemeenteraad is, nog voordat met de bouw werd begonnen, dit vraagstuk aan de orde geweest. Wanneer politici zich de mogelijkheid van deze problemen hebben gerealiseerd, hadden de bij het ontwerp betrokken (technische) partijen dat zeker ook mogen doen.

De huidige situatie leidt ertoe dat in de praktijk, zoals bij de bovengenoemde projecten, problemen pas worden opgemerkt tijdens of na de bouwfase, waardoor achteraf maatregelen nodig zijn om de overlast te beperken.

1.2 Doelstelling

Gelet op het bovenstaande is het doel van dit afstudeeronderzoek dan ook:

- Het inventariseren van bestaande empirische kennis en theorieën op het gebied van "wind induced sound in buildings", o.a. bij bouwfysische ingenieursbureaus;

- Te achterhalen of, en zo ja waar en waarom deze empirische kennis tekort schiet, zo nodig m.b.v. metingen dan wel op basis van bestaande meetresultaten;

- Op basis hiervan een voorstel of aanbevelingen doen voor ter verbetering van de situatie, gericht op het verbeteren of vergroten van de mogelijkheid deze thematiek tijdens het ontwerp mee te nemen om zo de genoemde overlast te voorkomen.

2 Windgeluid

2.1 Geluiddruk

Geluid is in essentie een trilling die zich binnen het medium lucht voort als een longitudinale golf voorplant. Deze longitudinale golf is waarneembaar als een serie drukverschillen ten opzichte van de statische druk p_0 in het medium, bekend als de geluiddruk. De voor het menselijk gehoor bepalende geluiddruk is niet de maximale maar de effectieve geluiddruk p_{rms}.

$$p_{rms} = \frac{\hat{p}}{\sqrt{2}} \tag{1}$$

Als waarde voor de minimale nog waarneembare effectieve geluiddruk, de zogenaamde gehoordrempel, wordt doorgaans $2*10^{-5}$ Pa aangehouden; de pijngrens ligt bij 200 Pa. Vanwege dit grote verschil van een factor 10^7 wordt de geluidssterkte doorgaans uitgedrukt in het beter behapbare geluiddrukniveau L_p, waarin de gehoordrempel als referentiewaarde wordt gebruikt:

$$L_p = 10 * \log\left(\frac{p_{rms}^2}{p_0^2}\right) \quad \text{[dB]} \tag{2}$$

Vanwege het logaritmische karakter geldt bij en toe- of afname van het aantal decibel voor het verschil in waarneming het volgende:

Toename [dB]	Verandering in subjectieve waarneming
1	minimaal waarneembare verandering
1.5 – 2	duidelijk hoorbaar verschil
3	verdubbeling geluidssterkte
5	orde grootte verschil

tabel 1 Verandering in subjectieve waarneming bij verschillen in geluiddrukniveau

2.2 Ontstaansmechanismen

2.2.1 Constructiedelen

Aan de kant van de bij de geluidsproductie betrokken constructiedelen is verscheidenheid troef. In principe is geen enkel aan wind blootgesteld constructiedeel uit te sluiten, maar veelal concentreren de problemen zich rond:

- Roosters

- Holtes en spleten, waaronder open profielen
- Platen (zowel langs de rand als trilling van het geheel)
- Buisprofielen / orgelpijpen
- Kabels en tuien

Er zijn verschillende mechanismen waarbij de wisselwerking tussen wind en constructiedelen tot geluidsproductie kan leiden of deze kan versterken. Deze zullen hierna beschreven worden.

2.2.2 Staande golf

Staande golven zijn een bekend verschijnsel uit onder andere de muziekwereld en een principe waar veel instrumenten gebruik van maken. Een geluidsgolf kan een staande golf vormen en zichzelf versterken tussen twee parallelle reflecterende wanden die op een afstand van een veelvoud van een halve golflengte van elkaar verwijderd staan. Op bepaalde plaatsen, de "knopen", is de amplitude nul; een kwart golflengte verder, bij de "buiken", juist maximaal.

Een beperkende factor hierbij vormt het vereiste dat de halve golflengte moet passen; dit is met name een belemmering bij lage tonen, die immers een lange golflengte hebben.

Het fenomeen van een trillende "snaar" is nauw verwant aan de staande golf.

2.2.3 Helmholtz resonanties

Wanneer wind langs een relatief kleine opening van een verder als afgesloten te beschouwen luchtvolume blaast wordt geluid gegenereerd. Dit principe is vooral bekend van de toon die kan worden gemaakt door te blazen langs een flessenhals, maar kan ook bij constructies voorkomen. Het geheel fungeert als een 1^{e} orde massa-veer systeem, waarbij de lucht in de flessenhals als massa fungeert die heen en weer beweegt, en het afgesloten luchtvolume erachter als veer. Deze "massa" kan bijvoorbeeld door harde wind in beweging worden gebracht en zal dan, analoog aan een veer waaraan een uitwijking wordt gegeven en vervolgens wordt losgelaten, een trilling gaan uitvoeren waarvoor geldt:

$$f_H = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\kappa * \frac{A^2}{m} * \frac{p_0}{V}} \quad \text{[rad/s]} \tag{3}$$

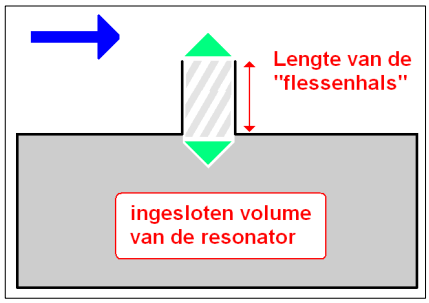
waarbij:

- m de massa van het medium in de "flessenhals" van de resonator;
- A de oppervlakte van een dwarsdoorsnede van de opening;
- V het volume van de gehele resonator.

Hetgeen ook geschreven kan worden als:

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{A}{V \bullet l_{nek}}} \quad \text{[Hz]} \tag{4}$$

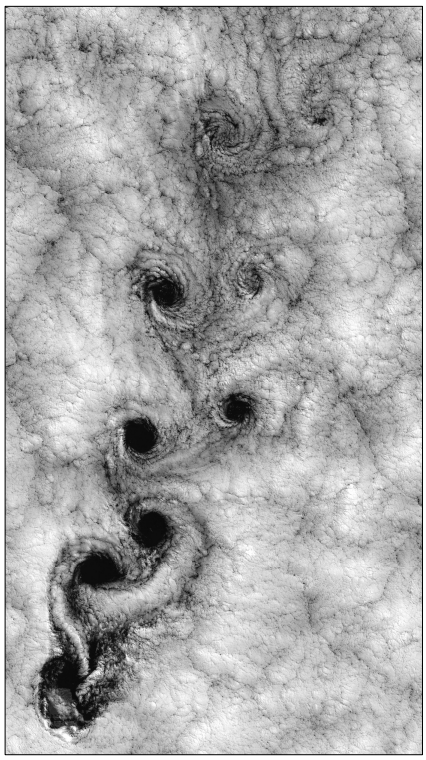
waarbij l_{nek} de lengte van de spreekwoordelijke flessenhals is (zie figuur 1).



figuur 1 Principe van een Helmholtz-resonator: het luchtvolume in de hals beweegt onder invloed van stroming langs de opening

De frequentie van het aldus geproduceerde geluid wordt slechts bepaald door de verhouding tussen het afgesloten luchtvolume en de afmetingen van de nauwe instroomopening; het is niet vereist dat de holte groot genoeg moet zijn om plaats te bieden aan de golflengte. Deze eigenschappen maken dit soort resonanties een realistische oorzaak van windgeluid.

2.2.4 Vortex shedding en Eolische tonen



figuur 2 Wervelstraat van Von Karman gevormd achter een eiland (satellietfoto: JPL/NASA)

Wanneer een object zich als een obstakel in een stromend vloeibaar of gasvormig medium bevindt, kan er aan de achterzijde een zeer herkenbaar repetitief patroon van om-en-om in tegengestelde richting draaiende vortexen optreden, een zogeheten wervelstraat van Von Karman, zie figuur 2. Bij gegeven vorm en omvang van het object is het Reynolds-getal bepalend voor het al dan niet optreden van het verschijnsel en de precieze vorm ervan. De vortexen hebben zowel zich om-en-om afwisselend drukveranderingen in het gebied achter het object tot gevolg, als krachtswerking op het object zelf. Een veelheid van trillingsproblemen aan constructies die zijn blootgesteld aan stromingen komen voor rekening van vortex shedding; variërend van trillende tuien, schoorstenen, en koeltorens tot offshore boorplatformen, vooral wanneer de frequentie waarmee wervels worden afgeschud overeen komt met de eigenfrequentie van het object. Het meetrillen van een object is echter geen vereiste voor het optreden van een wervelstraat, zoals het voorbeeld in figuur 2 duidelijk maakt. In het kader van windgeluid zijn de hoorbare drukwisselingen ten gevolge van de elkaar afwisselende vortexen het interessants; dit verschijnsel staat bekend onder de noemer "eolische tonen". Ook in dit geval is er geen sprake van meetrillen en kan het object waarbij de wervels ontstaan als star worden opgevat.

2.2.5 Flutter

Het uit de dynamica bekende verschijnsel "flutter" (aero-elasticiteit) is een zichzelf versterkende trilling met de eigenfrequentie van het constructiedeel ten gevolge van negatieve demping. Dit verschijnsel is onder andere bekend uit de luchtvaart, waar de

vleugels van vliegtuigen hierdoor op en neer kunnen bewegen. Omdat deze beweging van een constructiedeel primair het gevolg is van materiaaleigenschappen en het om trillen van de constructie zelf gaat, zal flutter verder buiten beschouwing blijven.

2.3 Wind

2.3.1 Grenslaag

Wanneer een gas of vloeistof langs of over een oppervlakte stroomt, ontstaat er onder invloed van de viscositeit van het medium een grenslaag. Dicht bij de oppervlakte is de stroomsnelheid lager, waarna deze met toenemende hoogte stijgt om uiteindelijk, op een zekere hoogte, niet langer te worden beïnvloed door de aanwezigheid het object waarlangs de grenslaag is ontstaan. De hoogte van deze grenslaag neemt toe bij grotere ruwheid van de oppervlakte en bij een langer aanstroomprofiel (Engels: "fetch").

2.3.2 Windklimaat

Betrouwbare meetgegevens over het windklimaat in Nederland zijn in ruime mate voorhanden, bijvoorbeeld bij het KNMI. Doorgaans wordt de windsnelheid gegeven op een vaste referentiehoogte van 10 meter, waarna op basis van een bekende relatie tussen windsnelheid en hoogte (windsnelheidsprofiel) een waarde kan worden bepaald voor andere hoogtes. Doorgaans wordt hierbij uitgegeaan van een logaritmisch profiel.

De uiteindelijke waarde van de windsnelheid kan daarnaast ook afhankelijk zijn van de atmosferische omstandigheden; vooral bij stabiele atmosfeer ('s nacht bij lage temperatuur en weinig tot geen bewolking) ontstaan er afwijkingen ten opzichte van het standaard windsnelheidsprofiel doordat de atmosfeer een sterke gelaagdheid kan vertonen, zoals bekend uit onderzoek door Van den Berg en De Graaf [2]. Daarnaast zijn er beperkingen aan de geldigheid van deze relaties op geringe hoogte en in de bebouwde omgeving, als gevolg van turbulentie door de aanwezigheid van allerlei obstakels zoals andere hoge constructies.

Wanneer het niet mogelijk is om metingen te doen, bijvoorbeeld omdat een project nog niet gerealiseerd is, zal er een schatting moeten worden gemaakt van de lokaal te verwachten windsnelheden. Deze schatting heeft per definitie een vrij lage nauwkeurigheid, waardoor het inschatten van het risico op het optreden van windgeluid wordt bemoeilijkt.

De problematiek rondom windgeluid concentreert zich in de praktijk in de bebouwde, stedelijke omgeving. Vanwege de vele obstakels en objecten die de stroming beïnvloeden is een accurate bepaling van windsnelheden dan alleen mogelijk door middel van windtunneltesten of CFD-modellering. Deze methoden worden vaak toegepast om het windcomfort te bepalen, en zijn voor dat doel doorgaans nauwkeurig genoeg. Voor het analyseren van windgeluid is echter de windsnelheid ter plaatse van het onderzochte object of gebouwdeel nodig. Daarbij kan er, wegens zeer sterke invloeden van de vorm en geometrie van een gebouw en zijn omgeving, lokaal sprake zijn van een veel hogere

stroomsnelheid dan op basis van het snelheidsprofiel en de gebouwhoogte mag worden verwacht, zeker ter plaatse van de randen van daken en hoeken van gebouwen.

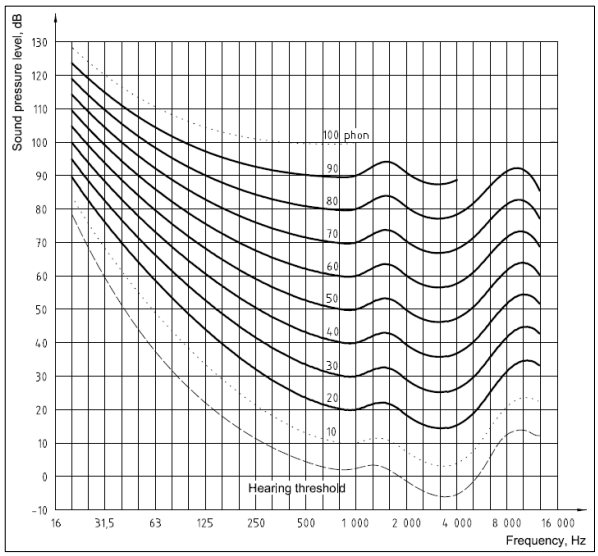
2.4 Hinder en perceptie

Of een bepaald geluid hinder is of zo wordt ervaren is een kwestie van een subjectieve beoordeling. Fysisch is er immers geen verschil tussen wat voor de één een aangenaam muziekje is, maar voor de ander pure herrie en overlast. Daarnaast wordt niet alle geluid wordt als (even) hinderlijk ervaren, zelfs als het dezelfde geluidssterkte heeft, en verschillen mensen onderling in hun gevoeligheid voor geluid(hinder).

Niet alleen de voor de hand liggende factor geluidssterkte is van invloed, maar ook de frequentie en karakter van het geluid, de (herkenbaarheid van) de bron, de tijdsduur waarover het geluid optreedt, en het tijdstip waarop (dag, nacht, etc.). In veel gevallen worden in normen en regelgeving correcties en opslagen gehanteerd om hiervoor te compenseren.

2.4.1 Gevoeligheid van het menselijk gehoor

Het oor is niet voor alle frequenties even gevoelig. Om te beginnen zijn, zelfs voor een jong iemand zonder enige gehoorschade, slechts het gebied tussen 20 en 20.000 Hz hoorbaar; naarmate iemand ouder wordt neemt dit frequentiegebied van nature steeds verder af door verlies aan hoge tonen. Daarnaast is de gevoeligheid van het menselijk gehoor niet voor alle frequenties hetzelfde, zelfs bij gelijk geluiddrukniveau. Om hiervoor te compenseren wordt veelal gebruik gemaakt van een gewogen geluiddrukniveau, uitgedrukt in dB(A).



figuur 3 "Normal equal loudness levels for pure tones"; uit ISO 226:2003 bijlage A, geeft de frequentieafhankelijkheid van het menselijk gehoor. Iedere lijn wordt als even luid ervaren, ondanks de grote verschillen in "Sound pressure level".

Duidelijk zichtbaar in figuur 3 is dat de gevoeligheid van het menselijk gehoor maximaal is in het gebied rond de 3 kHz, en duidelijk minder voor de frequenties lager dan 300 Hz of hoger dan 8 kHz. In het meest gevoelige frequentiegebied bevinden zich o.a. normale menselijke spraak (300-3000 Hz) evenals veel in het dagelijks leven belangrijke (waarschuwings-)signalen en de meeste muziek.

2.4.2 Tonaal karakter

Geluiden die niet alleen voldoende luid zijn maar ook een "toon" vormen, gelden als hinderlijker dan wanneer niet aan dat vereiste is voldaan (zoals bij ruis), reden voor de wetgever om hier speciale aandacht aan te besteden in de regelgeving. Veel van het door gebouwen onder invloed van wind geproduceerde geluid dat als hinderlijk wordt ervaren kenmerkt zich door dit tonale karakter; dit geldt bijvoorbeeld voor alle in de inleiding genoemde voorbeelden van probleemgevallen.

2.4.3 Impulsgeluiden

Dit betreft geluiden die van zeer korte duur zijn, maar wel herhaaldelijk kunnen voorkomen. Er kan worden gedacht aan hamergeluiden, schietgeluid, en bepaalde industriegeluiden. Ook onder invloed van wind kan geluid met een dergelijk karakter geproduceerd worden.

2.4.4 Muziek

Ook muziek kan als hinderlijk worden ervaren, en wel in behoorlijk grote mate. Zo wordt in de 'Handleiding meten en rekenen industrielawaai' een opslag van niet minder dan 10 dB gebruikt.

2.4.5 Tijdstip en duur van hinder

Voor het bepalen van de mate van overlast zijn er grote verschillen tussen de acceptabele geluidsniveaus overdag, 's avonds, en 's nachts. Zo is nachtrust veel gevoeliger voor geluidhinder dan activiteiten overdag, terwijl tegelijkertijd het niveau van het achtergrondlawaai lager is dan overdag. Daarom wordt er voor geluid 's nachts een opslag gehanteerd van 10 dB, voor de avond (en in ISO 1996-1:2003 ook in het weekend overdag) van 5 dB. Uiteraard verhoogt een langere duur de mate van hinder; bij equivalente geluidsniveaus wordt deze periode om die reden dan ook vermeld.

2.4.6 Overig

Naast de bovengenoemde factoren is het goed denkbaar dat ook de mate van vrijwillige blootstelling, en het al dan niet collectief getroffen worden door de overlast, van invloed kunnen zijn. Dit naar aanleiding van vergelijkbare verschillen in acceptatiegraad bij het lopen van risico's: hoe onvrijwilliger, en hoe groter het aantal mensen dat tegelijk getroffen wordt, des te lager de acceptatie en navenant, des te groter de (subjectief) ondervonden mate van hinder. Deze factor is echter geen onderdeel van bestaande normen.

2.4.7 Windgeluid = hinder?

Om windgeluid als hinder te kunnen beschouwen, moet het op basis van het bovenstaande aan een aantal criteria voldoen:

- Voldoende hoog geluiddrukniveau, niet alleen om hoorbaar te zijn maar ook om duidelijk te onderscheiden te zijn van het achtergrondlawaai;
- Herkenbaarheid. Geluid met een specifiek karakter zoals tonaal of impulsief wordt sneller als hinderlijk ervaren. Hoewel ruis bij zeer hoge niveaus in principe niet uit te sluiten is als bron van hinder, zal dit onderzoek zich daarom specifiek richten op tonaal windgeluid.

Dergelijk tonaal windgeluid zal door alle ontvangers als hinderlijk worden ervaren, vergelijkbaar met industrielawaai of zelfs muziek. Er kan dus redelijkerwijs van minstens dezelfde toeslagen gebruik gemaakt worden: 5 dB voor tonaal of impulsief karakter, en 10 dB nachttoeslag.

2.5 Huidige normen en regelgeving

In regelgeving zoals de Wet Geluidhinder, verschillende daarmee samenhangende publicaties (Reken- en meetvoorschriften, e.d.), evenals de Woningwet en het Bouwbesluit, wordt beschreven welke geluiden onder welke omstandigheden toelaatbaar zijn, en hoe hiermee in het bijzonder op bestuurlijk niveau mee kan worden omgegaan. Vaak worden er een tweetal getalswaarden gegeven, het wenselijke geluidsniveau en een maximale waarde, vergezeld van voorschriften onder welke voorwaarden en omstandigheden hiervan mag worden afgeweken. Ook voor zonering is er veel aandacht. Daarnaast worden er procedures voor metingen of berekening gegeven, en voorwaarden waaraan deze moeten voldoen.

Voor overlast en hinder zijn twee waarden van belang, te weten een representatieve waarde over een relevante tijdspanne, zoals een equivalent geluidniveau gedurende de nacht; daarnaast moet er aandacht zijn voor de piekwaarde van de geluidsterkte die maximaal optreedt binnen diezelfde periode. Deze laatste is voornamelijk van belang in het geval voor het beoordelen van kortdurende maar invloedrijke hinder met zoals het verstoren van de slaap, die zeer grote invloed op de gezondheid kan hebben. Een goed overzicht geeft in dat opzicht de volgende tabel, waarbij wordt uitgegaan van een isolatiewaarde van 15dB voor een openstaand raam:

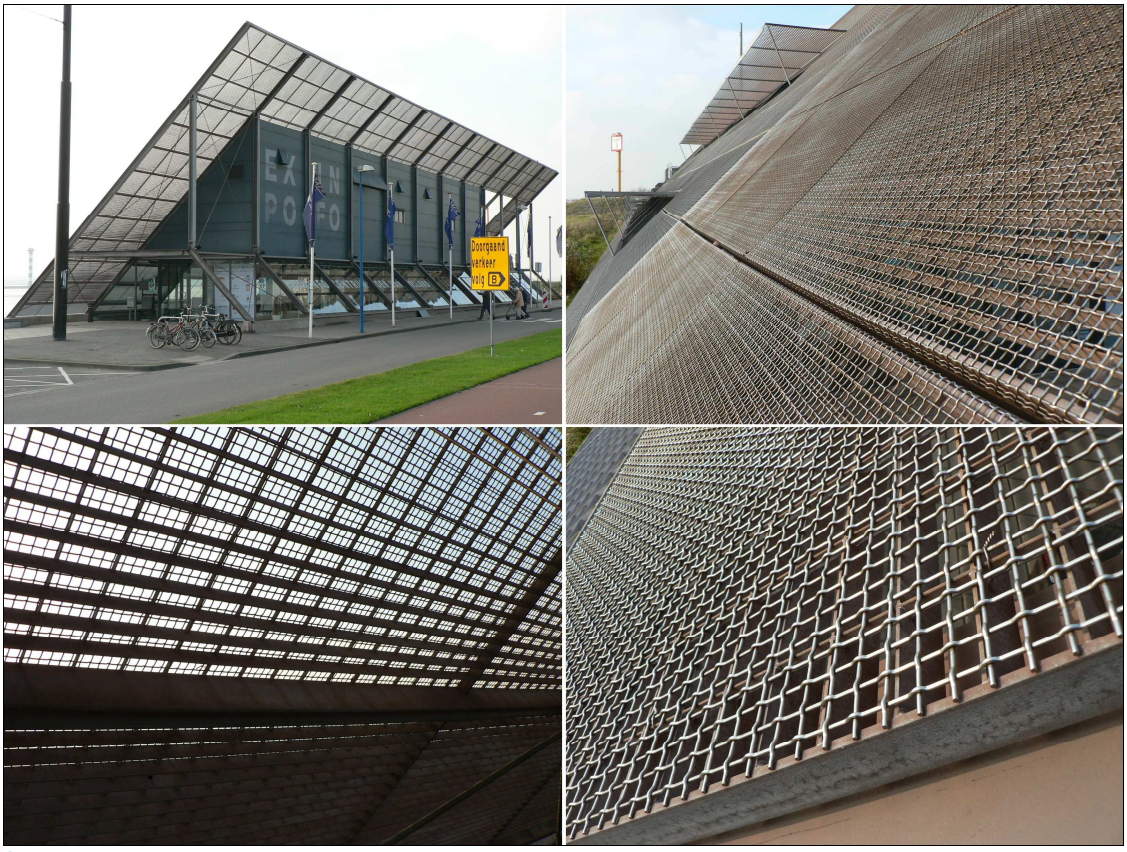
Specific environment	Critical health effect(s)	LAeq [dB]	Time base [hours]	LAmax, fast [dB]
Outdoor living area	Serious annoyance, daytime and evening Moderate annoyance, daytime and evening	55 50	16 16	- -
Dwelling, indoors Inside bedrooms	Speech intelligibility and moderate annoyance, daytime and evening Sleep disturbance, night-time	35 30	16 8	 45
Outside bedrooms	Sleep disturbance, window open (outdoor values)	45	8	60
School class rooms and pre-schools, indoors	Speech intelligibility, disturbance of information extraction, message communication	35	during class	-
Pre-school Bedrooms, indoors	Sleep disturbance	30	sleeping -time	45
School, playground outdoor	Annoyance (external source)	55	during play	-
Hospital, ward rooms, indoors	Sleep disturbance, night-time Sleep disturbance, daytime and evenings	30 30	8 16	40 -
Hospitals, treatment rooms, indoors	Interference with rest and recovery	#1		
Industrial, commercial, shopping and traffic areas, indoors and Outdoors	Hearing impairment	70	24	110
Ceremonies, festivals and entertainment events	Hearing impairment (patrons:<5 times/year)	100	4	110
Public addresses, indoors and outdoors	Hearing impairment	85	1	110
Music through headphones/ Earphones	Hearing impairment (free-field value)	85 #4	1	110
Impulse sounds from toys, fireworks and firearms	Hearing impairment (adults) Hearing impairment (children)	- -	- -	140 #2 120 #2
Outdoors in parkland and conservation areas	Disruption of tranquillity	#3		

#1: as low as possible;
#2: peak sound pressure (not LAmax, fast), measured 100 mm from the ear;
#3: existing quiet outdoor areas should be preserved and the ratio of intruding noise to natural background sound should be kept low;
#4: under headphones, adapted to free-field values

tabel 2 Richtwaarden voor geluid; uit "guidelines for community noise", Wereld Gezondheids Organisatie. De kolom LAeq geeft toelaatbare equivalente geluidniveaus voor de in de kolom "Time base" genoemde periode; LAmax geeft de maximaal toelaatbaar kortdurende piekwaarde.

2.6 Bekende probleemgevallen

2.6.1 Expo-paviljoen, Hoek van Holland



figuur 4 Expo-paviljoen met duidelijk zichtbare dakroosters, van linksboven met de klok mee: a. Overzicht; b. Alleen gaas ter plaatse van overstekken; c. Detail, inclusief bevestiging; verhouding maasgrootte van rooster en gaas. Het schuine dak grenst aan de noordelijke oever van de Nieuwe Waterweg en is gericht op ZZW. (eigen foto's)

Het Expo-paviljoen is een opvallend gebouw, dat zich direct naast de Nieuwe Waterweg bevindt. Het schuine dak, opgebouwd uit dejo-roosters, steekt uit boven en naast het eigenlijke gebouw en heeft een totaal roosteroppervlakte van circa 250m^2 (ofwel omstreeks 6 km plaatstrips alleen al van de grootste ribben van het rooster).

Bij harde zuidwestenwind (windkracht 7 of hoger) was er sprake van een zeer harde fluittoon met een geluiddrukniveau van maar liefst 100dB [3]. Deze toon werd veroorzaakt door wervels als gevolg van de luchtstroming door de mazen van het rooster. Een en ander kon in windtunneltesten worden gereproduceerd; als oplossing werd uiteindelijk gekozen voor het aanbrengen van een fijnmaziger gaas (met een maasgrootte circa 1/3 van die van het rooster in verticale richting, en 1/5 in horizontaal). Als gevolg van een "vermindering van de coherentie van de wervelafschudding" bleef de zeer harde

toon uit. Aangezien zich in de directe omgeving woonhuizen bevinden, waaronder de nodige recente nieuwbouw, zonder dat er nieuwe klachten bekend zijn, werkt deze oplossing tot op heden blijkbaar foutloos.

2.6.2 Strijkijzer, Den Haag

Ook hier bleken roosters oorzaak van overlast ten gevolge van windgeluid, ditmaal verwerkt in een buiten het vlak van de gevel uitstekende kroon bovenop het gebouw.

figuur 5 Roosters in de kroon van het Strijkijzer [uit: Bouwwereld #17 2007]

Na klachten van bewoners en omwonenden werden als tijdelijke oplossing delen van de kroon afgedekt, waarmee de luchtstroming door de rooster geblokkeerd werd.

Hoewel het voor de hand zou liggen dat juist deze constructie, met zijn buiten de gevel uitstekende kroon met grote oppervlakten aan roosters ook op akoestisch aspecten onderzocht zou worden, lijkt het erop dat dit niet gebeurd is.

Op het moment van schrijven is nog geen definitieve oplossing geïmplementeerd, hoewel om uitvoeringstechnische redenen de voorkeur op dit moment lijkt uit te gaan naar het definitief maken van het afdekken, alleen dan op een esthetisch verantwoorde wijze met behulp van doorzichtig plaatmateriaal. Voor meer details verwijs ik naar het gespreksverslag van Peutz verderop in dit document.

2.6.3 Hoftoren, Den Haag

Al snel na oplevering bleek dat bij harde wind (vanaf windkracht 7) er overlast bestond vanwege een of meerdere fluittonen. Hoewel de panfluitachtige rand van het dak in eerste instantie allicht anders zou doen vermoeden, is ook hier de oorzaak een groot schuin rooster op het dak, zichtbaar in figuur 6. De oplossing werd in eerste instantie gezocht in de vorm van spoilers die "het regelmatige patroon van de luchtstroom" moeten verstoren en zo het ontstaan van windgeluid zouden moeten verhinderen [4]. Meerdere configuraties werden getest "in het lab", waarna spoilers met een hoogte van 10 à 15 cm het meest effectief bleken. De uiteindelijk toegepaste oplossing betrof echter met zware verf gecoate roosters, die behalve een einde maken aan het tonaal windgeluid ook het voordeel hebben beter bestand te zijn tegen corrosie. Aangezien het roostervlak in het dak hier slechts de functie heeft de apparatuur en installaties er onderin uit het zicht te houden, is de aanwezigheid van de verflaag geen probleem, en is deze ook niet aan al te snelle slijtage onderhevig. Dit was overigens niet het enige windgerelateerde probleem bij dit project: vanaf windkracht 9 waren er problemen met vallende gevelpanelen.

figuur 6 Dak van de Hoftoren, Den Haag; het hellende vlak bestaat uit roosters

figuur 7 Beetham tower

2.6.4 Beetham Tower, Manchester (Engeland)

Op het dak van dit 155 meter hoge gebouw uit 2006 bevindt zich een 14 meter hoge karakteristieke constructie uit staal en glas. Wind langs dit "scheermes" veroorzaakt bromtoon-achtig geluid met een frequentie van 260 à 270 Hz [5, 6]. Het aanbrengen van stukken schuim tegen de glazen delen bracht verlichting, hoewel deze er met enige regelmaat (gedeeltelijk) afwaaien waarna de geluidoverlast opnieuw begon [8]. Uiteindelijk werden naar verluid gebogen aluminium strips aangebracht om de windstroming rond de rand te veranderen en zo te het probleem definitief te verhelpen. Onduidelijk is of dit gelukt is, of mogelijk tot andere windgeluidproblemen heeft geleid [7]. Details over dit project zijn lastig te vinden, waarschijnlijk vanwege commerciële belangen.

2.6.5 Cityspire Center, Manhattan (New York, V.S.)

De luchtstroming door de koepel bovenop dit 248m hoge appartementengebouw veroorzaakte een harde, zuivere fluittoon. Na het nodige (juridisch) geruzie met buurtbewoners en slecht lopende verkopen werd het probleem verholpen door het om-en-om weghalen van de horizontale elementen van de koepel. Deze functioneerden als een holte; het aanpassen van de akoestische eigenschappen daarvan bleek afdoende.

figuur 8 Koepel van het Cityspire Center

Afgezien van de technische aspecten laat dit project ook goed zien welke commerciële belangen er spelen, hoe daarmee wordt omgegaan, en hoe weinig wet- en regelgeving op dit soort problematiek is ingespeeld. Bij de rechter hadden over overlast klagende omwonenden in eerste instantie weinig succes (kleine boete voor de gebouwbeheerder wegens het veroorzaken van een "domestic disturbance"), doordat de wetgeving geen rekening hield met situaties zoals deze. Commercieel eigenbelang van de ontwikkelaar, en de dreiging van grote schadeclaims door omwonenden vormden een betere aanmoediging.

figuur 9 Brugleuning Kruithuisweg

2.6.6 Brugleuning Kruithuisweg (Delft)

Fietsers en wandelaren in Delft zijn bekend met het feit dat de leuningen langs het fiets- en voetpad van de Kruithuisweg, een verhoogd liggende autoweg, op een aantal plaatsen geluid maken in de vorm van een aantal fluit- en bromtonen, afhankelijk van de windsnelheid. Ter hoogte van de brug over de Schie bij noordenwind; ter hoogte van de brug over de Rotterdamseweg ook bij wind uit zuidelijke hoek. In beide gevallen bevinden zich in de richting waaruit de wind komt minder obstakels zoals struiken en bomen; op plekken waar deze wel bestaan is er duidelijk minder geluidproductie. De constructie is behoorlijk stevig; desondanks is een trilling voelbaar wanneer er een bromtoon wordt geproduceerd. De Kruithuisweg loopt in WZW-ONO richting; de windrichtingen waarbij windgeluid optreedt zijn dus ongeveer haaks op de weg en de leuning.

De genoemde brugleuning bestaat uit een drietal metalen kokers, een grotere aan de bovenkant, en een tweetal identieke kleine daaronder, die allen aan de onderzijde een opening hebben:

figuur 10 Detail Detail grote (links) en kleine koker (rechts)

Onduidelijk is welke van de twee typen kokers verantwoordelijk is of zijn voor het geproduceerde geluid. Op basis van de grootte van de opening zou men zeker de grote koker als een holte kunnen zien; de kleinere heeft, wegens zijn duidelijk nauwere opening, meer weg van een Helmholtz-resonator. Met (buiten)maten hoogte 70 mm, breedte 50 mm, dikte 3 mm, opening 13 mm zou dat opleveren:

$$f = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{A}{V \bullet l_{nek}}} = \frac{343}{2\pi}\sqrt{\frac{13\cdot 10^{-3}}{64\cdot 10^{-3}\times 54\cdot 10^{-3}\times 4.2\cdot 10^{-3}}} = 1633\ Hz \qquad (5)$$

Mocht ook de grotere koker een Helmholtz-resonator zijn, dan levert dat op vergelijkbare wijze een *f* op van 1779 Hz. Ter plaatse zijn, afhankelijk van de windsnelheid, meerdere duidelijk verschillende tonen hoorbaar. De hierboven op basis van Helmholtz berekende frequenties stemmen echter niet overeen met de meest gangbare van deze tonen, een duidelijk lagere bromtoon (~311Hz op basis van vergelijken met een piano).

Helaas is er (nog) geen goede opname van het geluid ter vergelijking; opnames gemaakt met een mobiele telefoon worden steevast gedomineerd door windruis en verkeerslawaai.

2.7 Praktische oplossingen

Veelal worden bovengenoemde problemen pas ontdekt tijdens de bouwfase of zelfs pas na oplevering en ingebruikname, waardoor er laat in het ontwerpproces of achteraf maatregelen moeten worden genomen om de ontstane overlast weg te nemen.

Het wegnemen van de overlast op zich kan in veel gevallen op relatief eenvoudige wijze, zoals te zien is bij de bovengenoemde praktijkgevallen: het veranderen van de luchtstroming (Expo-paviljoen Hoek van Holland; Hoftoren) of het geheel wegnemen

daarvan (voorlopige oplossing Strijkijzer) zijn op zich bepaald geen wereldschokkende ingrepen. Wel is het lastig en kostbaar om achteraf in te moeten grijpen, en zou idealiter de windgeluidproblematiek vooraf moeten kunnen worden geëvalueerd, bij voorkeur op een snelle en efficiënte manier.

2.8 Inventarisatie beroepspraktijk

Inleiding
In najaar 2008 hebben een aantal gesprekken plaatsgevonden met deskundigen uit de akoestische beroepspraktijk, teneinde de stand van zaken rond het onderwerp windgeluid te inventariseren. Hieronder volgt een verslag van deze ontmoetingen.

2.8.1 Cauberg-Huygen

Den Bosch, 2008
Arjan Pleysier

Aan de hand van de nodige praktijkgevallen werd het optreden van problemen met windgeluid behandeld. Spleten en lamellen, zoals die veel voorkomen aan gevels of bij dakranden, zijn een gekende oorzaak. Lokaal hogere windsnelheden, bijvoorbeeld nabij dakranden of als gevolg van de bebouwde omgeving leveren meer geluidsoverlast op, ook van tonaal geluid.

In het geval van lamellen speelt de afronding van de elementen een grote rol; daarnaast is ook de onderlinge afstand van belang. Dat was onder andere het geval bij het Da Vinci complex in Alphen (figuur 11) waar een aanpassing (vergroting) van de afrondingsstraal uitkomst bracht. Ook regelmatige patronen verhogen de kans op tonaal geluid.

figuur 11 Da Vinci complex te Alphen

Hoewel het probleem met enige regelmaat voorkomt is het ook weer geen dagelijkse bezigheid. Zekerheid kan in veel gevallen alleen worden verkregen door het uitvoeren van proeven in een windtunnel. Technieken om op basis van computerberekeningen zijn niet praktisch inzetbaar wegens het verschil tussen de globale stroming rond bijvoorbeeld een gebouw, en het vereiste detailniveau dat ter plaatse van het problematisch constructiedeel is vereist.

2.8.2 Level Acoustics (TU/e)

Renz van Luxemburg
Eindhoven

Detectie
Detectie van windgeluidproblemen gaat eerst en vooral op basis van ervaring. Na een inschatting is het aan de opdrachtgever om al dan niet verder onderzoek te laten uitvoeren en/of het ontwerp te (laten) aanpassen. Gezien de kosten die, zeker bij complexere projecten, verbonden zijn aan het voorkomen van problemen rond windgeluid en de daarvoor benodigde testen, wordt regelmatig besloten tot het preventief aanpassen van het ontwerp door de gewraakte delen van de constructie eenvoudigweg te verwijderen. Dit was bijvoorbeeld het geval bij het TGV-station in het Noord-Franse Lille, waar men roosters wilde toepassen op een dak met verschillende hellingshoeken. Zonder aanvullend onderzoek was het niet mogelijk om voldoende zicht te krijgen op de mogelijkheid en ernst van de te verwachten problematiek.

Berekeningen aan windgeluid gaan niet verder dan een basisschatting; voor meer zekerheid is windtunnelonderzoek noodzakelijk indien het risico niet kan worden uitgesloten. Daar staat dan weer tegenover dat indien de problematiek inderdaad onderzocht wordt, en voorgestelde oplossingen geïmplementeerd, er in de praktijk ook geen problemen optreden.

Computational Fluid Dynamics
Voor het (vooraf) opsporen van problemen met windgeluid kan CFD in de toekomst een rol spelen. Belangrijk voordeel daarbij ten opzichte van het uitvoeren van testen in de windtunnel is dat een goede detaillering, en daarmee een beter inzicht in het stromingspatroon, beter haalbaar is dan wanneer er aan bijvoorbeeld schaalmodellen in de windtunnel gemeten moet worden. Vooral het op schaal modelleren van zaken als oppervlakte-eigenschappen is nauwelijks te doen. Op dit moment staat een CFD-gebaseerde aanpak echter nog in de kinderschoenen, niet in de laatste plaats doordat de benodigde rekenkracht nog niet in voldoende mate beschikbaar is; daarnaast is er nog zeer veel onderzoek nodig voordat een dergelijke aanpak voldoende praktisch en betrouwbaar zal worden.

Een problematisch aspect van CFD (en windgeluidproblemen in het algemeen) is dat de geluidssterkte lastig is in te schatten op basis van theorie; de link tussen de windstroming en de geluidssterkte wordt eigenlijk altijd gelegd door middel van metingen (in de windtunnel dan wel in situ).

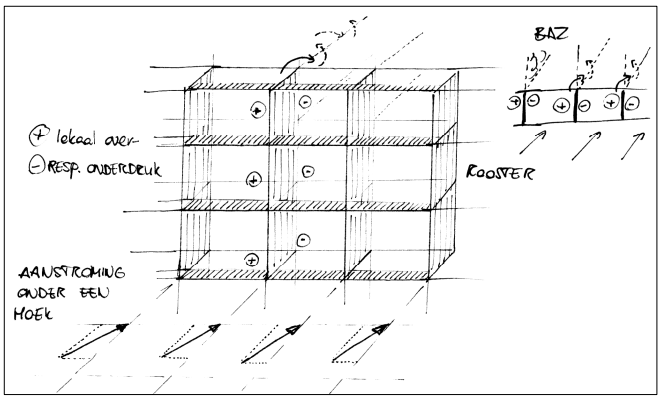
Hiernaast kwamen een aantal artikelen aan bod op het gebied van windgeluid, alsmede enkele contacten die mogelijk meer informatie zouden kunnen opleveren. Respons van collega's en bekenden die naar aanleiding van ons gesprek door dhr. Van Luxemburg zijn benaderd geeft wederom aan dat bij de huidige stand van zaken in de beroepspraktijk, met niet in de laatste plaats de beperkte mogelijkheden van berekeningen, men sterk afhankelijk is van (windtunnel)testen wanneer meer zekerheid gewenst is.

2.8.3 LBP

Rob Dekkers
Nieuwegein

Aanpak
De sterk empirische omgang met windgeluid werd ook hier bevestigd.

Aan de hand van een recent project in Utrecht (kantoorpand in Papendorp) bleek dat roosters ook hier geen onbekende waren als veroorzaker van windgeluid. Bij een net gerealiseerd kantoorpand kwam bij de eerste storm aan het licht dat de roosters, die op iedere van de drie verdiepingen horizontaal voor de gevel waren aangebracht ten behoeve van glazenwassers, schrille tonen produceerden die ook binnen hinderlijk aanwezig waren. Bij metingen bleek het te gaan om een duidelijk toon van circa 2450 Hz. Met name bij windvlagen werd de geproduceerde geluidssterkte zeer hoog; zelfs het terugluisteren van de opname was weinig aangenaam (maar daarom natuurlijk niet minder interessant). De zeer grote totale oppervlakte aan roosters bij het gebouw, en daarmee de veelheid aan bronnen, is hier waarschijnlijk debet aan. Uit de metingen was niet te bepalen welk rooster wel of niet bijdroeg, of in welke mate, hoewel uiteraard verwacht mag worden dat de windsnelheid bij de hoger gelegen roosters hoger ligt.



figuur 12 Mogelijk excitatiemechanisme bij roosters

Problematiek rond roosters
Uit proeven door LBP, waarbij (bij wijze van low budget windtunnel) een rooster op het dak van een bestelbus werd gemonteerd, bleek dat aanstroming onder een hoek het snelst windgeluid oplevert; bij de situatie bij het kantoorpand in Papendorp zouden de horizontale en verticale componenten van de windstroming dusdanig zijn dat hier een vergelijkbare bron ontstaat. Sommige oplossingen om de roosters stil te krijgen, leveren hun eigen praktische problemen op, met name vanwege de eis dat het rooster bruikbaar moet zijn voor de glazenwassers: zo maakt het coaten van de roosters, waarvan een voorbeeld (waarbij het aanbrengen van de coating niet helemaal succesvol was verlopen maar het idee was duidelijk) aanwezig was van een ander project, ze te glad en bovendien vatbaar voor slijtage; vergelijkbare nadelen kleven aan het afdekken van de roosters met een (doorzichtig) plaatmateriaal. Tot op heden is voor dit geval voor zover bekend overigens geen oplossing daadwerkelijk geïmplementeerd, waarschijnlijk omdat men de kosten niet vond opwegen tegen het voorkomen van windgeluid wanneer het stormt.

Bij aanstroming onder een hoek zou een drukverdeling kunnen ontstaan zoals in bijgevoegde schets, waarbij het "ontsnappen" van overdruk richting onderdruk dan zou moeten zorgen voor een regelmatig patroon van afschudding van wervels, zie figuur 12.

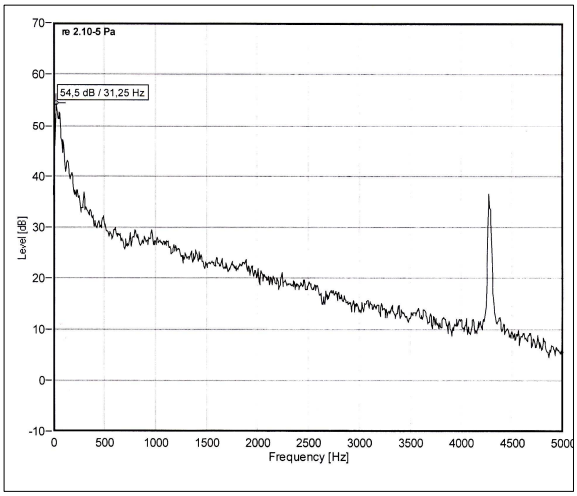
Naast bovenstaande kwam een artikel [9] over een woningbouwproject aan bod waar stroming in de langsrichting, dus over het vlak van een rooster, tot windgeluid leidde. De frequentie van het hierdoor opgewekte geluid was gebaseerd op de werking van de mazen van het rooster als een soort van (korte) orgelpijpen. De luidheid en frequentie van het geluid waren dusdanig dat dit sterke hinder opleverde, inclusief slaapklachten en dergelijke. De trechtervorm van de bebouwing in de straat (en dus hoger dan normale windsnelheden), gecombineerd met de opgewekte frequentie die zich precies bevond in de octaafband waar de geluidsisolatie van veel materiaal het geringst is, had tot gevolg dat ook met de ramen dicht e.e.a. duidelijke overlast veroorzaakte. Een oplossing werd na metingen en testen gevonden in het laten begroeien van alle roosters die als tuinafscheiding werden gebruikt, en het plaatsen van spoilers bij de roosters op de daken die de gelijkmatige luchtstroming langs onderbreken. Jammer genoeg zijn de metingen aan dit geval niet smalbandig uitgevoerd, maar op 1/3-octaafband, waardoor de precieze kenmerken en piek van de geluidssterkte niet optimaal duidelijk worden.

Verder zijn er nog een aantal publicaties besproken, waaronder een recentere publicatie van Parker (1997).

2.8.4 Peutz

Evert de Ruiter
Zoetermeer

Strijkijzer
Niet geheel onverwacht kwam het gesprek al gauw op de perikelen rond het Strijkijzer. De problemen, duidelijk zichtbaar in figuur 13, bleken na eliminatie van alle makkelijker te bereiken onderdelen (o.a. roosters op lagere verdiepingen t.b.v. glazenwassers) uiteindelijk veroorzaakt te worden door de roosters in de kroon. Het geproduceerde geluid heeft een zeer duidelijk tonaal karakter, en is zeer luid. Ter plaatse van de roosters is de richting van de wind verticaal door de invloed van het gebouw; de roosters worden dus praktisch loodrecht in het vlak aangestroomd.

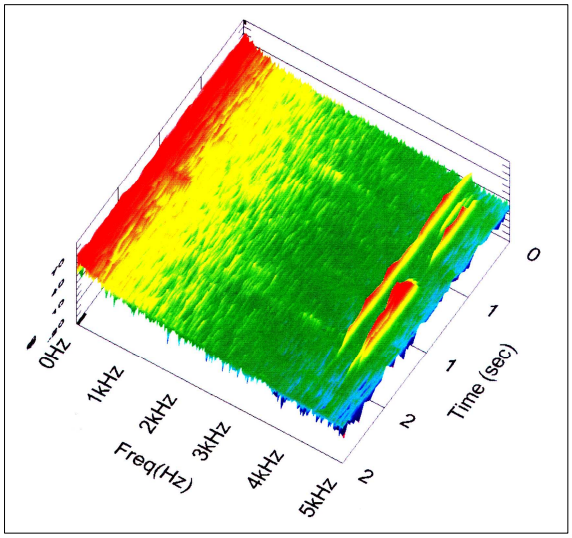


figuur 13 Meting tonaal geluid Strijkijzer vanaf een nabijgelegen gebouw (circa 125 meter afstand van de bron); de piek heeft een frequentie van circa 4300 Hz

Nadat de roosters in de kroon als noodmaatregel geheel afgedekt waren met plaatmateriaal, werd begonnen met het zoeken naar oplossingen. Bij wijze van test werd een gedeelte van de platen weggehaald, en al snel bleek het probleem niet te bestaan bij de roosters in het gedeelte van de kroon dat zich op enige afstand van het gebouw

bevindt. Het zelfs maar gedeeltelijke weghalen van de overige platen leidde steeds tot hervatting van de geluidsproductie.

Opvallend is bovendien, zie bijgevoegde 3D weergave van enkele seconden geluid in figuur 14, dat er sprake lijkt te zijn van een tweetal tonen, een hardere die optreedt bij windvlagen, maar ook een tweede met een iets lagere frequentie die ondanks diezelfde windvlagen constant blijft in zowel frequentie als amplitude.



figuur 14 3D weergave van enkele seconden van een geluidmeting. Let op de verschillende reactie op windvlagen tussen de twee tonen.

Uitvoeringstechnische aspecten
Voor dit gedeelte was dus ingrijpen vereist, ware het niet dat vele van de overwogen maatregelen (coaten, verstoring van de stroming, e.d.) allemaal aanpassingen nodig maakten aan de "bovenstroomse" zijde van het rooster, in dit geval dus de onderkant ervan. Dit zou neerkomen op volledige demontage van de roosters uit de kroon, hetgeen gezien de grote bouwhoogte en de locatie direct naast doorgaande wegen en het drukke Rijswijkseplein op zijn zachts gezegd niet wenselijk werd geacht.

Het zijn hier dus uitvoeringstechnische aspecten die de definitieve oplossing dicteren: het (permanent) afdekken van de roosters door middel van transparante platen. Hierbij kan van bovenaf gewerkt worden, waardoor geen kostbare en tijdrovende demontage van de bestaande roosters nodig is.

Overige projecten
De omgang met windgeluidproblematiek verloopt niet altijd even soepel. Zeker wanneer tijdelijke maatregelen de stortvloed aan klachten tot staan hebben gebracht, verliest men wel eens de aandacht. Een goed voorbeeld hiervan is een kunstwerk in een buitenwijk aan de rand Amsterdam, bestaande uit een tientallen meters hoge, met roosters beklede staalconstructie, in de vorm van een soort van portaal. Niet geheel verrassend leidde e.e.a. tot klachten over geluidhinder uit de omliggende woonwijk. Nadat bij wijze van noodmaatregel het kunstwerk werd bekleed met een uit de steigerbouw bekend type zeil was het fluiten "verholpen", en de kunstenaar liet weten geen aanpassingen te wensen aan zijn werk, liet de gemeente het er verder bij zitten; toen de problemen en dus ook de klachten na verloop van tijd terugkeerden doordat het zeil de tand des tijds niet ongeschonden had doorstaan (wind, vernielingen, enz.) werd zonder verder naar oplossingen te zoeken het gehele kunstwerk alsnog ontdaan van zijn roosters zodat slechts het geraamte bleef staan.

Windtunnel
Peutz beschikt als bureau over een eigen windtunnel, die voornamelijk wordt gebruikt voor het doen van windhinderonderzoek. Een beperkt deel van de tijd (≤10%) wordt de tunnel ook ingezet voor het doen van metingen aan o.a. stromingsgeluid. Nadeel is dat de tunnel voor dit doel moet worden "verbouwd": zaken zoals de blokken die voor een juiste opbouw van de grenslaag zorgen moeten worden verwijderd, nieuwe testopstellingen geplaatst, enzovoort. Een dergelijk proces neemt zowel voor het opbouwen als het weer in de oude staat herstellen circa een dag in beslag, hetgeen dergelijke testen verhoudingsgewijs duur maakt.

Voorts wordt er, in opdracht van leveranciers van dergelijke producten, gemeten aan onderdelen van airconditioning- en luchtverversingssystemen. Deze worden klaarblijkelijk standaard voorziet van certificaten betreffende de maximale hoeveelheid geluid die bij gegeven debieten geproduceerd worden. Helaas bestaat een vergelijkbare certificering vooralsnog niet op het gebied van bijvoorbeeld gevelelementen.

2.8.5 DMGR

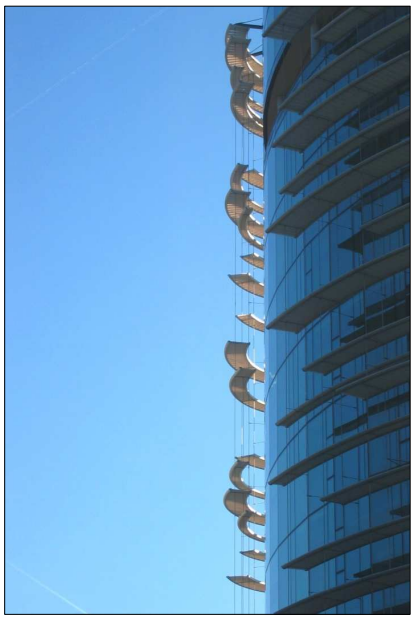
Bart van de Graaf, e.a.
Arnhem

Algemene aanpak
Bij DGMR is windgeluidproblematiek ondergebracht bij de sector die zich bezighoudt met trillingstechniek en geluidarm construeren. De eerste aanpak verschilt niet wezenlijk van de elders gehanteerde methoden: een snelle, kwalitatieve "quick scan" op basis van kennis en ervaring, eventueel gevolgd, indien nodig of gewenst, door een meer diepgaande analyse, windtunneltesten (TNO Apeldoorn), enzovoort.

CFD
Hierbij wordt getracht de mogelijkheden van CFD optimaal te benutten, en naast onderzoeken naar windhinder, brandveiligheid, rookverspreiding, comfort of concentraties chemische stoffen, ook bij windgeluid gebruik te maken van kennis die door CFD-modellen kan worden geleverd. Deze modellen leveren immers niet alleen informatie over bijvoorbeeld de windsnelheden op een per definitie beperkt aantal meetpunten, maar ook over stroomlijnen en windsnelheden elders. Zo kan bijvoorbeeld bepaald worden waar langs een onregelmatige gevel de windsnelheden maximaal zijn, en dus het risico op het overschrijden van deze en gene voor windgeluid kritische waarden.

Op termijn streeft men naar het integreren van dergelijke informatie in een model, om onder andere geluidhinder als gevolg van stroming in luchtverversingssystemen accuraat te kunnen inschatten. Nadeel is en blijft de benodigde rekenkracht, zeker wanneer er voor bijvoorbeeld ieder van twaalf verschillende windrichtingen meerdere berekeningen moeten worden gedaan. Verder is de acceptatie van de resultaten lang nog niet in alle gevallen vanzelfsprekend. Daar waar mogelijk zullen de resultaten uit de windtunnel en vanuit de CFD-kant naast elkaar gelegd moeten worden ter verificatie.

Projecten
Vanzelfsprekend kwamen ook een aantal relevante projecten aan bod, waaronder Tasmantoren (Groningen), Westraven (Rijkswaterstaat, Utrecht), en Walterbos complex (belastingsdienst, Apeldoorn). Opvallend is de rol van de Rijksgebouwendienst als opdrachtgever, waarbij relatief veel ruimte is voor onderzoek, in ieder geval meer dan gebruikelijk bij windgeluidproblematiek, en dit ook vroeg in het ontwerpproces wordt meegenomen. Met name in het geval van Walterbos waarbij aan de onregelmatige roosterachtige zonwering die als een soort ringen driekwart rond de gevel zijn gedrapeerd moest veel werk worden verricht om enerzijds dicht bij het ontwerp van de architect te blijven, en anderzijds te behoeden voor de in de windtunnel voorspelde ernstige geluidhinder. De uiteindelijke oplossing in de vorm van voor dit doel ontworpen roosters uit plastic met afgerond profiel is dan vanuit de techniek bezien weer geen onbekende.



figuur 15 Zonwering Walterbos te Apeldoorn

Roosters
Tot slot kwam ook het ontstaansmechanisme van wervelafschudding aan roosters nog aan bod. Ook hier was de vaste overtuiging dat aanstroming onder een hoek de "beste" resultaten opleverde, zo niet zelfs noodzakelijk zou zijn. DGMR was als bouwfysisch adviseur betrokken bij het Strijkijzer vóórdat de problemen daar optraden; voor zover bekend is de kroon van dat gebouw nooit in de ontwerpfase nooit op het aspect windgeluid onderzocht.

2.9 Samenvatting

De beroepspraktijk kenmerkt zich door een sterke focus op het vinden van een werkende oplossing. Uitgebreid onderzoek naar de precieze achtergrond doet in dat kader vaak niet er zake, zeker niet wanneer opdrachtgevers er niet om vragen en dus ook niet bereid zijn ervoor betalen. Het opdoen van wetenschappelijk kennis is geen doel, slechts het bereiken van een voldoende niveau van zekerheid over het functioneren van de voorgestelde oplossing(en) volstaat. Slechts in uitzonderingsgevallen is er sprake van opdrachtgevers die van dit patroon afwijken, zoals de Rijksgebouwendienst.

Vaak spelen hierbij de financiële belangen van de opdrachtgever een grote rol: windgeluid is ook vanuit diens perspectief immers slecht hinderlijk en "bad for business". Wanneer voor een mogelijke oplossing te veel of te diepgaand onderzoek nodig is wordt het in dat kader al snel lonend het ontwerp zo aan te passen dat de kans op het optreden van problemen wordt omzeild, bijvoorbeeld door het in zijn geheel weglaten of verwijderen van de risicovolle constructiedelen.

Het analyseren van een potentieel probleem bij de verschillende bureaus berust voor een redelijk groot deel op ervaring en/of gevoel; zekerheid wordt vaak verkregen door het uitvoeren van testen, "on site" dan wel in laboratorium of windtunnel. Numerieke methoden zoals CFD worden meestal voor de (verre) toekomst wel als mogelijkheid gezien maar op dit moment nog niet of nauwelijks daadwerkelijk toegepast bij windgeluidproblematiek. Wel wordt er gepoogd gegevens die uit voor andere doeleinden (windcomfort-, windhinderonderzoek) gedane CFD-werk beschikbaar zijn ook nuttig te gebruiken voor werk op het gebied van windgeluid. Te denken valt daarbij bijvoorbeeld aan het opsporen van plaatselijk hoge windsnelheden, waar de informatie die uit CFD voortkomt uitgebreider is dan de puntmetingen die een meer traditionele test in de windtunnel oplevert.

3 Relevant wetenschappelijk onderzoek

Windgeluid is als onderzoeksgebied nauw verwant aan zowel vloeistofmechanica als akoestiek. Windgeluid heeft zijn basis in drukverschillen, die door het menselijk gehoor als geluid worden waargenomen, die ontstaan door turbulentie en wervelingen in de stroming rondom objecten; de voortplanting, versterking, enz., van die drukverschillen behoort vervolgens tot het domein van de akoestiek.

Strikt genomen zijn twee grondoorzaken voor het ontstaan van stromingsgeluid aan te merken [8]:

- Cavitatie
- Turbulentie

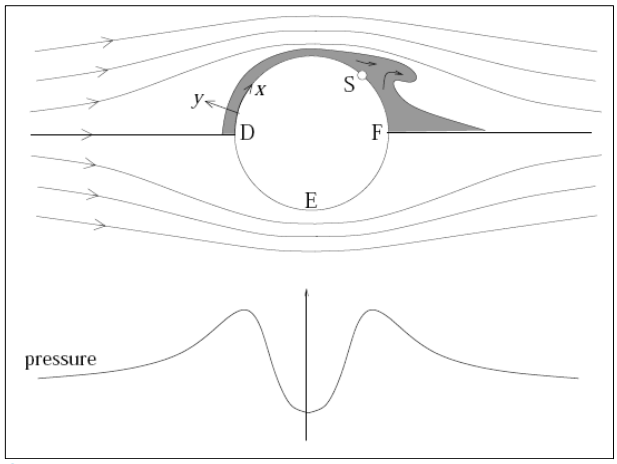
Cavitatie treedt op wanneer er in een vloeistof bellen ontstaan ten gevolge van een snelle stroming; het medium kan e.e.a. niet bijbenen waardoor er plaatselijk een druk ontstaat die lager is dan de dampdruk van de vloeistof. Het vervolgens weer ineenklappen van deze dampbellen (na door de stroming meegevoerd te zijn naar een gebied waar weer hogere/normale druk heerst) kan geluidproductie tot gevolg hebben. Voor windgeluid is deze oorzaak echter niet relevant, aangezien in het gasvorming medium lucht dit fenomeen nooit optreedt.

Daarmee resteert de turbulentie als oorzaak voor windgeluid.

3.1 Turbulentie

3.1.1 Grenslaag

In een zogenaamde ideale niet-viskeuze vloeistof zou gelden dat een vloeistofdeeltje, dat precies recht tegen de cilinder aan zou stromen vervolgens over het oppervlak van de cilinder naar de andere kant zou bewegen, om vervolgens rechtdoor zijn weg weer te vervolgen met precies de oorspronkelijke snelheid en voortbewegingsrichting. Potentiële energie wordt omgezet naar kinetische energie en weer terug zonder enig verlies.



figuur 16 Ontwikkeling van druk bij stroming rond een cylinder

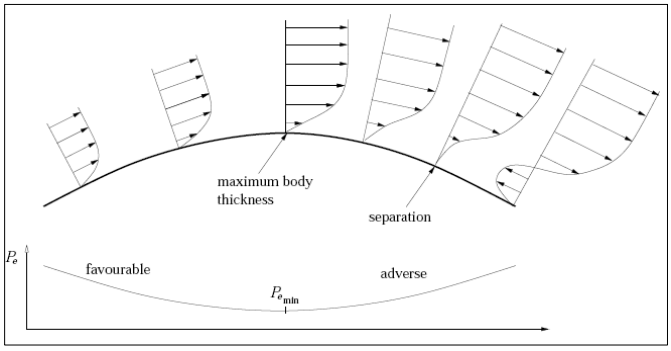
Dit is in de realiteit echter niet het geval omdat ieder medium, of het nou een vloeistof of een gas betreft, een

zekere viscositeit bezit. Als gevolg hiervan ontstaat er een dunne grenslaag langs de wand van het voorwerp waarin de stroomsnelheid in korte tijd toeneemt van nul naar een waarde van circa twee keer de uniforme beginsnelheid; eenmaal buiten deze grenslaag daalt de stroomsnelheid vervolgens weer tot op enige afstand van het voorwerp het gebied wordt bereikt waar de stroming (en dus ook de snelheid ervan) niet is beïnvloed door de aanwezigheid van het voorwerp.

Omdat de stroming versnelt om langs het voorwerp te geraken, en volgens de wet van Bernouilli op een stroomlijn geldt dat:

$$p = p_\infty + \frac{1}{2}\rho U^2 = p + \frac{1}{2}\rho u^2 \qquad (6)$$

moet ten gevolge van deze hogere snelheid de druk dalen. Na het passeren van het breedste punt van de cilinder moet deze navenant ook weer toenemen. Ter plaatste van die laatste situatie, bij het rechter deel van de cilinder, bestaat dus een drukgradiënt in de richting tegengesteld aan de stroming zelf. Het bestaan van deze grenslaag leidt tot energieverlies, omdat ten gevolge van de viscositeit er schuifspanningen optreden aan de oppervlakte van de cilinder. Tevens treedt hierdoor niet, zoals in een ideale vloeistof, volledig (druk)herstel op aan de achterzijde. Het totale verschil veroorzaakt door deze factoren komt tot uiting als een resultante kracht op het voorwerp in de stroming. De verhouding tussen de krachten t.g.v. de druk- en de schuifspanning komt tot uiting in het (dimensieloze) Reynoldsgetal:



figuur 17 Stroomsnelheid langs de oppervlakte van de cylinder in een visceus medium

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho U^2 / l}{\eta U / l^2} = \frac{\rho U l}{\eta} \sim \frac{\text{bijdrrage dynamische druk}}{\text{bijdrage schuifspanning}} \quad [-] \qquad (7)$$

waarin l de kenmerkende afmeting (diameter van de cilinder) is, U de snelheid van de (ongestoorde) stroming, ρ het soortelijk gewicht en η de kinematische viscositeit van het medium.

3.1.2 Loslaten van de grenslaag

Wervelingen bij stroming rond een object ontstaan door het loslaten van het stromingsprofiel van het object. Gezien de geringe dikte van de grenslaag kan de druk erin gelijk gesteld worden aan die er vlak buiten, zoals eerder beschreven. Daarmee zal ook in de grenslaag een drukgradiënt optreden tegen de stromingsrichting in. Als gevolg daarvan zal op enig punt langs de oppervlakte van dit deel van de cilinder ergens de situatie optreden dat de snelheid van teken wisselt, en geldt dat $\partial u / \partial y = 0$.

Op dat punt zal loslating van de stroming optreden en daarmee het begin van een wervel. Dergelijk wervels kunnen, wanneer ze alternerend en periodiek afgeschud worden zoals in het geval van de uit paragraaf 2.2.4 figuur 2 bekende wervelstraat van Von Karman, in lucht voor geluidproductie en zoals bekend zelfs een duidelijk toon zorgen. De frequentie van afschudding daarvan is voor die situatie gegeven via het kental van Strouhal:

$$St = \frac{f \bullet l}{U} \tag{8}$$

waarin *f* de frequentie is waarmee de vortexen loslaten, *l* de kenmerkende afmeting (voor een cirkelvormige doorsnede de diameter), en *U* de (ongestoorde) stroomsnelheid. Voor de waarden van het Reynoldsgetal waarbij de wervelstraat van Von Karman optreedt, is de waarde van het Strouhalgetal vrijwel constant met een waarde van circa 0.2.

Concluderend: om te kunnen voorspellen of er (tonaal) geluid ontstaat als gevolg van dit fenomeen, zal moeten worden bepaald of er (regelmatige) drukverschillen ontstaan als gevolg van wervelafschudding. Van invloed op wervelafschudding zijn:

- Mate van blootstelling aan wind en windsnelheid. Dit kan op basis van bestaande klimaat- en windgegevens, en desnoods op basis van niet-akoestisch windtunnelonderzoek goed worden ingeschat.
- Vorm. De al dan niet afgeronde of aerodynamische vorm heeft significante invloed op het moment waarop en de mate waarin wervels optreden. Dit kan grote invloed hebben op de stroming rond een object en vormt o.a. de basis van het verhelpen van de windgeluidproblematiek in het geval van Beetham Tower.
- Oriëntatie ten opzichte van de stroming. Hangt sterk samen met de factor "vorm".Ruwheid van de oppervlakte van het materiaal. Ruwere oppervlakten leiden eerder tot turbulentere stroming.
- Al dan niet regelmatige herhaling of patroon van het voorwerp. Denk aan de mazen van een rooster.
- Het al dan niet beschikken over een (eigen) klankkast of ander versterkend effect of resonantie, of interactie met andere vormen of constructiedelen met dit effect tot gevolg.

Het vooraf opsporen van problemen met windgeluid is complexer dan achteraf; veel gegevens, zoals het feit dát er geluidproductie optreedt alsmede de kenmerken van het geproduceerde geluid zijn in het laatste geval al bekend, hetgeen het zoeken naar de oorzaak en het verifiëren daarvan aanmerkelijk makkelijker maken. Toch is het goed voorstelbaar dat er mogelijkheden bestaan tot algemeen schatten en vaststellen van het risico op storend windgeluid bij standaard elementen. Zeker in het geval van roosters, die voor geluidproductie onder invloed van wind niet afhankelijk zijn van enige interactie met de rest van de constructie (zie het voorbeeld van het Expo-paviljoen) mag zelfs verrassend heten dat het juist deze elementen zijn die verhoudingsgewijs zeer vaak ten grondslag liggen aan de problematiek.

3.1.3 Standaardgeval: cilinder in stroming

Een klassiek experiment op het gebied van turbulentie is de stroming rondom een in water geplaatste cilinder. Nu de vorm en oriëntatie van het object bekend is, wordt het resulterende stromingspatroon bij en stroomafwaarts van de cilinder geheel bepaald door het Reynoldsgetal:

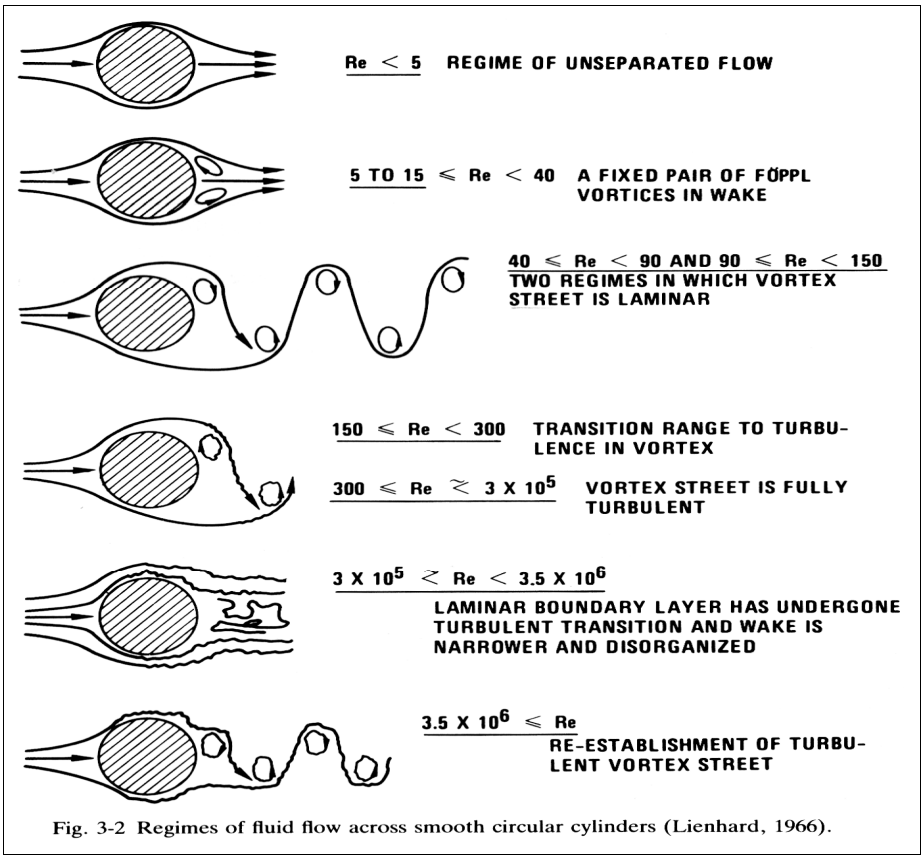


Fig. 3-2 Regimes of fluid flow across smooth circular cylinders (Lienhard, 1966).

figuur 18 Stromingsbeeld voor verschillende waarden van het Reynoldsgetal langs ronde cylinders (uit [1])

Bij *5 à 15 < Re < 40* bestaan een tweetal in tegengestelde richting draaiende vortexen volgens Föppl; het effect hiervan blijft beperkt tot het gebied direct stroomafwaarts van de cilinder, en ieder van de vortexen beperkt zich nog tot zijn eigen helft van de cilinder. Bij een verdere toename van het Reynoldsgetal (*40 < Re < circa 300*10^3*) oefenen de ontstane vortexen onderlinge invloed op elkaar uit, en ontstaat het stromingsbeeld dat bekend staat als de wervelstraat van Von Karman, eerst laminair, later (bij *Re > 300*) turbulent.

Hierop volgt bij *300*10^3 < Re < 3.5*10^6* een gebied met een redelijk chaotisch stromingsbeeld zonder duidelijke, regelmatige vortexen, om uiteindelijk voor waarde van *Re > 3.5*10^6* over te gaan in een volledig turbulente stroming waarin wederom vortexen worden gevormd. Resultaten vergelijkbaar met de bovenstaande resultaten gaan ook op voor andere niet-gestroomlijnde voorwerpen, en bij gelijke waarden van het Reynoldsgetal ook voor andere media zoals lucht. Stroming ten gevolge van wind in de

buitenlucht is (voor de afmetingen waarmee men te maken heeft bij windgeluid aan constructies) altijd turbulent.

Al in de jaren ’20 en ’30 van de vorige eeuw werden op deze wijze de ondergrens bepaald voor het optreden van periodieke loslating van wervels, en empirisch vastgesteld dat het geproduceerde geluidvermogen proportioneel was met de stroomsnelheid en de lengte van de cilinder volgens **[1, pag. 350]**, hetgeen suggereert dat over de hele lengte van de cilinder sprake is van eenzelfde type bron. De frequentie van het geproduceerde geluid volgt hierbij uit de relatie die door Strouhal was gevonden (8). Wanneer de frequentie van wervelafschudding echter (een mode van) de eigenfrequentie van de cilinder benadert, treedt er sterke koppeling op tussen deze twee en vindt de wervelafschudding plaats met de eigenfrequentie. Hierbij neemt de amplitude van de bewegingen van de cilinder, en de geluidsterkte van de geproduceerde toon toe.

3.1.4 Arrays van cilinders, invloed geluid op wervels

Wanneer er een of meerdere rijen cilinders naast en achter elkaar aan een stroming zijn blootgesteld, kan er ook akoestische resonantie optreden. Hiervan zijn in de literatuur een veelvoud aan gevallen bekend in onder andere rookgaskanalen, warmtewisselaars, en dergelijke meer. De waarden voor het Strouhalgetal zijn hierbij afhankelijk van de opstelling van de cilinders, zowel het aantal rijen, als de onderlinge afstanden en relatieve opstelling ten opzichte van elkaar. In de afgesloten luchtkanalen kan de wervelafschudding ook nog eens beïnvloed door het aanwezige geluid, wat voor een sterke terugkoppeling zorgt. Waar normaliter de frequentie van het geluid stijgt bij toenemende stroomsnelheid U, wordt dit patroon bij voldoende hard geluid (>= 140 dB) onderbroken en neemt de frequentie haast trapsgewijs toe bij stijgende U **[1, pag. 368-369]**. Aangezien het voor het optreden van een dergelijke terugkoppeling noodzakelijk is dat er staande golven kunnen ontstaan in een (rookgas)kanaal, en er bovendien sprake moet zijn van wel heel hoge geluiddrukken, zal dit probleem bij windgeïnduceerd geluid aan gebouwen in ieder geval op macro schaal geen rol spelen. Voor methodes voor het onderdrukken van dit type terugkoppeling, zie **[1, pag. 374]**.

3.2 Stroming over holten

Bekend voorbeeld van geluid door stroming over holten is uiteraard de Helmholtz-resonator (bekend van blazen over een flessenhals). Tonen kunnen ontstaan wanneer de onstabiele grenslaag van de stroming langs de opening van een holte komt en deze probeert te “overbruggen”. Wegens van nature aanwezige onregelmatigheden in de grenslaag lukt dit niet perfect, en ontstaat er een stroming de holte in en uit.

Er treedt er resonantie op wanneer deze voorkeursfrequentie van de instabiliteit samenvalt met de natuurlijke akoestische frequentie van de holte in kwestie.

Het verhinderen van tonaal windgeluid bij stroming langs holtes gaat uit van dezelfde basisprincipes als in andere situaties, namelijk het aanpassen of beïnvloeden van de stroming en/of de eigenschappen van de holte **[1]**:

- Afronding van de opening van de holte. Hierdoor wordt het mechanisme van de terugkoppeling verstoord of minder effectief en blijft resonantie uit;
- Geleiders aan de bovenstroomse kant om de stroming over de opening van de holte te tillen;
- Aanpassen van de opening door in plaats van één grotere, meerdere kleine gaten te hebben; of het geheel afdichten van de holte;
- Geometrie van de holte aanpassen om zo de akoestische eigenschappen ervan te beïnvloeden en het ontstaan van resonantie te voorkomen."

3.3 Stroming langs platen

Hoewel in veel onderzoeken de focus lag op het overbekende geval van de ronde cilinder en bijbehorende stromingsbeeld, is ook aan andere objecten werk verricht. Onderzoeken aan platen in een stroming komen voor wat betreft vorm van het obstakel in de buurt van roosters, die immers bestaan uit een grote hoeveelheid dezelfde strips in een regelmatig patroon. Dergelijke strips kennen eenzelfde vorm en een verhouding tussen lengte en dikte van dezelfde orde (10:1, 20:1) als veel onderzochte platen. In dit opzicht is er dus feitelijk geen verschil tussen platen en strips, afgezien van de gewoonte de laatste vooral voor kleinschaliger elementen te gebruiken dan de eerste.

In onderzoek naar stroming langs platen in een gesloten leiding werd resonantie gevonden, waarbij in deze volledig omsloten situatie zeer hoge geluidsniveaus ontstonden (tot 160 dB) zonder dat er sprake was van trilling van de platen zelf. Daarmee was e.e.a. volledig toe te schrijven aan resonantie-effecten wanneer de frequentie van de wervelafschudding in de buurt kwam van een frequentie die bij een staande golf in de leiding (dwars op de stromingsrichting) hoorde. Deze "lock-in" hield stand over een duidelijk gebied van stroomsnelheden, totdat de frequenties te ver uit elkaar kwamen te liggen en deze koppeling abrupt weer verbroken werd, waarbij het resulterende geluidsniveau dan ook flink afnam **[18]**. Dergelijke resultaten, met sterke terugkoppeling via akoestische drukgolven, werden later ook door anderen gevonden door in een "open" situatie te werken onder toevoeging van geluid uit luidsprekers, waarbij men als voordeel had ook nog de kenmerken (toonhoogte, sterkte) van het toegevoerde geluid te kunnen controleren.

In **[18]** werd voorts aandacht besteed aan de invloed van de verhouding tussen de lengte (in de stroomrichting) en de dikte van de plaat, een ratio die doorgaans als chord/thickness (c/t) wordt aangeduid, op de waarde van het Strouhalgetal. Dit verloop kent een aantal opvallende pieken en dalen die samenhangen met de wijze waarop wervelingen ontstaan en zich voorplanten bij aanstroming van een plaat evenwijdig aan de stromingsrichting.

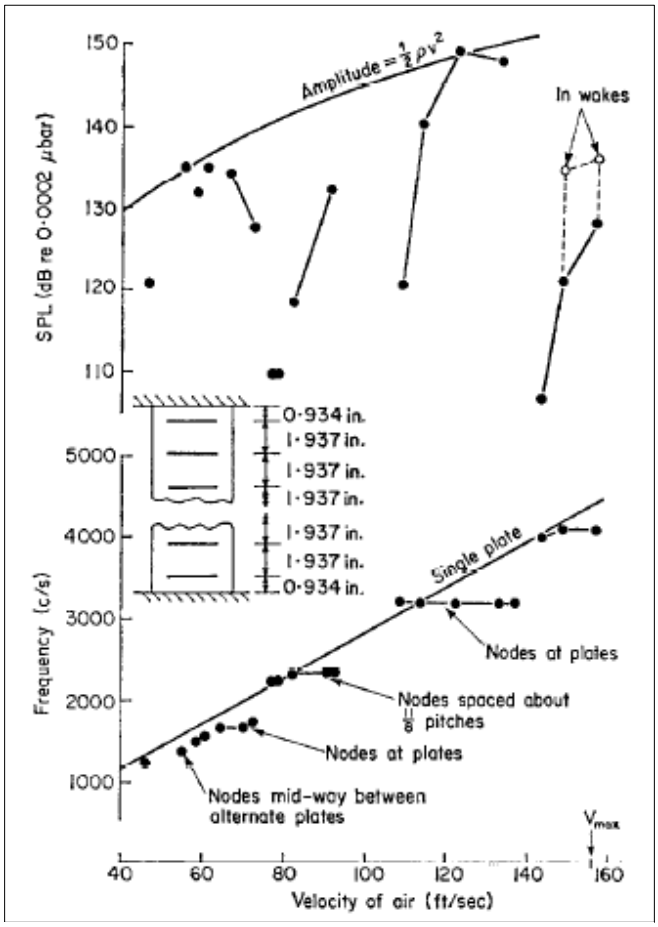
In de open lucht ontbreken mechanismen van resonante terugkoppeling via geluid uiteraard, bij gebrek aan een harde wand om de drukgolven te weerkaatsen. Wel blijft extern toegevoegd geluid wel degelijk invloed hebben. Ook blijken relaties tussen c/t en het Strouhalgetal overeind te blijven **[19]**. In dit onderzoek is er weliswaar geen sprake van een dergelijke externe bron van geluid,

In geval van platen met een rechthoekige vorm aan de voorzijde, treden dan een aantal stromingspatronen op, afhankelijk van:

- Voor "korte" platen (c/t < 3.2 voor laminaire stroming, < ~2 voor turbulente stroming **[10]**): de stroming laat direct aan de voorzijde van de plaat los, waarna er achter de plaat directe interactie optreedt tussen de aldus ontstane wervels. Een dergelijk regime staat bekend als "Leading Edge Vortex Shedding" (LEVS). Door de korte lengte van de plaat komen de wervels niet opnieuw aan te liggen tegen de plaat. De vorm van het einde van de plaat (rond, rechthoekig, of anderszins) heeft dan ook geen invloed, het beeld wordt volledig bepaald door de interactie tussen de stroming en de voorzijde van de plaat.
- Voor iets langere platen (3.2 < c/t < 7.6) vindt er periodiek "reattachment" plaats, waarbij de wervels tijdelijk weer langs de plaat aan komen te liggen alvorens weer los te laten. Door het regelmatig optreden van dit fenomeen worden er evenzeer regelmatig nieuwe vortices gecreëerd stroomafwaarts van de plaat en vormt zich een duidelijke "vortex street".
- Voor nog slankere platen (7.6 < c/t 16) komt de stroming altijd weer aan te liggen voordat het einde van de plaat wordt bereikt. De exacte plaats (langs de lengte van de plaat) waar dit gebeurt varieert, zonder dat hierbij een zich regelmatig herhalend patroon bestaat. Uit deze "separation bubble" van variabele omvang ontstaan op willekeurige wijze concentraties van vorticiteit die zich vervolgens voortbewegen richting het einde van de plaat. Dientgevolge is er stroomafwaarts van het einde van de plaat dan ook geen sprake van een regelmatige vortex street.
- Voor platen waarbij c/t > 16 is het beeld vergelijkbaar met dat voor de vorige categorie, maar gaan de uit de separation bubble voortgekomen vortices verloren voordat het einde van de plaat bereikt wordt. Hierdoor is in feite de situatie bereikt dat de kenmerkende vorm van de voorzijde van de plaat geen directe invloed meer uitoefent op het stromingsbeeld stroomafwaarts van het einde van de plaat. Dat wil uiteraard niet zeggen dat er geen wervelvorming meer mogelijk is, doch slechts dat langs het laatste deel alsmede stroomafwaarts van een dergelijk plaat een volledig ontwikkeld stromingsbeeld bestaat als ware de vorm en afmeting van de kopse kant van de plaat dusdanig dat de stroming er geen of verwaarloosbare invloed van zou ondervinden. Het bijbehorende regime is dan ook dat van "Trailing-Edge Vortex Shedding" (TEVS), waar de specifieke kenmerken van de grenslaag langs het object een belangrijke rol spelen bij het ontstaan van wervelingen en de frequentie waarmee dat gebeurt **[10]**.

3.3.1 Parker

Uit werk van Parker e.a. [11, 12] blijkt dat bij een opstelling van een rij dunne platen er een serie aan resonanties wordt opgewekt die hun oorsprong vinden in wervelafschudding aan de stroomafwaartse zijde van de plaat. In tegenstelling tot de tot dat moment gebruikelijke aanname dat dergelijke loslating van wervels plaats vond door resonantie op of in de buurt van de eigenfrequentie van de constructie, onderzocht Parker de mogelijkheid dat het hier een puur akoestisch fenomeen betrof.



figuur 19 Resultaten van Parker bij metingen aan parallelle platen. In het onderste deel van de figuur zijn tonen zichtbaar die gedurende een zekere snelheidsband (horizontale as) dezelfde frequentie (verticaal) behouden; in het bovenste deel zijn de bijbehorende geluidniveaus te zien. Zie ook figuur 20.

Daartoe werd een aantal platen op gelijke afstanden van elkaar in een windtunnel opgesteld, en vervolgens liet men de windsnelheid langzaam toenemen. Steeds wanneer er resonantie gehoord en/of gemeten werd, werd de stroomsnelheid even constant gehouden om metingen te verrichten, met een in twee richtingen in het vlak loodrecht op de windtunnel beweegbare microfoon, gemonteerd op korte afstand van de achterzijde van de rij platen. Op deze wijze werden voor iedere resonantie een duidelijk golfpatroon met knopen en buiken gevonden: een specifieke "Parker-mode", die ook in metingen aan roosters door Spruyt ([25], figuur 20) werden gevonden.

Na iedere meting liet men de snelheid weer verder stijgen totdat er weer resonantie werd gevonden, steeds op een hogere frequentie dan de vorige. Hierbij werden drie mogelijkheden gevonden, zie figuur 19:

- De resonantie verdween, om bij een hogere windsnelheid op een andere, hogere frequentie weer te verschijnen; of
- Er vond een abrupte verandering plaats naar resonantie met een andere frequentie (wat altijd samen bleek te gaan met een switch naar een andere mode); óf
- De resonantie bleef (over enige bandbreedte van de snelheid) bestaan met dezelfde frequentie, dit ondanks toenemende windsnelheid.

Deze testopzet werd herhaald met platen van verschillende afmetingen en materialen (messing en lichtmetaal, lengte 1 of 3 inch bij een dikte van 1/16 of 3/32 inch; gekozen met het oog op een verschillende ratio E/ρ en duidelijk andere eigenfrequenties), en bij verschillende onderlinge afstanden. De frequentie van de verschillende tonen bleek vooral afhankelijk van de lengte van de platen en hun onderlinge afstand; de materiaalkeuze had geen invloed. Voor een gegeven opstelling leidt dit bij bepaalde stroomsnelheden tot het in fase afschudden van de wervels en daarmee tot resonantie. In verder werk van Parker **[13]** wordt getracht de experimentele resultaten voor de vier minst gecompliceerde modes (*0,1*; *1,1*; *0,2*; en *2,0* – daar aangeduid als α, β, γ en δ) rekenkundig te verklaren.

Ieder van deze vier modes blijkt een kritieke waarde van de ratio tussen lengte en dikte van de plaat te hebben, waar beneden deze niet kan bestaan.

Hoewel bij veel modes de knopen in het verlengde liggen van de platen/roostergrid, vond Spruyt ook modes waarbij dit niet het geval was en de knoopvlakken zelfs onder 45° geroteerd waren ten opzichte van de mazen van het rooster, zoals figuur 20 duidelijk maakt.

3.3.2 Aanstroming onder een hoek

In verschillende onderzoeken, o.a. **[23]** zijn opstellingen beproefd waarbij platen behalve in de stromingsrichting ook onder een hoek (<90 graden) worden aangestroomd, waarbij de optredende wervel, de manier van ontstaan en afschudding daarvan, alsmede de benedenstroomse ontwikkeling van de aldus ontstane vortices worden beschreven.

Effect op het Strouhalgetal
Knisely **[22]** vergelijkt resultaten behaald door verschillende onderzoekers bij het bepalen van het Strouhalgetal van platen en (rechthoekige) cilinders, en voegt daar zijn eigen resultaten aan toe. Hierbij blijken de gevonden waarden uit zowel vloeistof- als windtunnelonderzoek grotendeels in overeenstemming met waarden die uit de literatuur bekend waren, waarbij verschillen doorgaans aan verschillende waarden voor de turbulentie kunnen worden toegeschreven.

Bij het beproeven van een aantal rechthoekige proefstukken met ratio's tussen lengte en breedte van 1:1 tot 1:25 blijkt met uitzondering van de smalste plaat (1:25) in alle gevallen het Strouhalgetal een sterke hoekafhankelijkheid te kennen. De waardes kennen een snelle stijging onder geringe hoeken (10-15°). Knisely schrijft dat toe aan "reattachment of the separated shear layer". Wanneer dat precies plaatsvindt is afhankelijk van de verhouding tussen lengte en breedte (= c/t). Hierna blijft de waarde vrij stabiel, rond 0.18-0.20. Bij de smalste plaat in het onderzoek van Knisely is daarentegen sprake van een vrijwel volledig hoekonafhankelijkheid van Strouhal bij hoeken <= 70°; daarentegen treedt bij het naderen van de 90° juist een sterke daling op. Dat laatste wordt in dat onderzoek toegeschreven aan "shear layer-corner interaction".

Voorts wordt geconcludeerd dat het afronden van het aangestroomde object in het algemeen leidt tot een significant verhoging van de waarden van het Strouhalgetal. Dit effect sterker is naarmate de afrondingsstraal groter is.

3.4 Roosters

Van alle constructiedelen blijken roosters opvallend vaak een rol te spelen in situaties waar windgeluid voor overlast zorgt. Hiervoor kunnen een aantal oorzaken worden aangewezen:

- Roosters worden geregeld op grote hoogte op daken en aan de buitenzijde van gevels bevestigd, waar lokaal hoge windsnelheden optreden.
- Het regelmatige patroon vormt in geval van windgeluid een groot aantal bronnen. Bij veel projecten is de totale oppervlakte aan roosters groot: vele tientallen of zelfs honderden m^2.
- Tussen de wervelafschudding aan naastgelegen bronnen bestaat onderlinge beïnvloeding.
- Het resoneren van de luchtvolumes in de mazen kan als versterker werken.

In principe kan een oplossing gezocht te worden in het voorkomen van het ontstaan van regelmatige wervelafschudding. Hiervoor bestaan een aantal mogelijkheden:

- Elimineren van de stroming zelf (door het dichtmaken van de mazen of het afdekken van het rooster).
- Verstoren van de stroming vóór het bereiken van het rooster; in geval van een onregelmatige aanstroming zullen de optredende effecten ook niet veel regelmaat meer vertonen, waarmee tonaal geluid wordt voorkomen. Voorbeeld hiervan is de oplossing bij het Expo-Paviljoen in Hoek van Holland.
- Aanpassen van de afmetingen, geometrie, of de oppervlakte-eigenschappen van het rooster. Dit varieert van het aanbrengen van een dikke verflaag (coating) waardoor er geen hoekige randen meer aanwezig zijn tot het aanpassen van het ontwerp van het rooster door bijvoorbeeld alle kopse kanten van de platen af te ronden of juist extreem te stroomlijnen.

Helaas bestaat er geen kant-en-klare rekenmethode om zeker te zijn dat oplossingen waarbij de stroming niet volledig onderbroken wordt ook daadwerkelijk windgeluid zullen voorkomen. Hierdoor blijft het uitvoerig testen van voorgestelde oplossingen in de windtunnel (of de praktijk!) vaak noodzakelijk. Ook veelgebruikte roosters (en zelfs "echte" gevelelementen!) worden niet door leveranciers getest op hun gevoeligheid voor windgeluid of daarvoor gecertificeerd geleverd.

De roosters in kwestie zijn opgebouwd uit strips plaatmateriaal die haaks aan elkaar bevestigd zijn en zo een regelmatig roosterpatroon met rechthoekige mazen vormen. Zowel bij stroming langs het vlak van het rooster, als bij stroming door de mazen kan er sprake zijn van (hinderlijk, tonaal) windgeluid. Een voorbeeld van de eerste is de situatie

in een woonwijk in Leiden, waarbij het geluid uiteindelijk afkomstig bleek van een uit roosters opgebouwd hekwerk langs een dakrand zoals beschreven in **[9]** (waarbij de metingen helaas zijn uitgevoerd in 1/3 octaafband).

In de meeste praktijkgevallen is er echter sprake van wind die stroming door het rooster tot gevolg heeft, waarbij de windrichting dus (min of meer) haaks staat op het vlak van het rooster.

In dit soort gevallen lijkt het in eerste instantie zinvol het rooster op te vatten als een driedimensionale variant op de (doorgaans in 2D beschouwde) situatie van een plaat of rij platen in een stroming, evenwijdig aan de stromingsrichting. Aan dergelijke opstellingen is e.e.a. aan onderzoek verricht, zowel gericht op geluid, waaronder diegene zoals die van Parker **[11, 12]** zelf waar één of meerdere platen evenwijdig aan de stroomrichting in een kanaal wordt opgesteld, maar ook op trillingen in de aangestroomde constructies, bijvoorbeeld door Naudascher en Wang **[10]**. Bij dat onderzoek, aan platen en rasters in een vloeistofstroming, worden onder andere de mechanismen waardoor wervels ontstaan geanalyseerd, wanneer deze optreden, de afhankelijkheid van de aanstroomhoek en welke de meeste schade veroorzaken. Helaas is daarmee nog niet zomaar gezegd dat dit ook zomaar overeenkomt met de stroming die het meest storende geluid voortbrengt.

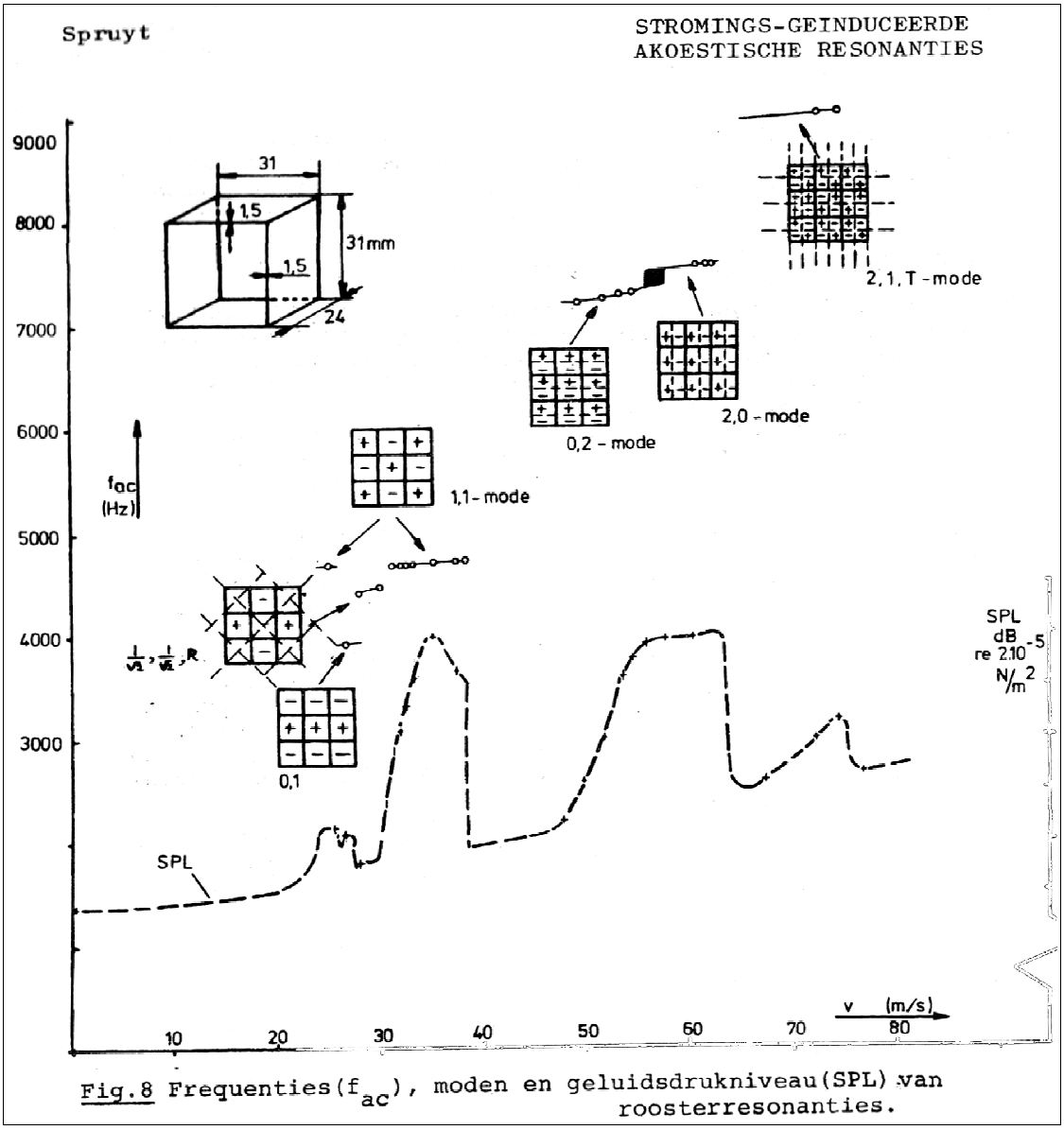
3.4.1 Spruyt

Spruyt **[25]** stelt over geluid bij stroming (loodrecht) door roosters, mede naar aanleiding van onderzoeken door Parker **[11, 12]**: *Het geluid is afkomstig van een akoestische resonantie in en direct stroomop- en -afwaarts van de mazen en wordt veroorzaakt door periodieke wervelvorming aan de platen. Daarbij zijn in elke maas apart diverse modi mogelijk en voorts geeft de roostervorm aanleiding tot een reeks modi waarbij naburige mazen onderling een bepaald faseverband bezitten. Elke mode treedt op over een bepaald snelheidsgebied.*

Bij metingen door Spruyt (zie figuur 20) aan stroming langs pijpen in rookgaskanalen bleek dat de meeste resonanties loodrecht op zowel de rij pijpen als de stromingsrichting stonden, waarbij de afstand tussen de pijpen onderling gelijk stond aan meervouden van een halve golflengte ($n \bullet (\lambda/2)$). Resonanties zijn in alle drie de hoofdrichtingen mogelijk, zeker bij schuine aanstroming; ook kunnen er combinaties van resonanties optreden.

In het geval van roosters worden de waargenomen tonen door Spruyt opgevat als driedimensionale manifestatie van het (2D) verschijnsel van periodieke wervelvorming aan platen. In de roostermazen kunnen verschillende moden (figuur 20) bestaan. Tussen de moden werden faseverbanden vastgesteld door een verplaatsbare microfoon direct achter de roostermazen te bewegen, en het signaal daarvan te vergelijken met dat van een vaste referentiemicrofoon. Deze faseverbanden liggen allen in het vlak van het rooster. In het werk van Parker aan platen zijn echter ook in de stromingsrichting dergelijke effecten gevonden, zodat niet is uit te sluiten dat iets vergelijkbaars ook bij een rooster zou kunnen optreden. Iedere mode wordt door Spruyt aangeduid met indices die het aantal halve golven ($\lambda/2$) per maas in de twee plaatrichtingen aangeven; “R” of “T” geven

daarbij aan dat de mode is geroteerd dan wel getransleerd t.o.v. het roostervlak. Het in 2.8.3 aangehaalde mechanisme lijkt hier sterk op.



figuur 20 Parker-modes gevonden door Spruyt bij metingen aan roosters. De modes worden aangeduid met indices die het aantal halve golven ($\lambda/2$) per maas in de twee plaatrichtingen aangeven; "R" of "T" geven hierbij aan dat de mode is geroteerd dan wel getransleerd t.o.v. het roostervlak.

3.4.2 Efficiënte bron

Doordat iedere bron in een rooster in (tegen)fase kan oscilleren met zijn buren, kan het geheel gezamenlijk een zeer groot akoestisch vermogen produceren, beduidend meer dan op basis van vergelijking met een muziekinstrument voor een individuele maas verwacht

zou worden [27]. Hoe meer mazen in fase, en hoe hoger de orde van de mode, des te lager de verliezen en des te harder de resulterende toon.

Voor verhoudingsgewijs dikke en korte platen worden andere vormen van loslating van wervels gevonden (samengevat door Naudascher en Wang [10]), onder andere aan de "leading edge", de stroomopwaartse kopse kant van de platen. De verhouding tussen lengte en dikte van het plaatmateriaal in veelgebruikte roosters is echter dusdanig dat deze niet relevant zijn.

Recenter onderzoek (o.a. [23]) laten zien dat het Strouhalgetal voor stroming langs een plaat stapsgewijs stijgt wanneer de verhouding tussen de lengte (parallel aan de stroming) en de dikte van de plaat toeneemt van 3 ~ 16. Tan, Thompson en Hourigan [24] pogen de overdracht van energie van de stroming naar de akoestiek te modelleren, en behalen daarmee resultaten die goed overeenkomen met hetgeen eerder experimenteel is onderzocht [19].

Uiteindelijk is stroming door roosters echter een driedimensionaal system; uit de praktijkervaringen zoals die tijdens de interviews naar voren kwamen blijkt bovendien een duidelijk vermoeden dat aanstroming onder een zekere hoek het snelst tot windgeluid leidt, niet noodzakelijkerwijs de situatie waarbij de windrichting precies loodrecht op het rooster staat. Over de precieze achtergronden en mechanisme die in deze situatie aan het werk zijn bestaat geen duidelijkheid; suggesties variëren van drukopbouw binnen de mazen van het rooster, tot afschudding in fase aan de achterzijde, en combinaties daarvan.

3.5 Computational Fluid Dynamics

3.5.1 Inleiding

Op basis van de resultaten van de gesprekken met vertegenwoordigers van de beroepspraktijk, lijken twee zaken meer aandacht te behoeven. Een daarvan is een verkenning van de mogelijkheden en stand van zaken op het gebied van CFD. Onder dit begrip valt een groot aantal modellen en benaderingen om via numerieke simulaties stromingen en interactie tussen stromingen en objecten te berekenen. De nauwkeurigheid van de resultaten van dergelijke berekeningen wordt behalve door beperkingen aan de hoeveelheid beschikbare rekenkracht ook bepaald door de gebruikte wiskundige modellering, de daarin meegenomen factoren, gekozen resoluties, afbakening, en gedane aannames.

3.5.2 Ontwikkeling

In eerste instantie werd de basis gevormd van de modelleringen door het toepassen van de wet van behoud van energie, impuls, en massa op een stroming; later volgde de

uitbreiding naar Navier-Stokes-vergelijkingen waarin ook zaken als viscositeit en samendrukbaarheid kunnen worden meegenomen.

De continu stroming wordt in alle gevallen discreet gemaakt door deze op te delen in een groot aantal cellen, waarvan de vorm en afmetingen sterk kunnen verschillen, zelfs binnen hetzelfde model. Voor een voldoende betrouwbaarheid van de uitkomsten is het noodzakelijk dat de op deze wijze gekozen resolutie hoog genoeg is, zowel in ruimte als in tijd. Bij te grove resolutie gaan essentiële kenmerken en details van de stroming verloren, terwijl bij een nauwkeuriger, kleinere mesh een sterke toename van de benodigde rekenkracht optreedt.

3.5.3 Direct numerical simulation

In theorie is het mogelijk voor een stroming en de akoestische eigenschappen ervan een directe numerieke oplossing te vinden, zonder de turbulentie apart te modelleren, door middel van Direct numerical simulation (DNS). Door de grote verschillen in de schaal tussen de fenomenen die optreden in de stroming vergt deze aanpak een zeer fijne mesh en daarmee onpraktisch veel rekenwerk. Enerzijds zijn daar de zogenaamde Kolmogorov microscales die de kleinste schalen in turbulente stroming definiëren (als functie van energiedissipatie en kinematische viscositeit), anderzijds de schaal (golflengtes) van de akoestische eigenschappen waarop de grootste effecten in de stroming plaatsvinden.

3.5.4 RANS en LES modellen

Een aantal verschillende methodes zijn ontwikkeld om te proberen een acceptabel resultaat te verkrijgen en de benodigde hoeveelheid rekenwerk binnen de perken te houden. De belangrijkste zijn:

- Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS).
- Large Eddy Simulation (LES)

Beide worden voornamelijk gebruikt voor turbulente stromingen, maar verschillen in de gebruikte methodiek. Zoals de naam als zegt, wordt bij RANS gebruik gemaakt van tijdgemiddelden: variabelen zoals de stroomsnelheid worden op basis van kennis over het stromingsbeeld opgedeeld in een gemiddeld en variabel deel ("Reynolds stress tensor"). Het op deze wijze incalculeren van de turbulente eigenschappen van de stroming vereenvoudigt de wiskundige beschrijving van het probleem, en daarmee de benodigde rekencapaciteit. Wel gaat dit ten koste van details, lokale verschijnselen kunnen door de toegepaste middeling niet inzichtelijk zijn in de verkregen resultaten.
In geval van LES, dat voorkomt uit pogingen weersvoorspellingen te berekenen, wordt er onderscheid gemaakt tussen de schaal van wervels in de stroming. Grote wervels worden gezien als bepaald door "het grote geheel van de stroming", kleinere (d.w.z. schaal kleiner dan de gekozen mesh) daarentegen als een generiek verschijnsel dat kan worden beschreven door het te modelleren als een "wervelviscositeit" die vervolgens effect heeft op de wervels op grotere schaal. LES zit voor wat betreft de benodigde rekenkracht

tussen DNS en RANS in, maar heeft als voordeel ten opzichte van die laatste dat turbulente onregelmatigheden en details beter kunnen worden gemodelleerd.

In de praktijk worden verschillende methoden wel gecombineerd in "hybride" modellen. Zo is LES voor het berekenen van grenslaagstroming langs wanden nog niet haalbaar met de huidige hardware, en wordt daarvoor plaatselijk gebruik gemaakt van bijvoorbeeld op RANS gebaseerde methoden.

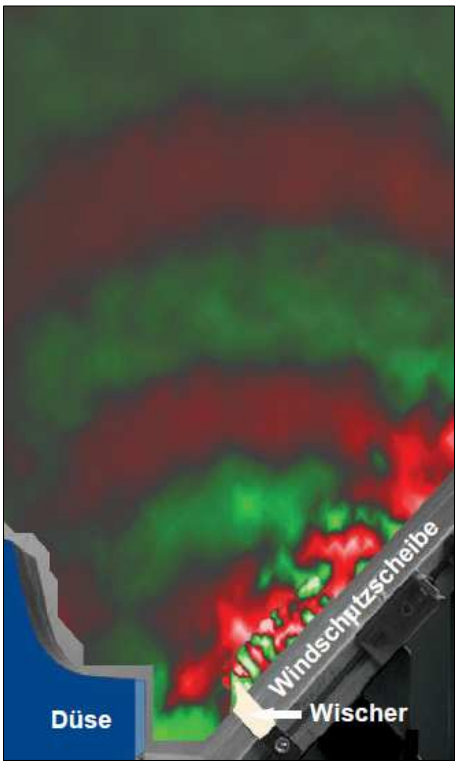
3.5.5 Computational Aero Acoustics

Wanneer de objecten waarlangs de stroming plaatsvindt bij lage Mach getallen, en er geen of weinig interactie tussen optreedt, is het bij Computational Aero Acoustics (CAA) praktisch en gebruikelijk om waar mogelijk stroming en akoestische effecten te scheiden [14], door eerst de stroming te berekenen met bovengenoemde methoden op basis van de Navier-Stokes vergelijkingen en vervolgens uit de resultaten hiervan de akoestische effecten af te leiden op basis van (Linearized) Perturbed Compressible Equations (LPCE). In recent werk van Seo en Moon [15] wordt met deze methode een aantal simulaties uitgevoerd, en de resultaten vergeleken met hetgeen bij aanpak via DNS werd gevonden.

Gecompliceerder wordt het wanneer ook de wisselwerking door de interactie tussen stroming en objecten wordt beschouwd, waardoor niet langer zoals bij CAA slechts de stroming als uitgangspunt voor akoestische berekeningen kan worden genomen. Onderzoek op dit gebied is wel al gaande, bijvoorbeeld door Bunge [16] waarin gepoogd wordt genoemde wisselwerking uit te werken in CFD.

3.5.6 Validatie

Om de resultaten te valideren worden deze vaak vergeleken met testresultaten uit fysieke experimenten, zoals in de windtunnel. Drukgolven (en dus geluid) kunnen middels laserinterferometrie direct worden gemeten en zichtbaar gemaakt (Bosch Research [17], zie figuur 21) om een snelle en effectieve vergelijking mogelijk te maken. Deze techniek kan ook bij onderzoek naar windgeluid een rol spelen, zo is de bron van het geluid bijvoorbeeld makkelijk inzichtelijk te maken.



figuur 21 Windtunnelonderzoek door Bosch aan een ruitenwisser; rood en groen geven drukgolven aan, gemeten met laserinterferometrie (ontleend aan [19])

Dat kan ook noodzakelijk zijn om jegens toezichthouders en vergunningverleners de juistheid van de door middel van simulaties behaalde resultaten aan te tonen. Ondanks recente

verbeteringen in normen en regelgeving, kan de acceptatie van CFD-onderzoek door verschillende (lokale) overheden nog steeds sterk verschillen.

3.5.7 Ontwikkelingen

Op het terrein van CAA wordt veel onderzoek verricht en ook de beschikbare rekenkracht wordt almaar groter. Hierdoor ligt het in de lijn der verwachting dat de mogelijkheden en het gebruik van deze techniek zullen toenemen. Toch zal het nog de nodige tijd duren voordat e.e.a. in de beroepspraktijk gemeengoed zal zijn. Voor zover men zich al aan schattingen hierover waagt, gaat het doorgaans om vele decennia.

4 Meetplan

4.1 Inleiding

Uit de literatuur zijn de nodige pogingen bekend waarin de kenmerken van stroming rond objecten en bijbehorende vortexgeneratie worden onderzocht. Daartoe behoren ook voor zogenaamde "trashracks", bedoeld om te voorkomen rotzooi in kanalen en leidingen terecht komt, die voor wat betreft afmeting en vorm de nodige gelijkenis vertonen met roosters. Bij deze onderzoeken komt ook aanstroming onder een hoek enkele malen aan bod. Vaak zijn dergelijke trashrack met veel minder dwarsverbindingen uitgevoerd dan een typisch rooster, waardoor de stijfheid van een dergelijke constructie in het vlak loodrecht op de stromingsrichting veel kleiner is, met een veel groter risico op potentieel vernietigende trillingen als gevolg; de focus ligt logischerwijs ook op het voorkomen van schade door resonantie.
Bij windgeluid ten gevolge van wind door roosters is schade aan de constructiedelen zelf niet bekend uit de praktijk; de problematiek ligt hier op het vlak van de akoestiek.

In de huidige situatie zijn er weinig meetgegevens bekend van roosters, en betreft het steeds een bestaand probleem van windgeluid aan één specifiek rooster. De focus ligt steevast op het (z.s.m.) beëindigen aan de overlast van dat specifieke geval, niet op het zoeken naar een overkoepelende oplossing.

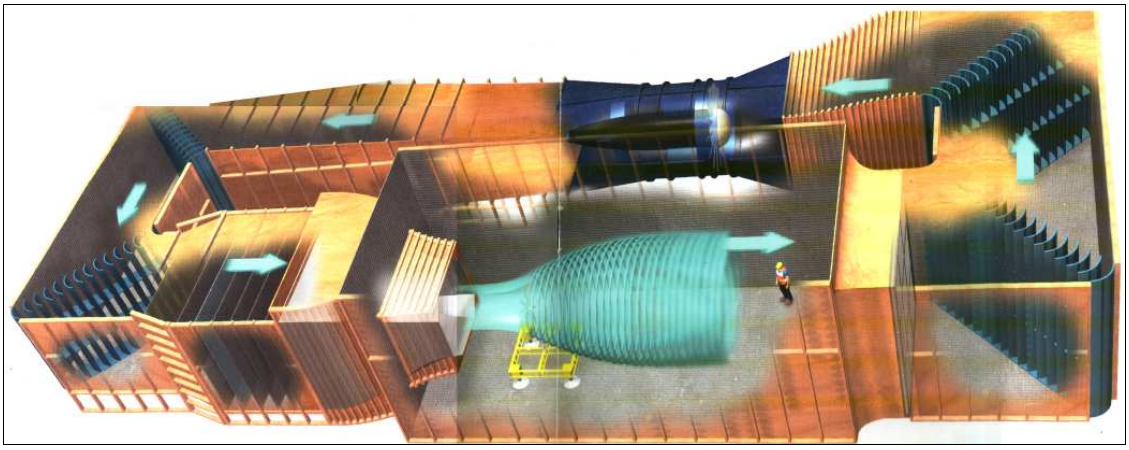
Zoals gezegd ligt de problematiek hier op het vlak van de akoestiek. Dat geldt dus ook voor de gewenste resultaten van dit windtunnelonderzoek:

- Inzicht of, en zo ja, in welke mate, bij welke windsnelheden en onder welke hoeken een rooster tonaal geluid voortbrengt onder invloed van wind;
- Inzicht in de invloed van het type afwerking;

Op basis van die resultaten kan dan een vergelijking met uit de literatuur bekende patronen van vortex- en wervelvorming worden gemaakt op basis van onder andere de maasgrootte en de (verhouding van) de afmetingen van de strips waaruit het rooster is opgebouwd.

4.2 Windtunnel (Open Jet Facility)

Uit de praktijk bekende probleemgevallen van windgeluid bij roosters treden veelal op bij windsnelheden vanaf 7 à 8 Bft. Gelet daarop, alsmede op de in ons klimaat met enige regelmaat voorkomende windsnelheden, zal de te gebruiken windtunnel ten minste snelheden tot circa 30 m/s (~11 Bft) moeten kunnen genereren. Gezien deze eisen is de Open Jet Facility (OJF) bij de TUDelft (zie figuur 22) een geschikte faciliteit.



figuur 22 Overzicht van de Open Jet Facility (OJF)

Deze nieuwe windtunnel (bouwstart: november 2006) haalt snelheden tot 30 m/s, en biedt met een uitstroomopening van 2.85x2.85 meter plaats aan behoorlijk grote proefstukken zodat er op ware grootte gewerkt kan worden. Dientgevolge zullen de te vinden geluidssterktes en frequenties ook niet aan de effecten van het werken op schaal onderworpen zijn, en kunnen er geen verschillen optreden door andere oppervlakte-eigenschappen of afwerkingniveau.

De basis van de OJF wordt gevormd door een grote ventilator, aangedreven door een elektromotor van 500 kilowatt waarmee een maximale snelheid in de testsectie van zo'n 120 kilometer/uur kan worden behaald. Na de ventilator wordt de lucht via een lange diffuser en twee rijen hoekschoepen 180 graden gedraaid.

Door middel van een korte diffuser, waarin een gaas de loslating van de stroming langs de wanden moet voorkomen, wordt de doorsnede verder verwijd en belandt de lucht in de 'suskamer'. In de suskamer is een vijftal zeer fijnmazige gazen opgenomen, die ervoor zorgen dat de turbulentie en de snelheidsafwijkingen in de stroming worden verminderd: lucht met hoge snelheid wordt door de gazen meer afgeremd dan lucht met een lagere snelheid. Via een contractie wordt de lucht met een egale straal de testsectie in geblazen. Aan het eind van de testsectie wordt de lucht gekoeld door een enorme koelradiator en vervolgens weer teruggeleid naar de ventilator.

De tunnel wordt bediend vanuit de naast de testruimte gelegen controlekamer. Het toerental van de ventilator kan op de aanwezige computersystemen worden ingevoerd; tevens is hier een aantal meetwaarden aangaande temperatuur, druk en windsnelheid beschikbaar.

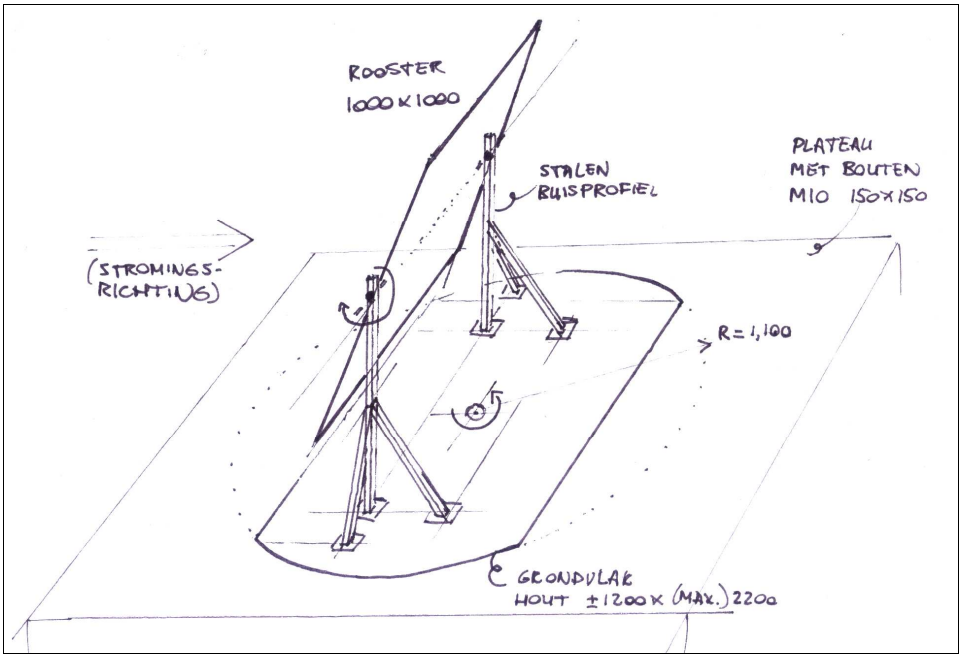
Proefstukken worden geplaatst op een platform (max 3t.) dat zich in de testruimte bevindt en hydraulisch omhoog en omlaag kan worden gebracht. De uitstroomopening bevindt zich circa 1.5 m boven de vloer van de ruimte, die in totaal circa 8 meter hoog is.

4.3 Montage proefstukken

Proefstukken dienen bij voorkeur niet te klein te zijn, aangezien daarmee zowel het aantal bronnen als de te verwachten geluidsproductie lager zal zijn, wat de metingen kan bemoeilijken. Roosters zelf zijn in vele maten in de handel verkrijgbaar. Als basis voor deze proef ligt een rooster waarvan bekend is dat het tonaal geluid kan produceren onder invloed van wind voor de hand, zoals die bekend zijn van de praktijkvoorbeelden zoals het Expo-paviljoen of het Strijkijzer. Parametrisch onderzoek kan worden gedaan door te variëren met de kenmerkende afmetingen van de geteste roosters, waarbij de variaties zullen worden gebaseerd op de resultaten van literatuuronderzoek. Specifiek:

- De afmeting van de roostermazen;
- De verhouding tussen dikte van de strips waaruit het rooster is opgebouwd en de roosterdiepte;
- Eventueel: een losse strip beproeven, ter vergelijking met het rooster als geheel (uiteindelijk in dit onderzoek niet haalbaar gebleken wegens tijdgebrek).

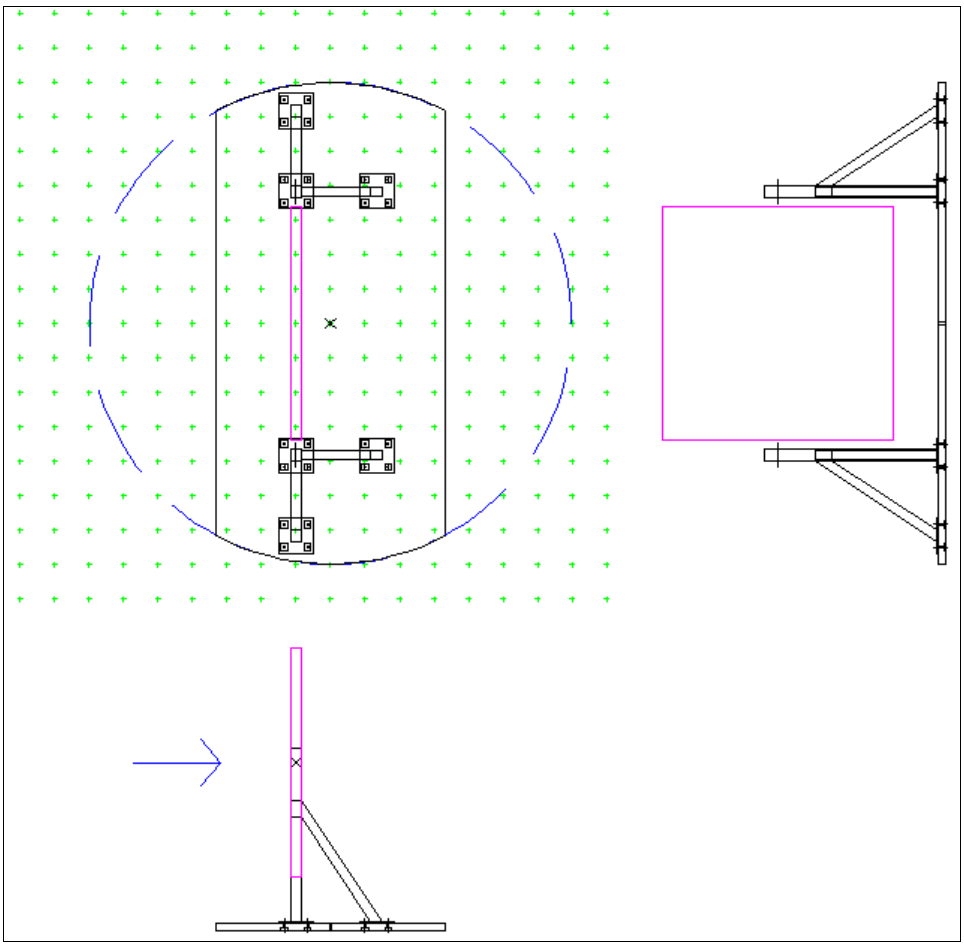
Aangezien het onderzoek in beginsel niet gericht is op het verhinderen van het ontstaan van het geluid maar op het onderzoeken van de oorzaak ervan zijn in de bovenstaande lijst geen maatregelen opgenomen gericht op het voorkomen van tonaal geluid, zoals het bovenstrooms verstoren van de luchtstroming, netten of gaas aanbrengen, enzovoort. Door het proefstuk om zijn eigen as draaibaar te monteren en tevens het grondvlak draaibaar te monteren kan optimale bewegingsvrijheid worden gerealiseerd:



figuur 23 Schetsmatige weergave van de proefopstelling.

Hoewel een geheel frame rondom het rooster mogelijk steviger (minder kans op torderen proefstukken) of makkelijker monteren is, kan het mogelijk storende invloed hebben door

zelf geluid (ruis en/of tonaal) toe te voegen. Om die reden maakt een dergelijk frame geen deel uit van het ontwerp. De grondplaat van de opstelling wordt met een bout in het midden vastgezet op het in de tunnel aanwezige platform; hierin zijn voor dat doel boutgaten aanwezig op een raster van 150x150 mm.



figuur 24 Ontwerp frame; boven-, voor-, en zijaanzicht

4.4 Meetprocedure

- Proefstuk plaatsen;
- Tunnel starten op snelheid 15 of 20 m/s, waarbij het proefstuk om zijn horizontale as wordt gekanteld t.o.v. de stroming, totdat (op het gehoor) bij een bepaalde hoek een toon wordt gevonden;
- Bij die hoek een meting doen door circa 30 seconden te meten. Deze stap wordt voor meerdere snelheden uitgevoerd, waarbij de oriëntatie van het proefstuk hetzelfde wordt gehouden maar de snelheid stapsgewijs verhoogd.

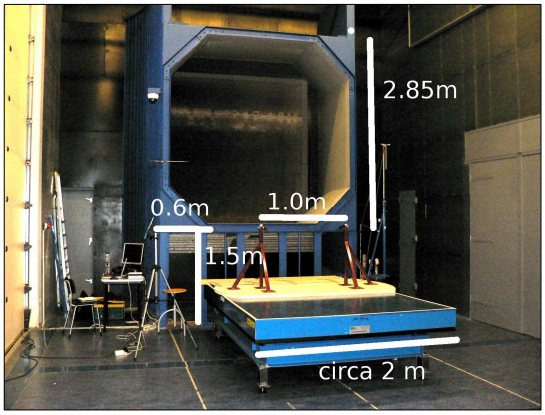
- Herhaal bovenstaande om eventuele andere hoeken te vinden waarbij een fluittoon optreedt.
- Herhaal voor overige proefstukken.

4.5 Apparatuur

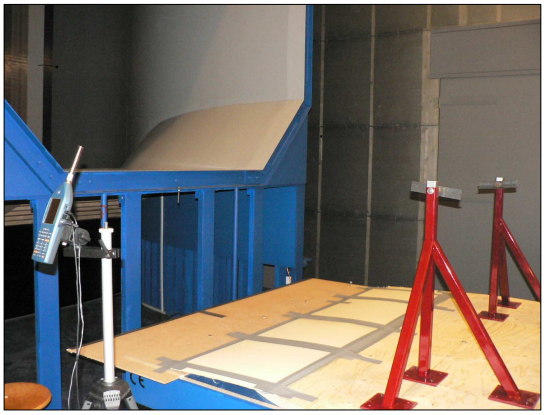
- Microfoon/geluidmeter Norsonic NOR-140: in staat om op het display octaafbanden of tertsen weer te geven, en tevens geluidopnames in wav-formaat op te slaan (volledig signaal). Dit kan op een in de geluidmeter zelf aanwezige opslagkaart; bediening kan ook op afstand met behulp van door de fabrikant meegeleverde software.
- IJking geluidmeter, zie 5.2.2.
- Signaalverwerking met behulp van matlab of vergelijkbare programmatuur, inclusief het plotten van de resultaten in grafieken waarin geluidssterkte is uitgezet tegen de frequentie.

4.6 Opstelling

In figuur 26 is de opstelling te zien, waarbij het platform met de meetopstelling op de laagste stand is gebracht om een nieuw rooster te kunnen monteren. Tijdens het meten bevindt het platform zich circa 30 centimeter boven het laagste punt van de uitstroomopening van de tunnel, ofwel 1,8 meter boven de vloer van de testruimte.



figuur 26 Overzicht opstelling.

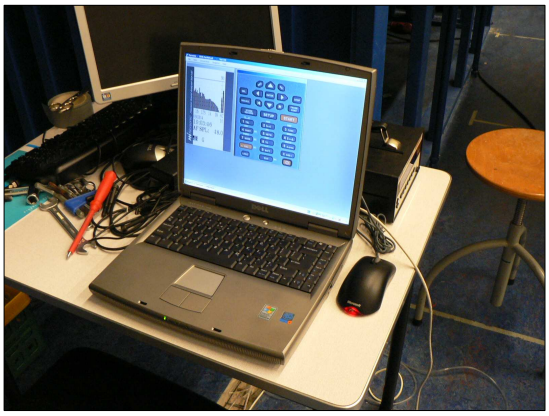


figuur 25 Afwerking aan de voorzijde.

Aan de voorzijde van het platform is getracht met behulp van een plaat en karton de invloed van de rand van het grondvlak zoveel mogelijk te minimaliseren (figuur 25). De in beide bovenstaande figuren zichtbare meter is op een statief geplaatst net buiten de stroming op 60 centimeter van de rand van het platform. Tijdens een meting bevindt de microfoon zich op ongeveer anderhalve meter van het centrum van de roosters. De meter is met een USB-kabel aangesloten op een laptop, waarop software is geïnstalleerd om

deze daarmee te bedienen (Norsonic Virtual Instrument). De laptop op zijn beurt kon met dank aan 'remote desktop' software in zijn geheel vanuit de controleruimte worden bediend, zodat tijdens het doen van de metingen niemand in de testruimte aanwezig hoefde te zijn. Afgezien van een gering vertragingseffect functioneerde deze werkwijze tijdens de metingen zonder problemen.

figuur 27 Aansluiting geluidmeter.

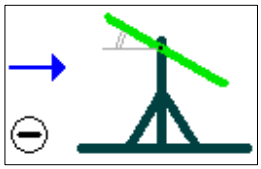


figuur 28 Programma 'Virtual Instrument' in actie.

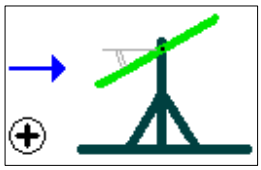
5 Resultaten windtunnel

5.1 Uitvoering onderzoek

De geteste roosters zijn opgebouwd uit twee verschillende strips, de zogeheten draag- en vulstaven. De draagstaven nemen de bulk van de constructieve sterkte van het rooster voor hun rekening; de (kleinere) vulstaven zorgen ervoor dat de individuele draagstaven niet bezwijken maar als een geheel samenwerken.



figuur 29 Definitie negatieve hoek

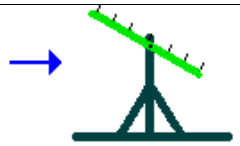
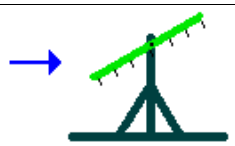
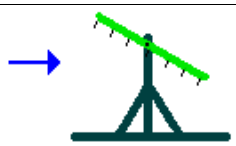
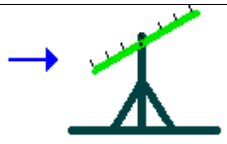


figuur 30 Definitie positieve hoek

Definitie voor- en achterzijde roosters
Voor het doel van dit onderzoek wordt de voorzijde van een rooster gedefinieerd als de kant waar zowel draag- als vulstaven zich direct aan het oppervlakte bevinden. De achterzijde is dan dus de kant van waaruit bezien de (kleinere) vulstaven verdiept liggen, zoals in figuur 31.

Definitie hoekverdraaiing
De hoekverdraaiing wordt gemeten t.o.v. van de horizontale stand, zie figuur 29 en figuur 30. Een hoek geldt als positief wanneer, gezien in de stromingrichting, het laagste deel van het proefstuk zich verder naar voren bevindt dan het hoogste deel; negatief wanneer het omgekeerde het geval is. Een hoek bevindt zich in deze definitie tussen -90° en 90° voor zowel voor als achterzijde. Hiervoor is gekozen vanwege de foutgevoeligheid van het tijdens de windtunnelmetingen werken met een notatie van 0 tot 360°. Voor- en achterzijde zijn op dat moment immers onmiddellijk zichtbaar en zonder enig omrekenen bruikbaar.

In totaal leidt dit tot de hoeknotaties zoals in tabel 3.

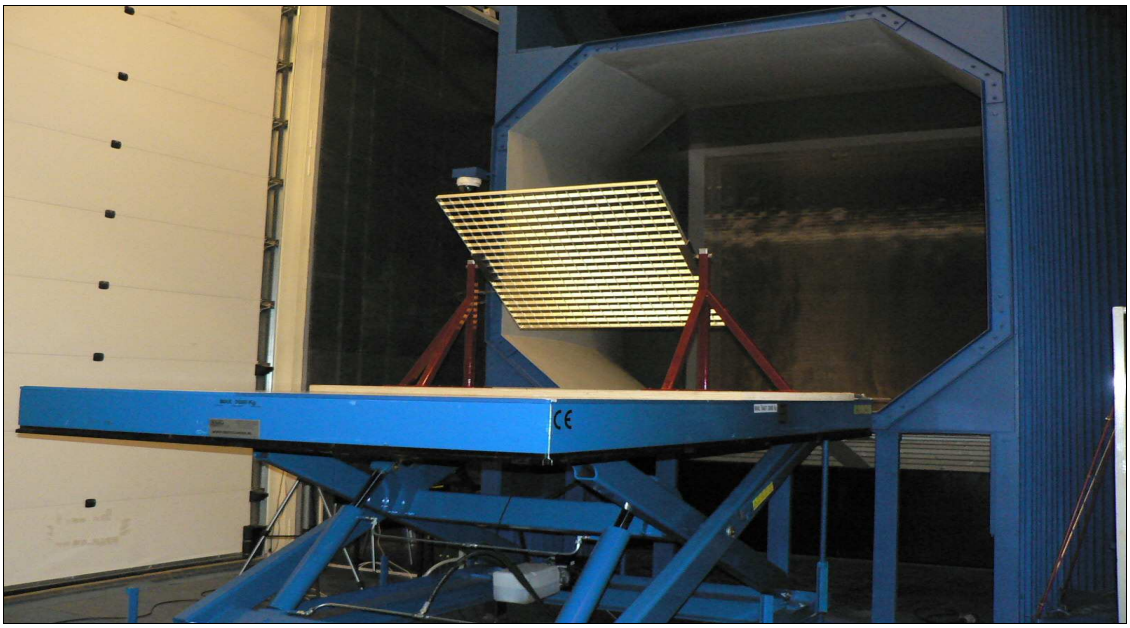
Hoek				
Notatie	-90-0° voorzijde	0-90° voorzijde	-90-0° achterzijde	0-90° achterzijde

tabel 3 Overzicht van de gebruikte hoeknotaties.

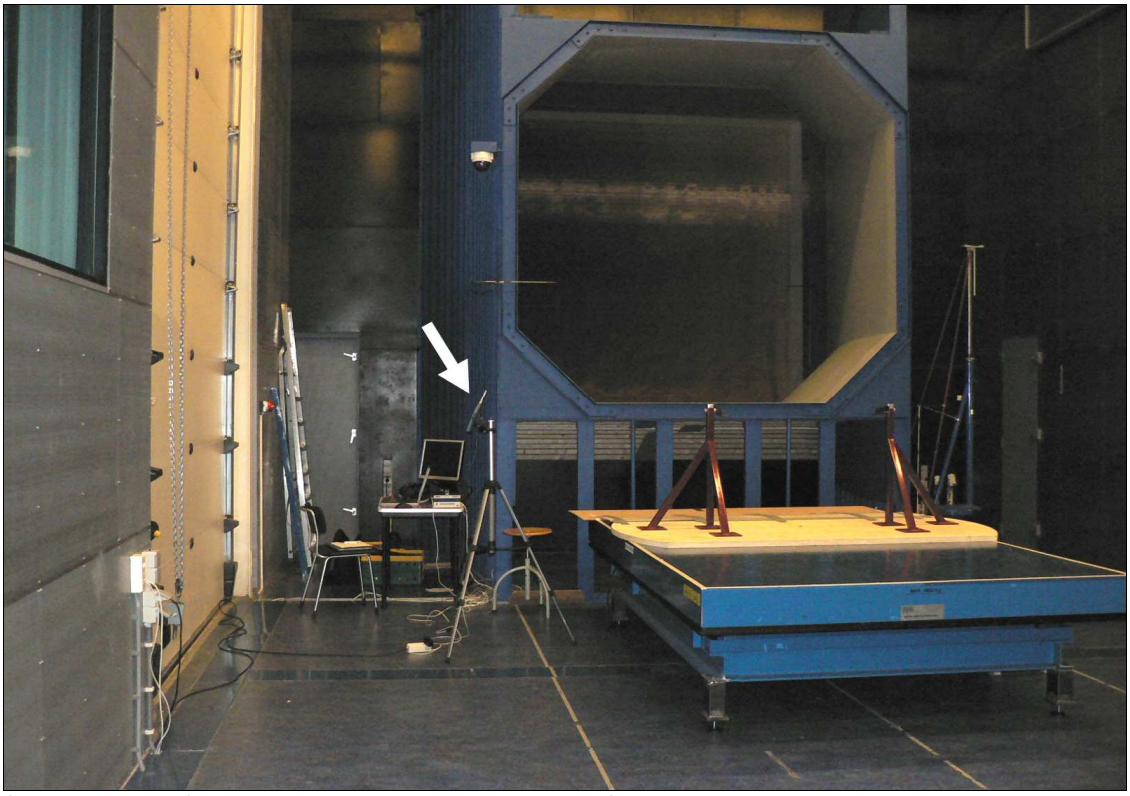
figuur 31 Aanstroming vanaf de achterzijde van een rooster. Let op het verschil tussen de draagstaven (horizontaal in deze afbeelding) en de kleinere vulstaven (verticaal).

Meetsnelheden

In het geval dat er bij 15 m/s tonaal geluid werd gevonden, is het desbetreffende rooster in die specifieke stand vastgezet en bij 10, 15, 20 en 25 m/s beproefd. De geluidmeter bevindt zich buiten de stroming, direct links naast de opstelling (zie figuur 33).



figuur 32 Proefopstelling gebruiksklaar in de windtunnel



figuur 33 Statief met geluidmeter naast de opstelling; foto tijdens het wisselen van roosters, met het platform voor dat doel tijdelijk op de laagste stand.

5.1.1 Beproefde roosters

Van de twaalf door Dejo beschikbaar gestelde roosters zijn er uiteindelijk tien in de windtunnel beproefd, waarbij deze zijn aangestroomd aan zowel de voor- als de achterzijde en van alle waargenomen tonen opnames zijn gemaakt. Alle tien zijn getest met de draagstaven horizontaal, de eerste drie proefstukken (n° 3, 6 en 10) ook met de vulstaven horizontaal. Dat levert het volgende overzicht op:

n°		afmeting	maaswijdte	dragerafstand	draagstaven	vulstaven
1	7	1000x1000	33.33x33.33	33.33x33.33	30x2	10x2
2	8	"	"	"	30x3	"
3	9	"	"	"	40x2	"
4	10	"	49.99x49.99	49.99x49.99	30x2	"
5	11	"	"	"	30x3	"
6	12	"	"	"	40x2	"

1 t/m 6 en 7 t/m 12 verschillen slechts in de afwerking; alle maten mm.

	beproefd		beproef + vulstaaf		niet beproefd

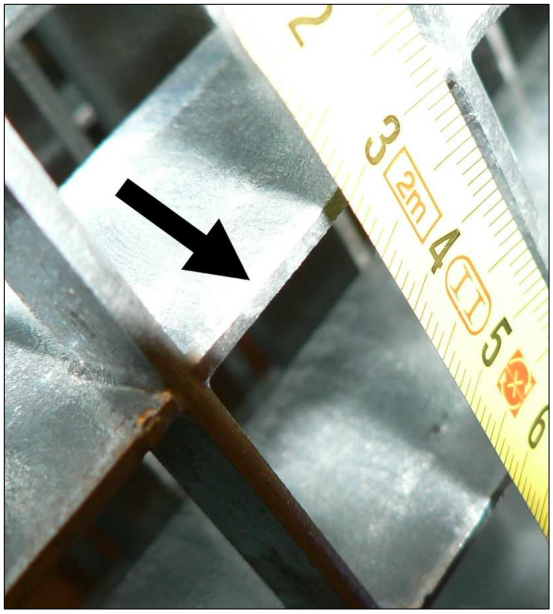
tabel 4 Overzicht proefstukken: twee verschillende maaswijdtes, voor ieder daarvan drie verschillende afmetingen draagstaven

5.1.2 Verschillen in afwerking tussen roosters 1 t/m 6 en 7 t/m 12

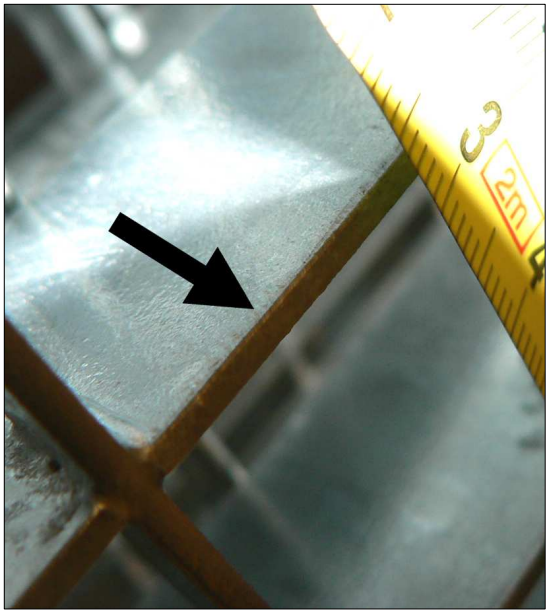
Van elk van de zes testroosters was zowel een versie met scherpkantig bandstaal (rooster 1 t/m 6) als een met afgerond bandstaal (7 t/m 12) aanwezig. De "scherpe" kant ontstaat bij de fabricage van de strips waaruit de roosters zijn opgebouwd. Deze strips worden geslit uit rollen dun plaatmateriaal, door het plaatmateriaal vanaf de coil in de lengterichting op te knippen. Dit gebeurt door plaatmateriaal langs een tweetal "messen", waarvan zich er één aan de boven- en een aan de onderzijde van de te slitten rol bevindt (figuur 34). Als gevolg van dit proces is er aan één zijde van de strip een scherpe rand. Daarnaast blijven er bij deze vorm van metaalbewerking soms onregelmatig gevormde bramen aan de randen over. Bij het "afgeronde" materiaal zijn de scherpste randen verwijderd, hoewel het verschil met het blote oog lastig zichtbaar kan zijn.

figuur 34 Slitten van plaatmateriaal; in het onderste deel zijn beide "messen" zichtbaar waar het plaatmateriaal tussendoor gehaald wordt.

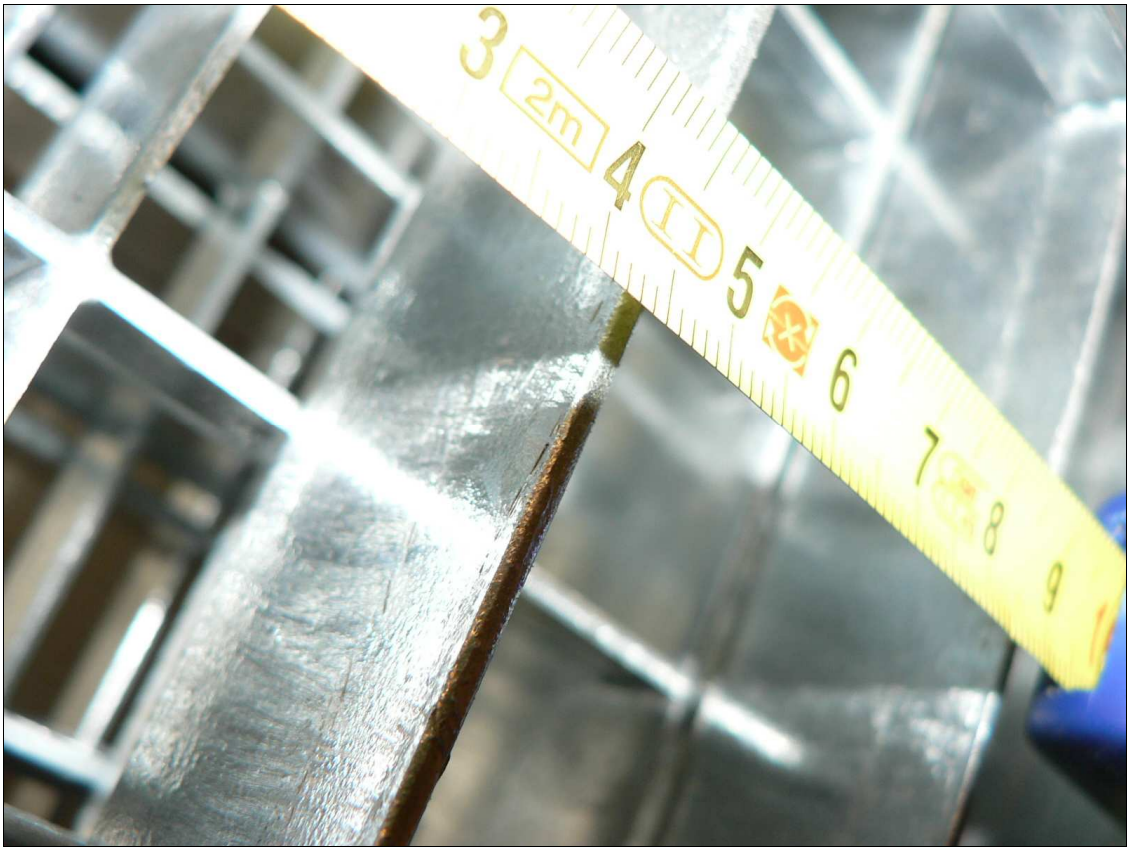
Daarnaast is er door Dejo naderhand nog een extra set roosters geleverd, waarvan de draagstaven een duidelijk grotere afrondingsstraal hebben en met het blote oog daaraan ook goed herkenbaar zijn. Zie onderstaande figuren, en figuur 37 voor het nieuwere, nog niet beproefde type:



figuur 36 Detail van rooster 1 (scherpkantig)



figuur 35 Detail van rooster 7 (afgerond); op basis van de dikte van de draagstaaf (2 mm) is de afrondingsstraal naar schatting 1/8 daarvan ofwel 0.25 mm



figuur 37 Later geleverd en nog niet beproefd rooster met grotere afrondingsstraal. Bij deze roosters is de afronding ook met het blote oog zonder problemen zichtbaar.

5.1.3 Metingen per rooster

n°	draagstaaf horizontaal		vulstaaf horizontaal	
1	2-0094 t/m 2-0113	2-0094: 76° voor 2-0098: 49° voor 2-0102: -37° achter 2-0106: 90° achter 2-0110: -74° voor	-	
2	2-0114 t/m 2-0133	2-0114: 28° voor 2-0118: -15° achter 2-0122: 77° voor 2-0126: 35° achter 2-0130: -29° achter	-	
3	1-0032 t/m 1-0043	1-0032: -30° achter 1-0036: 35° achter 1-0040: -89° voor	2-0007 t/m 2-0018	2-0007: -30° achter 2-00011: -86° voor 2-00015: 32° achter
4	1-0001 t/m 1-0009	1-0001: -51° voor 1-0006: 26° achter	-	
5	2-0062 t/m 2-0073	2-0062: 40° achter 2-0066: 83° voor 2-0070: 80° achter	-	
6	2-0021 t/m 2-0033	2-0021: 78° achter 2-0025: 72° voor 2-0030: 90° voor	2-0034 t/m 2-0042	2-0034: -89° voor 2-0039: -88° achter
7	2-0134 t/m 2-0146	2-0134: 41° voor 2-0139: -36° achter 2-0143: 84° achter	-	
8/9	(niet beproefd)			
10	1-0010 t/m 1-0027	1-0010: 24° achter 1-0014: -20° voor 1-0019: 47° voor 1-0023: -42° achter	1-0028 t/m 1-0031	1-0028: -86° achter
11	2-0074 t/m 2-0093	2-0074: 85° voor 2-0078: 40° voor 2-0082: 42° achter 2-0086: -20° achter 2-0090: 85° achter	-	
12	2-0043 t/m 2-0061	2-0043: -38° achter 2-0049: 82° voor 2-0053: 89° voor 2-0058: -9° voor	-	

	beproefd		beproef + vulstaaf		niet beproefd

tabel 5 Overzicht uitgevoerde metingen

Metingnummers bestaan steeds uit de dag (1 of 2), gevolgd door een nummer dat aangeeft de hoeveelste meting van die dag het betreft. Meetseries bestaan uit vier achtereenvolgende metingen bij dezelfde hoek en oplopende snelheid (10, 15, 20 en 25 m/s); de "meetserie 2-0043" betreft dus meting 43 t/m 47 op de tweede meetdag.

De resultaten van alle meetseries zijn integraal in bijlage 1 opgenomen.

5.2 Verwerking meetgegevens

5.2.1 Matlab

Voor het verwerken van de WAV-bestanden van de metingen is gebruikt gemaakt van Matlab. Voor deze benadering is gekozen wegens het volledig inzichtelijk zijn van de gebruikte methodes, de goede mogelijkheden om grote hoeveelheden bestanden te verwerken, en de ruime mogelijkheden en bestandsformaten die kunnen worden gebruikt om het uiteindelijke resultaat op te slaan.

WAV-bestanden bestaan uit een set getalswaarden tussen -1 en 1; in geval van een typische meting met een lengte van circa 30 seconden waarbij de meter is ingesteld op een sample rate van 48 kHz gaat het om bijna 1.5 miljoen waardes.

Het script leest het bestand van een meting in. Deze ingelezen data bevinden zich in het tijdsdomein; per seconde blijken deze te bestaan uit acht reeksen van 6000 waarden ieder, waarmee de sample rate dus uitkomt op 48000 Hz.

Omdat niet alle metingen precies dezelfde lengte hebben, en er meer dan genoeg data beschikbaar zijn om de gewenste nauwkeurigheid te halen, wordt uit deze data wordt een set van 200*6000 waarden genomen (ofwel precies 25 seconden bij 48 kHz) waarmee verder wordt gewerkt.

$$y(t) \quad [\text{Pa}] \tag{9}$$

Deze dataset uit de geluidsopname wordt omgezet van het tijd- naar het frequentiedomein door middel van een Fouriertransformatie:

$$y(f) = fft(y(t)) \tag{10}$$

Alleen de eerste helft van de aldus verkregen data in het frequentiedomein worden gebruikt, alle waarden boven de Nyquist-frequentie kunnen niet meer betrouwbaar worden gereproduceerd uit het signaal wegens aliasing-problemen.

$$Nyquistfrequentie = 0.5 \bullet sample\ rate = 24kHz \tag{11}$$

Het signaal wordt vervolgens in het gewenste aantal frequentiebandjes opgedeeld, waarbij de maximaal haalbare nauwkeurigheid (de smalst mogelijke "band") volgt uit de verhouding tussen sample rate en het aantal beschikbare waarden in de dataset. In het

matlab script wordt deze waarde overigens op minimaal 1 Hz gesteld, om de rekentijd binnen de perken te houden en omdat smaller weinig nut heeft in het kader van dit onderzoek.

Voorts worden de bijbehorende absolute niveaus in decibel berekend (voor iedere band) en gecorrigeerd op basis van de ijkfluit van de geluidmeter.

$$L_{band} = 10 \bullet \log(y_{band}(f)) + 10 \bullet \log(\sum_{1}^{n} \frac{y^2(t)}{n}) + 90 + Corr. \quad [\text{dB}] \qquad (12)$$

Nu worden automatisch pieken in de meetwaarden gedetecteerd en van bijbehorende waardes voorzien; in matlab is deze detectie, net als een aantal andere vaker voorkomende taken, opgesplitst in aparte functies die ieder hun eigen *.m-bestand hebben. De pieken worden berekend door een tweetal voorwaarden te stellen:

1. voldoende niveauverschil tussen een minimum, een tussengelegen "hoogste" punt en een daaropvolgend minimum.
2. voldoende verschil ten opzichte van een lopend gemiddelde.

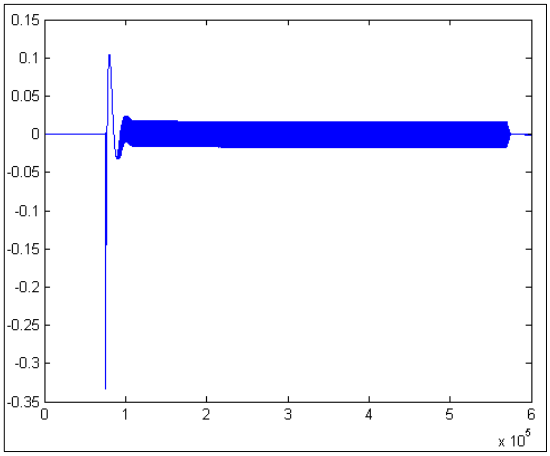
Daarnaast kunnen brede pieken worden gevonden op basis van het lopende gemiddelde, hoewel dat voor het onderzochte sterk tonaal geluid doorgaans minder van belang is.

Uiteindelijk volgt nog een eventuele A-weging en wordt de gewenste grafiek geplot (frequentie tegen het geluidniveau), inclusief labels met geluidsniveau, frequentie, en golflengte bij gevonden pieken.

De procedure wordt herhaald voor alle gegeven bestanden c.q. metingen, inclusief de mogelijkheid om meerdere metingen, bijvoorbeeld alle vier metingen aan een rooster bij verschillende snelheden, in één grafiek te combineren.

5.2.2 IJking geluidmeter

De gebruikte Norsonic NOR-140 geluidmeter kent een functie om een toon van een gewenste frequentie en geluidsterkte te genereren en op de gebruikelijke manier in de vorm van een wav-bestand op te slaan. Helaas is de implementatie hiervan verre van perfect: aan het begin van de toon bevindt zich een signaal met een onaangenaam grote amplitude (met risico op gehoorschade indien de meter op dat moment in combinatie met een hoofdtelefoon wordt gebruikt, zie figuur 38), en terwijl wél de juiste frequentie wordt geleverd gaat dat niet op voor het aantal decibellen.



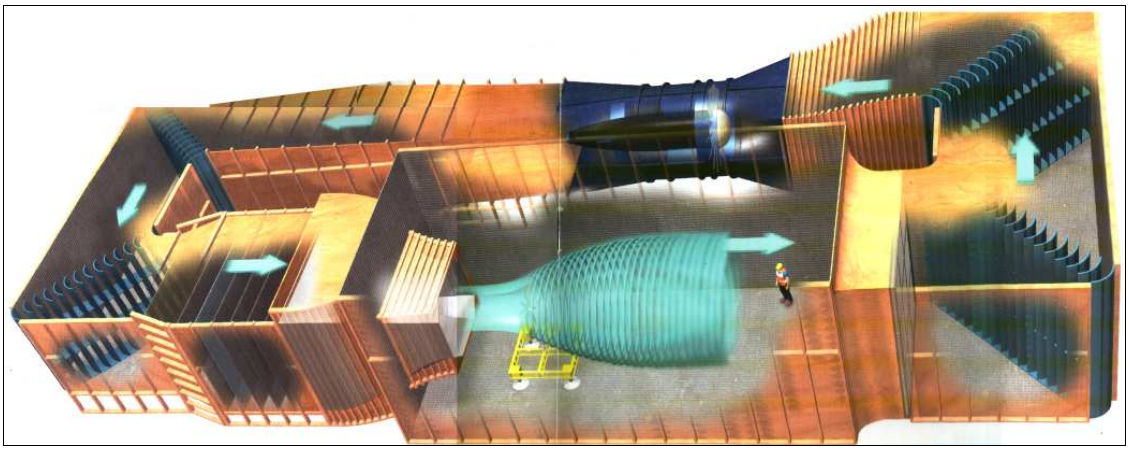
figuur 38 IJkfluit NOR-140; duidelijk zichtbaar is de zeer grote amplitude aan het begin van het signaal. Vanaf circa 1.25(*10^5) begint pas de correcte (sinusvormige) ijktoon

Dit laatste zou kunnen samenhangen met beperkingen aan het bestandsformaat: alle waarden in een wav-bestand bevinden zich per definitie tussen -1 en 1; signalen die een waarde zouden opleveren die daarbuiten valt worden afgekapt of weggelaten, met storend informatieverlies tot gevolg. Op basis van informatie in de handleiding van de geluidmeter zou de waarde van 1 (Volt) worden bereikt bij 120 dB. Intern behoeft dat geen probleem te zijn, bij opslag als wav-bestand daarentegen wel; allicht probeert de geluidmeter dergelijk verlies van een deel van het signaal te voorkomen door alles "te zacht" op te slaan? Hoe het ook zij, feit is dat er helaas niet op vertrouwd kan worden dat een instelling die 90 dB zou moeten opleveren ook daadwerkelijk een opname met dat geluidniveau oplevert.

Dientgevolge moet deze ijktoon eerst zelf geijkt worden, voordat aan de hand ervan de opgeslagen meetwaarden gecorrigeerd kunnen worden – die immers onder hetzelfde euvel te leiden hebben. Daartoe wordt de ijktoon op dezelfde manier in matlab ingelezen als normale metingen, waarna het niveau van de gegenereerde (en uiteraard overduidelijke) piek wordt vergeleken met de ingestelde waarde. Hieruit blijkt dat wanneer de te genereren toon wordt ingesteld op -30 (t.o.v. 120 dB, ofwel 90 dB), dit een toon oplevert met een piekwaarde van 54.4 dB. De toe te passen correctie is hiermee bepaald op 35.6 dB. Wanneer deze correctie op de metingen wordt toegepast is het resultaat in overeenstemming met wat tijdens het testen in de windtunnel is afgelezen op het display van de meter.

5.3 Geschiktheid tunnel voor akoestisch onderzoek

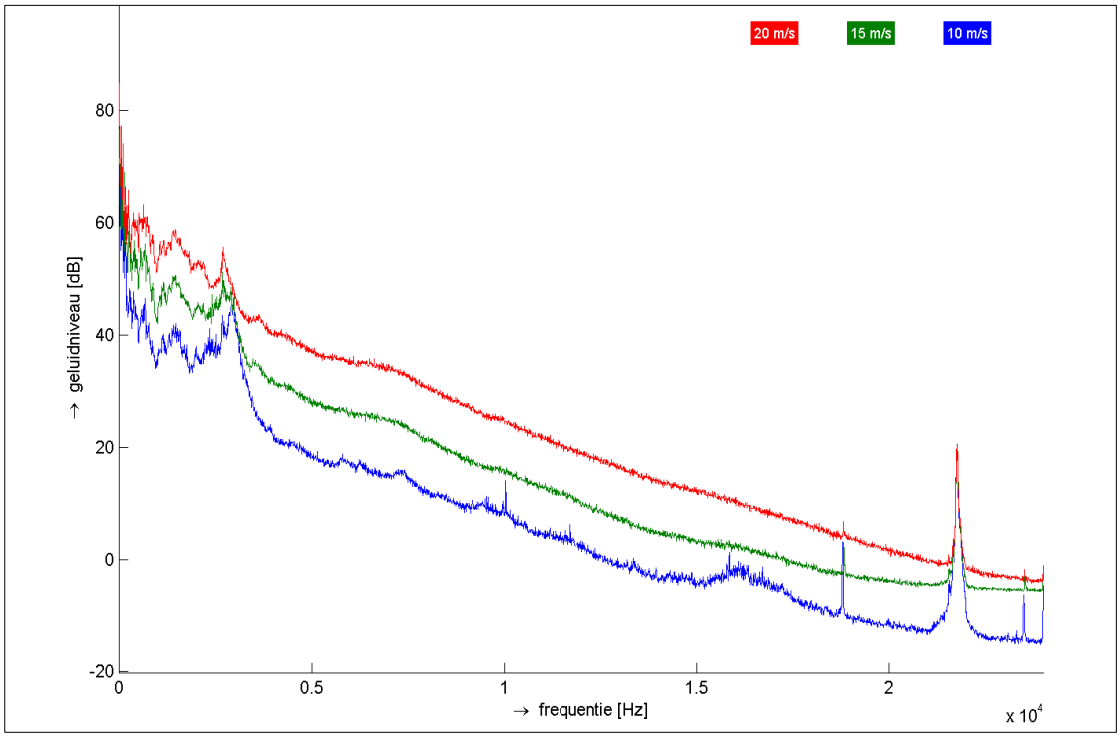
De voor dit onderzoek gebruikte tunnel is niet specifiek ontworpen voor akoestisch onderzoek. Zo is er geen sprake van geluiddempend materiaal in de testruimte, sluit de tussenwand met het deel van het gebouw waar de motoren en ventilatoren staan niet volledig aan op het plafond, en lekt er via de luchtaanvoer geluid naar de testruimte. Zie het schema in figuur 39.



figuur 39 Overzicht van de Open Jet Facility: midden voor de testruimte, instroomopening (en testplatform) aan de linkerkant daarvan. De pijlen geven de stroomrichting aan. De motor van het geheel bevindt zich in deze afbeelding direct achter de testruimte; de wand tussen beiden sluit niet volledig aan op het plafond waardoor de apparatuur daar een bron van (achtergrond)geluid vormen.

Het in geval van een "lege" tunnel aanwezige achtergrondgeluid bestaat uit geluid geproduceerd door de apparatuur, alsmede windruis (vooral bij hogere snelheden). Daarbij valt een toon rond 21800 Hz op, duidelijk zichtbaar in figuur 40, die gezien de totale ongevoeligheid van frequentie en geluidniveau voor veranderingen in de windsnelheid geen aeroakoestisch verschijnsel betreft. Deze storende toon was slechts een deel van de meetdagen aanwezig was. Waarschijnlijk betreft het apparatuur elders in het gebouw. Hoewel deze toon duidelijk aanwezig is in de uitgewerkte grafieken, maakt dit de meetresultaten niet onbruikbaar: de toon is makkelijk herkenbaar, heeft steeds dezelfde frequentie, bevindt zich buiten het hoorbare spectrum en de sterkte ervan is voldoende laag.

Overig geluid bevindt zich vooral in het laagfrequente gebied. Wordt daaraan de opstelling toegevoegd zonder dat er een rooster is gemonteerd, dan levert dat geen noemenswaardig verschil op; ook vormt de opstelling geen bron van tonaal geluid.



figuur 40 Achtergrondniveaus zonder rooster gemonteerd bij 10, 15 en 20 m/s; aan de rechterkant de beschreven storende toon rond 21800 Hz.

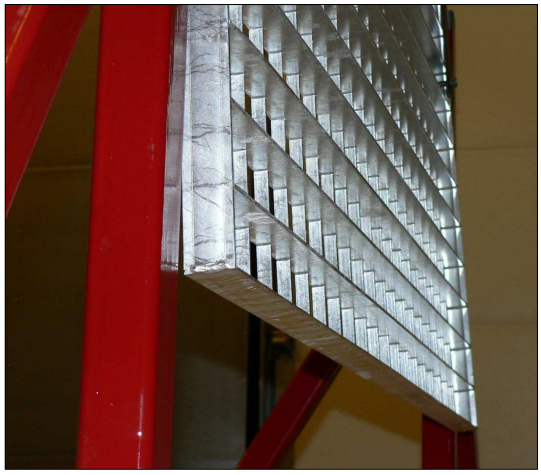
Gezien het feit dat er specifiek gezocht wordt naar tonaal geluid is de aanwezigheid van ruis op zich geen bezwaar, zolang de niveaus maar dusdanig zijn dat de toon voldoende duidelijk te onderscheiden is ten opzichte van de aanwezige ruis. Eenzelfde overweging geldt voor omgevingsgeluiden, de tunnel bevindt zich immers niet ergens ver weg in de polder maar in de bebouwde kom van Delft met bijbehorend risico op verkeers- en omgevingslawaai.

Een en ander heeft gezien de experimenteel gevonden geluidniveaus en het doel van deze specifieke proef geen probleem opgeleverd, maar zou voor andere proeven een reden kunnen zijn de voorkeur te geven aan een meer gespecialiseerde "stille" windtunnel met meer demping, isolatie, of geluidwerende maatregelen.

De tunnel heeft wel het duidelijke voordeel dat er behoorlijk grote proefstukken op ware grootte in kunnen worden geplaatst. Dit voorkomt praktisch problemen met het meten van geluid aan een schaalmodel, vooral waar het gaat om de verhoging van de frequenties. Op schaal 1:*x* werken heeft immers tot gevolg dat er ook *x*-maal hogere frequenties gemeten worden dan op ware grootte optreden, wat ertoe leidt dat deze het bereik van het menselijk gehoor al redelijk snel (bij relatief geringe mate van schaling) te boven kunnen gaan.

5.4 Alle roosters geven resultaat

Bij alle beproefde roosters kon tonaal geluid worden opgewekt, doorgaans onder een beperkt aantal - per rooster verschillende - zeer specifieke hoeken. Dit gaat zowel bij aanstroming vanaf de voor- als achterzijde van het rooster op, waarbij voorzijde is gedefinieerd als de zijde waaraan de vulstaven direct aan het oppervlak zitten. De enige uitzondering hierop betreft de configuratie waarbij de vulstaven parallel aan de rotatieas gemonteerd zijn. In dat laatste geval kon in de op deze wijze beproefde roosters meestal slecht tonaal geluid worden gevonden bij (vrijwel) haaks aanstromen. Om zo efficiënt mogelijk van de beschikbare meettijd gebruik te maken zijn – na de eerste drie op een dergelijke wijze beproefde roosters – alle proefstukken derhalve verder alleen beproefd in de oriëntatie met parallel aan de rotatieas gemonteerde draagstaven (figuur 41).



figuur 41 Rooster gemonteerd met de draagstaven parallel aan de rotatie-as

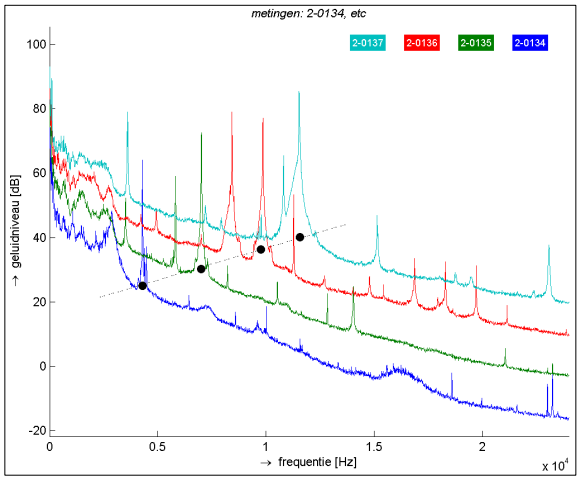
5.4.1 Verstoring tonaal geluid

Door de stroming net vóór het proefstuk te verstoren, bijvoorbeeld door een liniaal op die plek te houden, kan tonaal geluid sterk worden verminderd dan wel volledig worden verhinderd. Maximaal effect werd bereikt door deze voor het midden van het proefstuk te houden, hetgeen zou kunnen betekenen dat dit deel van de roosters de bulk van het geluid voor zijn rekening neemt. Dit zou verklaard kunnen worden door de ruime afmetingen van de tunnel, waardoor de stroming dichter bij de randen relatief makkelijk om het rooster heen kan bewegen in plaats van erdoor. Zekerheid hierover zou kunnen worden verkregen door de stroming zichtbaar te maken (bv. met behulp van rook) dan wel door op verschillende plekken het drukverschil tussen de voor- en achterzijde van het rooster te bepalen.

Het feit op zich dat verstoring aan de voorzijde een effectief middel kan zijn wordt ook bevestigd door de maatregelen die in de praktijk worden genomen, zoals bij het Expo-paviljoen en de Hoftoren.

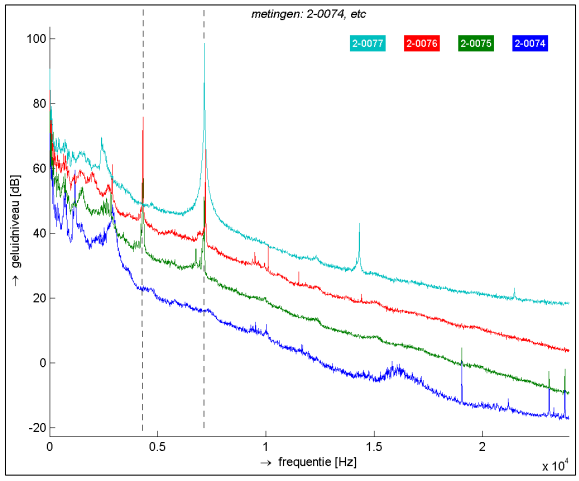
5.5 Relatie stroomsnelheid

Metingen werden standaard uitgevoerd bij snelheden van 10, 15, 20, en 25 m/s. In enkele gevallen, wanneer daar aanleiding toe was, zijn er ook bij afwijkende snelheden metingen uitgevoerd.



figuur 42 Veel meetseries laten bij het stapsgewijs opvoeren van de snelheid (10, 15, 20 en 25 m/s) een toename van de frequenties zien alsmede steeds bredere pieken. De verschillende snelheden zijn makkelijk herkenbaar aan het bij toenemende snelheden hogere ruisniveau.

Slechts in een beperkt aantal gevallen was er bij snelheden van 10 m/s al sprake van een luide toon; de laagste snelheid waar er sprake was van duidelijk tonaal geluid bedroeg slechts 8 m/s (meting 1-0032) of 9 m/s (meting 2-0062), goed voor respectievelijk 75.1 dB met 3862 Hz en 86.8 dB met 2897 Hz. Doorgaans nemen bij hogere snelheden zowel de het niveau als de frequentie toe. Het hoogste niveau werd dan ook gemeten bij 25 m/s en bedroeg ruim 112 dB met een frequentie van 2586 Hz (meting 2-0038). Hoewel



figuur 43 In een aantal gevallen wordt bij verschillende snelheden tonaal geluid van dezelfde frequentie gevonden, dit in tegenstelling tot de toename van de frequenties die de voorgaande figuur kenmerkt.

Zolang een bepaalde minimumsnelheid maar gehaald wordt, kent het optreden van het verschijnsel tonaal geluid op zich geen sterke afhankelijkheid van de precieze windsnelheid. Wel nemen in veel gevallen, bij metingen met opeenvolgende snelheden, de frequentie, hoogte, en breedte van de pieken toe met toenemende windsnelheid. Een voorbeeld daarvan is te zien in figuur 42.

Ook bij het uitzetten van de tunnel vanaf topsnelheid, waarbij de stroomsnelheid geleidelijk afneemt naar nul, was duidelijk waarneembaar dat veel tonen over een groot snelheidsbereik aanwezig waren, en daarbinnen doorgaans geleidelijk van toonhoogte veranderden. Wel treedt soms een plotseling sterk verschillend beeld op bij metingen die slechts voor wat betreft

stroomsnelheid van elkaar verschillen, hetgeen het bestaan van verschillende mechanismen bij verschillende snelheidsbereiken suggereert. Het omgekeerde komt ook voor, dat wil zeggen pieken die bij meerdere snelheden op dezelfde plaats(en) bevinden, en dus in frequentie constant blijven ondanks een verandering van de windsnelheid. Als voorbeeld daarvan kan meetserie 2-0074 in figuur 43 dienen.

Hoewel terdege van invloed is het variëren of manipuleren van de windsnelheid doorgaans dan ook geen effectief middel ter voorkoming van tonaal geluid, tenzij kan worden gerealiseerd dat ter plaatse van het problematisch constructiedeel de benodigde minimumsnelheid simpelweg niet wordt gehaald.

5.6 Relatie aanstroomhoek

Het al dan niet optreden van tonaal geluid bij roosters bleek in de windtunnel sterk afhankelijk van de hoek. Verstoring van een gevonden toon was doorgaans gemakkelijk realiseerbaar door het rooster slechts enkele graden te verdraaien; in enkele gevallen leidde zelfs het licht torderen van het proefstuk bij het aandraaien van de bouten al tot voldoende afwijking om een duidelijk waarneembaar verschil te maken. Slechts enkele malen was er sprake van een situatie waarbij het proefstuk "straffeloos" meerdere graden kon worden gekanteld zonder verlies van een toon; deze tonen waren zonder uitzondering duidelijk minder luid dan de andere gemeten tonen en traden uitsluitend op bij hoeken dichtbij 90° (vertikale stand van het rooster, haaks op de stroomrichting).

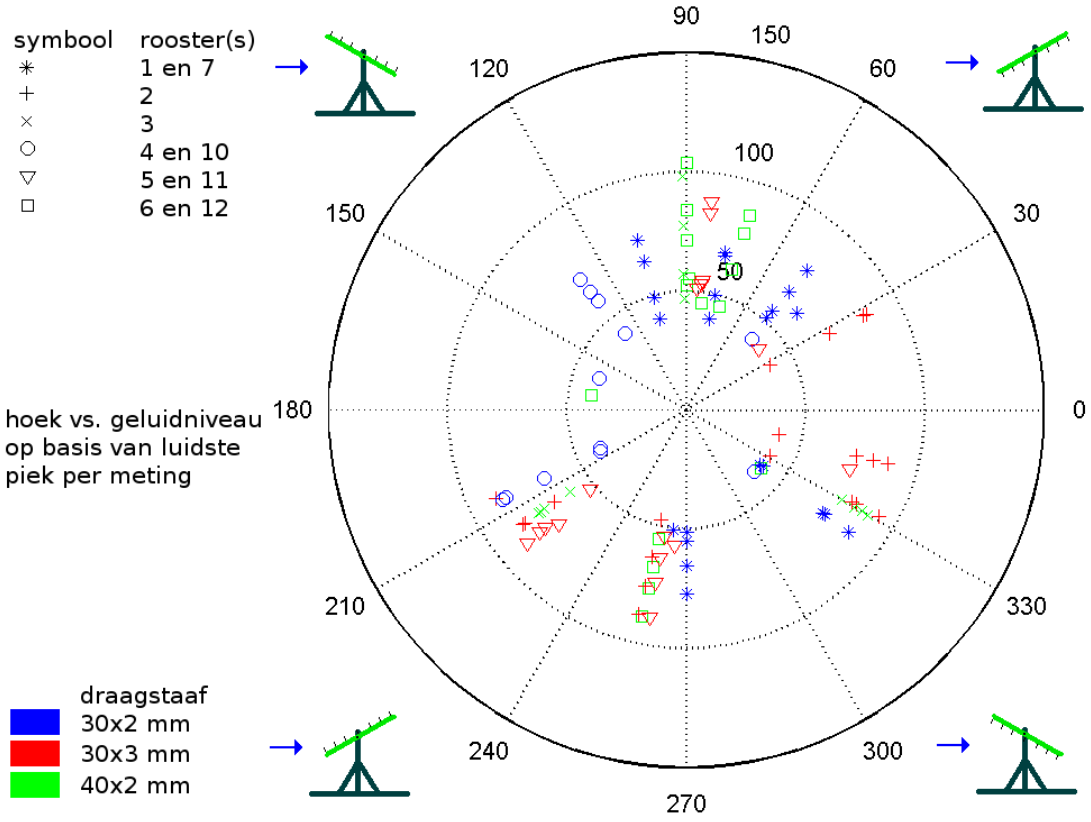
In een aantal figuren in deze paragraaf wordt gebruikt gemaakt van een 360° notatie in plaats van de elders in dit onderzoek gebruikte -90 tot +90° aan voor- en achterzijde. Dit vertaalt zich als volgt:

notatie elders	*komt bij 360° overeen met*
0 – 90° voorzijde	0 – 90°
-90 – 0° voorzijde	90 – 180°
0 – 90° achterzijde	180 – 270°
-90 – 0° achterzijde	270 – 360°

tabel 6 Hoeknotaties

Wanneer figuur 44 in ogenschouw wordt genomen, lijken er gebieden te bestaan rondom 0° en 180° (i.e., rooster horizontaal) evenals 60° daarvan verwijderd (60, 120, 240, en 300°) waarbij tonaal geluid niet kon worden waargenomen. Het is echter nog maar de vraag of dit verband ook stand houdt wanneer andere roosterconfiguraties beproefd zouden worden, en gezien het geringe aantal proefstukken lijkt het trekken van harde conclusies hieromtrent dan ook niet opportuun. Desalniettemin roept dit beeld genoeg vragen op om over te gaan tot het onderling vergelijken van de verschillende clusters in de grafiek; de resultaten hiervan komen later ter sprake.

De verdeling van de hoeken waaronder roosters tonaal geluid produceerden is niet willekeurig, zoals de onderstaande plot laat zien waarin de hoekverdraaiing en de geluidniveaus tegen elkaar zijn uitgezet:

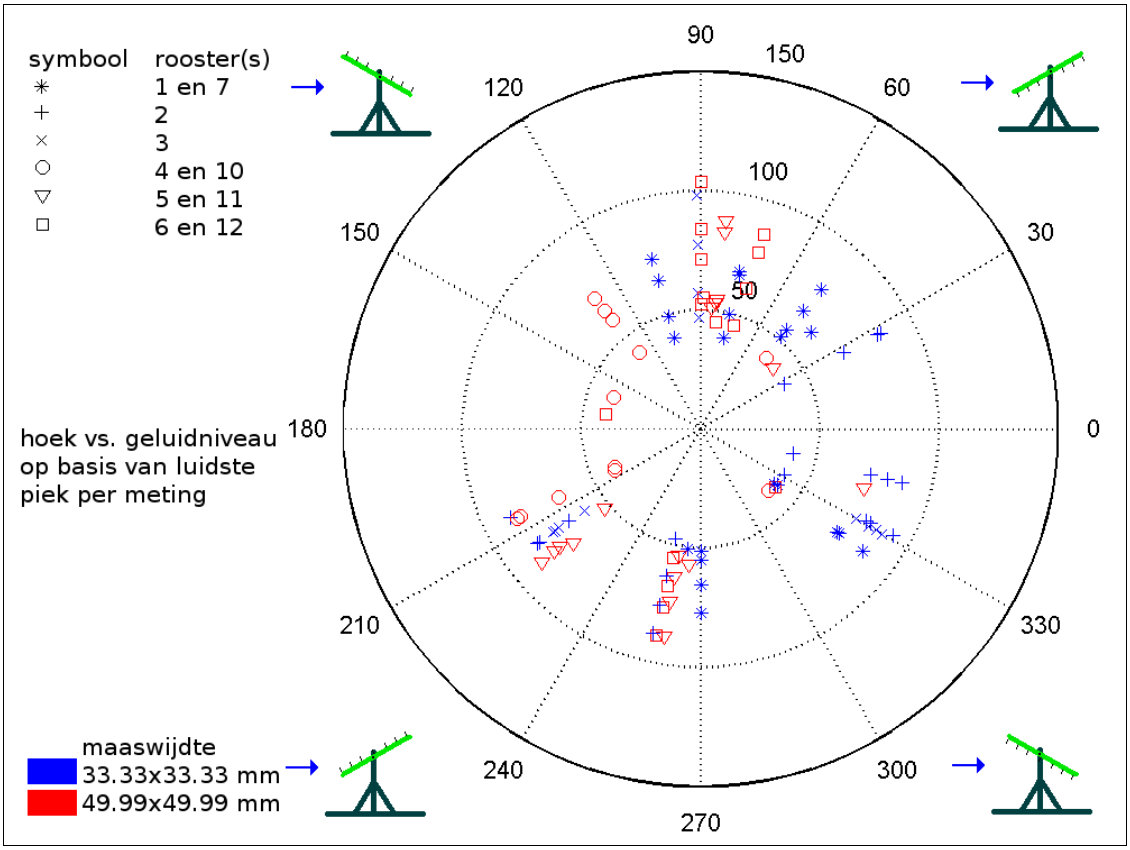


figuur 44 Aanstroomhoeken waarbij tonaal geluid optreedt zijn niet willekeurig verdeeld; Rondom 0° en 180°, en circa 60° verwijderd daarvan (60, 120, 240 en 300°) treedt er minder of geen tonaal geluid op. Zie tabel 6 voor een legenda van de gebruikte hoeknotatie.

Allereerst valt in figuur 44 op dat deze niet symmetrisch is ten opzichte van een verticale lijn door de oorsprong (90° – oorsprong – 270°). Een mogelijke oorzaak hiervoor zou kunnen zitten in het verschil in het "gemak" waarmee de stroming het rooster al dan niet kan ontwijken. In de tunnel bevonden wanden en plafond zich ver van het proefstuk, en ondervindt de stroming bij wat eerder wordt aangeduid als "positieve" hoeken daar dan ook geen hinder van. Bij wat werd aangeduid als negatieve hoeken wordt de stroming daarentegen tussen de rooster en het grondvlak van de proefopstelling gevangen, wat de afwijkende resultaten zou kunnen verklaren. Om dit te verifiëren zou bij toekomstige metingen ervoor gekozen kunnen worden een opstelling te bouwen die meer ruimte laat tussen het grondvlak en het proefstuk.

In de figuur valt tevens op dat bij negatieve hoeken er specifieke gebieden zijn waarin ofwel de voor-, ofwel de achterzijde acteren; dit in tegenstelling tot de positieve hoeken waarbij dit onderscheid juist nadrukkelijk afwezig is.

Voorts kan worden geconcludeerd dat er geen extreme verschillen bestaan tussen de luidheid van de tonen onder verschillende hoeken; hooguit een gebied in de buurt van 90° levert mogelijkerwijs geluid op dat luider is dan elders.

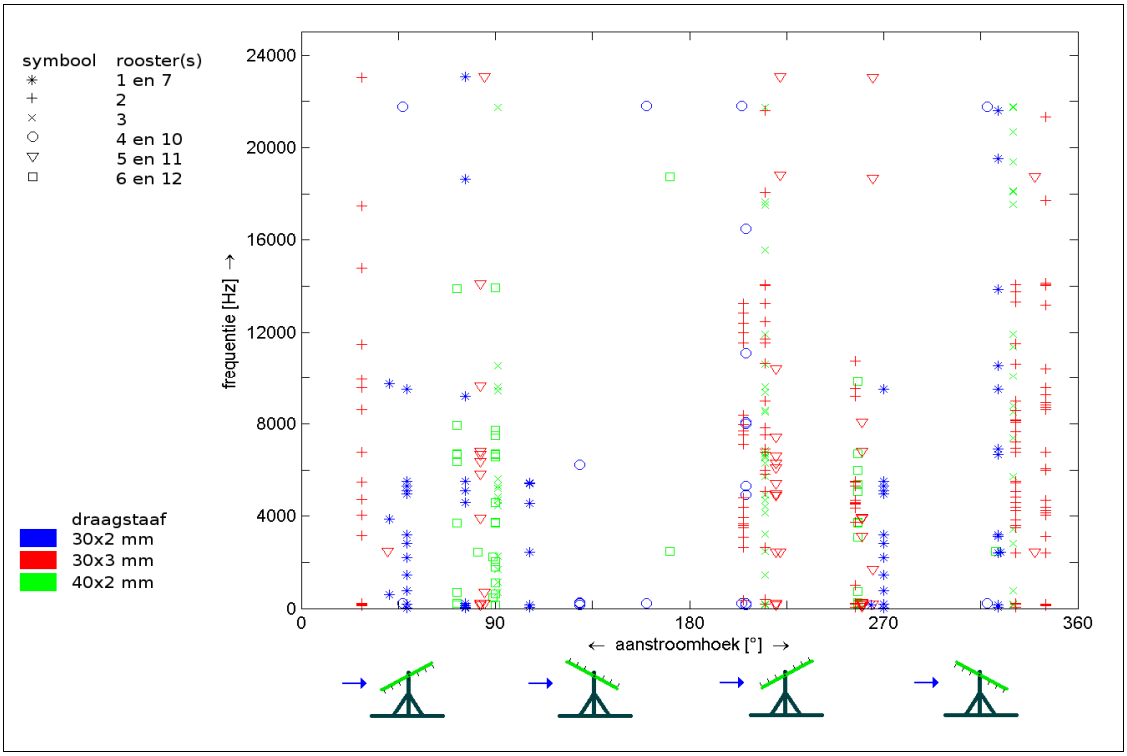


figuur 45 Dezelfde data als in figuur 44, ditmaal gekleurd op basis van de maaswijdte.

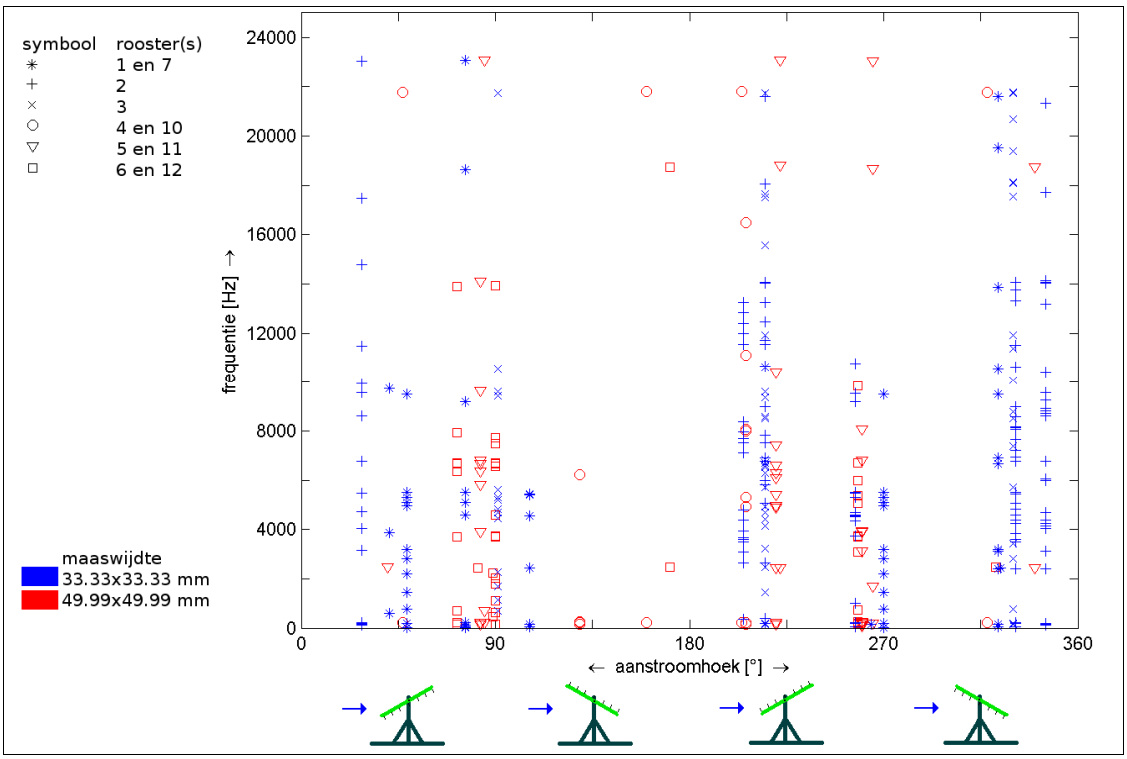
In figuur 45 zijn dezelfde resultaten nogmaals weergegeven, ditmaal echter gekleurd op basis van het onderscheid in maaswijdte terwijl de kleuren in de vorige figuur nog betrekking hadden op de draagstaven. Helaas kan noch op basis van maaswijdte, noch op basis van de draagstaaf een bepaalde hoek volledig worden uitgezonderd als mogelijk veroorzaker van tonaal geluid.

Invloed op de frequentie

Wanneer de frequenties van alle pieken worden geplot tegen de aanstroomhoek (figuur 46, figuur 47) valt, behalve wederom de hoekafhankelijkheid, op dat bij sommige hoekverdraaiingen (70-90°, 210-230°) het gebied van de frequenties boven de 10 kHz duidelijk drukker bezet is dan bij andere hoeken (met name 90 en 270°, rooster loodrecht op stroming). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat er hier vaker sprake is van een grondtoon met harmonische boventonen.



figuur 46 De aanstroomhoek geplot tegen de frequenties van alle gedetecteerde pieken; kleuren op basis van de draagstaaf.



figuur 47 De aanstroomhoek geplot tegen de frequenties van alle gedetecteerde pieken; kleuren op basis van de maaswijdte.

In figuur 47 is verder zichtbaar dat het gebied tussen 315° en 45° vooral het domein is van de (blauwe) maaswijdte 33.33 mm, terwijl er sprake is van een concentratie van resultaten voor de grotere maaswijdte 49.99 mm net vóórdat het proefstuk haaks op de stroming staat, tussen circa 70 en 90° en idem bij 250 tot 270°. Niet geheel verrassend is bij dergelijke vrijwel haakse aanstroming de kant van het rooster die aangestroomd wordt van minder belang.

5.7 Relaties geometrie

De roosterconfiguraties waarbij tonaal geluid werd gevonden zullen worden vergeleken, waarbij steeds één enkele parameter wordt gevarieerd. Dit betreft achtereenvolgens de afwerking ('scherpkantig' versus 'afgerond' bandstaal), de afmetingen van de draagstaaf, en de maasgrootte. Gezien de eerder besproken sterke afhankelijk van de hoekverdraaiing voor het al dan niet optreden van tonaal geluid ligt het in de lijn der verwachting dat een of meerdere van deze factoren sterk bepalend kunnen zijn, de vraag is uiteraard welke dat zijn en in welke mate.

5.7.1 Afwerking van het bandstaal

Van elk van de zes testroosters was zowel een versie met scherpkantig bandstaal (rooster 1 t/m 6) als een met afgerond bandstaal (7 t/m 12) aanwezig. De "scherpe" kant ontstaat bij de fabricage van de strips waaruit de roosters zijn opgebouwd. Deze worden geslit uit rollen plaatmateriaal, door deze vanaf de coil in de lengterichting op te knippen. Als gevolg hiervan is er aan één zijde van de strip een scherpe rand. Bij het "afgeronde" materiaal zijn de scherpste randen verwijderd, hoewel het verschil lastig zichtbaar kan zijn.

Aangezien niet alle roosters met afgrond bandstaal zijn getest beperkt deze vergelijking zich tot diegene die wel beproefd zijn, te weten 1, 4 t/m 6 versus 7, 10 t/m 12. Van iedere van deze combinaties wordt nagegaan of ze onder dezelfde hoeken fluiten, en indien dat het geval is of dan de geproduceerde tonen verschillen. Voorts zal worden bekeken of een van de afwerkingen vaker tot tonaal geluid leidt dan de ander.

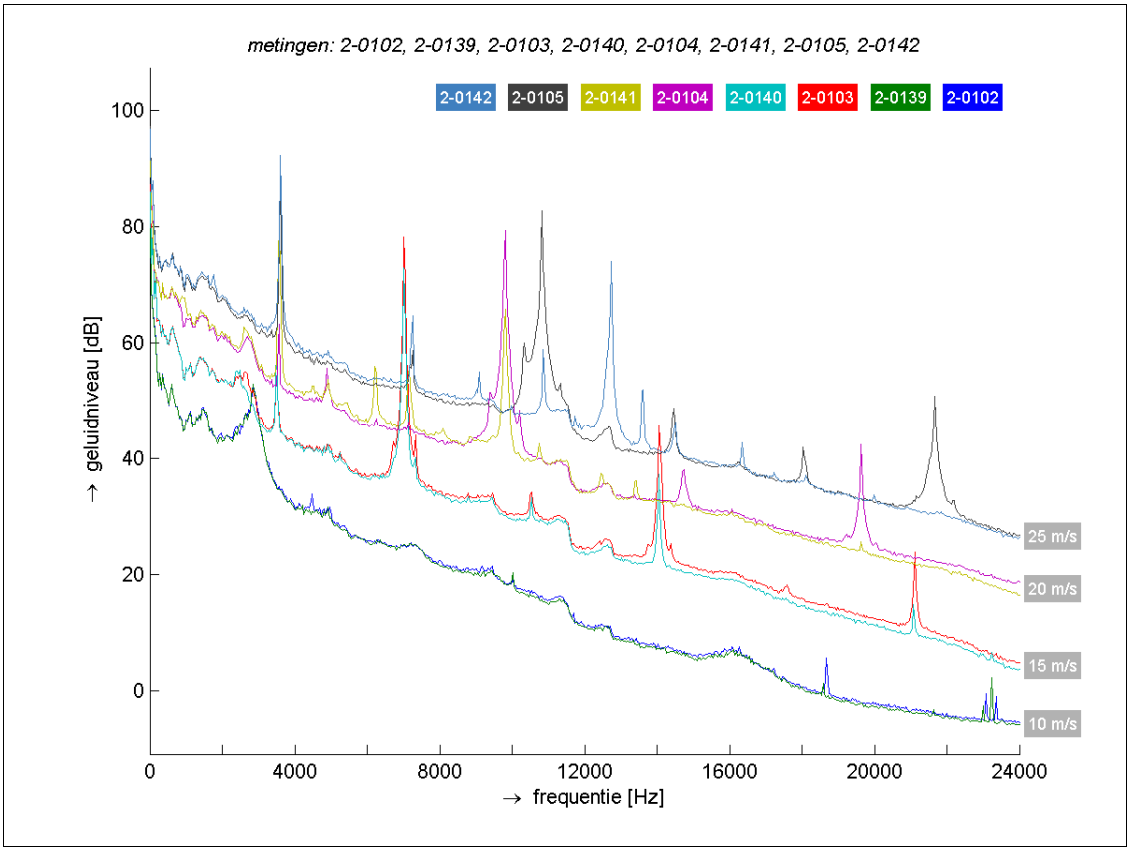
Grafieken van individuele meetseries, inclusief de frequenties en hoogte van de pieken zijn te allen tijde terug te vinden in de bijlagen; de grafieken die de invloeden van de verschillende parameters tonen bevinden zich bijlage 2. Voor de betekenis van de metingnummers wordt verwezen naar tabel 5.

Roosters 1 en 7
Deze twee roosters bestaan vertonen sterke overeenkomsten voor wat betreft de hoeken waaronder tonaal geluid voorkomt. Alle hoeken waarbij de afgeronde variant (rooster 7) resultaat oplevert komen (binnen een marge van +/- 5°) overeen met een hoek waarbij ook (scherpkantig) rooster 1 een fluittoon liet horen. Dat laatste rooster produceerde daarnaast ook tonaal geluid bij een tweetal andere hoeken, te weten 76° en -74° (beiden bij aanstroming aan de voorzijde), waar rooster 7 dat niet deed.

rooster **1** **scherpkantig**	mazen 33.33; draagstaaf 30x2 scherpkantig vs. afgerond		rooster **7** **afgerond**
-37° achter	2-0102 t/m 2-0105	2-0139 t/m 2-0142	-36° achter
49° voor	2-0098 t/m 2-0101	2-0134 t/m 2-0138	41° voor
90° achter	2-0106 t/m 2-0109	2-0143 t/m 2-0146	84° achter

tabel 7 Hoeken waarbij zowel rooster 1 als rooster 7 tonaal geluid opleverden

In bijlage 2, figuur 1 t/m 3, zijn grafieken opgenomen per overeenkomende hoek uit de bovenstaande tabel, waarin de meetseries (van 10, 15, 20, 25 m/s) van beide roosters zijn gecombineerd. Indien beide rooster onder deze vergelijkbare hoeken precies hetzelfde geluid zouden produceren, dan zouden de waarden elkaar (per meetsnelheid) perfect overlappen (en het effect van de gevarieerde parameter, in dit geval de afwerking, dus nihil zijn).
In de hiernavolgende figuur 48 is een typisch voorbeeld opgenomen van een dergelijke grafiek.



figuur 48 Meetseries van roosters 1 en 7 onder een vergelijkbare hoek (-37° resp. -36° achter), bij een viertal snelheden. De grote mate van overeenkomst tussen het door beide roosters geproduceerde tonaal geluid is duidelijk zichtbaar, slechts bij 25 m/s is er sprake van enige verschillen.

Bovenstaande grafiek laat voor deze hoeken een zeer goed overeenkomend beeld zien, waarbij de (geringe) verschillen zich concentreren bij de metingen bij 25 m/s. Enkele pieken verschijnen slechts bij een van beide proefstukken, of bij een andere frequentie. Bij 10, 15 en 20 m/s is er met deze hoeken voor wat betreft het tonaal geluid weinig verschil tussen de afgeronde en scherpkantige roosters; datzelfde geldt voor zowel de absolute hoogte van pieken als hun breedte. Eenzelfde beeld laten ook de overige hoeken in tabel 7 zien.

Roosters 5 en 11
Ook deze roosters delen het merendeel van de hoeken waarbij ze in de windtunnel tonaal geluid lieten horen. In dit geval is het echter het afgeronde rooster (11) dat onder meer hoeken van zich liet horen, namelijk bij aanstroming vanaf de voorzijde onder een hoek van 40° en vanaf de achterkant bij -20°.

rooster **5** **scherpkantig**	mazen 49.99x49.99; draagstaaf 30x3 scherpkantig vs. afgerond		rooster **11** **afgerond**
83° voor	2-0066 t/m 2-0069	2-0074 t/m 2-0077	85° voor
80° achter	2-0070 t/m 2-0073	2-0090 t/m 2-0093	85° achter
40° achter	2-0062 t/m 2-0065	2-0082 t/m 2-0085	42° achter

tabel 8 Hoeken waarbij zowel rooster 5 als rooster 11 tonaal geluid opleverden

Gecombineerde grafieken, wederom per hoek en meetserie, zijn te vinden in bijlage 2, figuur 4 t/m 6 aldaar.

Opvallend in deze vergelijking is het bij een lagere snelheid optreden van pieken bij het (scherpkantig) rooster 5 die bij het afgeronde exemplaar pas bij een hogere snelheid optreden. Hiervan is sprake bij meting 2-0071 (piek bij 4348 Hz, ontbreekt in 2-0091) en 2-0063 (5293 Hz, duidelijk anders in 2-0083). Dit terwijl e.e.a. voor het overige sterk gelijkend is, zeker voor de laagste en hoogste snelheden (10 en 25 m/s). In de laatste grafiek (achter, bij een hoek van 42°) heeft rooster 11 een meer tonaal karakter en een duidelijk hoger absoluut niveau (+9 dB).

Roosters 6 en 12
Aanstroming aan de voorzijde levert eenzelfde beeld op als de voorgaande twee roostercombinaties, veel overeenkomsten en een enkele hoek (-9° voor) waarbij een van beide wel en de ander niet produceert. Bij aanstroming vanaf de achterzijde is dat niet langer het geval: beide roosters leveren bij een verschillende hoek (78° vs. -38°) tonaal geluid op. Zoals verwacht hebben de bijbehorende metingen (2-0021 e.v. respectievelijk 2-0043 e.v.) dan ook niets met elkaar gemeen.

rooster **6** **scherpkantig**	mazen 49.99x49.99; draagstaaf 40x2 scherpkantig vs. afgerond		rooster **12** **afgerond**
90° voor	2-0030 t/m 2-0033	2-0053 t/m 2-0056	89° voor
72° voor	2-0025 t/m 2-0029	2-0049 t/m 2-0052	82° voor

tabel 9 Hoeken waarbij zowel rooster 6 als rooster 12 tonaal geluid opleverden

De verschillen tussen roosters 6 en 12 in de twee grafieken (bijlage 2, figuur 7 en 8) zijn ronduit minimaal, de gebruikte afwerking laat geen effect zien.

Totaalbeeld
De verschillen in afwerking tussen de proefstukken blijken slechts beperkte invloed te hebben; er is zeker sprake van een behoorlijk grote mate van overeenkomst in het geval dat beide roosters onder eenzelfde hoek tonaal geluid produceren.

Over het algemeen is er echter geen "winnaar" aan te wijzen; er is geen sprake van dat een van beide geteste afwerkingen duidelijk gevoeliger is voor (tonaal) windgeluid: noch voor het fenomeen tonaal geluid onder invloed van wind op zich, noch voor wat betreft de behaalde geluidsniveaus. Daarbij moet worden aangetekend dat de daadwerkelijke verschillen tussen de afwerkingen in dit geval ook zeer gering waren, dusdanig zelfs dat er met het blote oog nauwelijks verschillen zichtbaar waren. Met een veel grotere mate van afronding zouden mogelijkerwijs grote(re) verschillen gevonden kunnen worden. De praktijkervaring van een aantal van de geïnterviewde bureaus en de roosterleverancier wijzen in ieder geval in die richting. Ook uit de literatuur is significante invloed van afronden bekend, bijvoorbeeld op de waarden van het Strouhalgetal (zie paragraaf 3.3.2) Het in de windtunnel beproeven van dergelijke roosters in extra metingen zou daarover definitief uitsluitsel kunnen geven.

5.7.2 Dimensies van de draagstaaf

De beproefde roosters hebben een drietal verschillende afmetingen draagstaaf, namelijk 30x3, 30x2, en 40x2 mm; de verhouding tussen hoogte en dikte van bedraagt daarmee respectievelijk 10:1, 15:1, en 20:1. Deze verhouding is bij metingen aan losse strips van belang gebleken.

Net als in het geval van de afwerking van de roosters wordt er gekeken naar de resultaten waarbij onder vergelijkbare hoeken tonaal geluid werd waargenomen, alleen varieert ditmaal uiteraard de draagstaaf terwijl de overige parameters (afwerking, maasgrootte, afwerking) constant worden gehouden. Hiertoe dienen achtereenvolgens rooster 1 en 2, 1 en 3, 2 en 3, 4 en 5, 4 en 6 alsmede 5 en 6 te worden vergeleken.

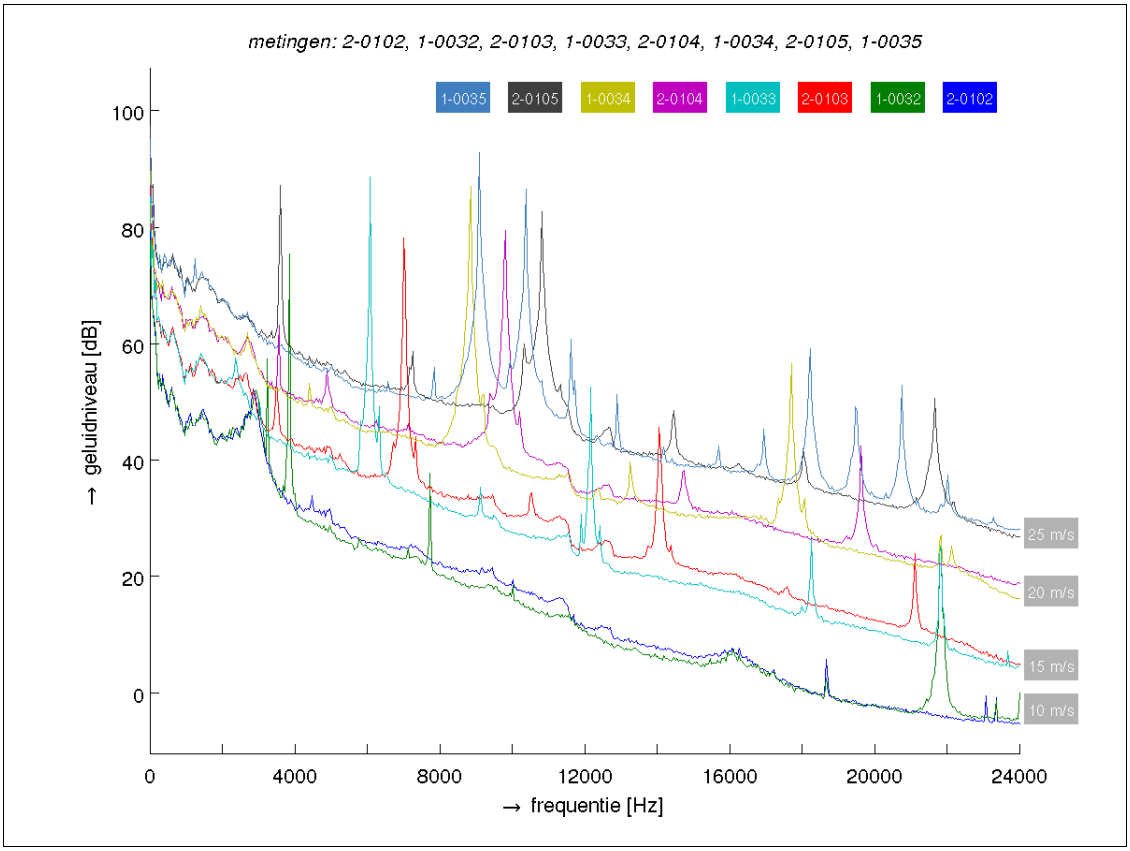
Roosters 1 en 2
Geen overeenkomende hoeken.

Roosters 1 en 3
Van alle hoeken waaronder tonen zijn gemeten is er slechts eenmaal sprake van een relevante set met dichtbij elkaar gelegen hoekverdraaiingen.

rooster **1** **draagst. 30x2**	mazen 33.33; draagstaaf **30x2** resp. **40x2**		rooster **3** **draagst. 40x2**
-37° achter	2-0102 t/m 2-0105	1-0032 t/m 1-0035	-30° achter

tabel 10 Hoeken waarbij zowel rooster 1 als rooster 3 tonaal geluid opleverden

Direct valt in figuur 49 op dat de serie met de hoogste pieken van beide roosters een vergelijkbaar verloop kent, zij het dat rooster 3 al bij lagere snelheid een toon oplevert en een iets lagere frequentie heeft dan nummer 1; voor de aanwezige harmonische boventonen (goed zichtbaar bij 15 en 20 m/s) geldt uiteraard hetzelfde. Slechts bij 25 m/s verschillen beide roosters: zo kent rooster 3 in meting 1-0035 een tweetal pieken rond 10 kHz, doch rooster 1 in 2-0105 slechts een enkele.



figuur 49 Twee meetseries van meetseries die onderling verschillen in de afmetingen van de draagstaaf (30x2 respectievelijk 40x2 mm). Het beeld is sterk gelijkend; slechts de frequenties van de pieken bij rooster 1 (30x2 mm, metingen 2-0102 t/m 2-0105) zijn hoger.

Roosters 2 en 3
Bij deze combinatie komen twee hoeken in aanmerking voor een onderlinge vergelijking.

rooster **2** **draagst. 30x3**	mazen 33.33; draagstaaf **30x3** resp. **40x2**		rooster **3** **draagst. 40x2**
35° achter	2-0126 t/m 2-0129	1-0036 t/m 1-0039	35° achter
-29° achter	2-0130 t/m 2-0133	1-0032 t/m 1-0035	-30° achter

tabel 11 Hoeken waarbij zowel rooster 2 als rooster 3 tonaal geluid opleverden

Deze beide vergelijking tussen rooster 2 en 3 komen door de vele pieken enigszins chaotisch over; het ter hand nemen van de individuele meetseries in bijlage 1 kan allicht

verhelderend werken. Toch zijn de overeenkomsten duidelijk zichtbaar: in alle gevallen kenmerkt het beeld bij 15 en 20 m/s zich door groepjes pieken met frequenties die dicht bij elkaar liggen en in frequenties stijgen wanneer de snelheid hoger wordt, terwijl dit bij 25 m/s overgaat in een veel opgeruimder beeld met een beperkter aandeel zeer brede pieken. Bij 10 m/s zijn bij rooster 2 (meting 2-0126, 2-0130) al meerdere (aanzetten van) pieken zichtbaar, terwijl daar bij rooster 3 duidelijk minder sprake van is.

Over het geheel genomen komt het beeld aardig overeen, en verschillen voornamelijk de frequenties. Dit wekt de suggestie dat er sprake is van eenzelfde mechanisme, waarbij de frequentieverschillen hun oorsprong vinden in de verschillende afmetingen van de draagstaven.

Roosters 4 en 5
Geen overeenkomende hoeken.

Roosters 4 en 6
Idem.

Roosters 5 en 6

rooster **5** **draagst. 30x3**	mazen 49.99; draagstaaf **30x3** resp. **40x2**		rooster **6** **draagst. 40x2**
80° achter	2-0070 t/m 2-0073	2-0021 t/m 2-0024	78° achter
83° voor	2-0066 t/m 2-0069	2-0030 t/m 2-0033	90° voor

tabel 12 Hoeken waarbij zowel rooster 5 als rooster 6 tonaal geluid opleverden

Significante verschillen worden slechts gevonden bij de metingen met 25 m/s; met name de extra –en zeer luide- toon van een relatief lage 2495 Hz in de tweede grafiek (bijlage 2, figuur 13) valt op bij rooster 6; datzelfde rooster is ook de meest productieve in de eerste vergelijking. NB: meting 2-0073 van rooster 5 is bij 22.5 m/s (duidelijk herkenbaar aan het lagere ruisniveau), bij 25 m/s gaf dit rooster geen tonaal geluid meer.

Totaalbeeld
Het aantal hoekverdraaiingen dat voldoende bij elkaar in de buurt zat en daarmee in aanmerking kwam voor bovenstaande onderlinge vergelijkingen was veel geringer dan bij de parameter "afwerking"; in de helft van de roostercombinaties kwam geen enkele fluitende hoek overheen. Hieruit alleen al blijkt dat de "draagstaaf" een veel grotere invloed heeft op het ontstaan van tonaal geluid dan de geringe verschillen in afwerking tussen de beproefde "scherpkantige" en "afgeronde" roosters. Voor de absolute geluidniveaus lijken de afmetingen van de draagstaaf niet van belang.

Desondanks werd er bij de wel voor vergelijking in aanmerking komende combinaties wel terdege samenhang ontdekt. In die situatie kwam het aantal pieken en hun vorm sterk overeen, maar verschilden de frequenties van de pieken al naar gelang de draagstaaf. Wanneer deze pieken horizontaal verplaatst zouden worden zou er sprake zijn van

praktisch volledige overlap. Dit suggereert dat aan deze tonen een en hetzelfde mechanisme ten grondslag ligt, en biedt aanknopingspunten voor het vinden van dan wel vergelijking met de literatuur.

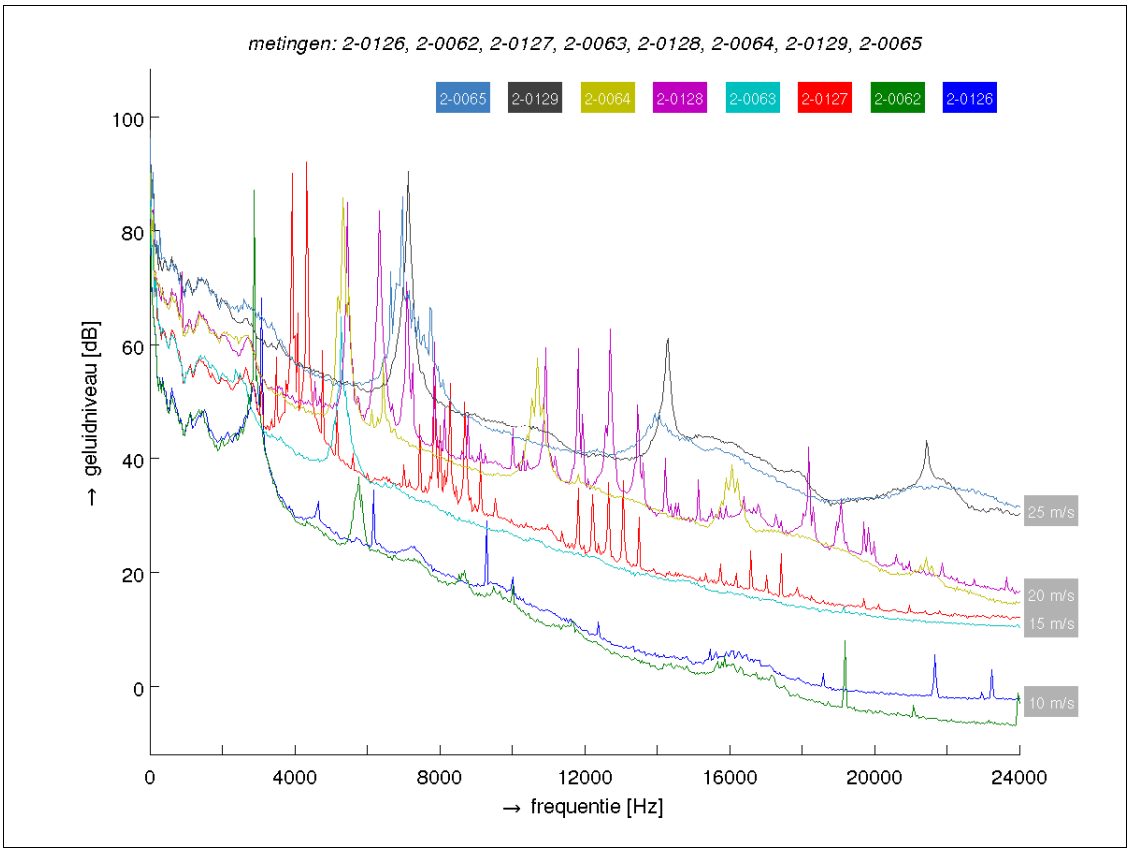
5.7.3 Maaswijdte

Allereerst worden de resultaten van roosters met een tweetal verschillende maasgroottes (33.33x33.33 en 49.99x49.99 mm) onderling vergeleken – met draagstaven en afwerking constant. Op het eerste gezicht lijken er redelijk weinig overeenkomende hoeken zijn waarbij – met slechts de maasgrootte verschillend - sprake is van tonaal geluid. Daar waar dat wel het geval is gaat het zonder uitzondering om hoeken die zich ofwel in de buurt van 40° bevinden, ofwel bij een stand circa loodrecht op de stroming (90°).

Roosters 2 en 5

rooster **2** **maasw. 33.33**	draagstaaf 30x3; mazen **33.33** resp. **49.99**		rooster **5** **maasw. 49.99**
35° achter	2-0126 t/m 2-0129	2-0062 t/m 2-0065	40° achter
77° achter	2-0122 t/m 2-0125	2-0070 t/m 2-0073	80° achter

tabel 13 Hoeken waarbij zowel rooster 2 als rooster 5 tonaal geluid opleverden



figuur 50 Deze twee meetseries laten sterke verschillen zien bij 15 en 20 maar niet bij 10 en 25 m/s

De vergelijking tussen metingen 2-0126 t/m 2-0129 en 2-0062 t/m 2-0065 in figuur 50 laat bij 10 en bij 25 m/s volledig overeenkomst zien voor zowel het optreden van pieken als hun frequentie. Bij de tussenliggende snelheden is een duidelijk ander beeld te zien, waarbij in 2-0063 en 2-0064 een eenvoudig patroon van een grondtoon met enkele harmonische boventonen zichtbaar is, terwijl 2-0127 en 2-0128 eenzelfde maar dan zeer grillig patroon laten zien met collecties van nabijgelegen pieken.

De tweede set meetseries kent daarentegen juist veel overeenkomst bij alle snelheden, behalve bij 25 m/s.

Roosters 7 en 10

rooster **7** **maasw. 33.33**	draagstaaf 30x2; mazen **33.33** resp. **49.99**		rooster **10** **maasw. 49.99**
41° voor	2-0134 t/m 2-0137	1-0019 t/m 1-0022	47° voor
-36° achter	2-0139 t/m 2-0142	1-0023 t/m 1-0026	-42° achter

tabel 14 Hoeken waarbij zowel rooster 7 als rooster 10 tonaal geluid opleverden

Wederom zien we een meting (1-0026) waar bij een snelheid van 25 m/s geen toon resteert, terwijl deze wel overtuigend aanwezig is bij het andere rooster in meting 2-0137. Bij 20 m/s was eerstgenoemde rooster (7, maasgrootte 33.33 mm) ook al relatief zwak en veel breder dan rooster 10 waarvan de geluidproductie juist een uitgesproken tonaal karakter kent, met scherpe pieken. Blijkbaar beperkt onder deze hoekverdraaiing bij aanstroming vanaf de voorzijde een kleine maasgrootte het optreden en de sterkte van tonen. In de tweede grafiek, waarbij aanstroming vanaf de achterzijde van het rooster plaatsvindt, is het absolute niveau voor rooster 7 bij 20 m/s nog behoorlijk hoog, maar dooft het redelijk snel uit wanneer de snelheid tot 25 m/s wordt opgevoerd. Dit in tegenstelling tot rooster 10, waar een dergelijk afname niet gevonden wordt.

Voorts valt in de tweede grafiek een aantal tonen op rond 3 kHz, die niet van toonhoogte veranderen bij toenamen van de snelheid en alleen aanwezig zijn in rooster 10. Hierover later meer.

Roosters 3 en 6

rooster **3** **maasw. 33.33**	draagstaaf 40x2; mazen **33.33** resp. **49.99**		rooster **6** **maasw. 49.99**
-89° voor	1-0040 t/m 1-0043	2-0030 t/m 2-0033	90° voor

tabel 15 Hoeken waarbij zowel rooster 3 als rooster 6 tonaal geluid opleverden

Het beeld komt goed overeen, slechts de frequenties niet. De zeer luide toon van een relatief lage frequentie van 2495 Hz valt op bij rooster 6, rooster 5 kent ter plaatse weliswaar ook een piek maar deze is duidelijk lager terwijl een dergelijk verschil niet bestaat bij de overige luide pieken die zichtbaar zijn bij 25 m/s.

Totaalbeeld
Roosters 2 en 5 (+77° vs. +80°) alsmede 3 en 6 (-89° vs. 90°) kennen weliswaar tonaal geluid onder vergelijkbare hoeken, maar dit is juist bij aanstroming (min of meer) haaks op de stromingsrichting - daar waar de stroming het minst beïnvloed wordt door de afstand tussen opeenvolgende draagstaven. Mogelijke andere overeenkomsten liggen allemaal in het gebied waar deze invloed juist maximaal zou zijn (45° +/- 10°) en het verschil in maasgrootte tussen 33 en 49 mm klaarblijkelijk onvoldoende is om verschil te maken.

5.8 Vasthouden van frequenties bij toename van de snelheid

Geïnspireerd door de puntenplot van de hoekverdeling, en dan vooral de daar geconstateerde voorkeur voor bepaalde hoeken, zijn deze metingen per cluster onderling vergeleken, te beginnen met degene waarvoor geldt 70 <= |hoek| <= 90. Het gaat dus om roosters beproefd in of nabij de verticale stand, ongeacht of de aanstroming van de voor- of de achterzijde plaatsvond. Deze metingen blijken zonder uitzondering tonen te kennen waarbij over meerdere snelheidsstappen dezelfde frequentie gehandhaafd blijft; dit in tegenstelling tot het verwachte, en (zo blijkt) bij aanstroomhoeken tussen 20 en 60 graden gebruikelijke patroon waarbij bij toenemende snelheid ook de frequentie (en het absolute niveau) toenemen. Daar treedt slechts bij uitzondering het beschreven mechanisme op, namelijk bij meetserie die beginnen bij 2-0062 (40° achter), 2-0102 (-37° achter) en 2-0139 (-36° achter) uit een totaal van meer dan 20 meetseries. Zie tabel 16:

n°	*Meting*	*hoek [°]*	*golflengte [mm]*	*maasgrootte [mm]*
1	2-0106 etc. 2-0094 etc. 2-0110 etc.	90 a. 76 v. -74 a.	59-64 59 59	**33.33 x 33.33**
2	2-0122 etc.	77 v.	59, 69-73	
3	1-0040 etc.	-89 v.	61-62	
4	(geen)			**49.99 x 49.99**
5	2-0066 etc. 2-0070 etc.	83 v. 80 a.	48, 80 48, 80	
6	2-0021 etc. 2-0030 etc. 2-0025 etc.	78 a. 90 v. 72 v.	49-51, 83 49, 83 49-51, 83-84	
7	2-0143 etc.	84 a.	36, 59-61	**33.33 x 33.33**
8, 9	-			
10	(geen)			**49.99 x 49.99**
11	2-0074 etc.	85 v.	48, 80	
12	2-0049 etc. 2-0053 etc.	82 v. 89 v.	49, 83-84 49, 83	

tabel 16 Meetseries waar bij gelijke hoek de piekfrequenties gelijk bleven bij opeenvolgende snelheidsstappen. Dit blijkt slechts bij een beperkt aantal golflengtes op te treden, waardoor een link met de geometrie van het rooster gelegd kan worden.

Onmiddellijk valt de afhankelijkheid van de maasgrootte op, en daarmee een directe link tussen het mechanisme dat verantwoordelijk is voor dit specifieke fenomeen en de geometrie van de rooster. De precieze aanstroomhoek per geval is daarentegen niet relevant, de waarden zijn hetzelfde bij een hoek van circa 70° als bij loodrechte aanstroming.

In het geval van rooster met mazen van 33.33 gaat het in de bulk van de gevallen om golflengtes van circa 59-61 mm, hetgeen neerkomt op iets minder dan tweemaal de afmeting van de mazen, en eenmaal om 36 mm – dicht bij de maasgrootte van 33.33. Tevens is 60 mm bij de roosters met een draagstaaf van 30 millimeter circa tweemaal de hoogte van de roosters. Aangezien de maas -wijdte en -diepte van de beproefde roosters niet veel verschillen is het niet direct duidelijk welke van deze beiden in welke gevallen bepalend is. Datzelfde geldt, gezien de vierkante roostermazen, voor de richting(en) in het vlak van het rooster.

De resultaten van roosters 5, 6, 11 en 12, beiden roosters met maaswijdte van 49.99 en een roosterdikte van 40 mm, suggereren dat meer dan een afmeting bepalend moet zijn: beide effecten zijn in dezelfde meetseries zichtbaar (zowel golflengten gelijk aan de maaswijdte als aan tweemaal de roosterdikte) zonder dat er sprake is van de precieze meervouden van elkaar die zo typisch zijn voor boventonen.

Bij roosters met een maasgrootte van 49.99 is er sprake van een tweetal "vastgehouden" golflengtes. De laagste daarvan varieert tussen de 48 en 51 mm, en komt daarmee exact overeen met de afmeting van de mazen zelf; de andere golflengte bedraagt 80 à 83 mm. Die laatste maat komt sterk in de buurt van een diagonaal van het "blokje" van iedere roostermaas (49 x 49 x hoogte draagstaaf, ofwel 76.8 mm bij draagstaven van 30 mm, 81.2 mm bij 40 mm).

Behalve bij aanstroomhoeken groter dan 70° werd de situatie dat frequenties constant bleven over meerdere snelheidsstappen ook drie maal (op 21 meetseries) aangetroffen bij hoeken kleiner dan 70°, aan de andere kant van de "leegte" die in de puntenplot rond de 60° zichtbaar is. De aanstroomhoeken waren 40° (achter), -37° (achter) en -36° (achter). Dit zou suggereren dat er voor dit mechanisme een ondergrens is voor wat betreft de aanstroomhoek; de literatuur biedt hier de nodige handgrepen.

Opgemerkt moet worden, dat dit niet de enige tonen zijn die optreden; e.e.a. komt geregeld voor in combinatie met andere tonen die op hun beurt wel een toenemende frequentie kennen bij toenemende windsnelheden. Dat duidt op de mogelijkheid dat er niet alleen meerdere mechanismen kunnen bestaan, maar dat deze bij dezelfde snelheden actief kunnen zijn.

Deze metingen waarin bepaalde frequenties worden vastgehouden, en er meerdere richtingen zijn waarin dit kan gebeuren, hebben veel weg van Parker-modes (paragraaf 3.4). Het zou in dat geval de (0,1)- of (1,0)-moden betreffen in geval van één vaste frequentie, en een (1,1)-mode indien meerdere frequenties bij dezelfde meetsnelheid worden vastgehouden zoals in meetserie 2-0049 (zie ook figuur 54).

5.9 Dimensieloze vergelijking van de meetresultaten

5.9.1 Vergelijking op basis van het Strouhalgetal

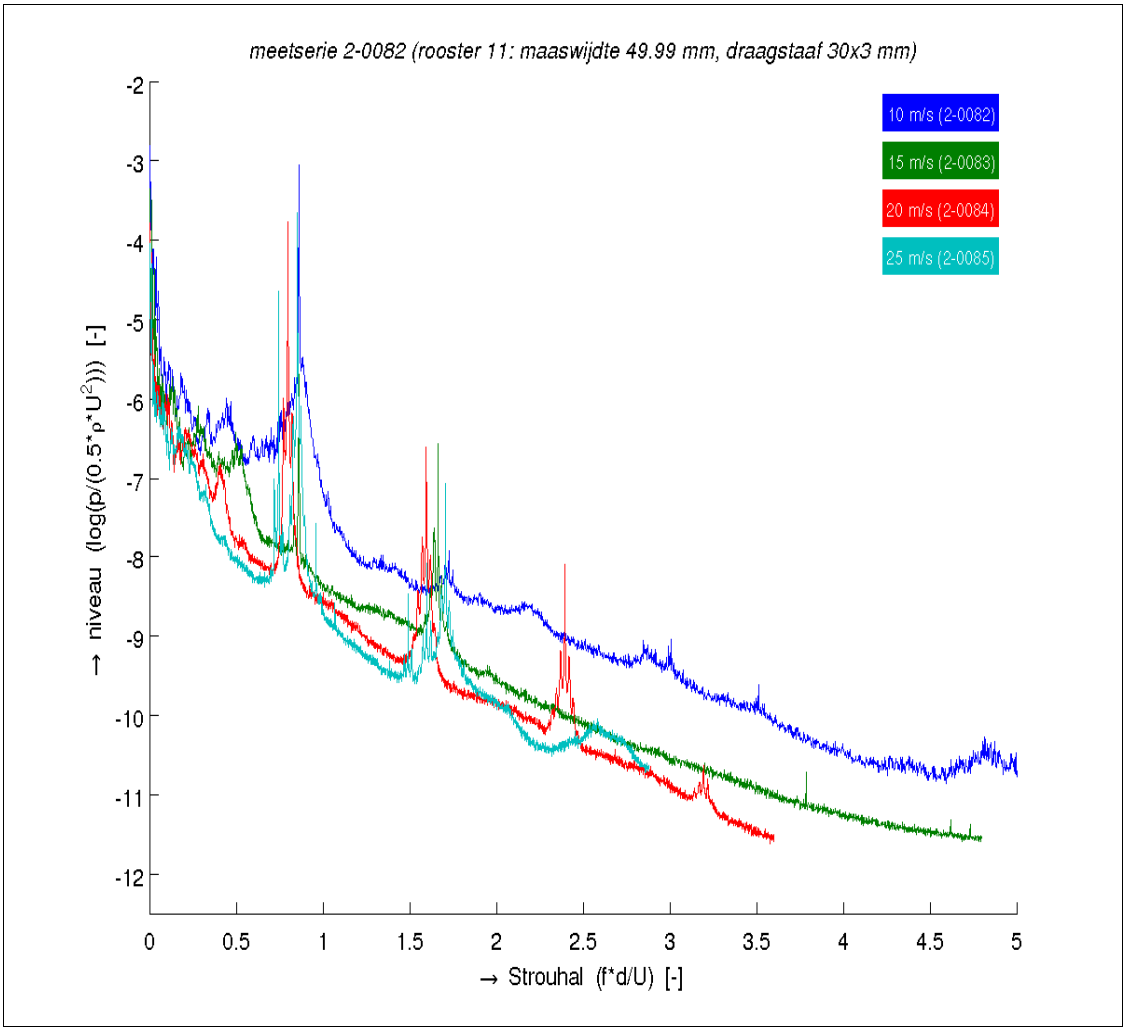
Om beter te kunnen vergelijken op excitatiemechanismen zonder dat zaken als windsnelheid daarbij in de weg zitten is het mogelijk de resultaten met behulp van het dimensieloos Strouhalgetal weer te geven:

$$St = \frac{f \bullet l}{U} \quad [-] \tag{13}$$

Als kenmerkende afmeting l wordt in dit geval de dikte van de draagstaaf genomen, zoals doorgaans ook wordt gedaan bij onderzoek naar platen in een stroming. Het Strouhalgetal wordt per meetserie in grafieken uitgezet tegen de logaritme van de gemeten geluidsdruk. Deze is eveneens dimensieloos gemaakt, ditmaal door te delen door de dynamische druk. Hierdoor worden de verschillen op de y-as ten gevolge van de windsnelheid geëlimineerd. Er is bovendien ook geen ijkcorrectie en dergelijke toegepast, aangezien die alleen relevant zijn voor het bepalen van het absolute geluidniveau.

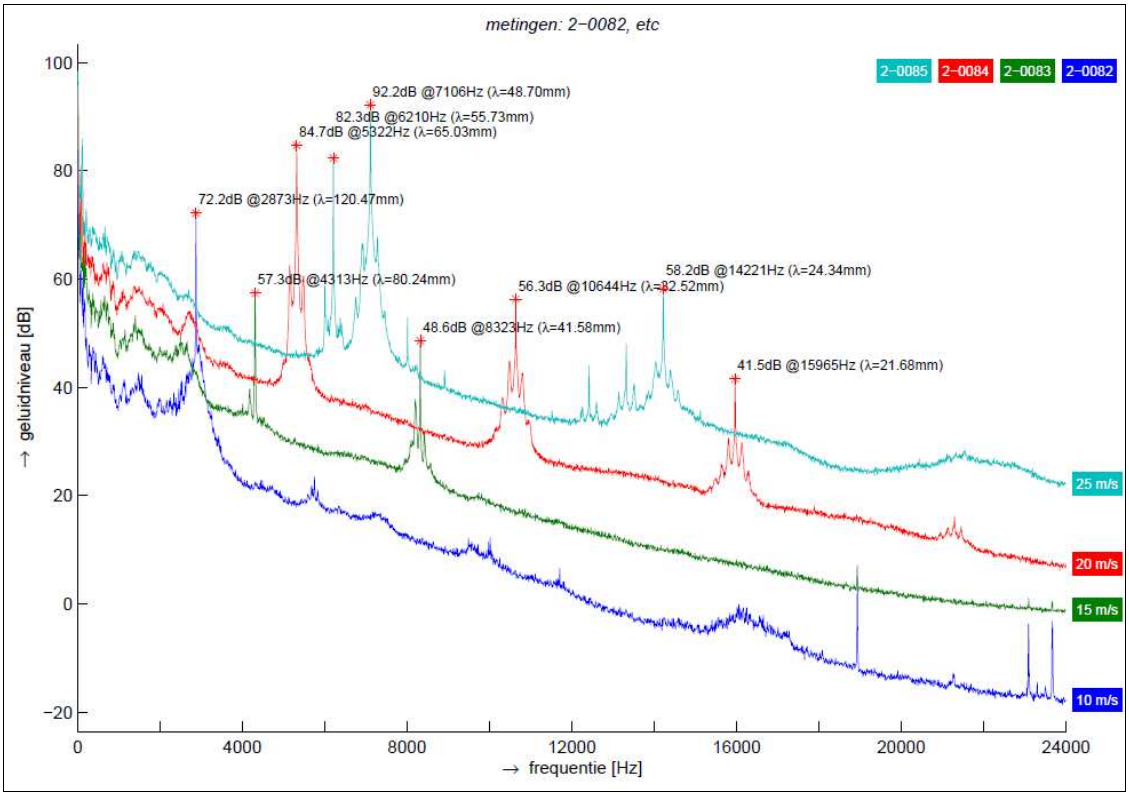
$$y = \frac{p_{gemeten}}{p_{dynamisch}} = \frac{p_{gemeten}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad [-] \tag{14}$$

Op deze manier kan zichtbaar gemaakt worden voor welke waarden van het Strouhalgetal er sprake is van tonaal geluid. Een typisch voorbeeld van een dergelijk grafiek is te vinden in figuur 51; de grafieken van alle meetseries zijn opgenomen in bijlage 3.



figuur 51 Een serie metingen aan een rooster bij meerdere snelheden, bij een vaste hoek. Duidelijk is dat tonen bij verschillende snelheden bij dezelfde waarden van het Strouhalgetal optreden (0.8 en veelvouden daarvan), en dat de meting bij 10 m/s (in blauw) afwijkt van de overige snelheden.

figuur 51 laat zien dat dit rooster onder de gegeven hoek tonaal geluid oplevert bij steeds dezelfde waarden van het Strouhalgetal, die bovendien meervouden van elkaar zijn (St = 0.8, 1.6, en 2.4). De conclusie dat dit een grondtoon met een tweetal boventonen betreft ligt voor de hand; een blik op een plot van dezelfde meetserie waarbij als vanouds de frequentie is uitgezet tegen het geluidsniveau in decibel bevestigt dit ook:



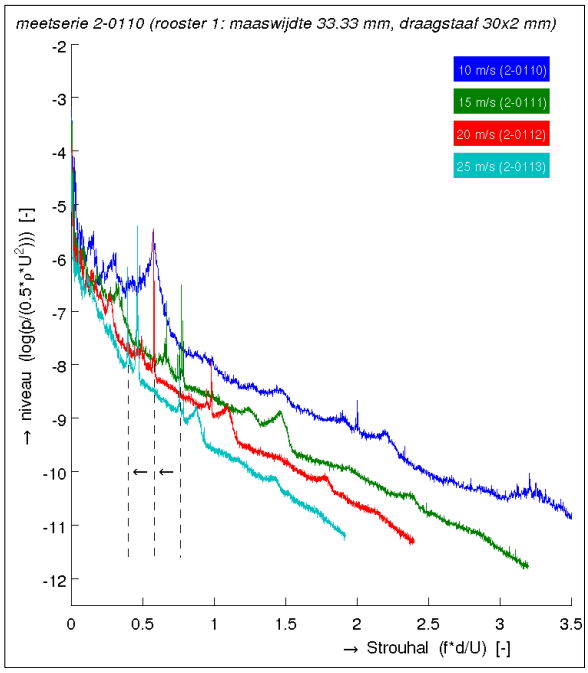
figuur 52 Ter vergelijking dezelfde meetseries als in figuur 51, ditmaal in de gebruikelijke weergave waarbij de frequentie is uitgezet tegen het geluidsniveau. De voordelen van het uitdrukken van de resultaten in het dimensieloze Strouhalgetal voor het vergelijken van metingen bij verschillende snelheden zijn snel duidelijk

Voorts valt in figuur 51 op, dat de meting bij 10 m/s (blauwe lijn) duidelijk afwijkt van de meetwaarden van de drie andere snelheden (15, 20 en 25 m/s), zowel door de duidelijke hogere ligging op de verticale as, als door het afwijkende beeld voor wat betreft de veel bredere piek. Dit gegeven is zichtbaar bij veel meetseries, uitgezonderd 2-0062 en (in iets mindere mate) 2-0086. Deze twee series behoren tot de relatieve zeldzame waar bij een windsnelheid van 10 m/s al sprake was van duidelijk hoorbaar tonaal geluid. Het duidelijke afwijken van de meetwaarden bij 10 m/s uitgedrukt in het Strouhalgetal kan daarmee worden opgevat als bevestiging van wat in de windtunnel ook al naar voren kwam, namelijk dat de minimumsnelheid waarbij aan deze roosters tonaal geluid optreedt –enkele uitzonderingen daargelaten– tussen de 10 en 15 m/s ligt.

De uit paragraaf 5.3 cq. figuur 40 bekende storende toon van circa 21800 Hz komt (wanneer aanwezig) in de Strouhalgrafieken terug als een piek bij $St = 2.9$ bij een windsnelheid van 10 m/s, en als $St = 4.4$ bij 15 m/s.

Eerder is gebleken (zie paragraaf 6.8) dat "vasthouden" van dezelfde frequenties bij meerdere snelheden kan optreden, waarbij de afmetingen van de door de roostermazen gevormde kubussen bepalend zijn voor de optredende frequenties. Dergelijke metingen laten eenmaal uitgedrukt in het Strouhalgetal juist een uitgesproken karakter van per snelheid pieken bij andere Strouhalwaarden zien. Veelal is dit herkenbaar aan het bij toenemende windsnelheid stapsgewijs afnemen van de waarde van het Strouhal (de frequentie blijft immers gelijk) totdat bij 20 of 25 m/s waarden van *St < 0.4* worden bereikt; zie figuur 53.

Duidelijk is dan ook dat het om een totaal ander mechanisme gaat.



figuur 53 Deel van een grafiek behorende bij meting waar frequenties werden vastgehouden uitgedrukt in het Strouhalgetal. De pijlen geven de ontwikkeling aan bij toename van de windsnelheid.

5.9.2 Invloed van c/t

Van de verhouding tussen de dikte en de lengte (in de stromingsrichting) van een element is uit de literatuur bekend dat deze invloed heeft of de manier waarop wervels gevormd worden. Wanneer de in het Strouhalgetal uitgedrukte metingen per maasgrootte worden opgedeeld op basis van deze verhouding, en daarbinnen voor iedere groep de typische waardes van het Strouhalgetal wordt vastgesteld waarbij tonaal geluid optreedt, levert dat de volgende tabel op:

c/t	maaswijdte 33.33x33.33 mm	maaswijdte 49.99x49.99 mm
10:1 (30x3 mm)	0.7 – 1.1	0.6 – 1.1
15:1 (30x2 mm)	0.6 – 1.0	0.6 – 0.8
20:1 (40x2 mm)	0.4 – 0.9	0.2 – 0.9

tabel 17 Typische bandbreedte waarin dominante waarden van het Strouhalgetal liggen bij verschillende waarden van de verhouding c/t op, per maaswijdte. Eventuele boventonen zijn niet meegenomen in deze tabel, de bovengrens geeft dus geen maximale waarde van het Strouhalgetal aan. Bij hogere waarden van c/t en grotere mazen daalt de waarde.

In deze tabel zijn waardes behorende bij boventonen niet meegenomen; de tabel is dus niet te lezen als een maximum mogelijke waarde waarbij tonaal geluid kan voorkomen voor de gegeven roosterconfiguratie. Wel zijn enkele trends zichtbaar: de roosters met grotere mazen kennen iets lagere dominante waardes van Strouhal voor tonaal geluid, en datzelfde geldt naarmate de waarde van c/t groter is. In geval van tonen bij de laagste waarden voor Strouhal (*0.2 <= St <= 0.4*) betreft het meest roosters waarvan uit paragraaf 5.8, tabel 16 bekend is dat er frequenties worden vastgehouden over een range aan windsnelheden.

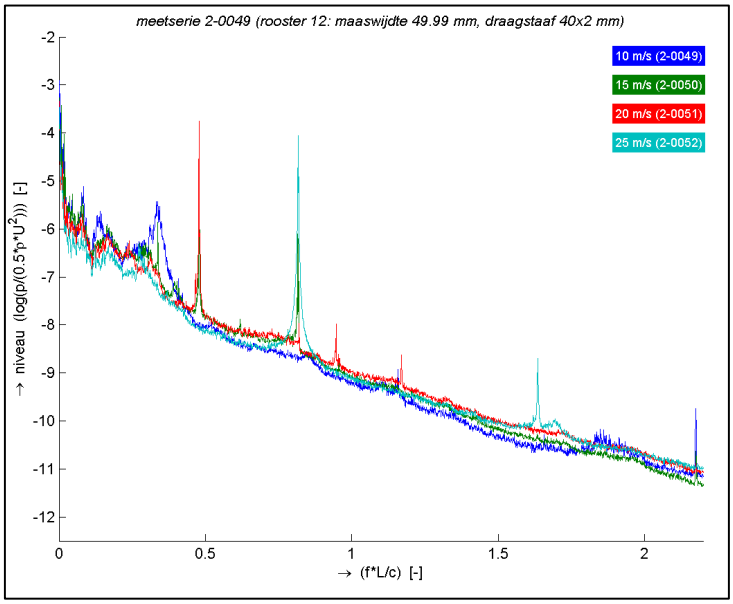
5.9.3 Elimineren van de invloed van de maasafmetingen

Een andere mogelijkheid om de resultaten dimensieloos te maken is door middel van:

$$y = \frac{f \bullet l}{c} \quad [-] \qquad (15)$$

waarbij voor de kenmerkende afmeting *l* kan worden gekozen voor de dikte van het rooster (i.e., de hoogte van de draagstaaf) of de maaswijdte, en *c* de snelheid van het geluid is. De verticale as wordt wederom dimensieloos gemaakt door de meetwaarden te delen door de dynamische druk, volgens de werkwijze bekend van vergelijking (14), waardoor de invloed van de snelheid op het geluidniveau wegvalt.

Dikte van de rooster
Dimensieloos maken met behulp van (15) heeft tot gevolg dat de invloed van de hoogte van de draagstaaf wordt geëlimineerd. Binnen een enkele meetserie (van vier metingen bij verschillende snelheden) leidt dit niet tot een verschuiving van de pieken op de horizontale as (zie figuur 54) ten opzichte van de eerdere niet-dimensieloze weergave zoals in paragraaf 5.7, omdat de frequentie dan immers in alle gevallen met dezelfde constante wordt vermenigvuldigd. Wel bruikbaar is deze werkwijze bij het onderling vergelijken van metingen afkomstig van roosters met verschillende hoogtes van de draagstaaf en het op basis daarvan bepalen in hoeverre die parameter van belang is. Daartoe werden een aantal roosters vergeleken die slechts daarin verschilden:



figuur 54 Het op deze wijze dimensieloos maken leidt binnen een meetserie niet tot verschillen op de x-as (zoals Strouhal dat wel deed) maar elimineert op de y-as wel de invloed van de snelheid. De twee vastgehouden frequenties in deze meting zijn zeer goed herkenbaar.

roosters met draagstaaf 30x2	*roosters met draagstaaf 40x2*
1	3
4	6
10	12

tabel 18 Roosters die onderling zijn vergeleken op basis van de hoogte van de draagstaaf).

Geen van de bij deze combinatie van roosters horende meetseries liet systematische overeenkomsten zien die op een doorslaggevende invloed van de geteste parameter zouden duiden.

Maaswijdte
Eenzelfde vergelijking kan worden gedaan door dimensieloos te maken volgens (15) op basis van de maaswijdte. De volgende roosters worden vergeleken:

roosters met maaswijdte 33.33	*roosters met maaswijdte 49.99*
1	4
2	5
3	6

tabel 19 Roosters die dimensieloos zijn vergeleken op basis van het verschil in maaswijdte.

Ook voor deze parameter geldt dat er geen overeenkomst wordt gevonden.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Windgeluid aan gebouwen en constructies is geen onbekende voor zowel de beroepspraktijk als de literatuur, en wordt vooral als zeer hinderlijk ervaren wanneer het een toon betreft.

Van de op dit gebied bekende probleemgevallen wordt een verhoudingsgewijs groot deel veroorzaakt door roosters, wat ook in de inventarisatie van de beroepspraktijk niet onopgemerkt bleef. Ook andere constructiedelen en ornamenten kunnen tonen opleveren, met name lamellen en spleten. Van CFD werd met enige regelmaat de hoop uitgesproken dat het in de toekomst een nuttig hulpmiddel kan zijn bij de aanpak van dit soort problemen. Niet in de laatste plaats door het veelal ontbreken van mogelijkheden dieper op het onderwerp in te gaan dan het oplossen van dat ene specifieke, urgente situatie waar hinder door tonaal geluid optrad, blijven de omvang van dit probleem en de achterliggende oorzaken helaas buiten schot.

Wetenschappelijk onderzoek op dit gebied legt de focus op stroming rond objecten; het optreden van geluid is daarbij in eerste instantie een nevenverschijnsel. Belangrijk werk op dit specifieke gebied is verricht door Parker en, zeker in het geval van roosters, door Spruyt begin jaren ‘70. Toch zijn de precieze mechanismen en hun onderlinge samenhang die uiteindelijk leiden tot tonaal windgeluid nog niet geheel opgehelderd. De rol van CFD is daarbij vooralsnog beperkt doordat de rekenkracht vooralsnog ontbreekt om effectief om te kunnen gaan met het grote verschil tussen de schaal waarop akoestische en stromingsgerelateerde verschijnselen optreden.

Uit in het kader van dit onderzoek gedane windtunnelmetingen aan roosters blijken optredende tonen verklaarbaar vanuit ten minste twee verschillende mechanismen:

1. De piekfrequenties nemen geleidelijk toe bij toenemende windsnelheid, en volgen daarbij een relatie die uitgedrukt kan worden in het dimensieloze Strouhalgetal. In de literatuur is hier veel werk verricht aan tweedimensionale stroming rond platen, waarbij de nodige wetmatigheden werden gevonden. Roosters vormen een complexe driedimensionale variant hierop. Niet alleen de afmetingen van de strips waaruit het rooster is opgebouwd hebben invloed, maar ook de onderlinge afstanden, hoek van aanstroming en de afwerking (afgerondingsstraal) spelen hierbij een belangrijke rol.
2. Toonhoogte is afhankelijk van de geometrie van de roostermazen, waarbij de maaswijdte en diepte van een rooster (of combinaties daarvan) bepalend zijn. Dit mechanisme is herkenbaar aan de constante toonhoogte over een range van windsnelheden; de relevante afmeting is steeds gelijk aan meervouden van een halve golflengte. Dit verschijnsel is in de literatuur bekend als een Parker-mode

en uitgebreid door Spruyt (1972) beschreven. Meerdere van dergelijk tonen kunnen tegelijkertijd optreden.

Alle beproefde roosters konden zonder problemen aan het fluiten worden gekregen in de windtunnel, doorgaans onder enkele –per rooster verschillende– specifieke hoeken. De gedane metingen geven geen aanleiding te denken dat vergelijkbare in de handel verkrijgbare roosters van gelijkwaardige dimensie en afwerking dramatisch andere resultaten zouden opleveren. De enige situatie die minder productief was, betrof het op monteren van de roosters met de veel kleinere vulstaven (10x2 mm) in de stroming. Hierbij was vrijwel alleen bij aanstroming loodrecht op het roostervlak sprake van tonaal geluid.

De enige mogelijkheid om zeker te zijn dat er geen tonaal windgeluid optreedt bij (redelijke scherpkantige) roosters is dan ook dit type niet toe te passen op plaatsen waar ze aan wind van meer dan 8 m/s zijn blootgesteld, tenzij er geverifieerde tegenmaatregelen worden gebruikt (afronden, coaten, etc.).

Het gemak waarmee ieder rooster aan het fluiten kon worden gebracht wordt enigszins gecompenseerd door de sterke afhankelijkheid van de hoek waaronder een toon wordt geproduceerd. Kleine verandering in de hoek leidden vaak al tot het volledig wegvallen van het tonaal geluid.

Al bij relatieve lage windsnelheden van 8 à 9 m/s treden luide tonen op, waarna bij verdere toename van de windsnelheid vrijwel altijd continue tonaal geluid aanwezig bleef tot en met de maximale geteste snelheid van 25 m/s. In de meeste gevallen ligt het begin van tonaal geluid tussen 10 en 15 m/s. Dit wordt nogmaals bevestigd door het duidelijk afwijken van de meetwaarden voor 10 m/s ten opzichte van de hogere snelheden, wanneer deze in dimensieloos worden gemaakt op basis van het Strouhalgetal en de dynamische druk.

Bij 25 m/s werd aan een rooster van slechts $1m^2$ ruim 110 decibel gemeten op circa 1.5 meter afstand. Met zulke luide bronnen hoeft van de vele honderden vierkante meters roosteroppervlakte op een gebouw als het Strijkijzer slechts een klein deel überhaupt tonaal geluid voort te brengen om voor grote problemen te zorgen. Een dergelijk project is zonder voorzorgsmaatregelen vragen om problemen.

Aan onderzoek naar stromingen rond objecten is in de wetenschap geen gebrek. De link met productie van tonaal geluid aan relatief complexe constructies is daarmee echter nog niet makkelijk gelegd. Zeker op detailniveau is die interactie nog geenszins helder. Dat is waarschijnlijk echter wel een voorwaarde om tot modelvorming over te gaan en accurate voorspellingen over het optreden van tonaal windgeluid aan constructies te kunnen doen.

6.2 Aanbevelingen

Van directe praktische waarde kan het in de windtunnel beproeven van roosters met een duidelijk afgerond profiel zijn. Hoewel de verschillen in afwerking tussen de twee sets in dit rapport beschreven proefstukken onvoldoende bleken om significante invloed te hebben op de mate en kenmerken van het (risico op) tonaal geluid, mag op basis van de praktijkervaringen bij de verschillende ingenieursbureaus alsmede de literatuur verwacht worden dat een duidelijker verschil meer invloed heeft. Het aanpassen van scherpe randen heeft in dat opzicht zijn waarde in de praktijk al meermalen bewezen, zodat dit een interessante vervolgmeting zou zijn.

Evenzeer kan aandacht worden besteed aan maatregelen gericht op het verhinderen van het optreden van tonaal geluid. Veel maatregelen die genomen worden zijn relatief simpel te implementeren, maar onduidelijk is of deze universeel succesvol kunnen worden toegepast. Daarbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan de bij het Expo-paviljoen in Hoek van Holland gebruikte oplossing waarbij een soort van gaas is aangebracht waarmee in ieder geval in die situatie het probleem windgeluid succesvol is verholpen.

Om meer duidelijkheid te krijgen over wat er precies gebeurt bij het passeren van het rooster, zou het zichtbaar maken van de stroming een aanzienlijke vooruitgang betekenen. Hierbij kan gedacht worden aan technieken zoals rook maar ook particle image velocimetry (PIV). Ook het meten van het drukverschil over de roostermaas kan waardevolle informatie opleveren.

Referenties

1 Blevins, "*Flow-induced vibration*", 2nd Ed., 1990

2 Frits van den Berg, Richard de Graaf, "*Hoge molens vangen veel wind II - geluidsbelasting door windturbines in de nacht*", Natuurkundewinkel Rijksuniversiteit Groningen, 2004

3 Hoffmans, Looijmans, "*Stromingsgeluid ten gevolge van wind rond bouwwerken*", NAG-journaal 146, mei 1999

4 Adviesbureau Peutz in de Haagsche Courant, 21 april 2004

5 New Scientist Tech, 4 augustus 2006

6 Manchester Evening News, "*Tower blows the whistle on Corrie*", 24 mei 2006, en "*Spiderman back for tower tour*", 27 augustus 2007

7 BBC Manchester, "*Can you hear it?*", 11 januari 2008

8 De Bruijn: "*Stromingsgeluid: een inleiding*"; Journaal van het Nederlands Akoestisch Genootschap

9 Ruud Hartman, "*Fluiten kan niet meer*", Geluid nr. 2, juni 1996, pag. 49-52

10 Naudascher & Wang, "*Flow induced vibrations of prismatic bodies and grids of prisms*", 1992, Journal of Fluids and Structures, Volume 7, Issue 4, pag. 341-373

11 R. Parker, "*Resonance effects in wake shedding from parallel plates: some experimental observations*", Journal of Sound and Vibration, 4(1), 1966, pag. 62-72

12 R. Parker, W. M. Griffith, "*Low frequency resonance effect in wake shedding from parallel plates*", Journal of Sound and Vibration, 7, 1968, pag. 371-379

13 R. Parker, "*Resonance effects in wake shedding from parallel plates: calculation of resonant frequencies*", Journal of Sound and Vibration, 5, pag. 330-343

14 Hardin, J. C., en Pope, D. S., "*An Acoustic/Viscous Splitting Technique for Computational Aeroacoustics*", Theoretical Computational Fluid Dynamics, Vol. 6, No. 5–6, 1994, pag. 323–340

15 Jung H. Seo, Young J. Moon , "*Linearized perturbed compressible equations for low Mach number aeroacoustics*", Journal of Computational Physics 218, 2006, pag. 702–719

16 Ulf Bunge, "*Numerische Simulation turbulenter Strömungen*

im Kontext der Wechselwirkung zwischen Fluid und Struktur", Hermann-Föttinger-Institut für Strömungsmechanik, Technische Universität Berlin, Berlijn, 2005

17 Bosch Research Info Ausgabe 4/2004, pag. 3, Robert Bosch GmbH, Stuttgart

18 M.C. Welsh, A.N. Stokes, R. Parker, "*Flow-resonant sound interaction in a duct containing a plate, part I: Semi-circular leading edge*", Journal of Sound and Vibration, Volume 95, Issue 3, 8 Augustus 1984, pag. 305-323

19 N. Stokes, M.C. Welsh , "*Flow-resonant sound interaction in a duct containing a plate, II: Square leading edge*", Journal of Sound and Vibration, Volume 104, Issue 1, 8 January 1986, pag. 55-73

20 M.C. Welsh, D.C. Gibson, "*Interaction of induced sound with flow past a square leading edged plate in a duct*", Journal of Sound and Vibration Volume 67, Issue 4, 22 December 1979, pag. 501-511

21 K.M. Lam, M.Y.H. Leung, "*Asymmetric vortex shedding flow past an inclined flat plate at high incidence*", European Journal of Mechanics B/Fluids 24 (2005), pag. 33–48

22 C.W. Knisely, "*Strouhal numbers of rectangular cilinders at incidence; A review and new data*", Journ. of Fluids and Structures, 1990-4, pag. 371-393

23 Nakamura, Ohya Tsuruta, "*Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges*", Journal of Fluid Mechanics, vol. 222, 1991

24 Tan B.T., Thompson M.C., Hourigan K., *"Sources of Acoustic Resonance Generated by Flow around a Long Rectangular Plate in a Duct"*, Journal of Fluids and Structures, Vol 18(6), p.p. 729-740, 2003

25 Spruyt, A.G., "*Stromings-geïnduceerde akoestische resonanties in de industrie*", Journaal van het Nederlands Akoestisch Genootschap, 22 (1), 1972

26 Parker, R., "*Aeroacoustics*". International Journal of Fluid Dynamics (http://elecpress.monash.edu.au/ijfd) 1, Article 1, 1997

27 Hirschberg, A., *"Introduction to aero-acoustics of internal flows"*, Technische Universiteit Eindhoven

Bijlage 1 - GRAFIEKEN PER MEETSERIE, MET PIEKEN

In deze bijlage is voor iedere serie metingen onder een vaste hoek maar bij vier verschillende windsnelheden een grafiek opgenomen waarin de frequentie tegen het geluidniveau is uitgezet. In de grafieken wordt de frequentie en de absolute hoogte van de pieken aangegeven.

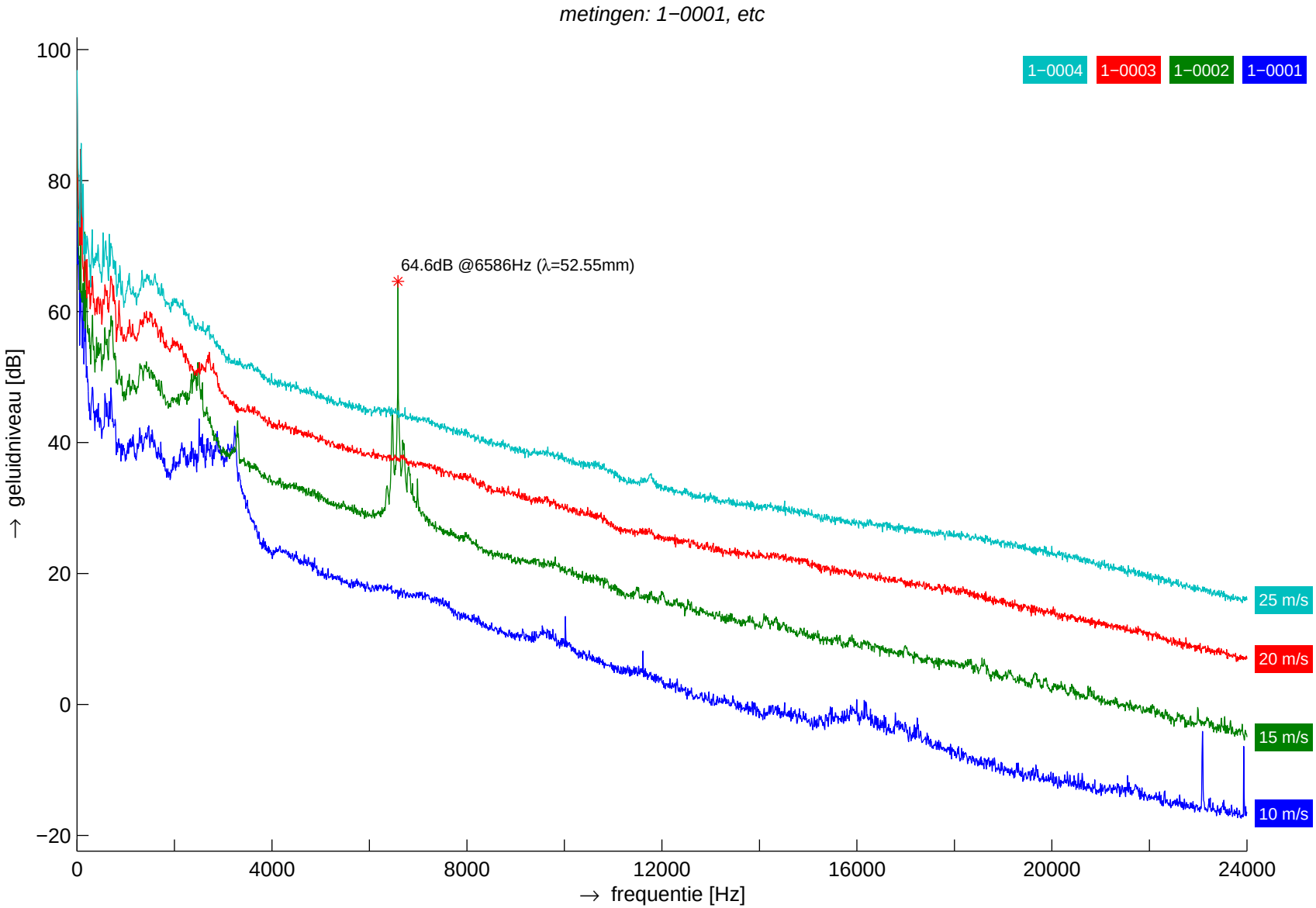
Voor de duidelijkheid worden vooraf nogmaals de kenmerken van de verschillende roosters en de nummers van de metingen benoemd.

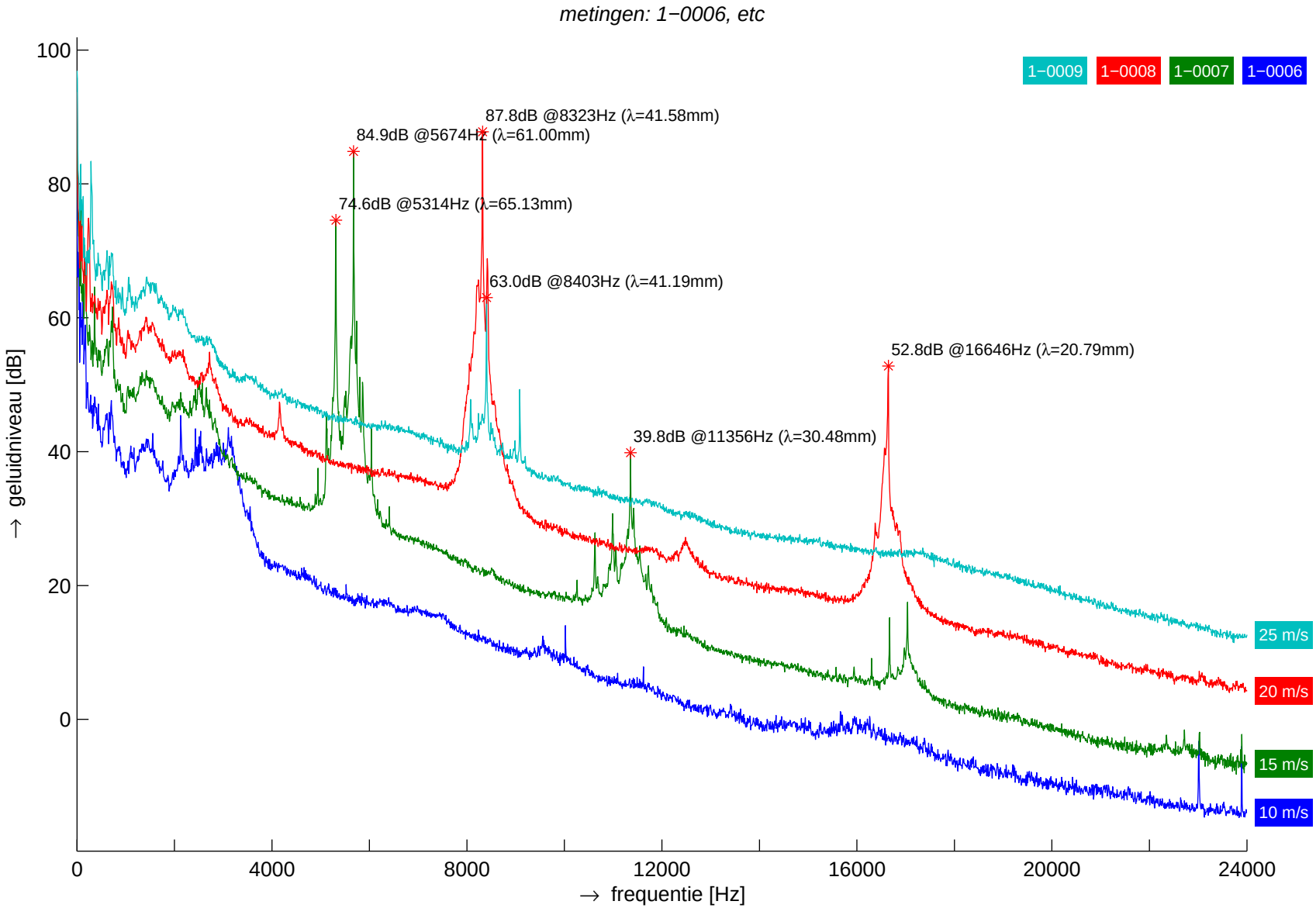
Roosterkenmerken

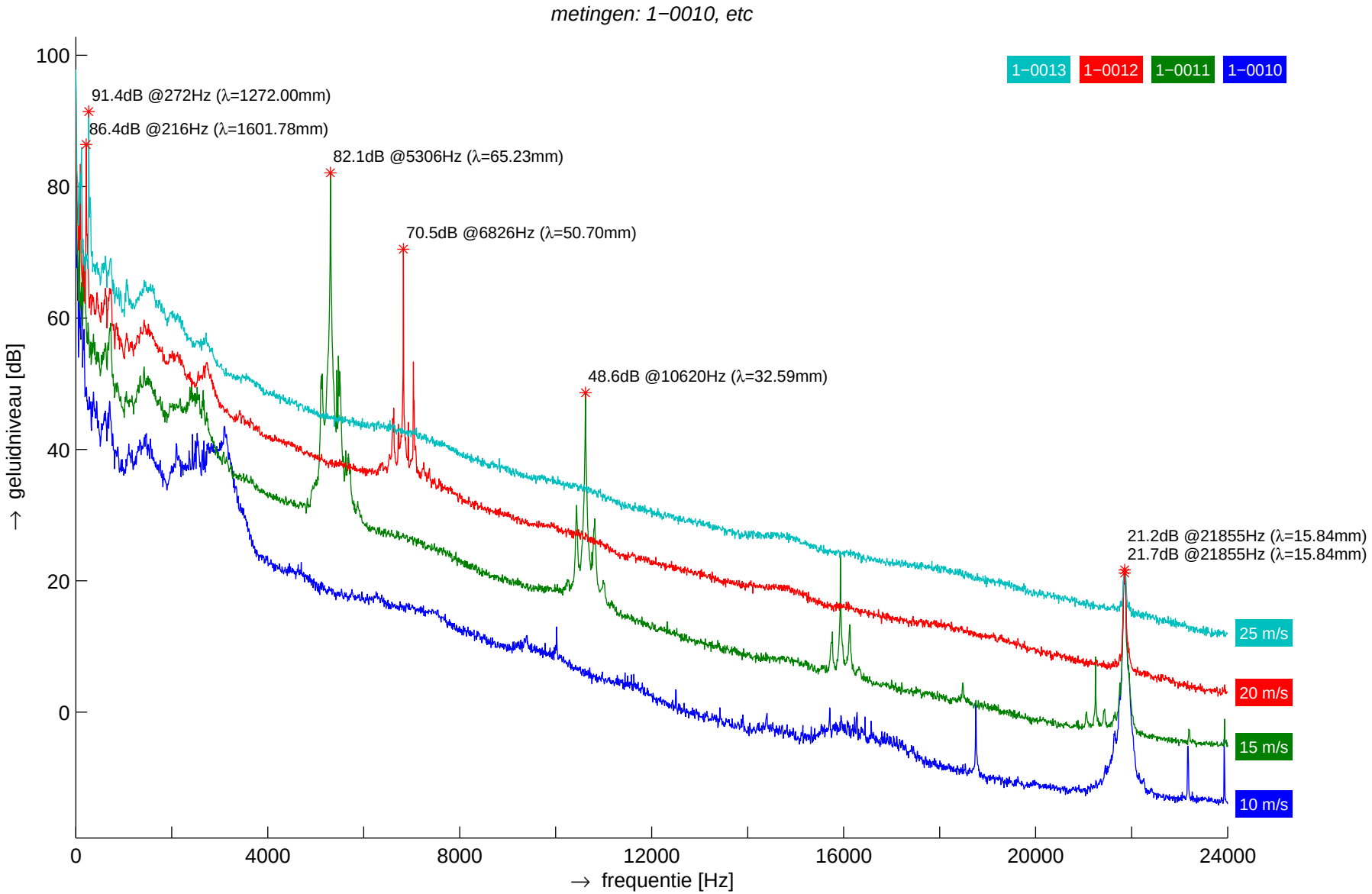
n°		afmeting	maaswijdte	dragerafstand	draagstaven	vulstaven
1	7	1000x1000	33.33x33.33	33.33x33.33	30x2	10x2
2	8	"	"	"	30x3	"
3	9	"	"	"	40x2	"
4	10	"	49.99x49.99	49.99x49.99	30x2	"
5	11	"	"	"	30x3	"
6	12	"	"	"	40x2	"

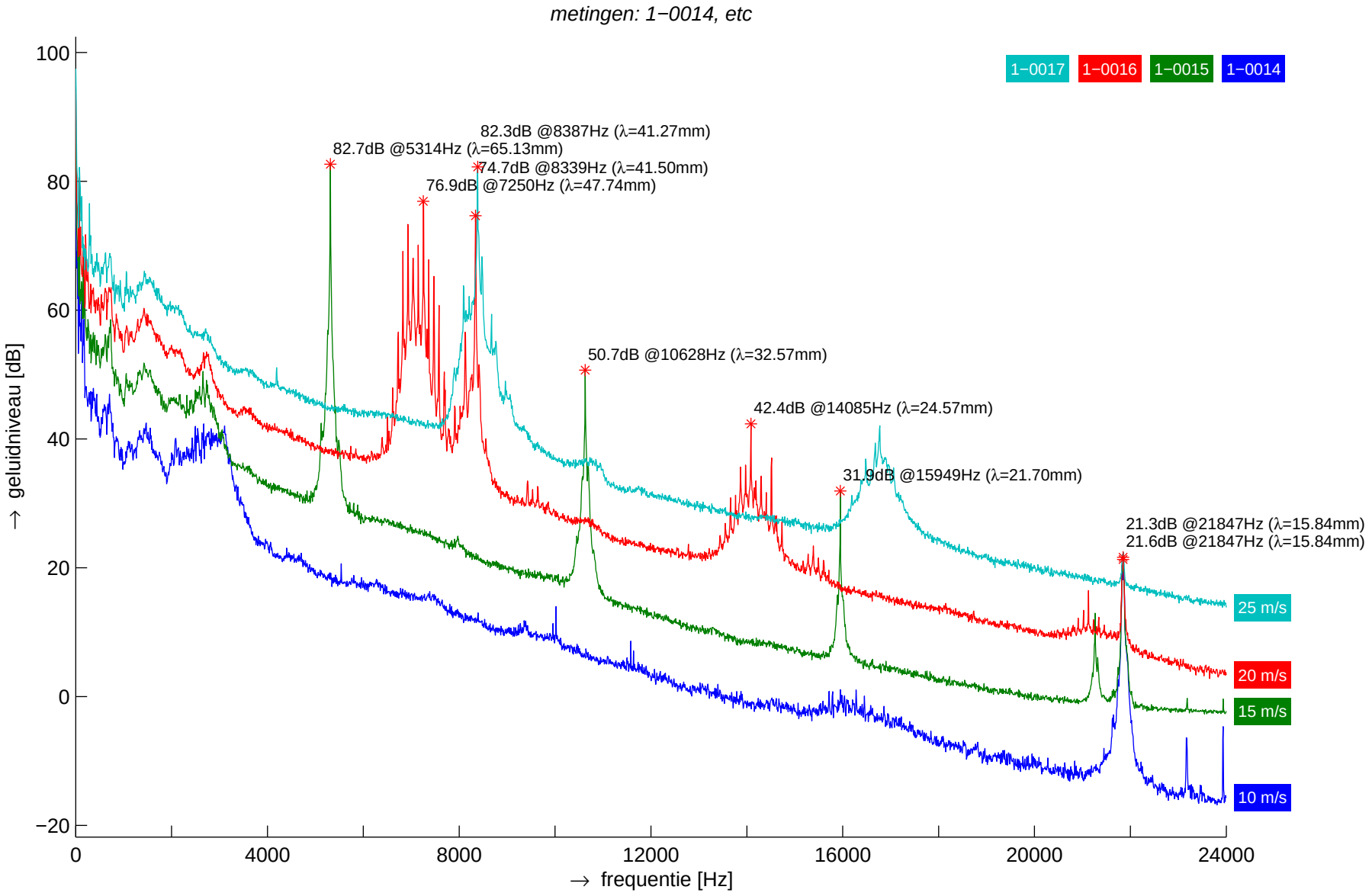
1 t/m 6 en 7 t/m 12 verschillen slechts in de afwerking; alle maten mm.

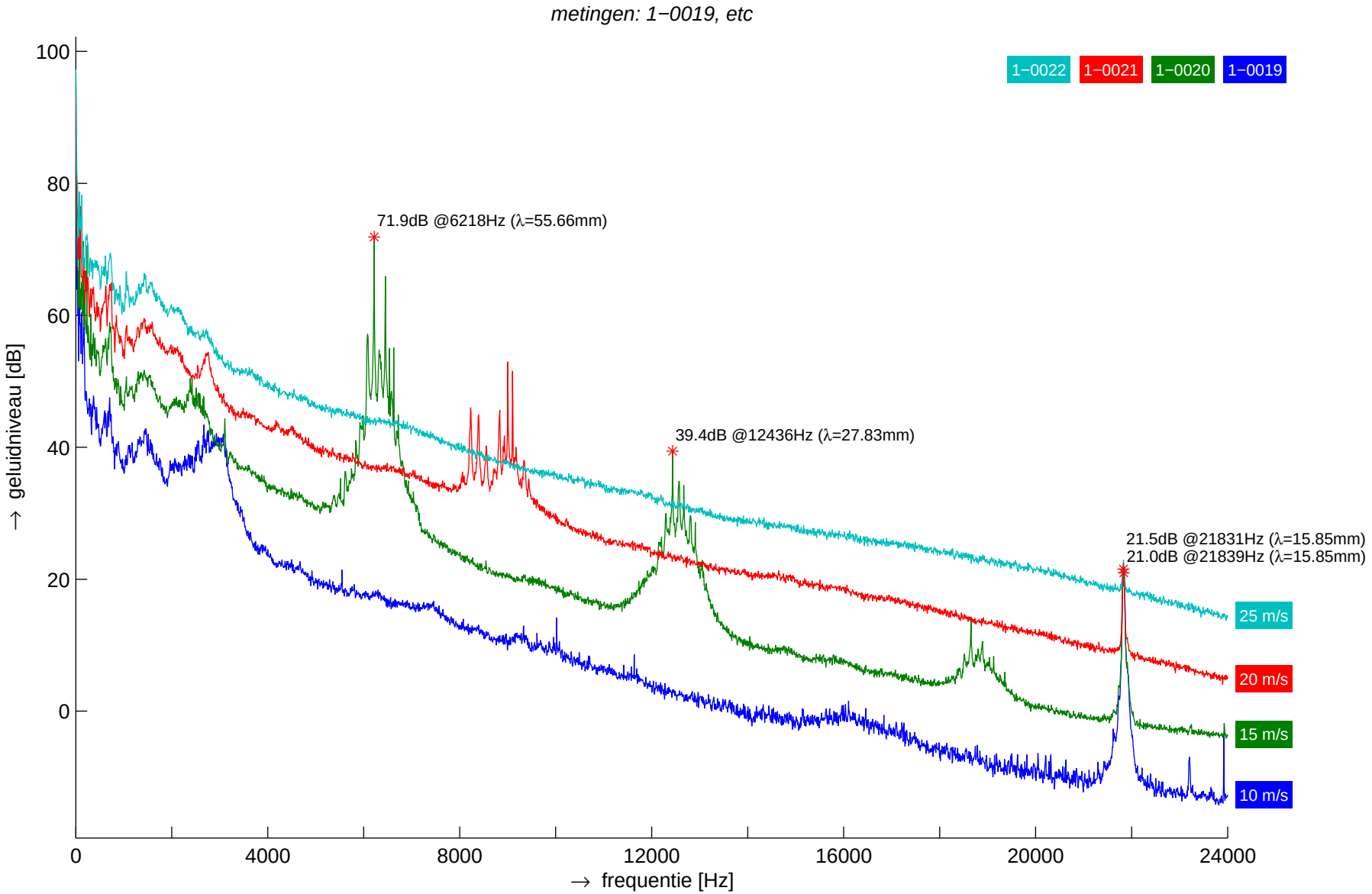
	beproefd		beproef + vulstaaf		niet beproefd

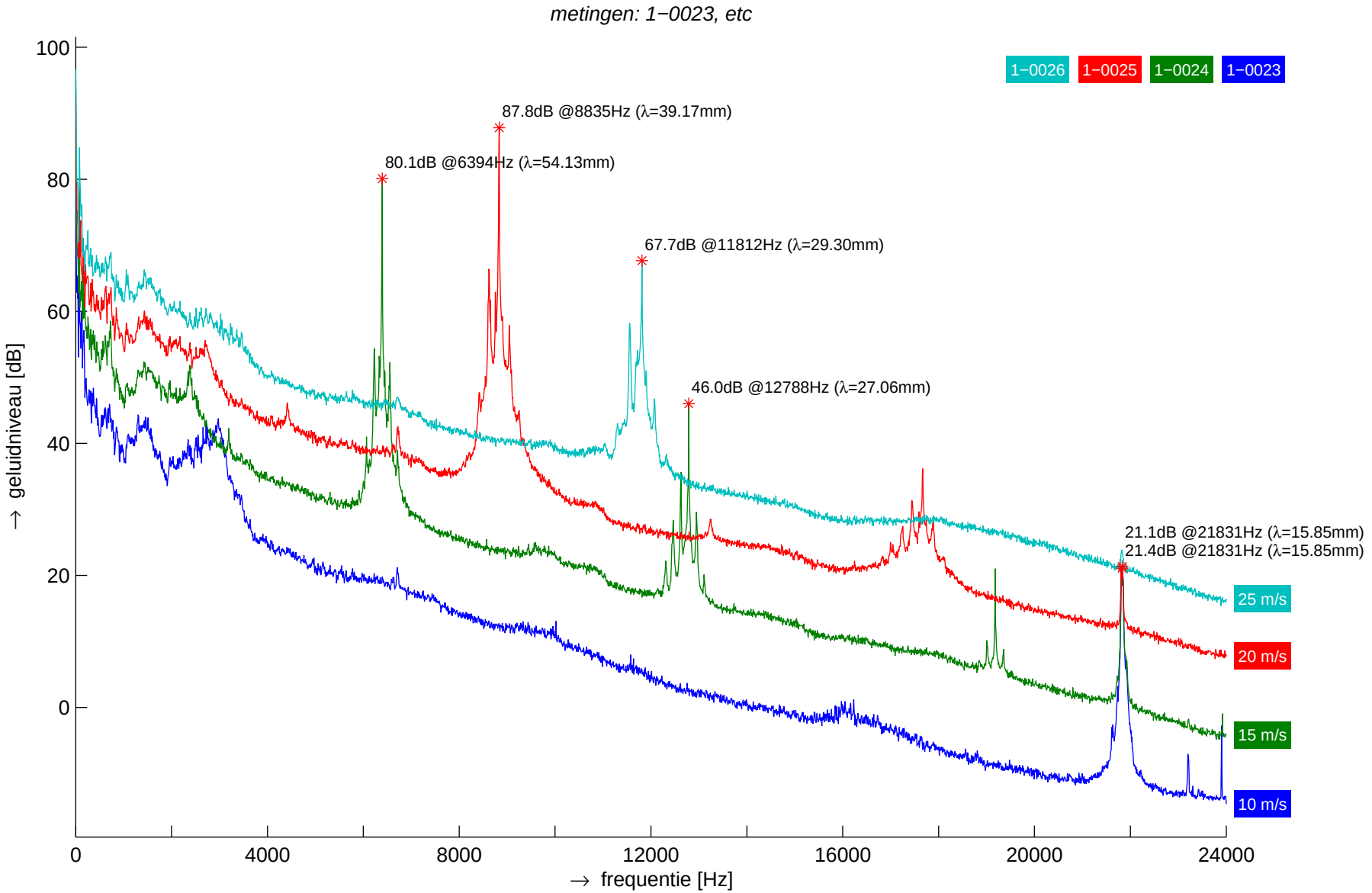

metingen: 1−0001, etc
1−0004
1−0003
1−0002
1−0001
64.6dB @6586Hz (λ=52.55mm)
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s

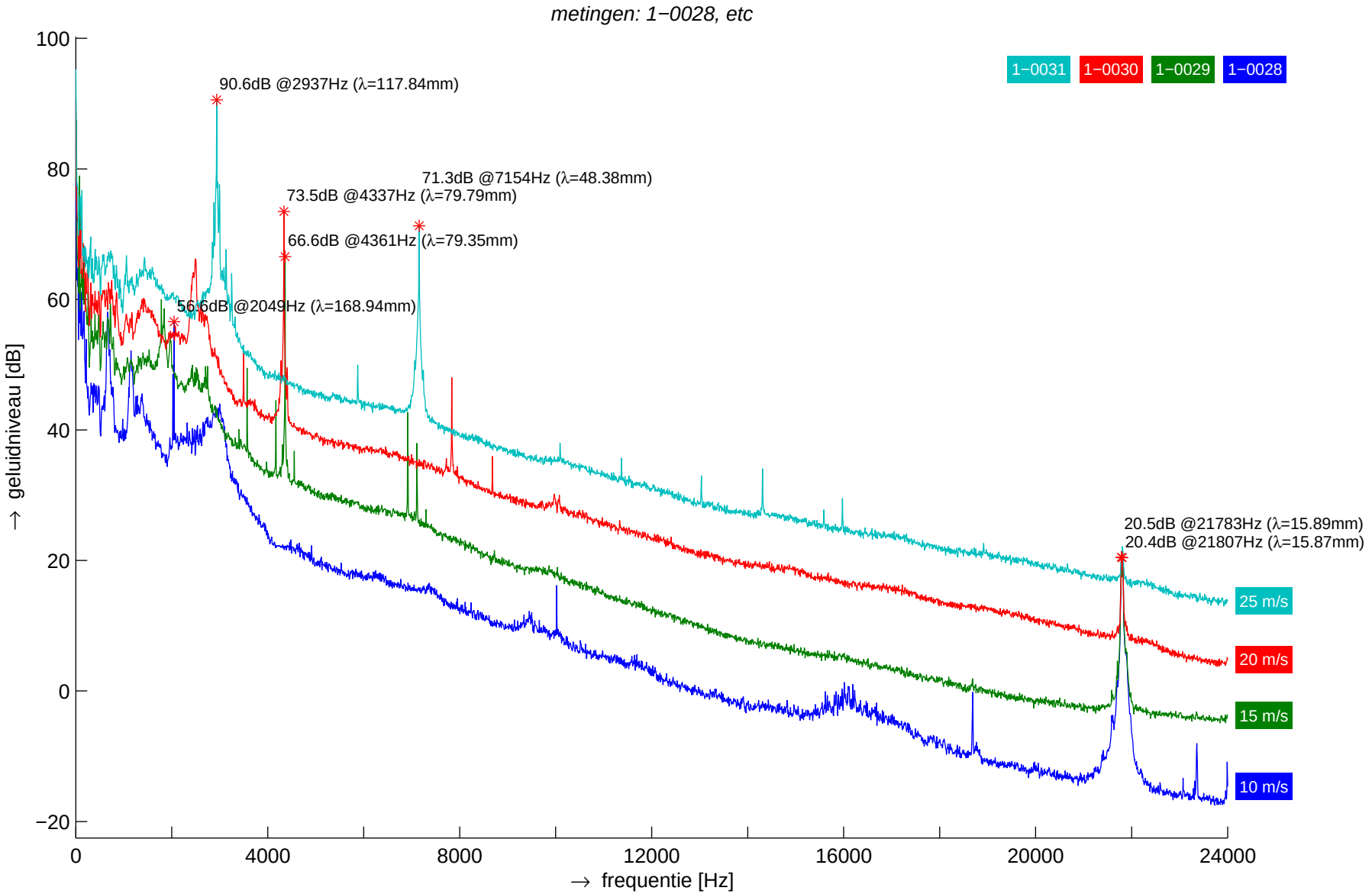

metingen: 1−0006, etc
1−0009
1−0008
1−0007
1−0006
87.8dB @8323Hz (λ=41.58mm)
84.9dB @5674Hz (λ=61.00mm)
74.6dB @5314Hz (λ=65.13mm)
63.0dB @8403Hz (λ=41.19mm)
52.8dB @16646Hz (λ=20.79mm)
39.8dB @11356Hz (λ=30.48mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

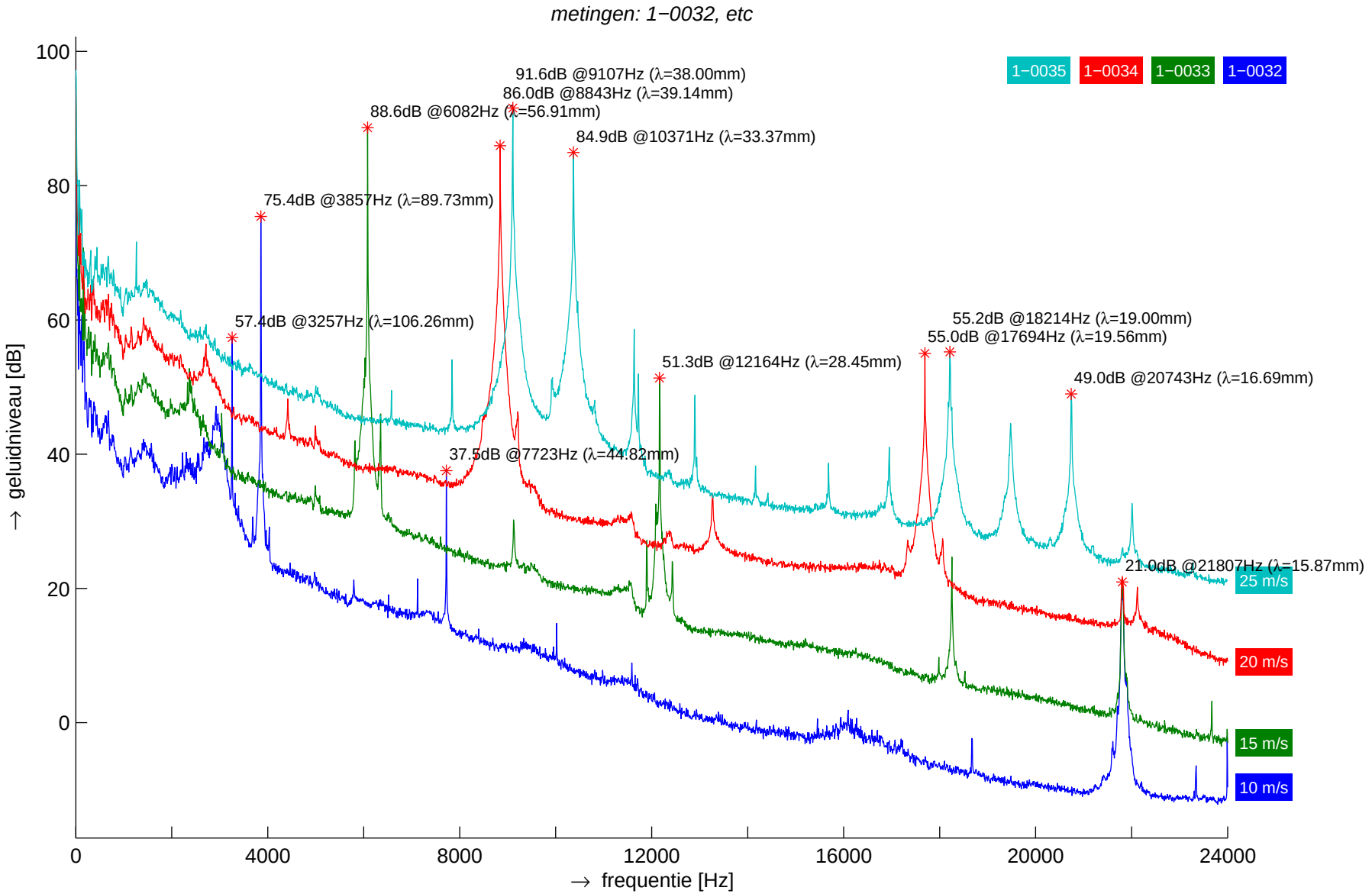

metingen: 1−0010, etc
1−0013
1−0012
1−0011
1−0010
91.4dB @272Hz (λ=1272.00mm)
86.4dB @216Hz (λ=1601.78mm)
82.1dB @5306Hz (λ=65.23mm)
70.5dB @6826Hz (λ=50.70mm)
48.6dB @10620Hz (λ=32.59mm)
21.2dB @21855Hz (λ=15.84mm)
21.7dB @21855Hz (λ=15.84mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

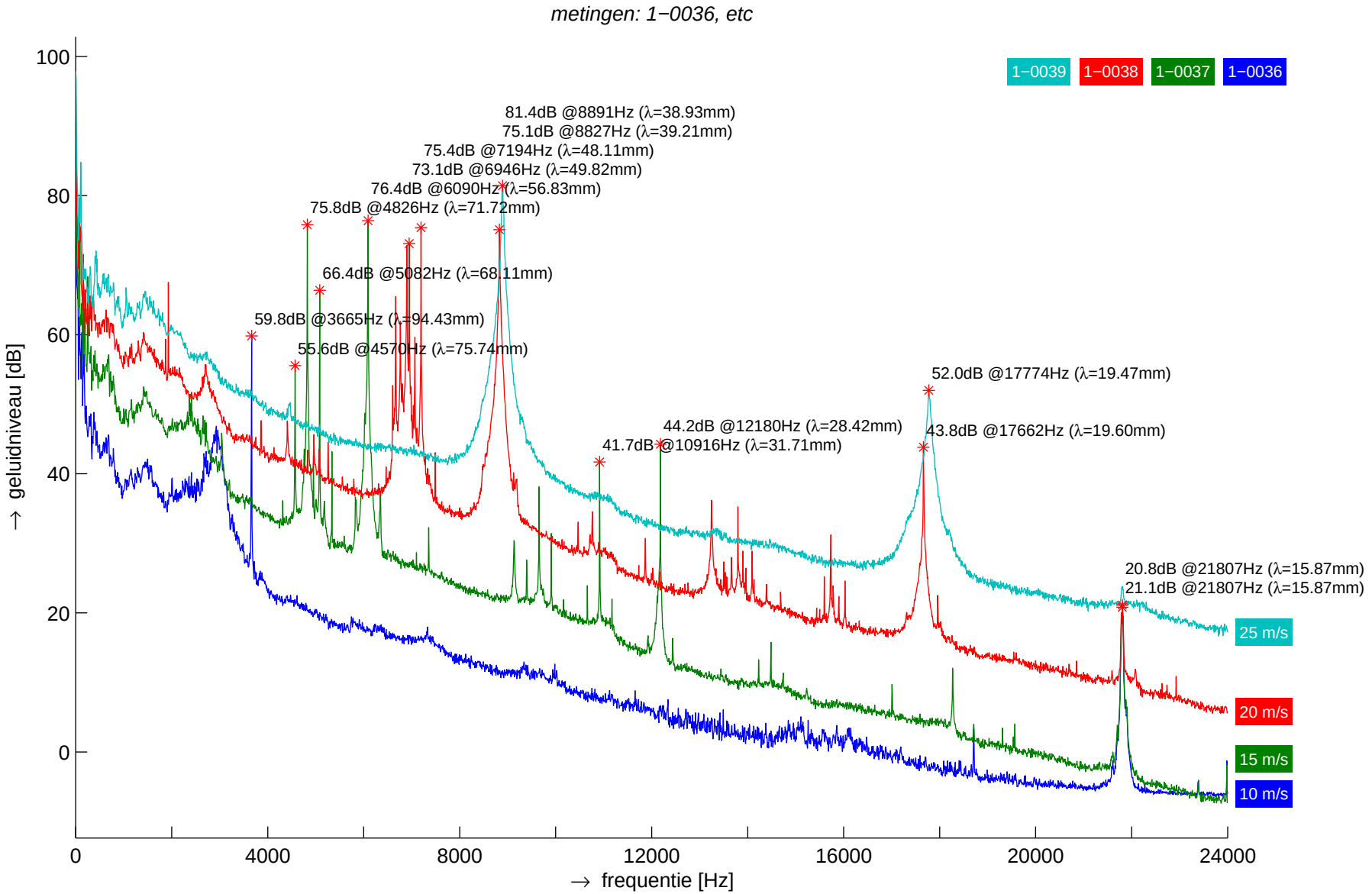

metingen: 1−0014, etc
1−0017
1−0016
1−0015
1−0014
82.3dB @8387Hz (λ=41.27mm)
82.7dB @5314Hz (λ=65.13mm)
74.7dB @8339Hz (λ=41.50mm)
76.9dB @7250Hz (λ=47.74mm)
50.7dB @10628Hz (λ=32.57mm)
42.4dB @14085Hz (λ=24.57mm)
31.9dB @15949Hz (λ=21.70mm)
21.3dB @21847Hz (λ=15.84mm)
21.6dB @21847Hz (λ=15.84mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

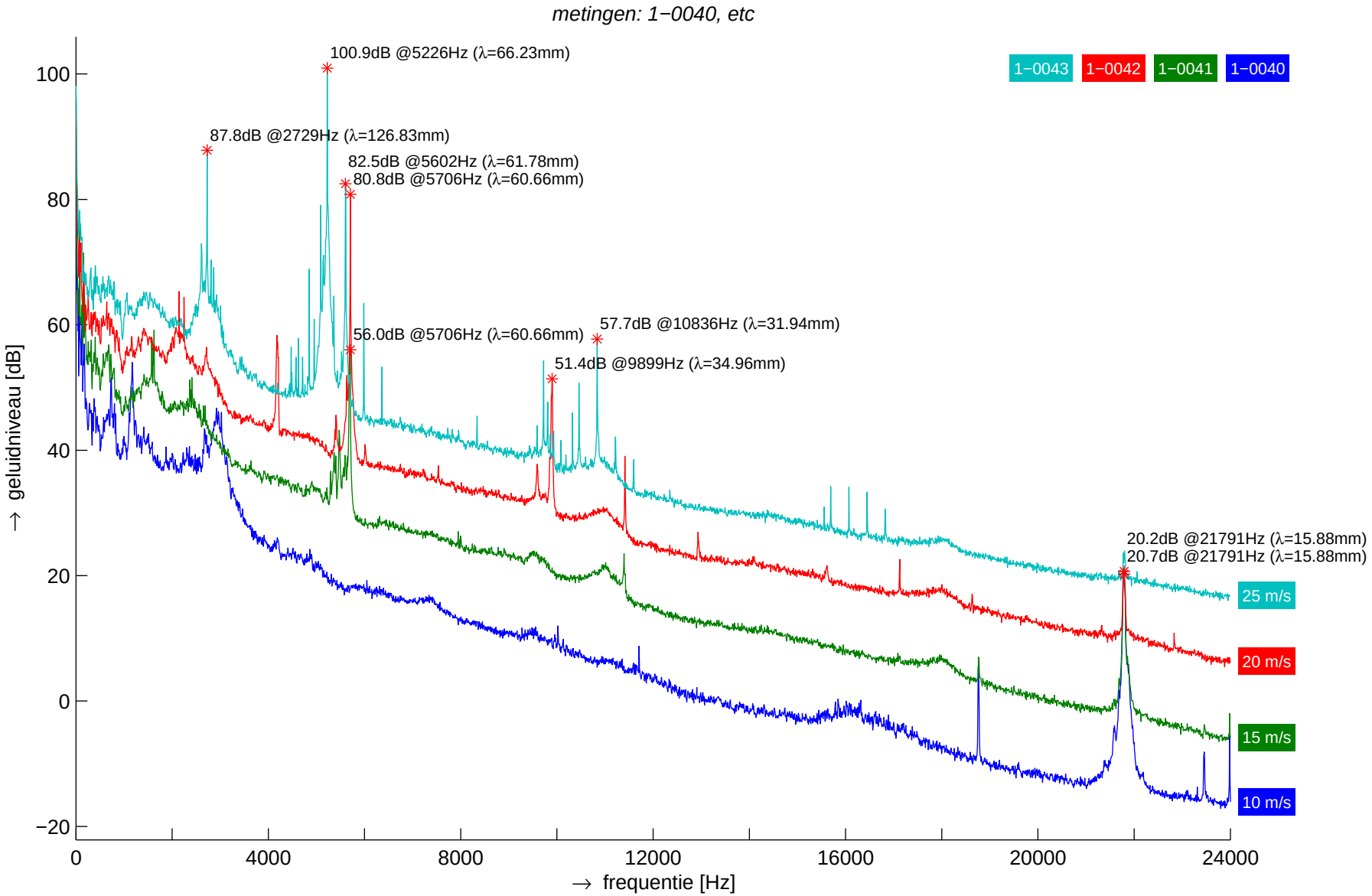

metingen: 1−0019, etc
1−0022
1−0021
1−0020
1−0019
71.9dB @6218Hz (λ=55.66mm)
39.4dB @12436Hz (λ=27.83mm)
21.5dB @21831Hz (λ=15.85mm)
21.0dB @21839Hz (λ=15.85mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

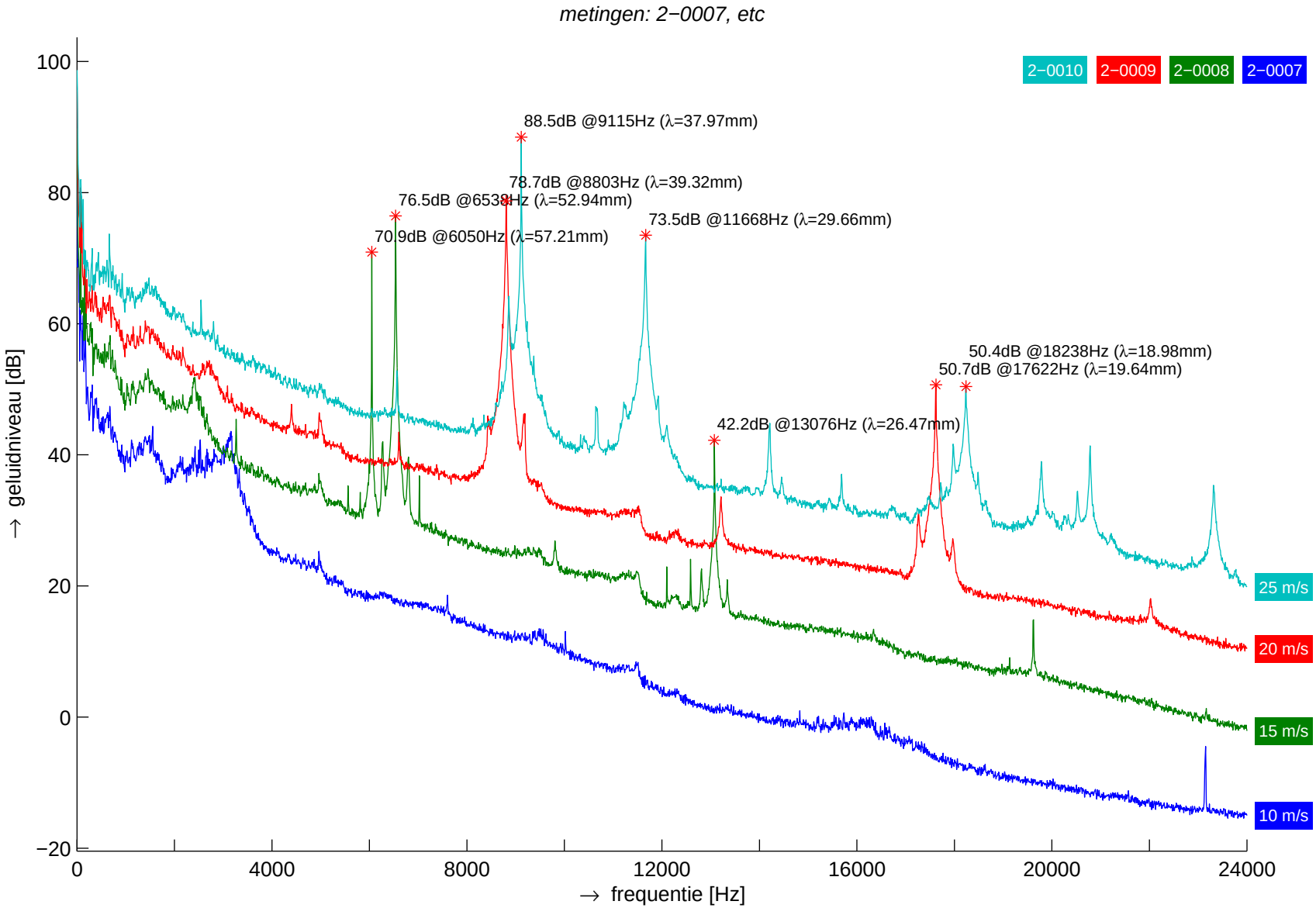

metingen: 1−0023, etc
1−0026
1−0025
1−0024
1−0023
87.8dB @8835Hz (λ=39.17mm)
80.1dB @6394Hz (λ=54.13mm)
67.7dB @11812Hz (λ=29.30mm)
46.0dB @12788Hz (λ=27.06mm)
21.1dB @21831Hz (λ=15.85mm)
21.4dB @21831Hz (λ=15.85mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

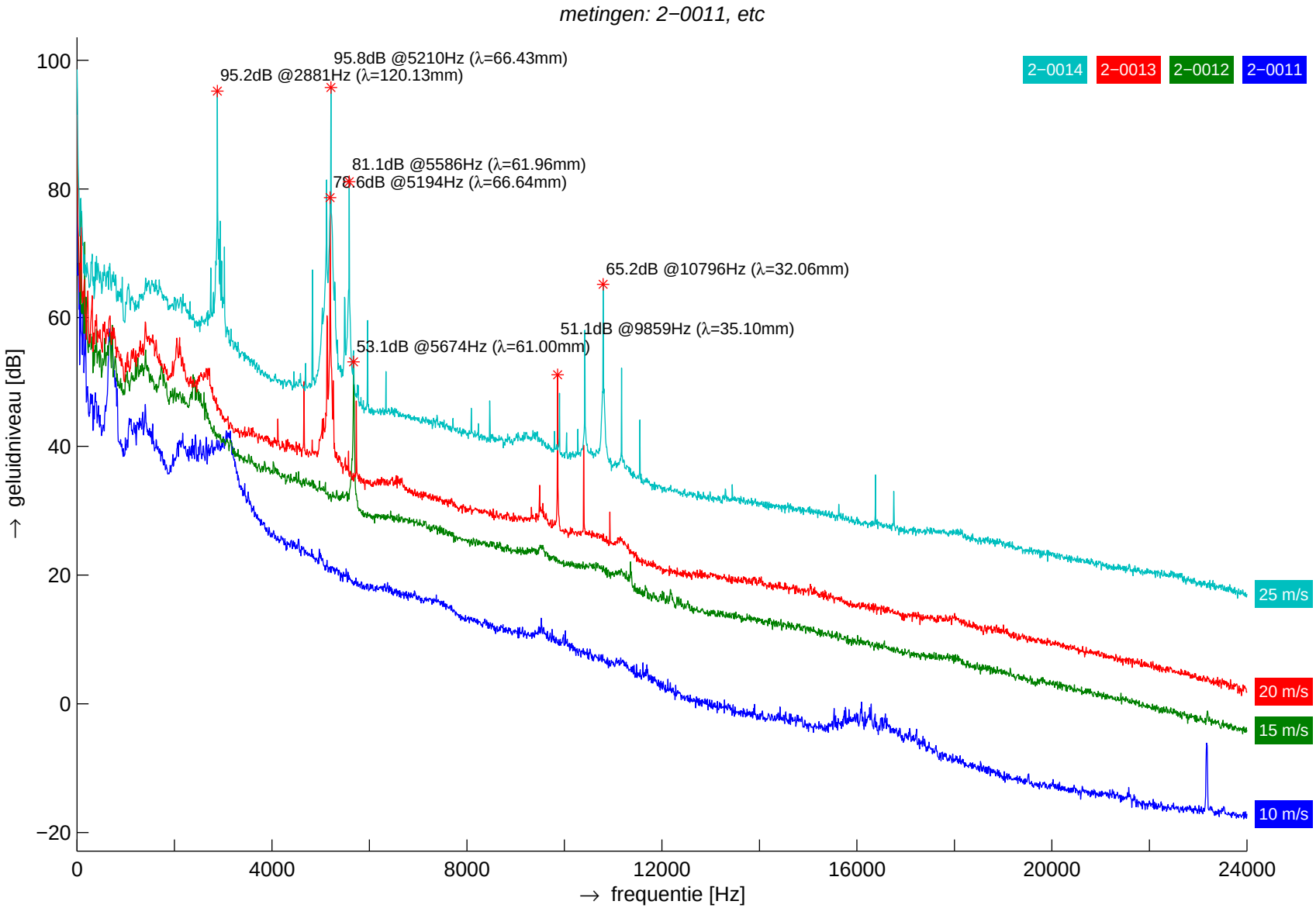

metingen: 1−0028, etc
1−0031
1−0030
1−0029
1−0028
90.6dB @2937Hz (λ=117.84mm)
73.5dB @4337Hz (λ=79.79mm)
71.3dB @7154Hz (λ=48.38mm)
66.6dB @4361Hz (λ=79.35mm)
56.6dB @2049Hz (λ=168.94mm)
20.5dB @21783Hz (λ=15.89mm)
20.4dB @21807Hz (λ=15.87mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

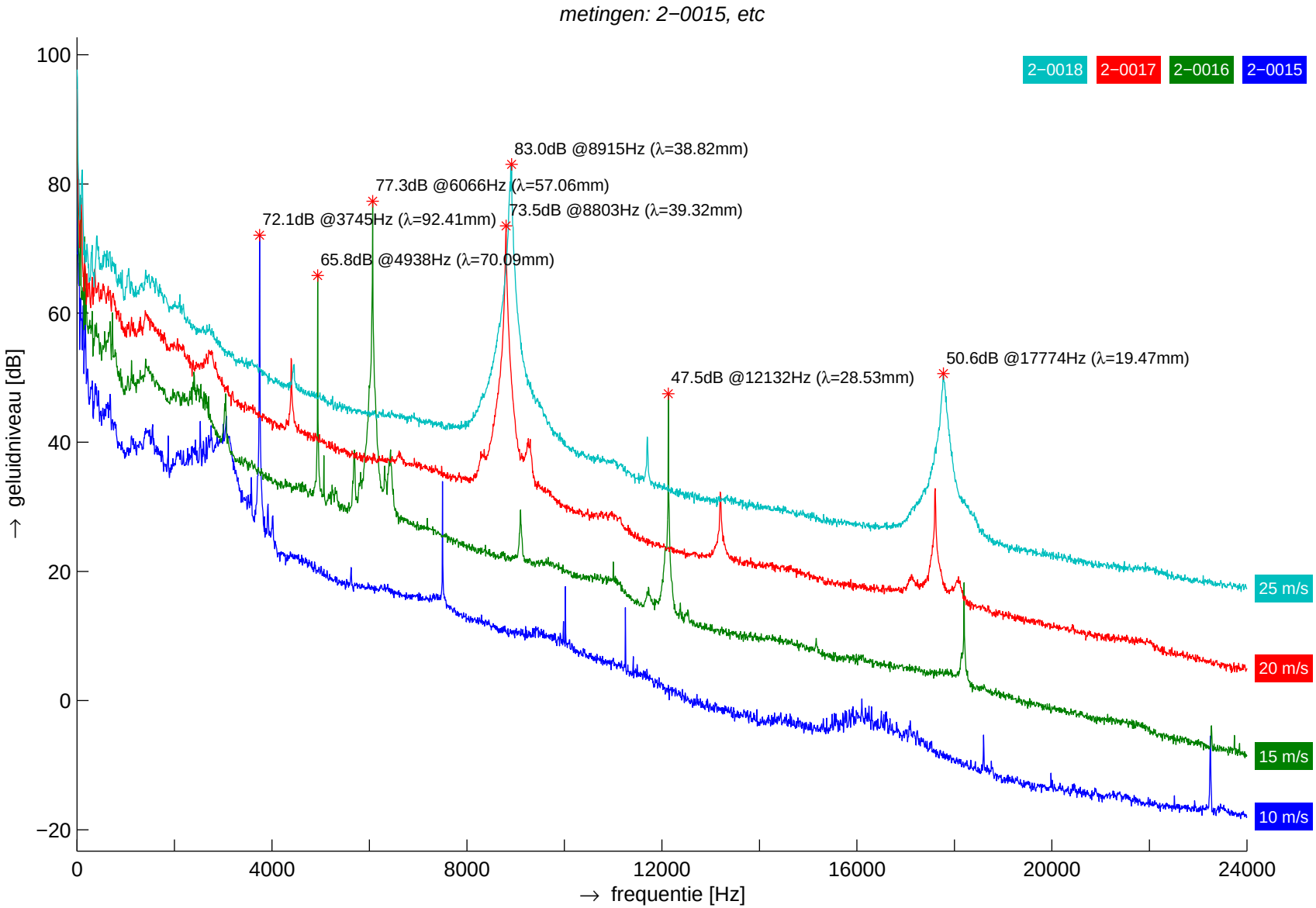

metingen: 1−0032, etc
1−0035
1−0034
1−0033
1−0032
91.6dB @9107Hz (λ=38.00mm)
86.0dB @8843Hz (λ=39.14mm)
88.6dB @6082Hz (λ=56.91mm)
84.9dB @10371Hz (λ=33.37mm)
75.4dB @3857Hz (λ=89.73mm)
57.4dB @3257Hz (λ=106.26mm)
55.2dB @18214Hz (λ=19.00mm)
55.0dB @17694Hz (λ=19.56mm)
51.3dB @12164Hz (λ=28.45mm)
49.0dB @20743Hz (λ=16.69mm)
37.5dB @7723Hz (λ=44.82mm)
21.0dB @21807Hz (λ=15.87mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

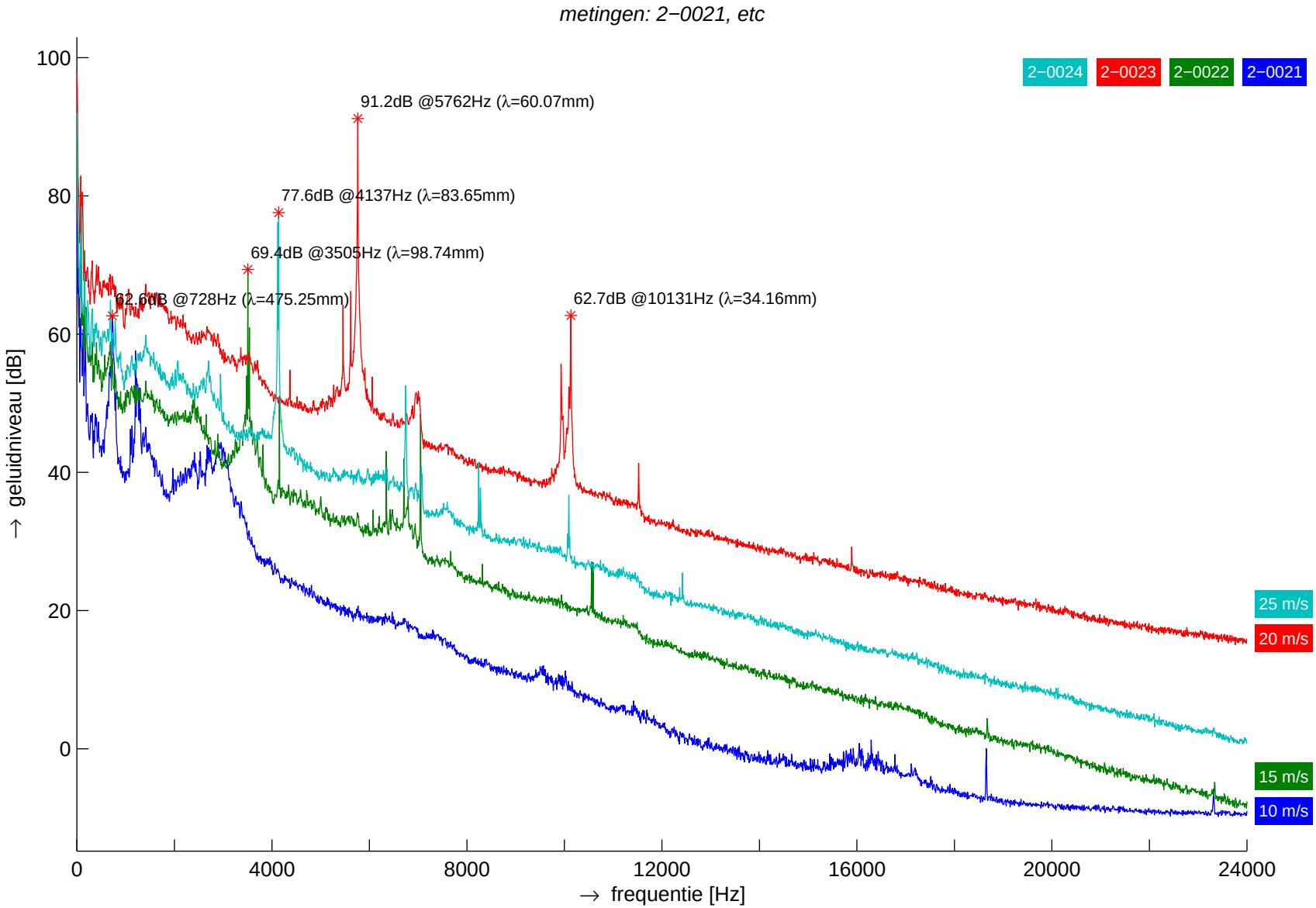

metingen: 1−0036, etc
1−0039
1−0038
1−0037
1−0036
81.4dB @8891Hz (λ=38.93mm)
75.1dB @8827Hz (λ=39.21mm)
75.4dB @7194Hz (λ=48.11mm)
73.1dB @6946Hz (λ=49.82mm)
76.4dB @6090Hz (λ=56.83mm)
75.8dB @4826Hz (λ=71.72mm)
66.4dB @5082Hz (λ=68.11mm)
59.8dB @3665Hz (λ=94.43mm)
55.6dB @4570Hz (λ=75.74mm)
52.0dB @17774Hz (λ=19.47mm)
44.2dB @12180Hz (λ=28.42mm)
41.7dB @10916Hz (λ=31.71mm)
43.8dB @17662Hz (λ=19.60mm)
20.8dB @21807Hz (λ=15.87mm)
21.1dB @21807Hz (λ=15.87mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

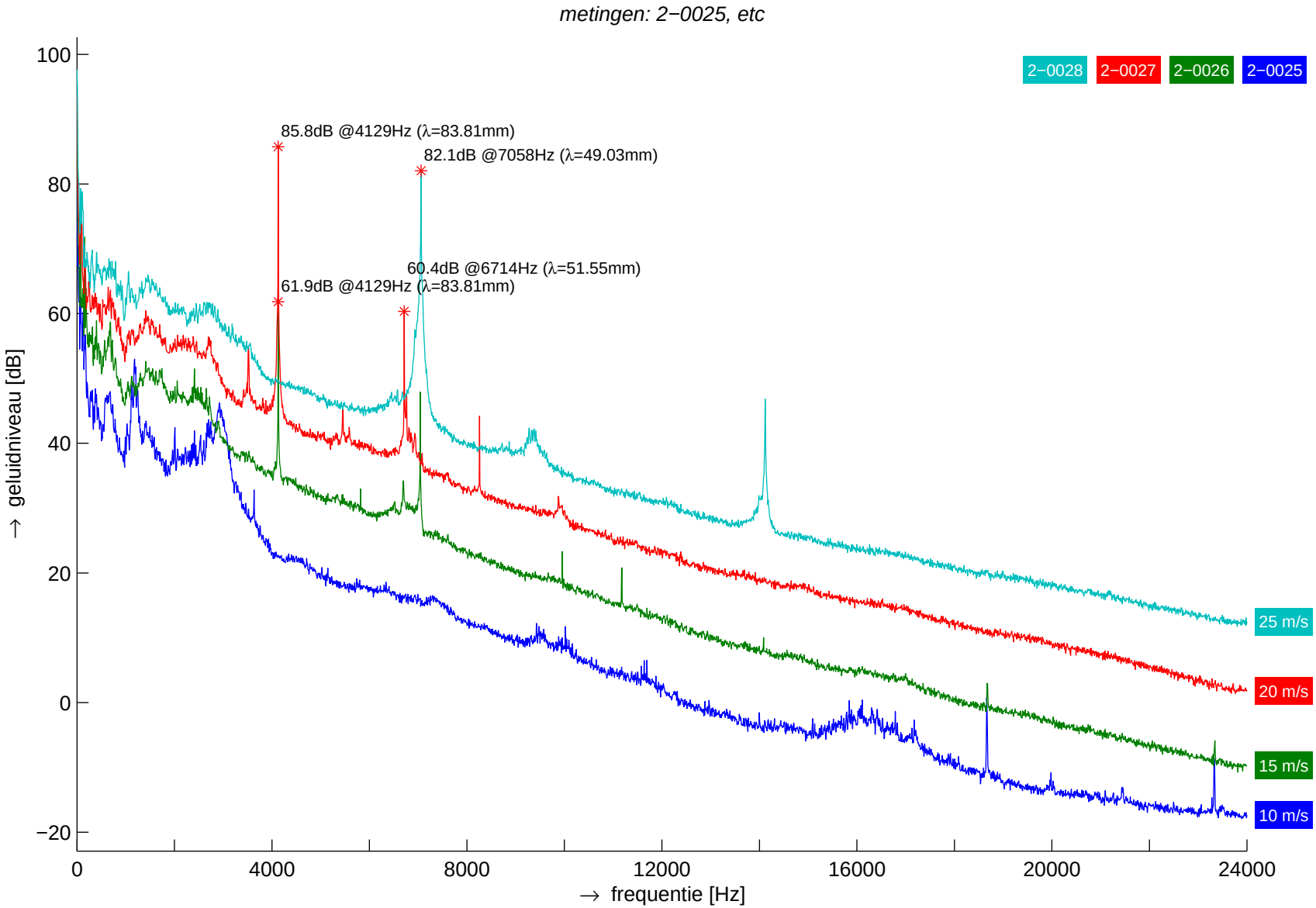

metingen: 1−0040, etc
100.9dB @5226Hz (λ=66.23mm)
87.8dB @2729Hz (λ=126.83mm)
82.5dB @5602Hz (λ=61.78mm)
80.8dB @5706Hz (λ=60.66mm)
56.0dB @5706Hz (λ=60.66mm)
57.7dB @10836Hz (λ=31.94mm)
51.4dB @9899Hz (λ=34.96mm)
20.2dB @21791Hz (λ=15.88mm)
20.7dB @21791Hz (λ=15.88mm)
1−0043
1−0042
1−0041
1−0040
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

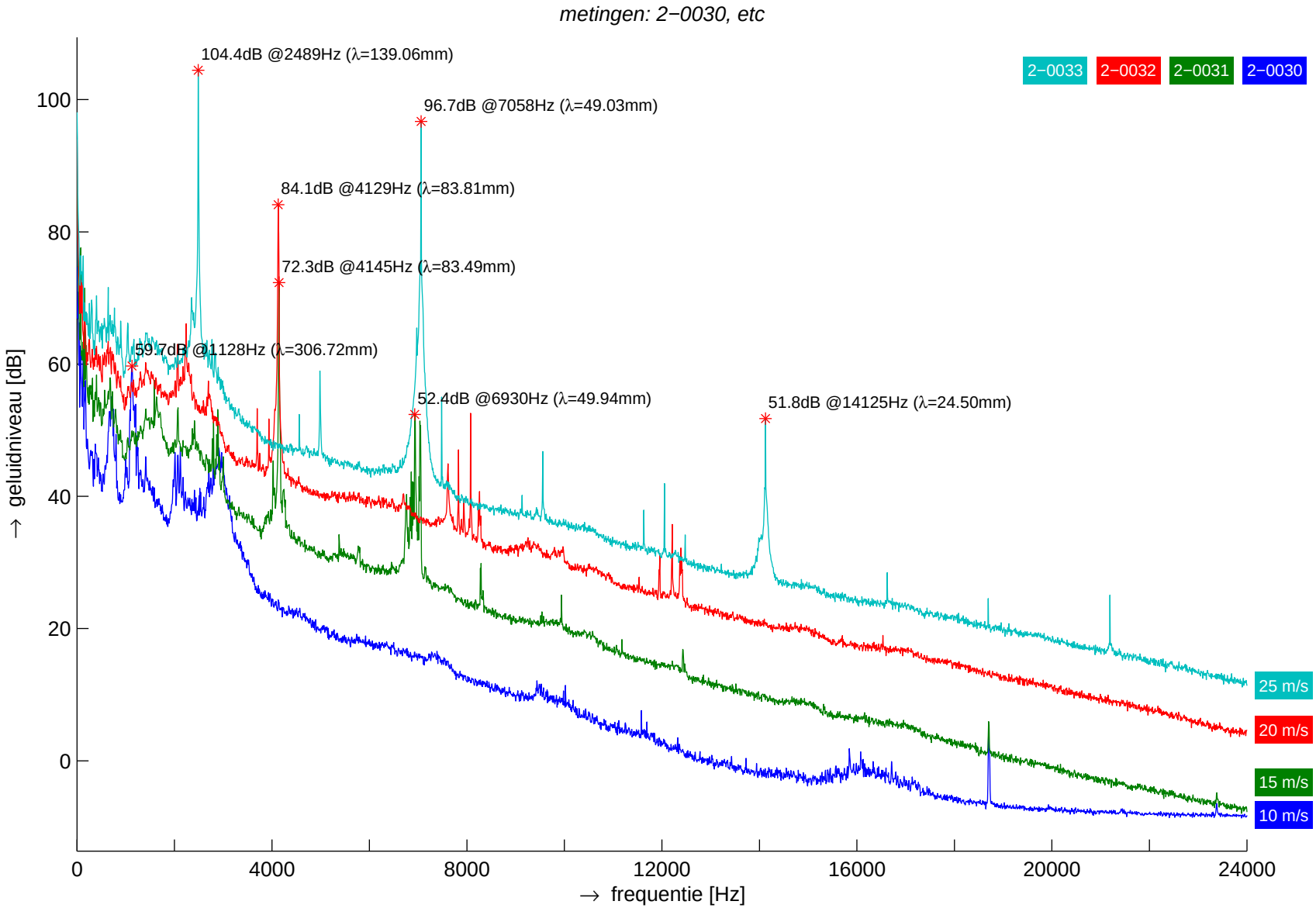

metingen: 2−0007, etc
2−0010
2−0009
2−0008
2−0007
88.5dB @9115Hz (λ=37.97mm)
78.7dB @8803Hz (λ=39.32mm)
76.5dB @6538Hz (λ=52.94mm)
73.5dB @11668Hz (λ=29.66mm)
70.9dB @6050Hz (λ=57.21mm)
50.4dB @18238Hz (λ=18.98mm)
50.7dB @17622Hz (λ=19.64mm)
42.2dB @13076Hz (λ=26.47mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

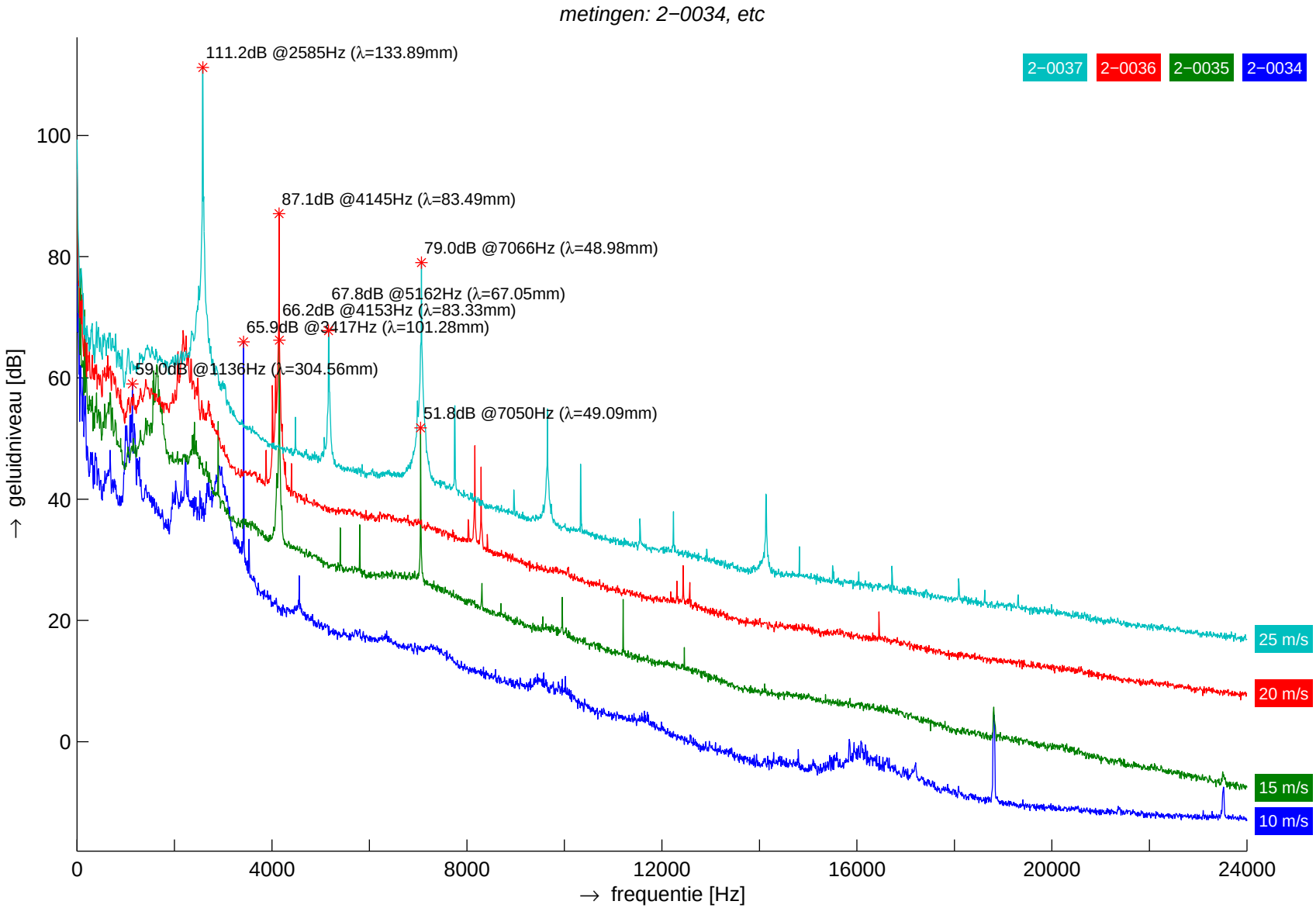

metingen: 2−0011, etc
2−0014
2−0013
2−0012
2−0011
95.8dB @5210Hz (λ=66.43mm)
95.2dB @2881Hz (λ=120.13mm)
81.1dB @5586Hz (λ=61.96mm)
78.6dB @5194Hz (λ=66.64mm)
65.2dB @10796Hz (λ=32.06mm)
51.1dB @9859Hz (λ=35.10mm)
53.1dB @5674Hz (λ=61.00mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

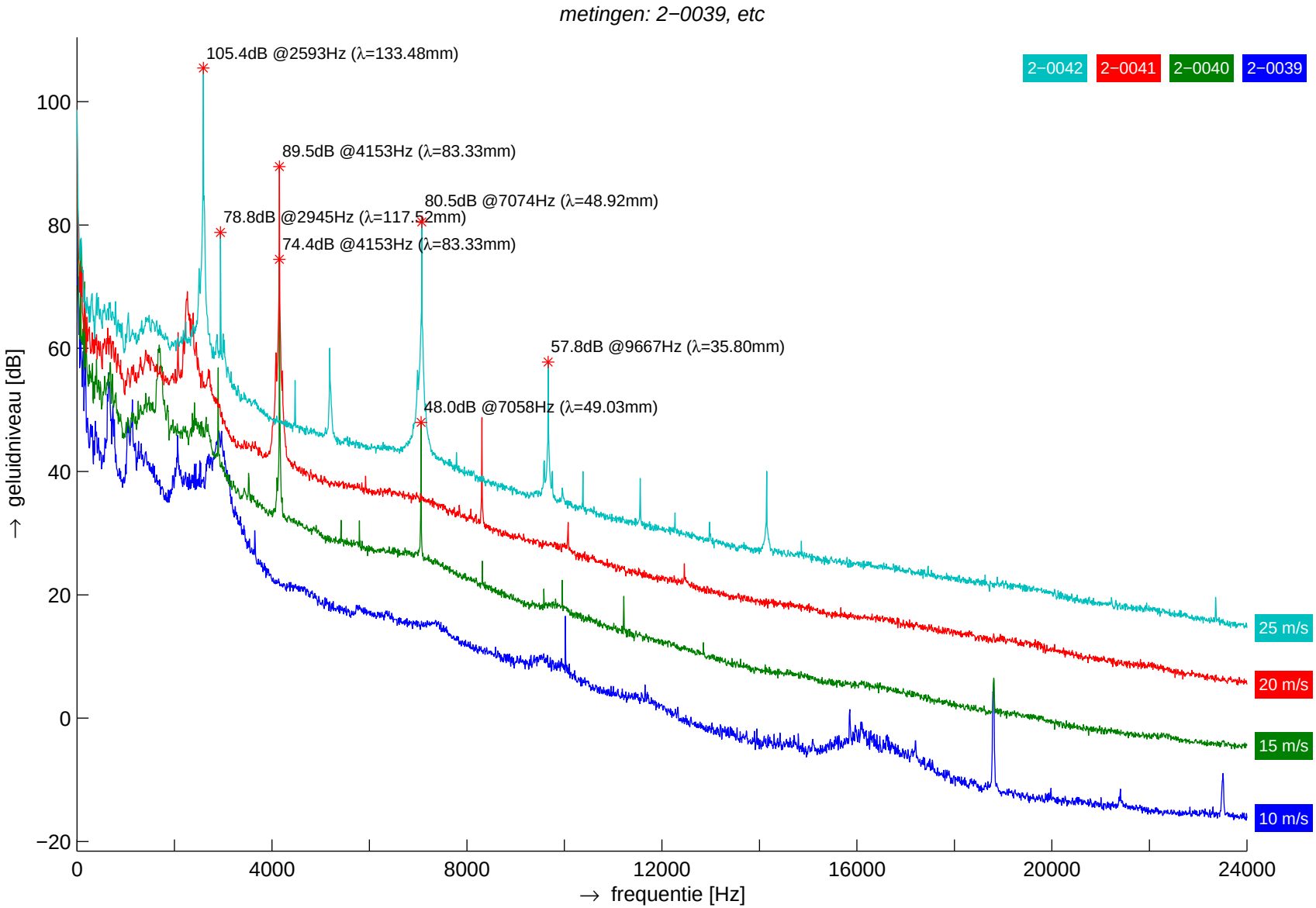

metingen: 2−0015, etc
2−0018
2−0017
2−0016
2−0015
83.0dB @8915Hz (λ=38.82mm)
77.3dB @6066Hz (λ=57.06mm)
73.5dB @8803Hz (λ=39.32mm)
72.1dB @3745Hz (λ=92.41mm)
65.8dB @4938Hz (λ=70.09mm)
47.5dB @12132Hz (λ=28.53mm)
50.6dB @17774Hz (λ=19.47mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

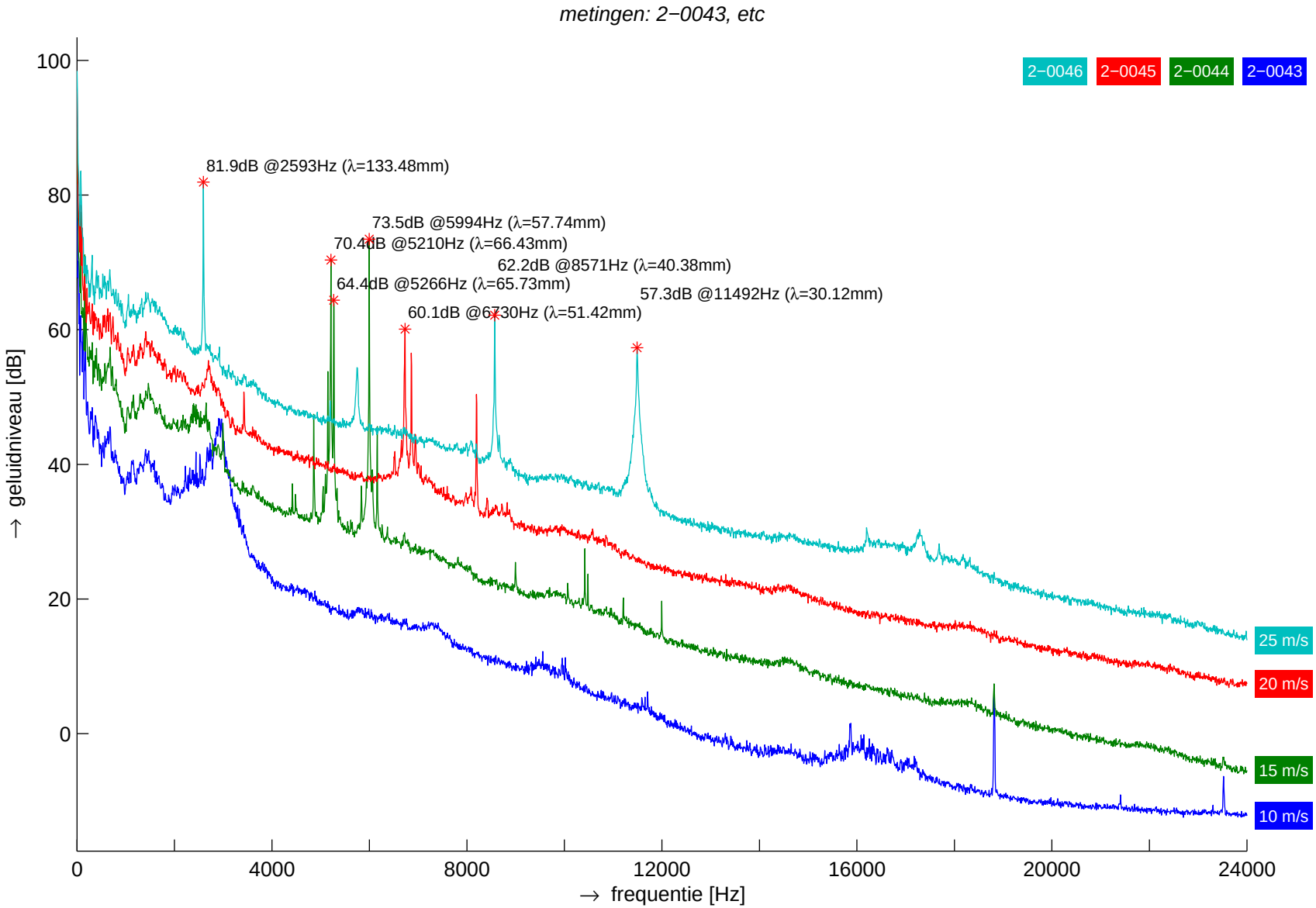

metingen: 2−0021, etc
2−0024
2−0023
2−0022
2−0021
91.2dB @5762Hz (λ=60.07mm)
77.6dB @4137Hz (λ=83.65mm)
69.4dB @3505Hz (λ=98.74mm)
62.6dB @728Hz (λ=475.25mm)
62.7dB @10131Hz (λ=34.16mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

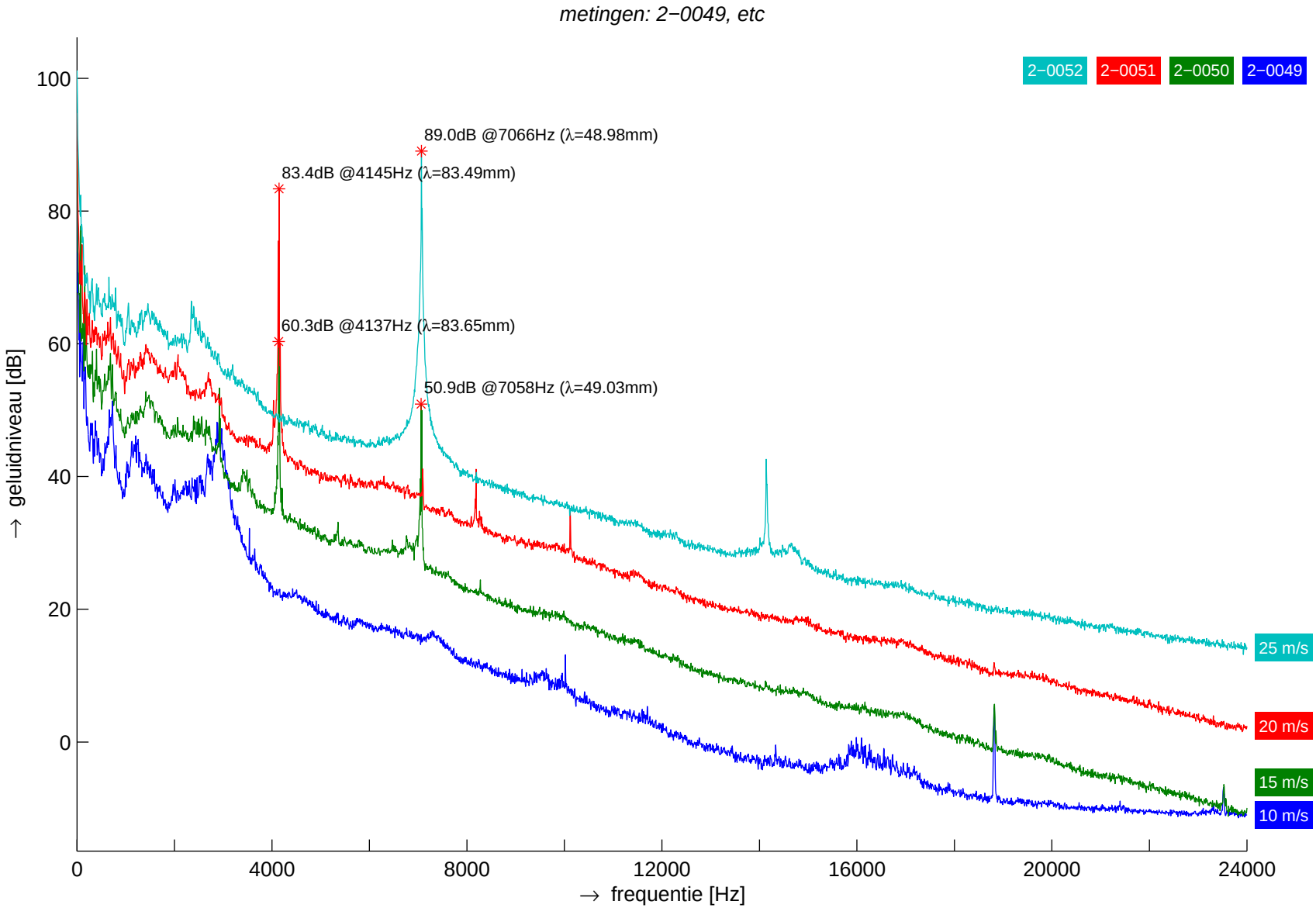

metingen: 2−0025, etc
2−0028
2−0027
2−0026
2−0025
85.8dB @4129Hz (λ=83.81mm)
82.1dB @7058Hz (λ=49.03mm)
60.4dB @6714Hz (λ=51.55mm)
61.9dB @4129Hz (λ=83.81mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

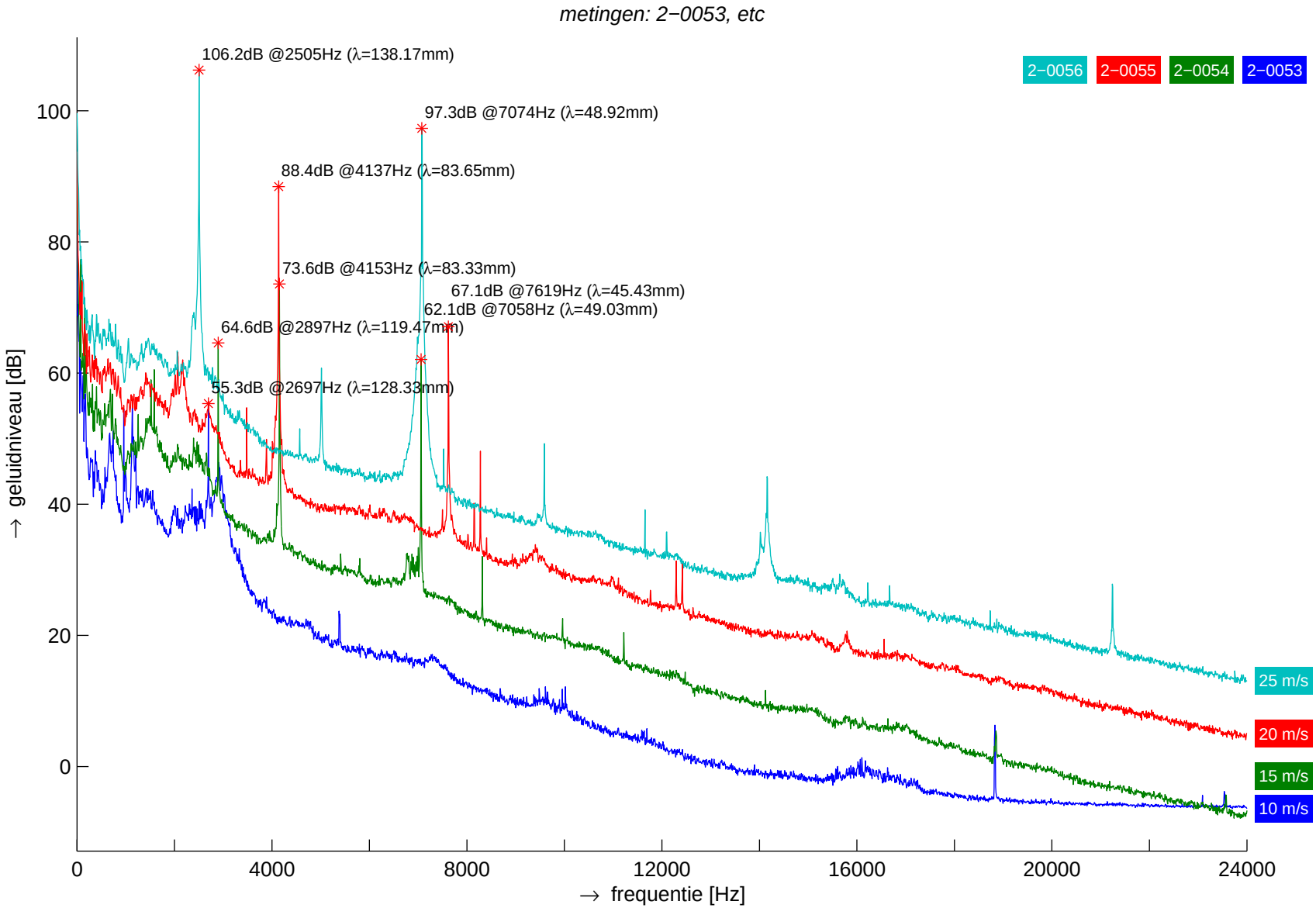

metingen: 2−0030, etc
104.4dB @2489Hz (λ=139.06mm)
96.7dB @7058Hz (λ=49.03mm)
84.1dB @4129Hz (λ=83.81mm)
72.3dB @4145Hz (λ=83.49mm)
59.7dB @1128Hz (λ=306.72mm)
52.4dB @6930Hz (λ=49.94mm)
51.8dB @14125Hz (λ=24.50mm)
2−0033
2−0032
2−0031
2−0030
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
0
20
40
60
80
100
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

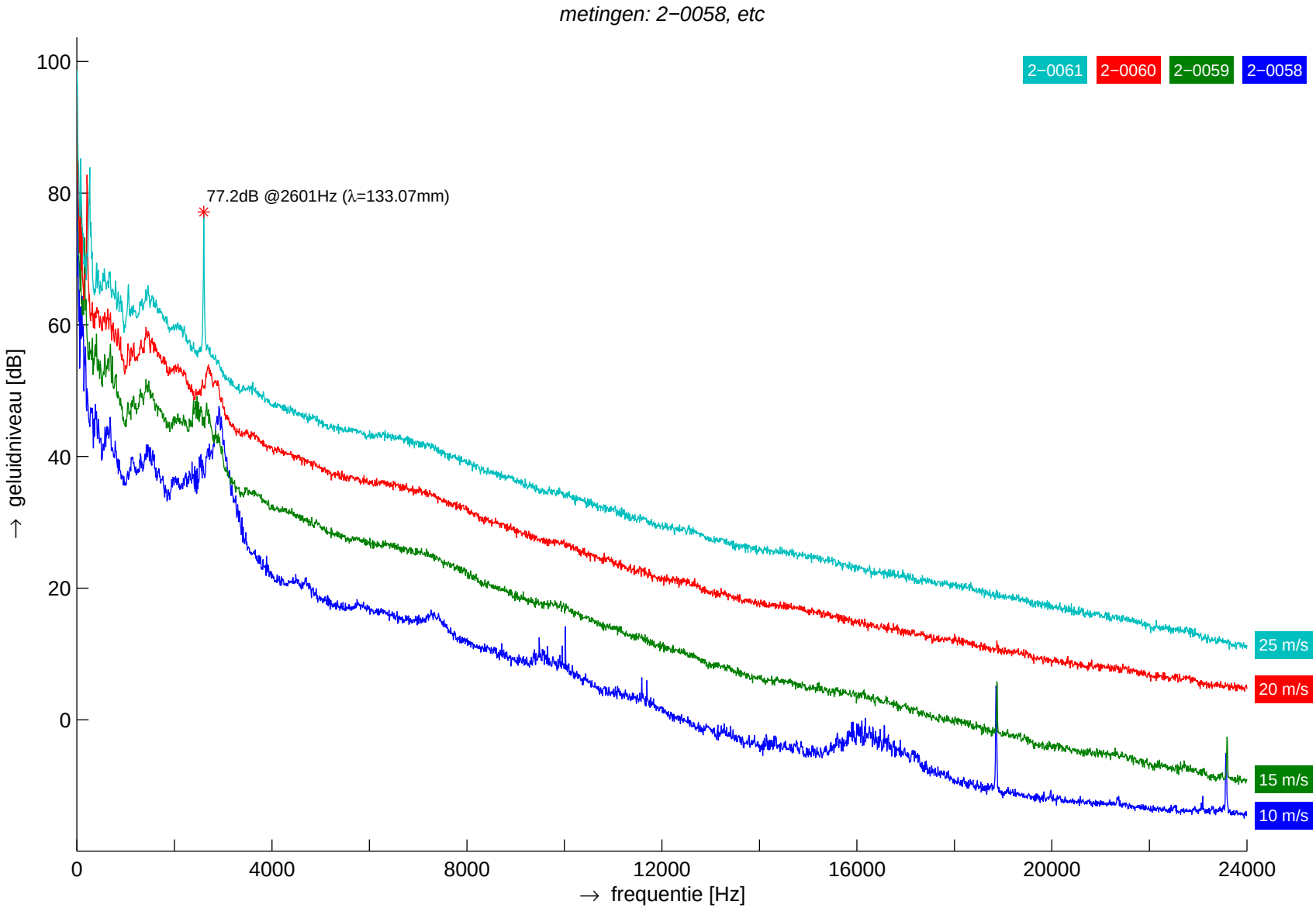

metingen: 2−0034, etc
111.2dB @2585Hz (λ=133.89mm)
87.1dB @4145Hz (λ=83.49mm)
79.0dB @7066Hz (λ=48.98mm)
67.8dB @5162Hz (λ=67.05mm)
66.2dB @4153Hz (λ=83.33mm)
65.9dB @3417Hz (λ=101.28mm)
59.0dB @1136Hz (λ=304.56mm)
51.8dB @7050Hz (λ=49.09mm)
2−0037
2−0036
2−0035
2−0034
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]

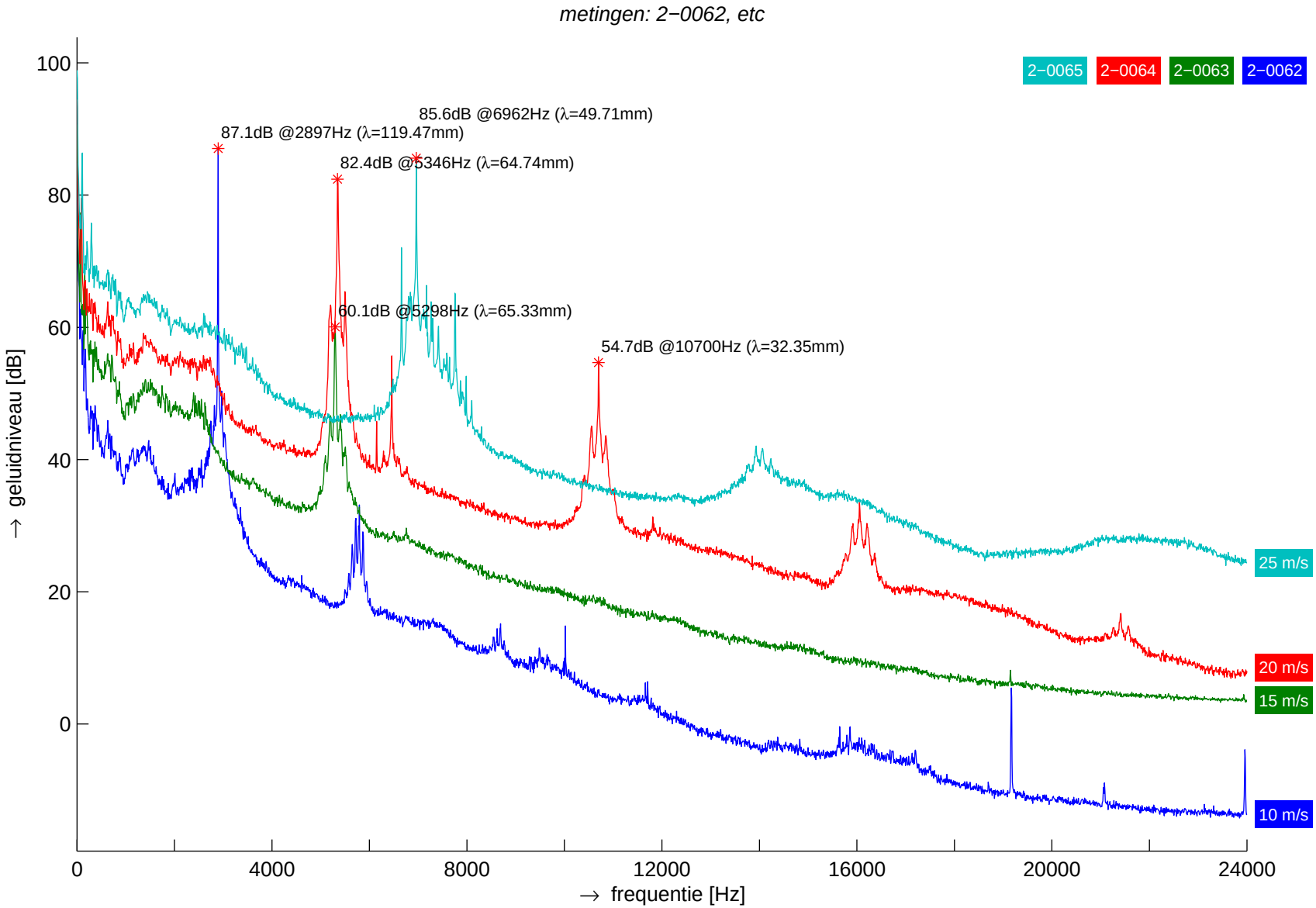

metingen: 2−0039, etc
105.4dB @2593Hz (λ=133.48mm)
89.5dB @4153Hz (λ=83.33mm)
80.5dB @7074Hz (λ=48.92mm)
78.8dB @2945Hz (λ=117.52mm)
74.4dB @4153Hz (λ=83.33mm)
57.8dB @9667Hz (λ=35.80mm)
48.0dB @7058Hz (λ=49.03mm)
2−0042
2−0041
2−0040
2−0039
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]

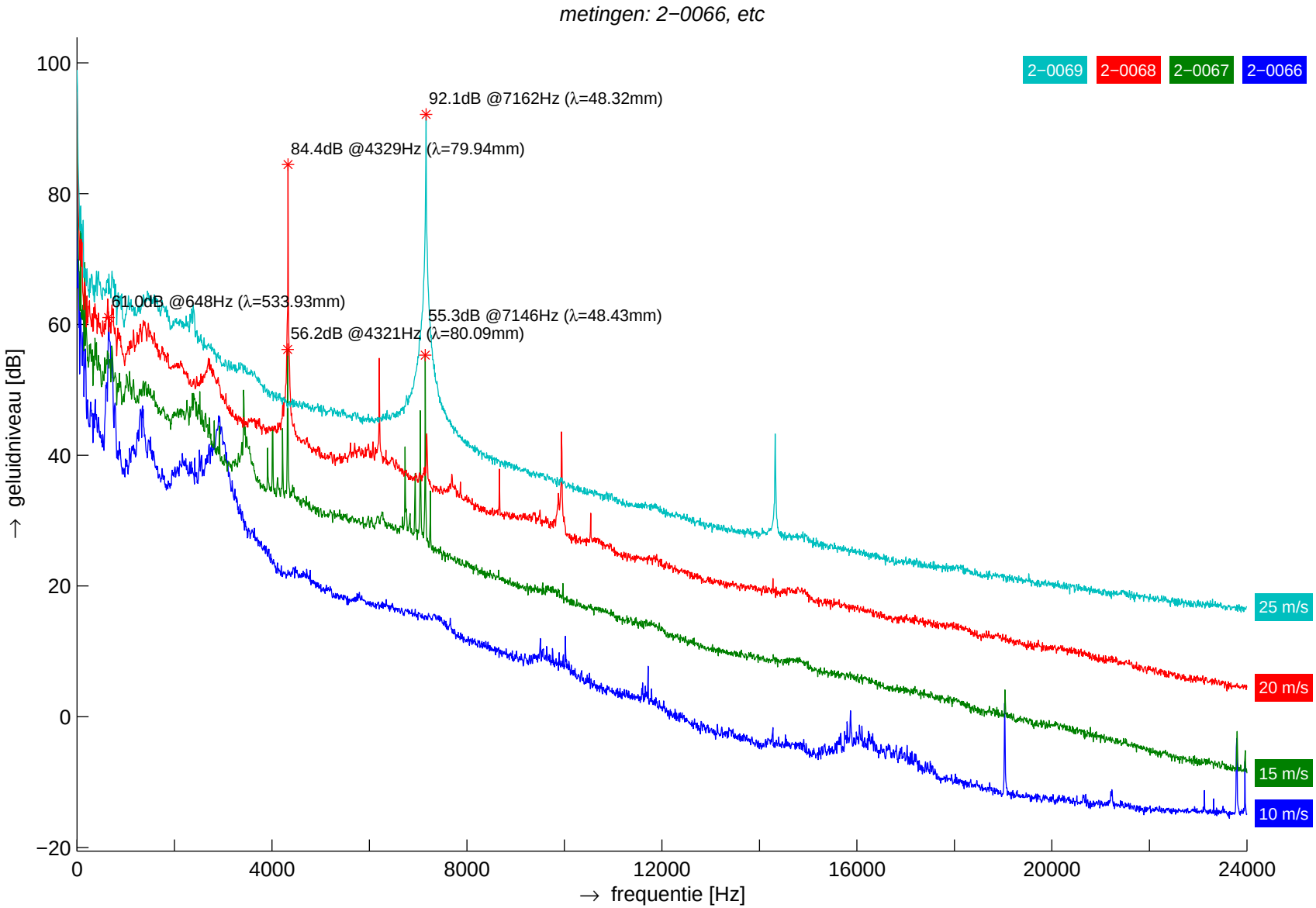

metingen: 2−0043, etc
2−0046
2−0045
2−0044
2−0043
81.9dB @2593Hz (λ=133.48mm)
73.5dB @5994Hz (λ=57.74mm)
70.4dB @5210Hz (λ=66.43mm)
62.2dB @8571Hz (λ=40.38mm)
64.4dB @5266Hz (λ=65.73mm)
57.3dB @11492Hz (λ=30.12mm)
60.1dB @6730Hz (λ=51.42mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

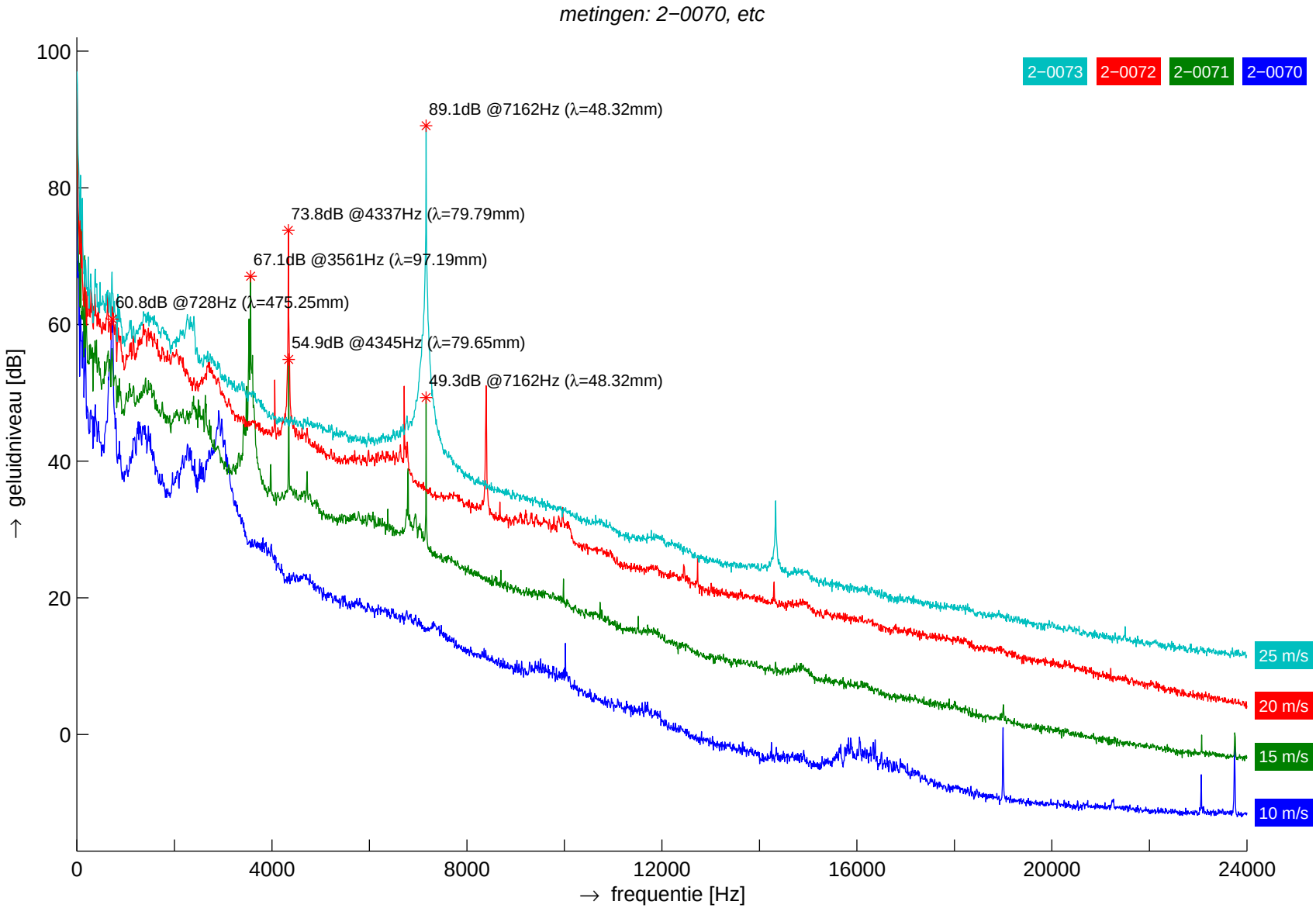

metingen: 2−0049, etc
2−0052
2−0051
2−0050
2−0049
89.0dB @7066Hz (λ=48.98mm)
83.4dB @4145Hz (λ=83.49mm)
60.3dB @4137Hz (λ=83.65mm)
50.9dB @7058Hz (λ=49.03mm)
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s

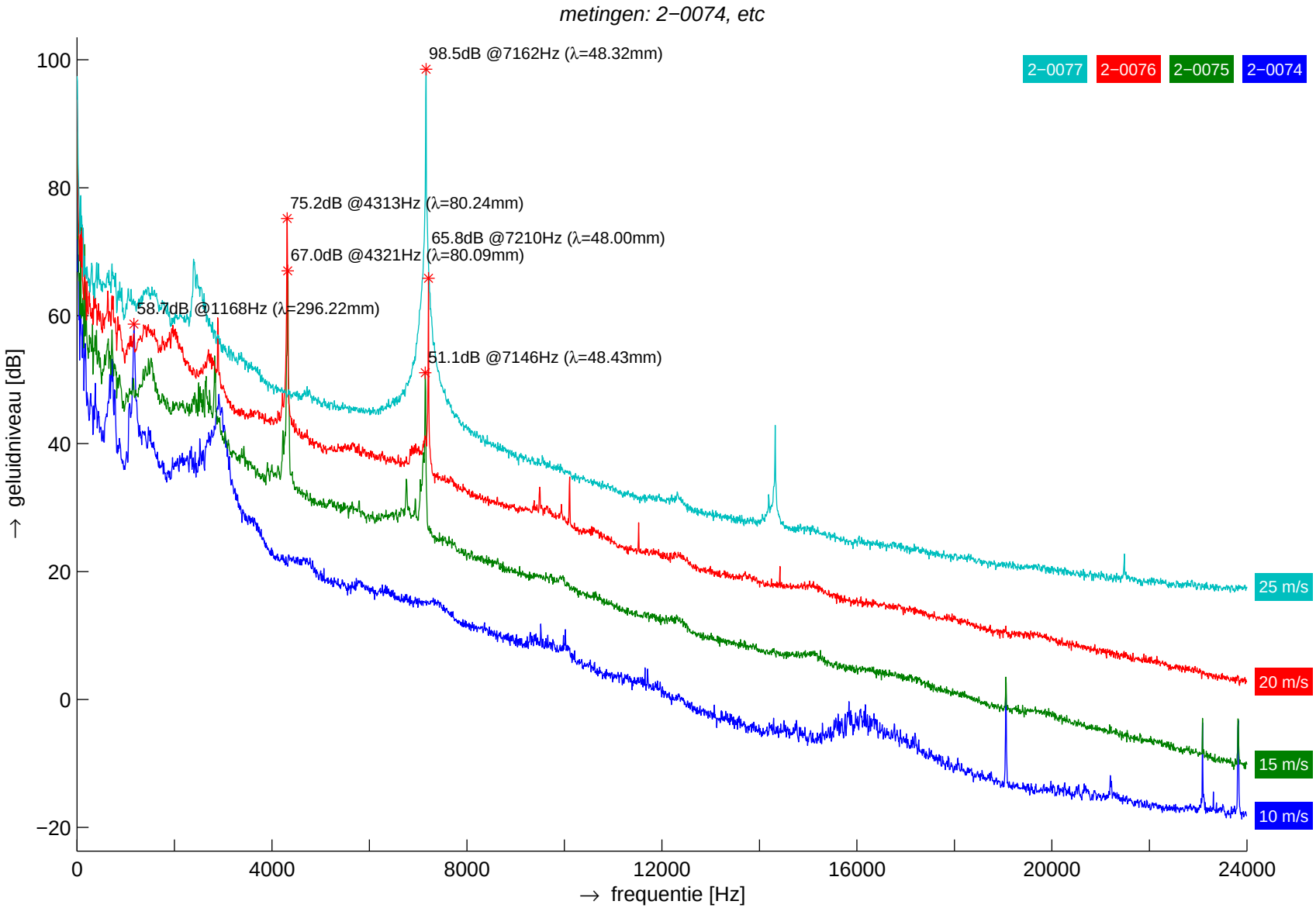

metingen: 2−0053, etc
106.2dB @2505Hz (λ=138.17mm)
97.3dB @7074Hz (λ=48.92mm)
88.4dB @4137Hz (λ=83.65mm)
73.6dB @4153Hz (λ=83.33mm)
67.1dB @7619Hz (λ=45.43mm)
62.1dB @7058Hz (λ=49.03mm)
64.6dB @2897Hz (λ=119.47mm)
55.3dB @2697Hz (λ=128.33mm)
2−0056
2−0055
2−0054
2−0053
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
0
20
40
60
80
100
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

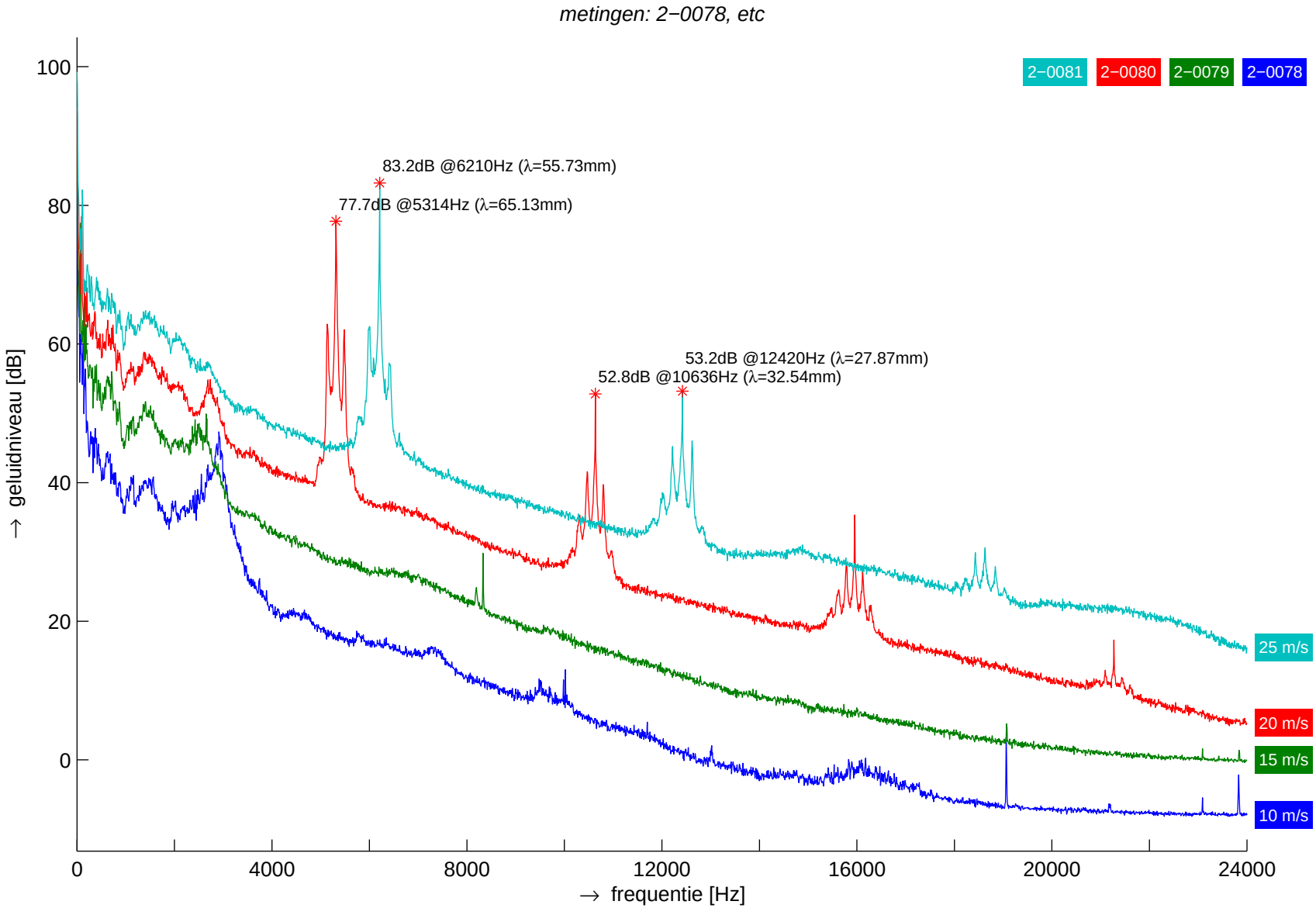

metingen: 2−0058, etc
2−0061
2−0060
2−0059
2−0058
77.2dB @2601Hz (λ=133.07mm)
100
80
60
40
20
0
→ geluidniveau [dB]
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s

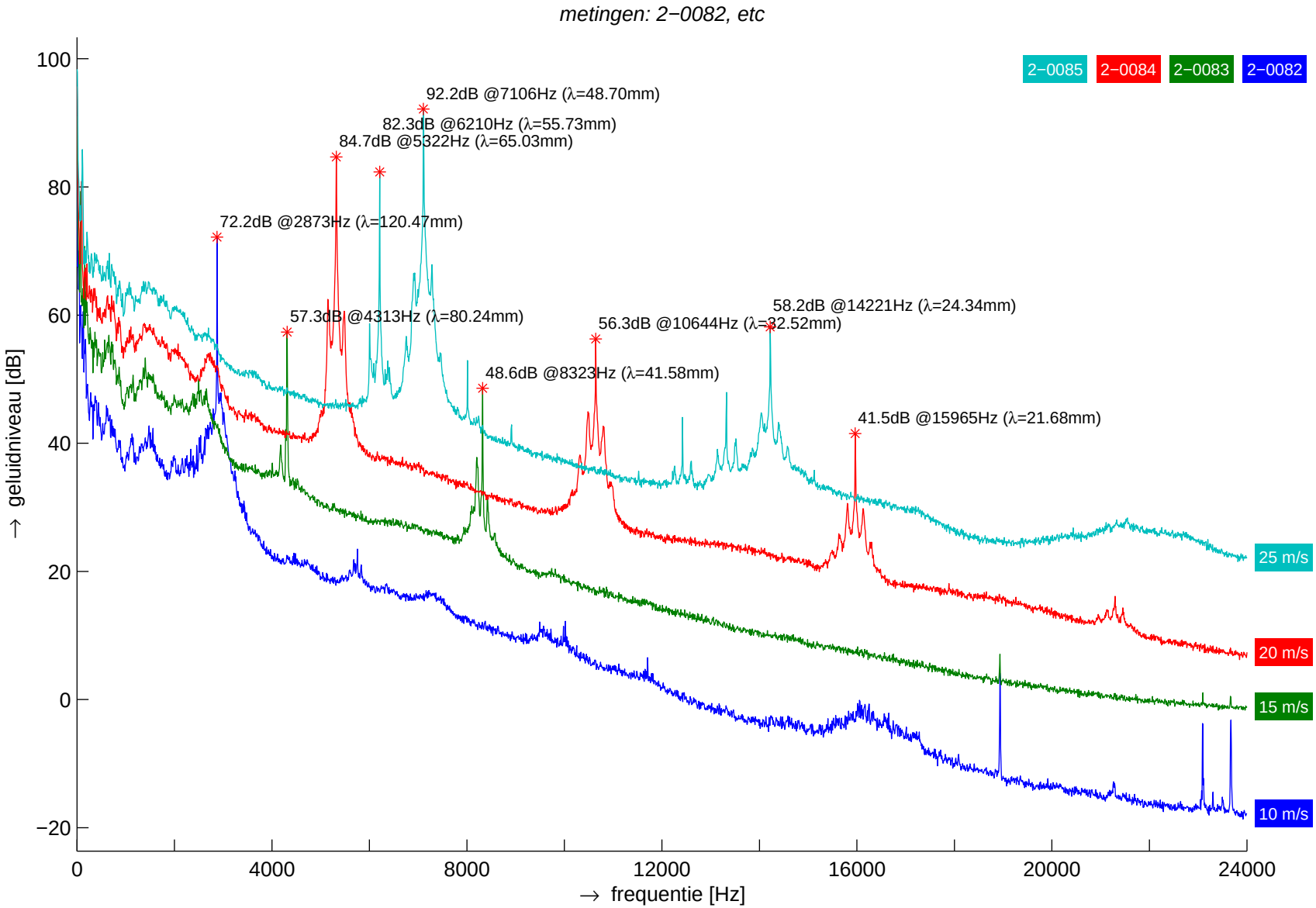

metingen: 2−0062, etc
2−0065
2−0064
2−0063
2−0062
87.1dB @2897Hz (λ=119.47mm)
85.6dB @6962Hz (λ=49.71mm)
82.4dB @5346Hz (λ=64.74mm)
60.1dB @5298Hz (λ=65.33mm)
54.7dB @10700Hz (λ=32.35mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

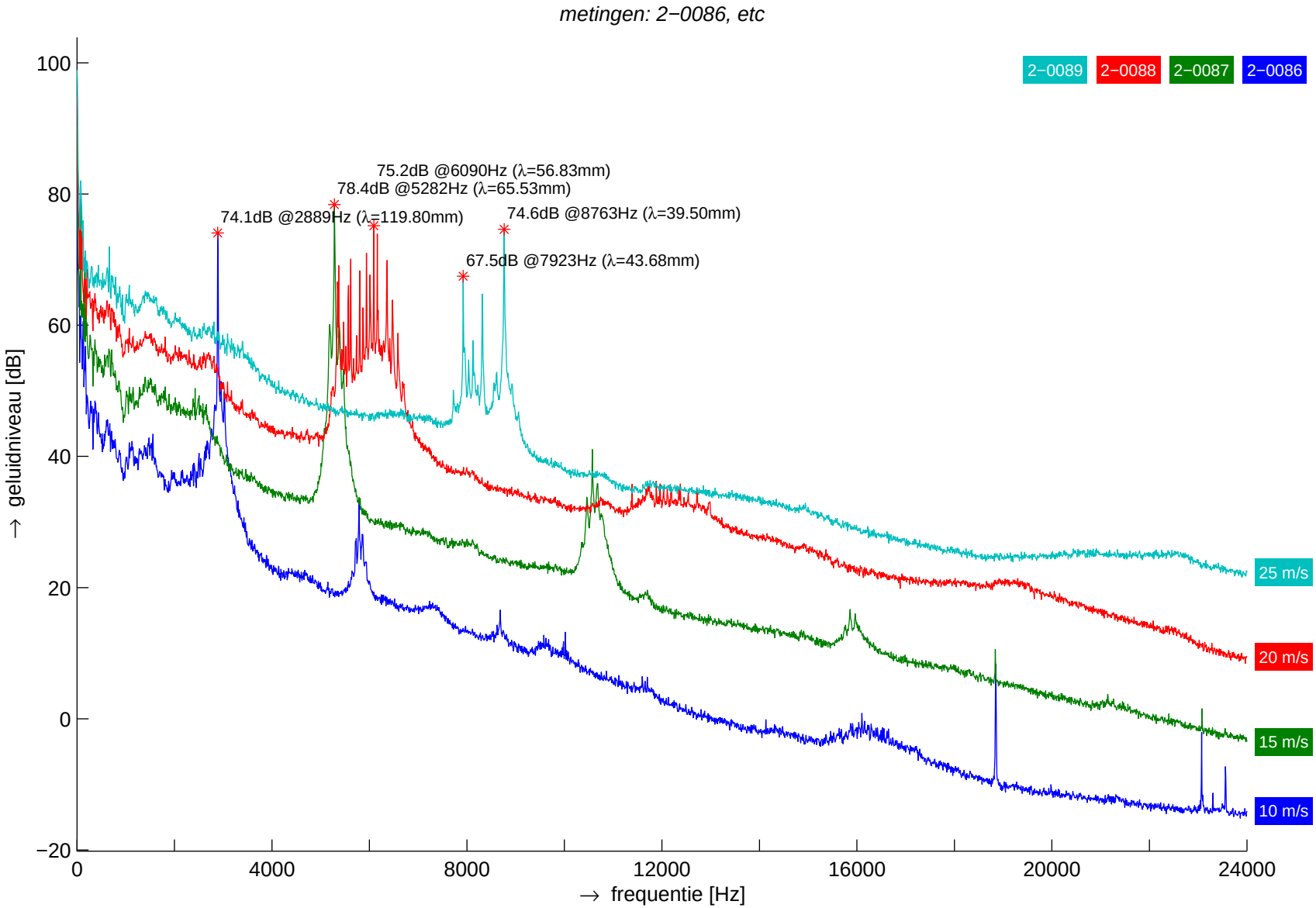

metingen: 2−0066, etc
2−0069
2−0068
2−0067
2−0066
92.1dB @7162Hz (λ=48.32mm)
84.4dB @4329Hz (λ=79.94mm)
61.0dB @648Hz (λ=533.93mm)
55.3dB @7146Hz (λ=48.43mm)
56.2dB @4321Hz (λ=80.09mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

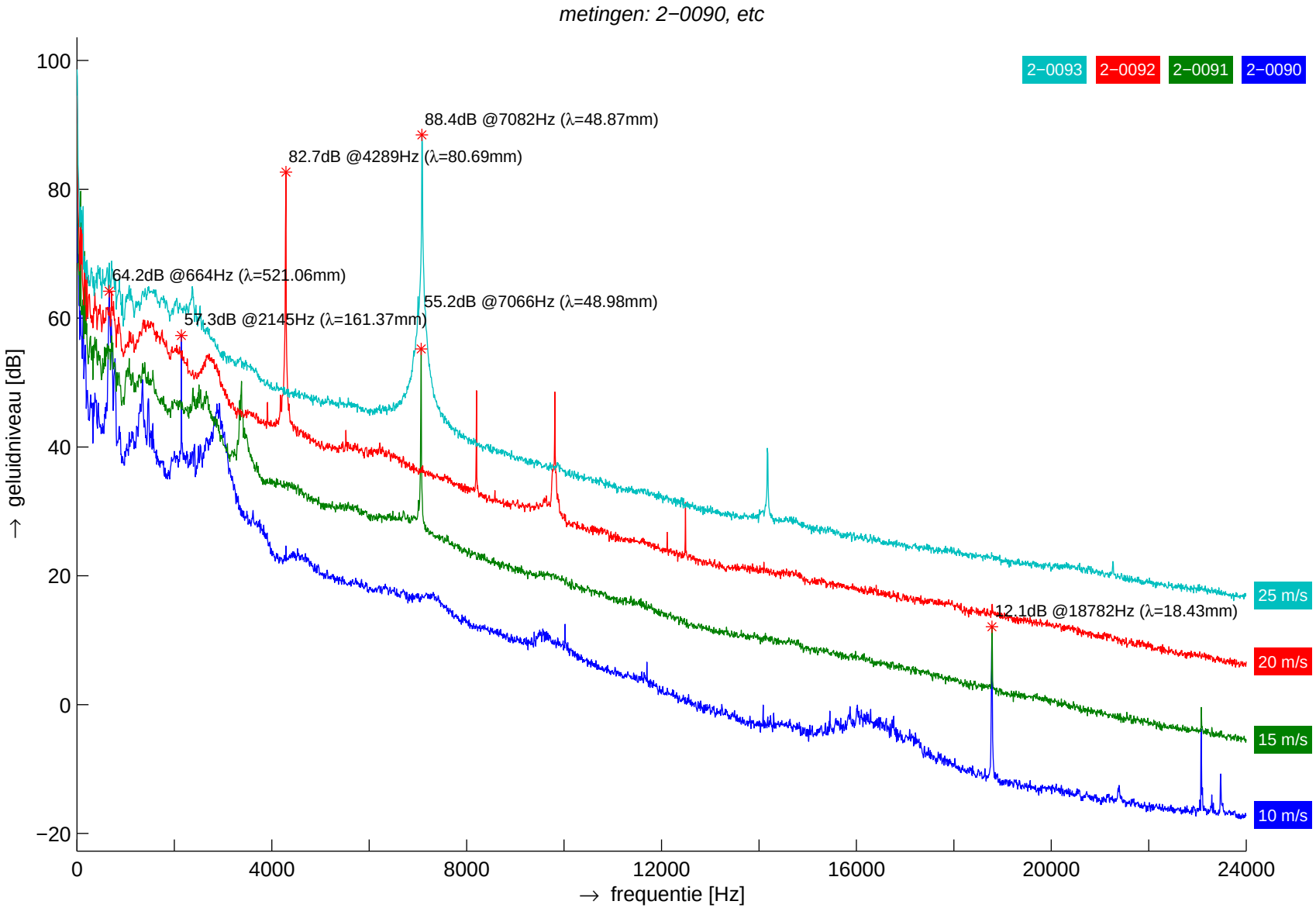

metingen: 2−0070, etc
2−0073
2−0072
2−0071
2−0070
89.1dB @7162Hz (λ=48.32mm)
73.8dB @4337Hz (λ=79.79mm)
67.1dB @3561Hz (λ=97.19mm)
60.8dB @728Hz (λ=475.25mm)
54.9dB @4345Hz (λ=79.65mm)
49.3dB @7162Hz (λ=48.32mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

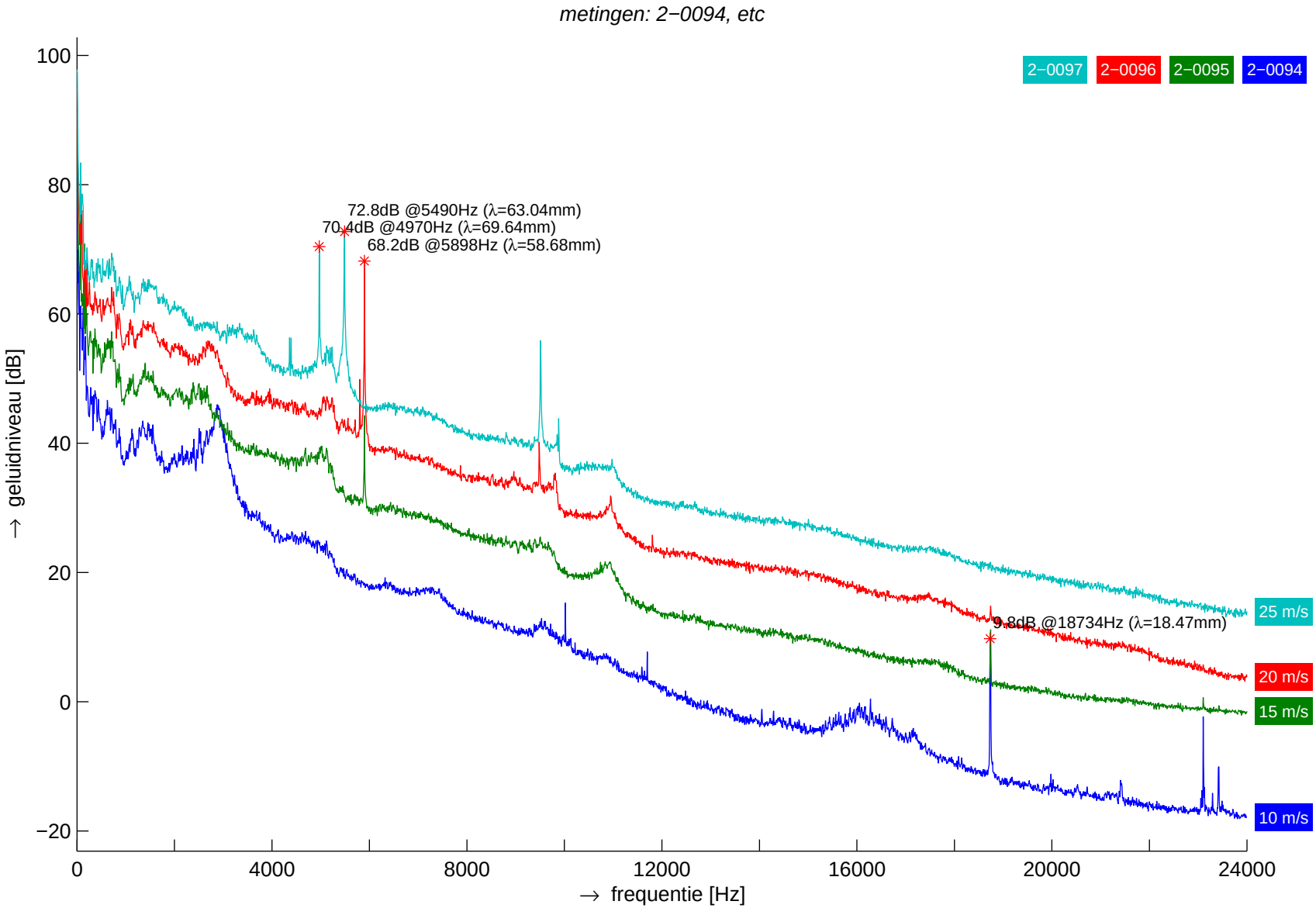

metingen: 2−0074, etc
98.5dB @7162Hz (λ=48.32mm)
75.2dB @4313Hz (λ=80.24mm)
65.8dB @7210Hz (λ=48.00mm)
67.0dB @4321Hz (λ=80.09mm)
58.7dB @1168Hz (λ=296.22mm)
51.1dB @7146Hz (λ=48.43mm)
2−0077
2−0076
2−0075
2−0074
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]

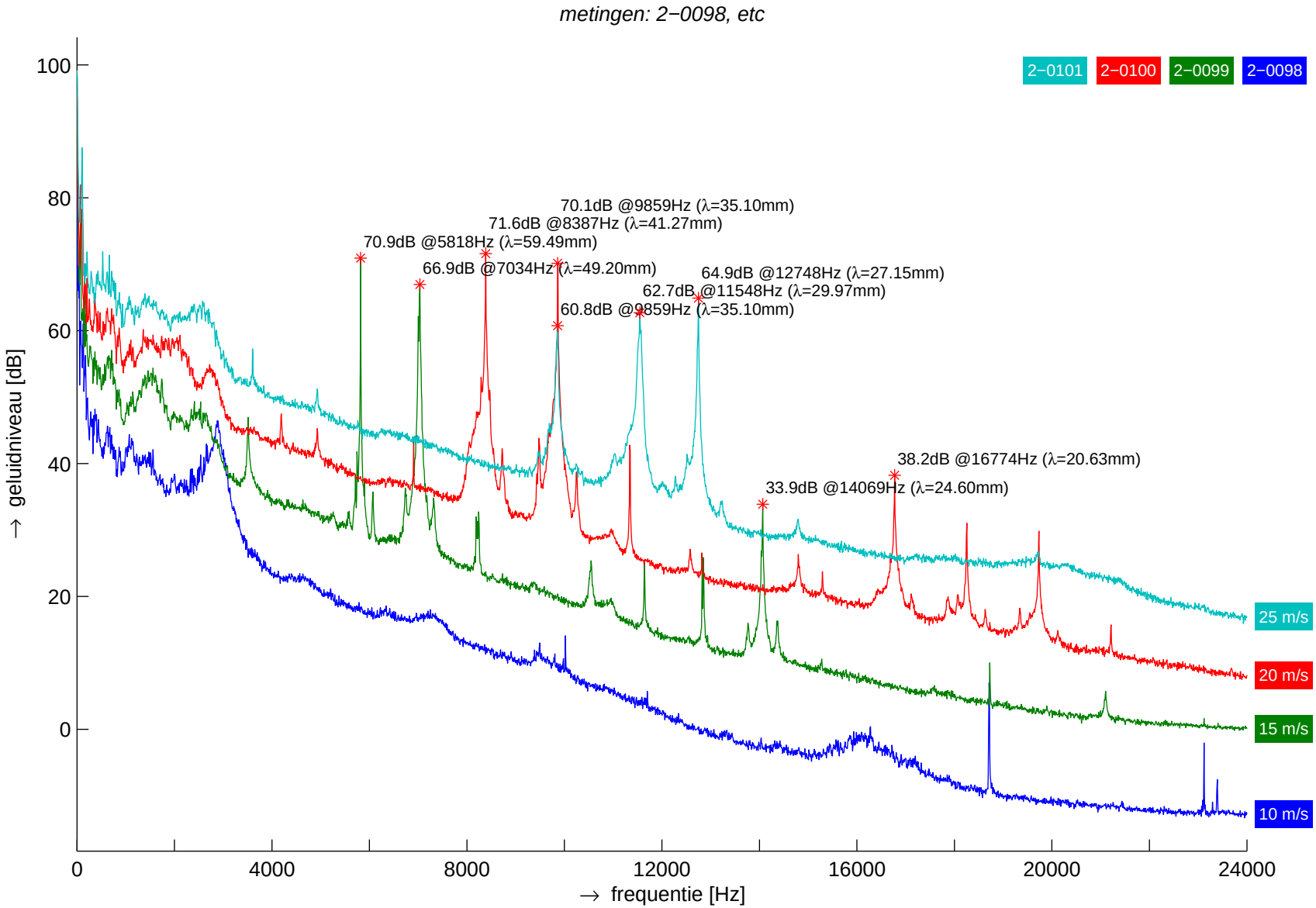

metingen: 2−0078, etc
2−0081
2−0080
2−0079
2−0078
83.2dB @6210Hz (λ=55.73mm)
77.7dB @5314Hz (λ=65.13mm)
53.2dB @12420Hz (λ=27.87mm)
52.8dB @10636Hz (λ=32.54mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

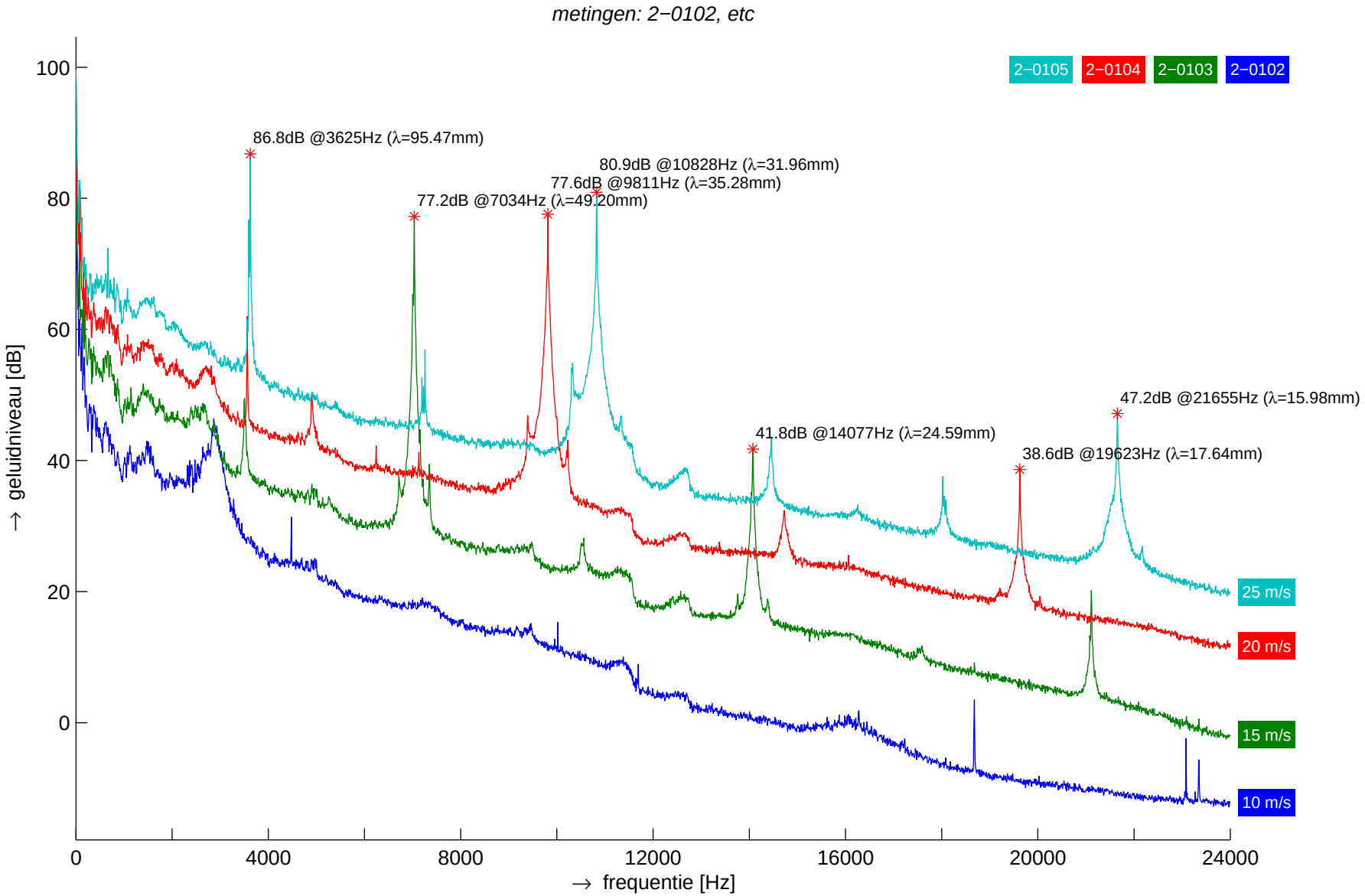

metingen: 2−0082, etc
2−0085
2−0084
2−0083
2−0082
92.2dB @7106Hz (λ=48.70mm)
82.3dB @6210Hz (λ=55.73mm)
84.7dB @5322Hz (λ=65.03mm)
72.2dB @2873Hz (λ=120.47mm)
57.3dB @4313Hz (λ=80.24mm)
56.3dB @10644Hz (λ=32.52mm)
58.2dB @14221Hz (λ=24.34mm)
48.6dB @8323Hz (λ=41.58mm)
41.5dB @15965Hz (λ=21.68mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]

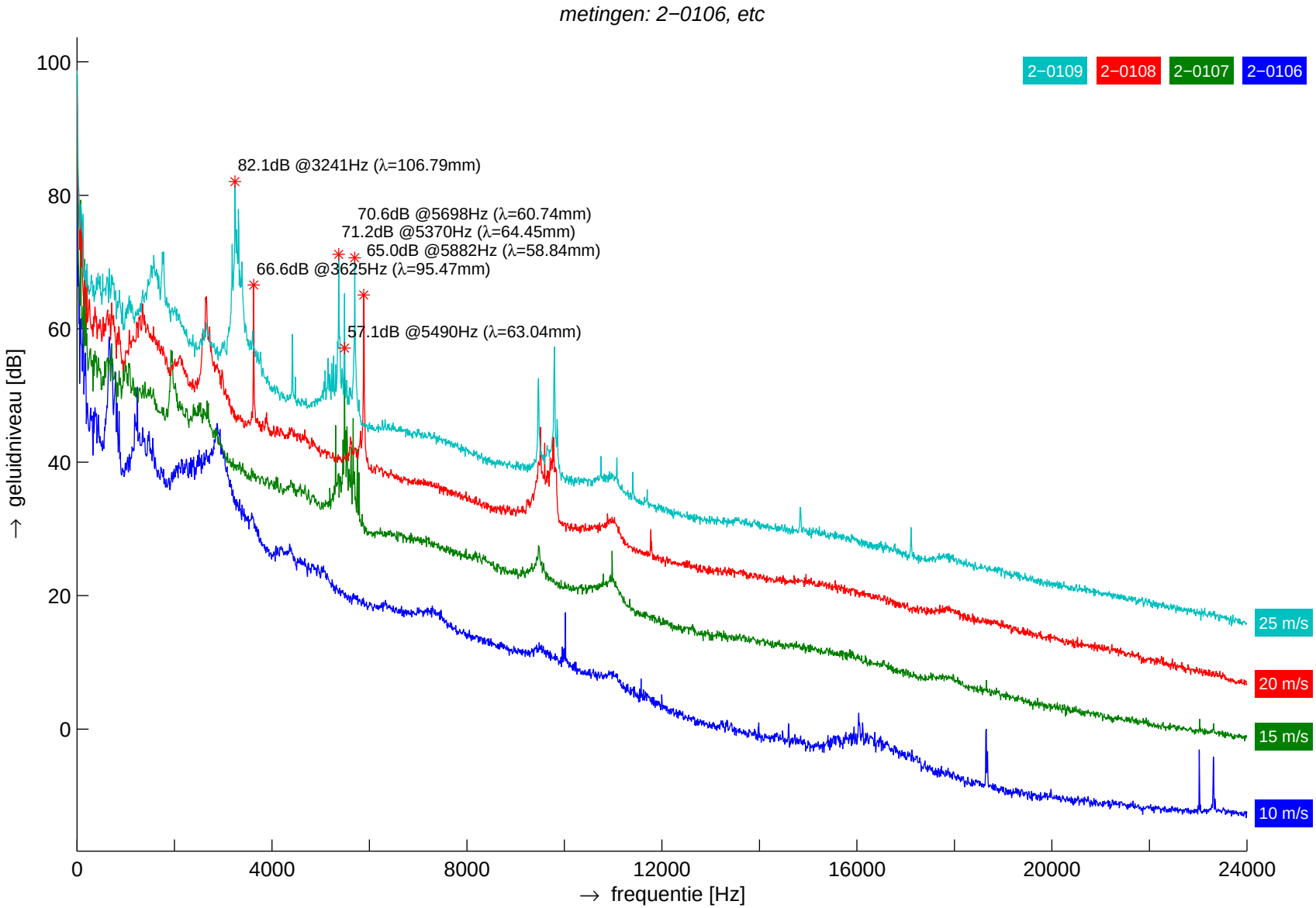

metingen: 2−0086, etc
2−0089
2−0088
2−0087
2−0086
75.2dB @6090Hz (λ=56.83mm)
78.4dB @5282Hz (λ=65.53mm)
74.1dB @2889Hz (λ=119.80mm)
74.6dB @8763Hz (λ=39.50mm)
67.5dB @7923Hz (λ=43.68mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]

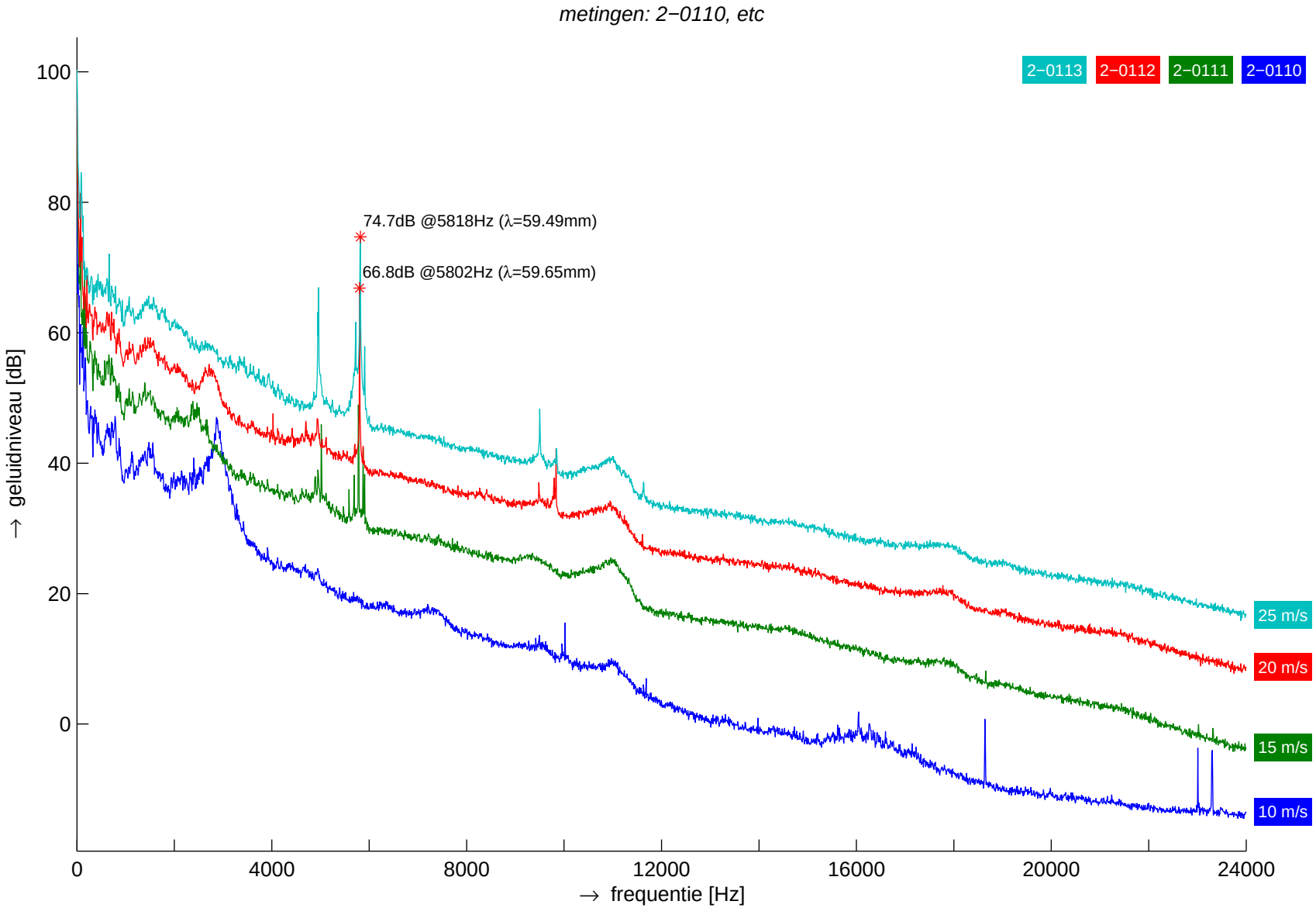

metingen: 2−0090, etc
2−0093
2−0092
2−0091
2−0090
88.4dB @7082Hz (λ=48.87mm)
82.7dB @4289Hz (λ=80.69mm)
64.2dB @664Hz (λ=521.06mm)
57.3dB @2145Hz (λ=161.37mm)
55.2dB @7066Hz (λ=48.98mm)
12.1dB @18782Hz (λ=18.43mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

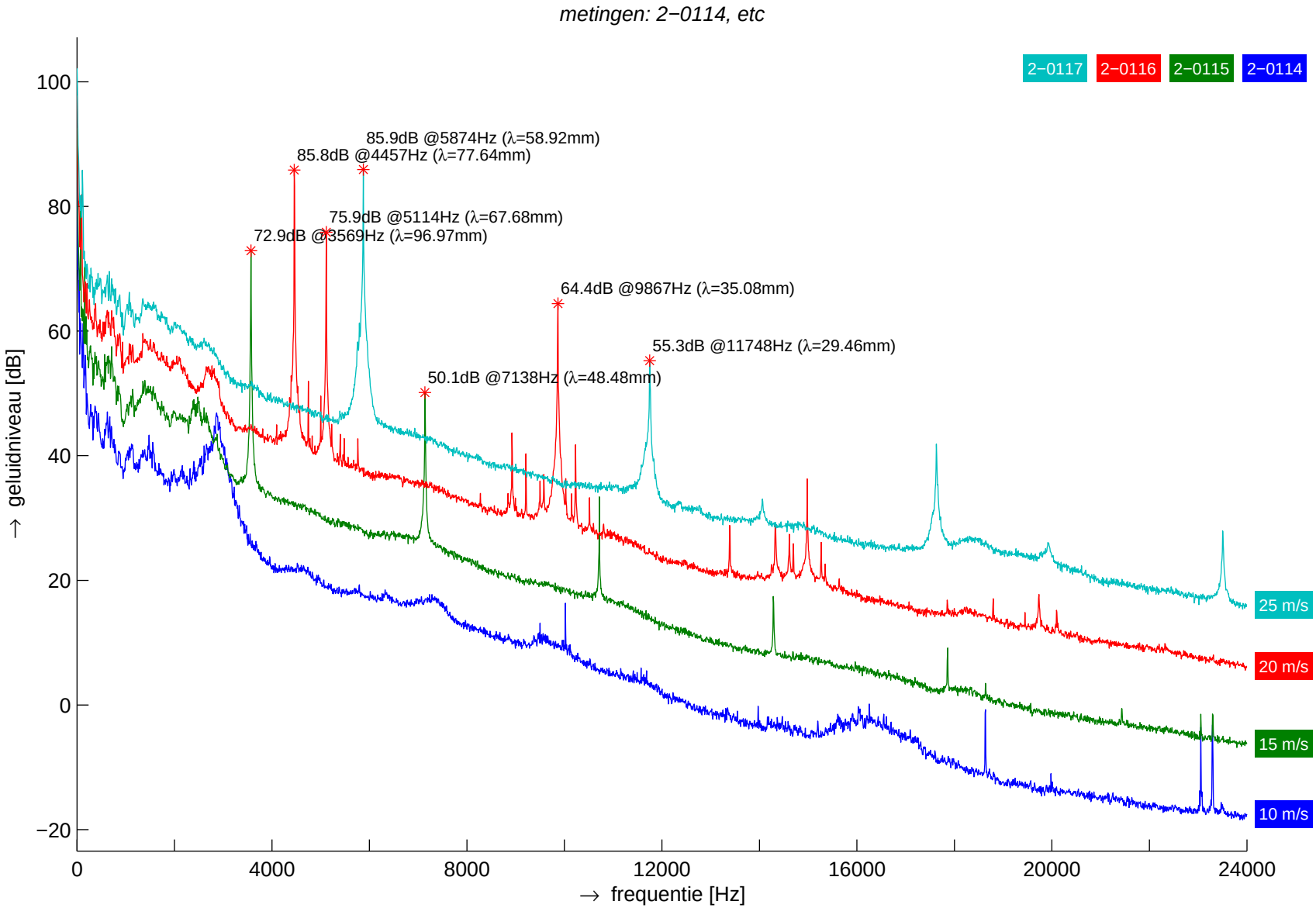

metingen: 2−0094, etc
2−0097
2−0096
2−0095
2−0094
72.8dB @5490Hz (λ=63.04mm)
70.4dB @4970Hz (λ=69.64mm)
68.2dB @5898Hz (λ=58.68mm)
9.8dB @18734Hz (λ=18.47mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

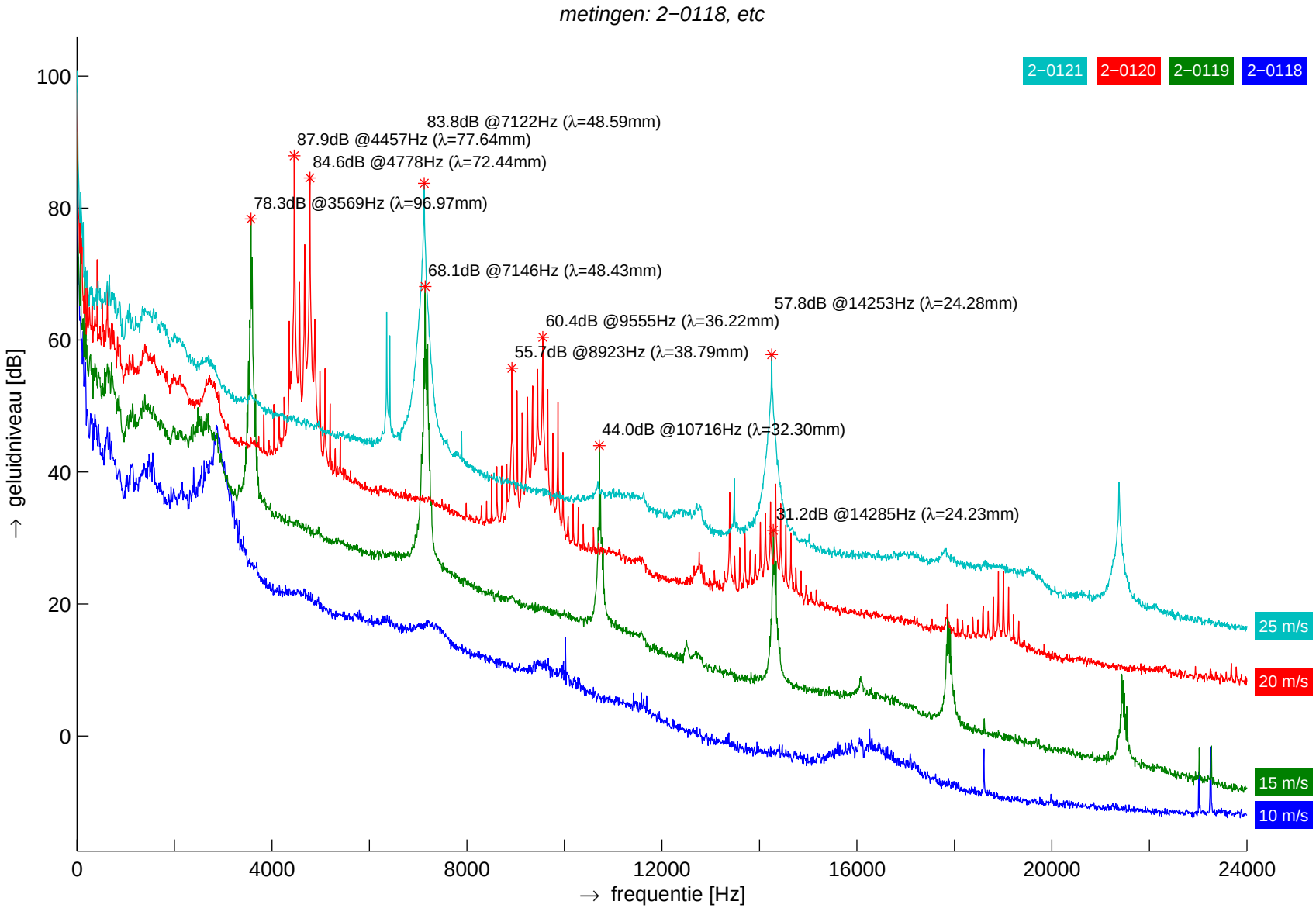

metingen: 2−0098, etc
2−0101
2−0100
2−0099
2−0098
70.1dB @9859Hz (λ=35.10mm)
71.6dB @8387Hz (λ=41.27mm)
70.9dB @5818Hz (λ=59.49mm)
66.9dB @7034Hz (λ=49.20mm)
64.9dB @12748Hz (λ=27.15mm)
62.7dB @11548Hz (λ=29.97mm)
60.8dB @9859Hz (λ=35.10mm)
38.2dB @16774Hz (λ=20.63mm)
33.9dB @14069Hz (λ=24.60mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

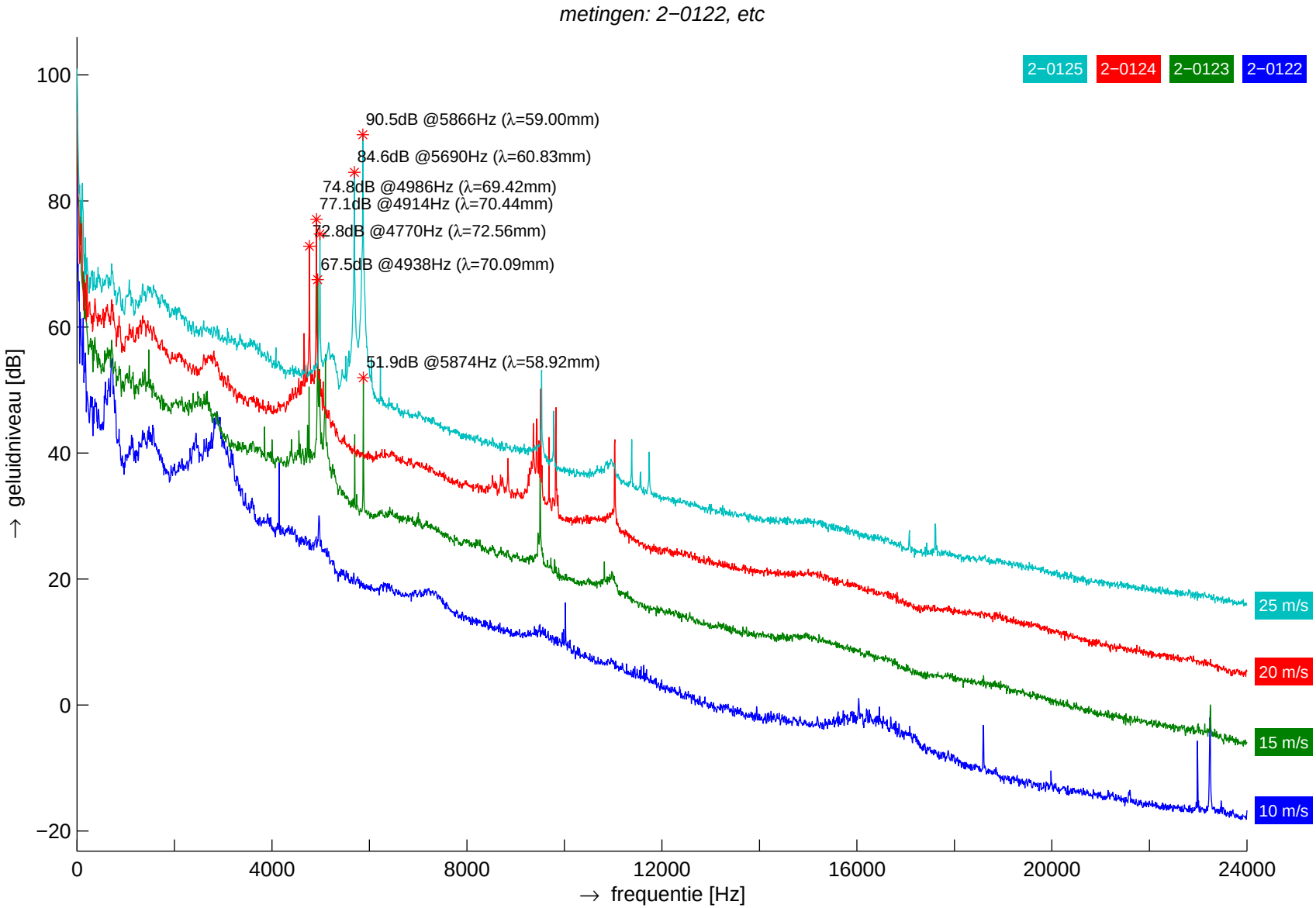

metingen: 2−0102, etc
2−0105
2−0104
2−0103
2−0102
86.8dB @3625Hz (λ=95.47mm)
80.9dB @10828Hz (λ=31.96mm)
77.6dB @9811Hz (λ=35.28mm)
77.2dB @7034Hz (λ=49.20mm)
47.2dB @21655Hz (λ=15.98mm)
41.8dB @14077Hz (λ=24.59mm)
38.6dB @19623Hz (λ=17.64mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

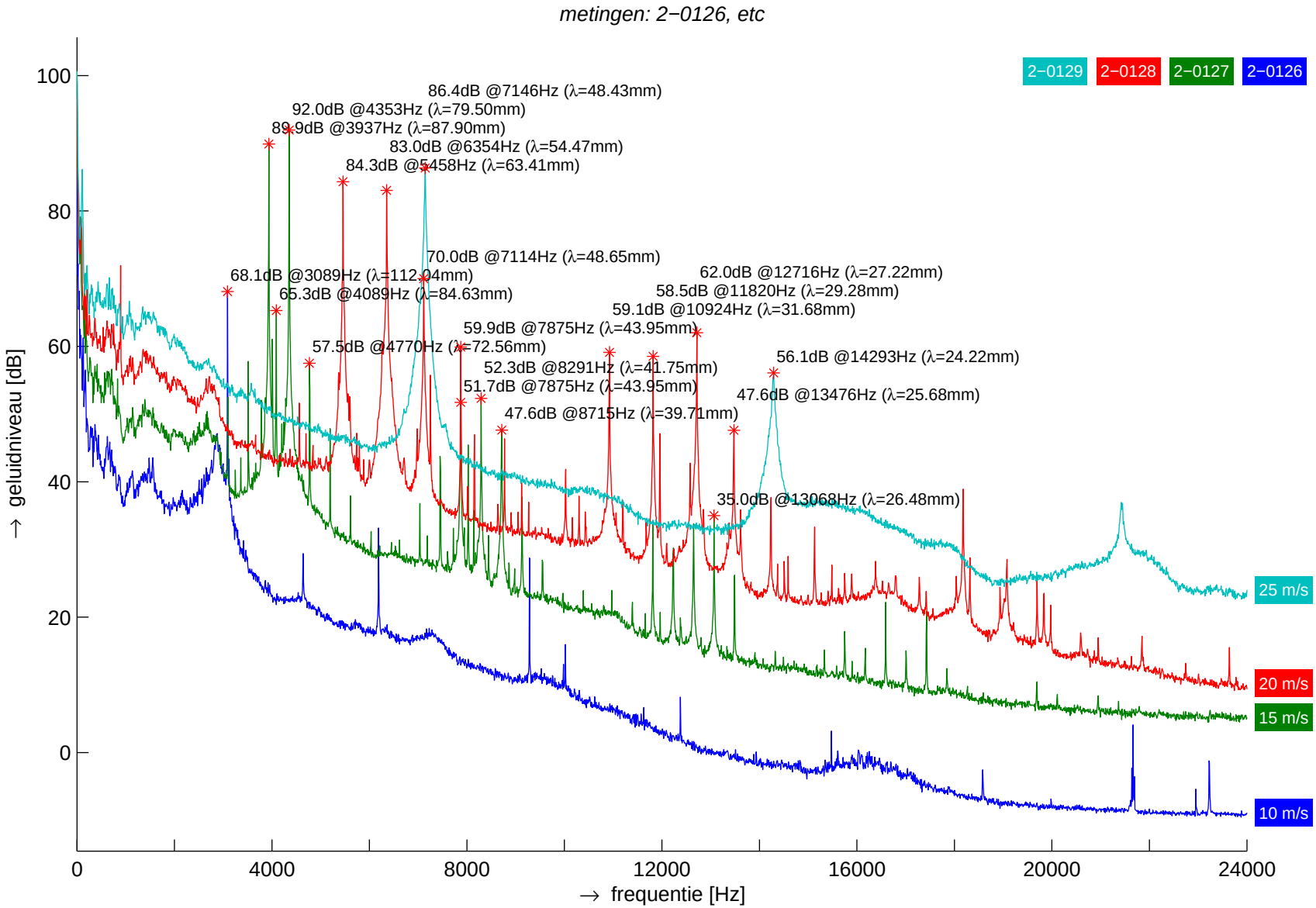

metingen: 2−0106, etc
2−0109
2−0108
2−0107
2−0106
82.1dB @3241Hz (λ=106.79mm)
70.6dB @5698Hz (λ=60.74mm)
71.2dB @5370Hz (λ=64.45mm)
65.0dB @5882Hz (λ=58.84mm)
66.6dB @3625Hz (λ=95.47mm)
57.1dB @5490Hz (λ=63.04mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

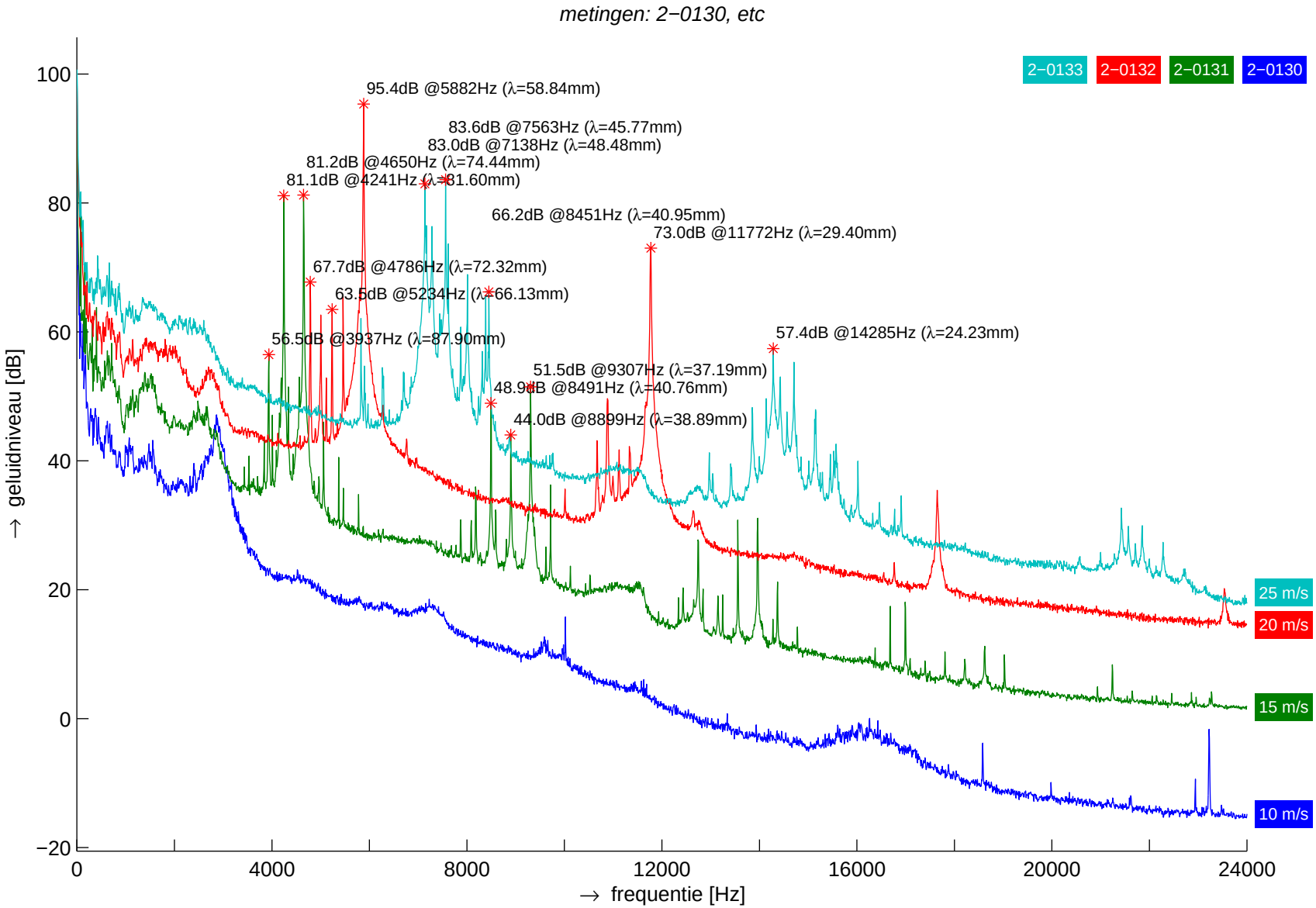

metingen: 2−0110, etc
2−0113
2−0112
2−0111
2−0110
74.7dB @5818Hz (λ=59.49mm)
66.8dB @5802Hz (λ=59.65mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

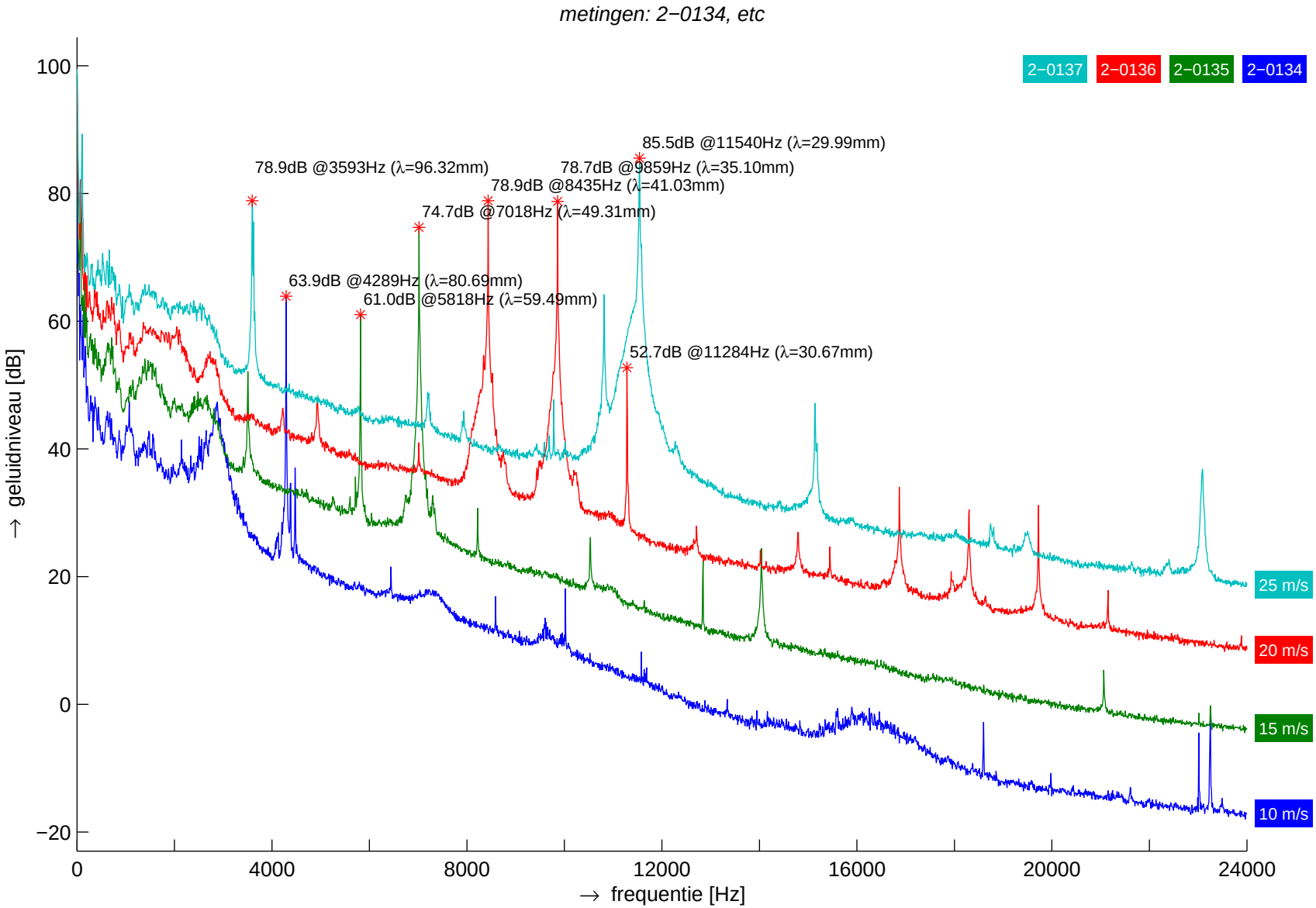

metingen: 2−0114, etc
2−0117
2−0116
2−0115
2−0114
85.9dB @5874Hz (λ=58.92mm)
85.8dB @4457Hz (λ=77.64mm)
75.9dB @5114Hz (λ=67.68mm)
72.9dB @3569Hz (λ=96.97mm)
64.4dB @9867Hz (λ=35.08mm)
55.3dB @11748Hz (λ=29.46mm)
50.1dB @7138Hz (λ=48.48mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]

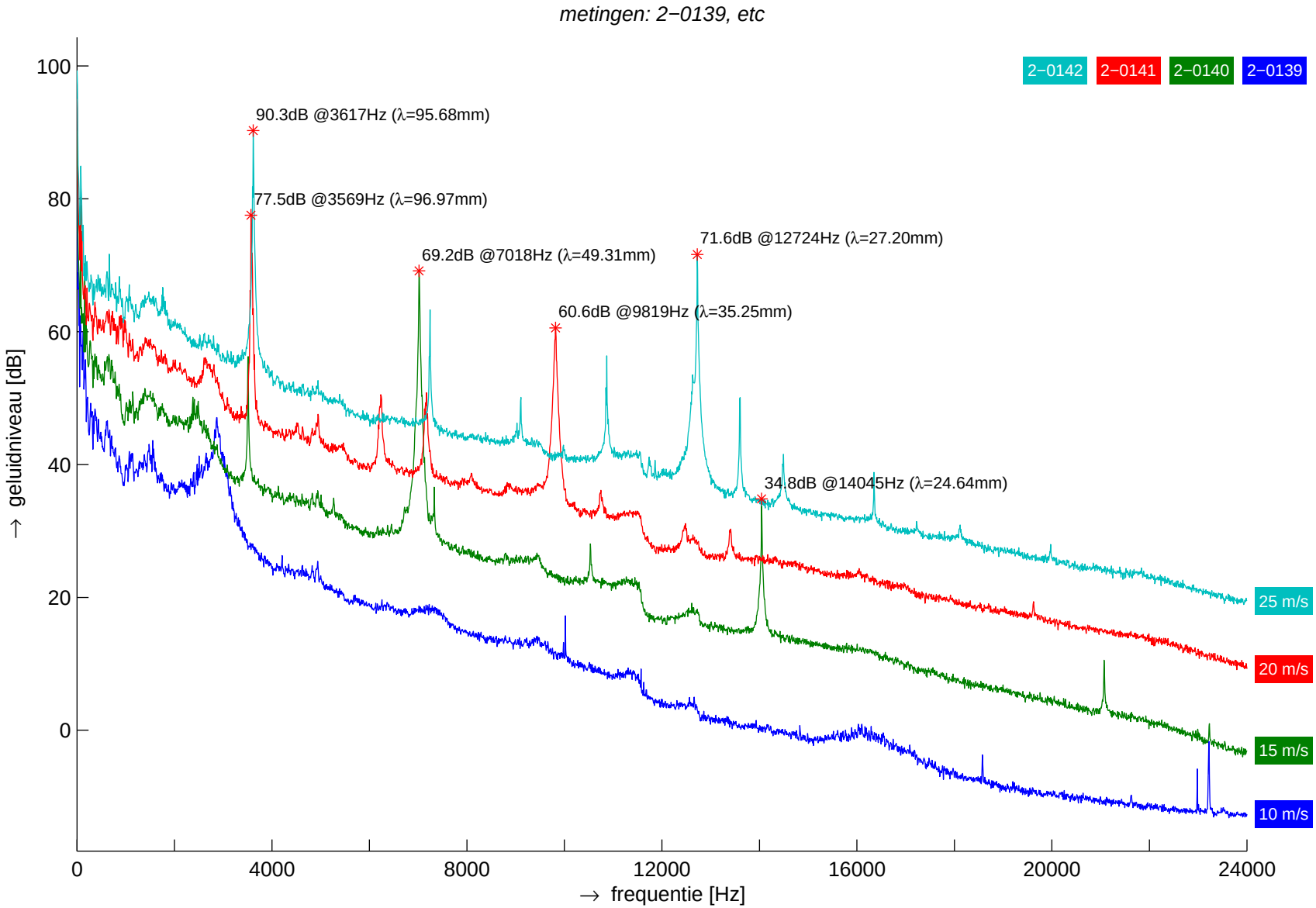

metingen: 2−0118, etc
2−0121
2−0120
2−0119
2−0118
83.8dB @7122Hz (λ=48.59mm)
87.9dB @4457Hz (λ=77.64mm)
84.6dB @4778Hz (λ=72.44mm)
78.3dB @3569Hz (λ=96.97mm)
68.1dB @7146Hz (λ=48.43mm)
57.8dB @14253Hz (λ=24.28mm)
60.4dB @9555Hz (λ=36.22mm)
55.7dB @8923Hz (λ=38.79mm)
44.0dB @10716Hz (λ=32.30mm)
31.2dB @14285Hz (λ=24.23mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

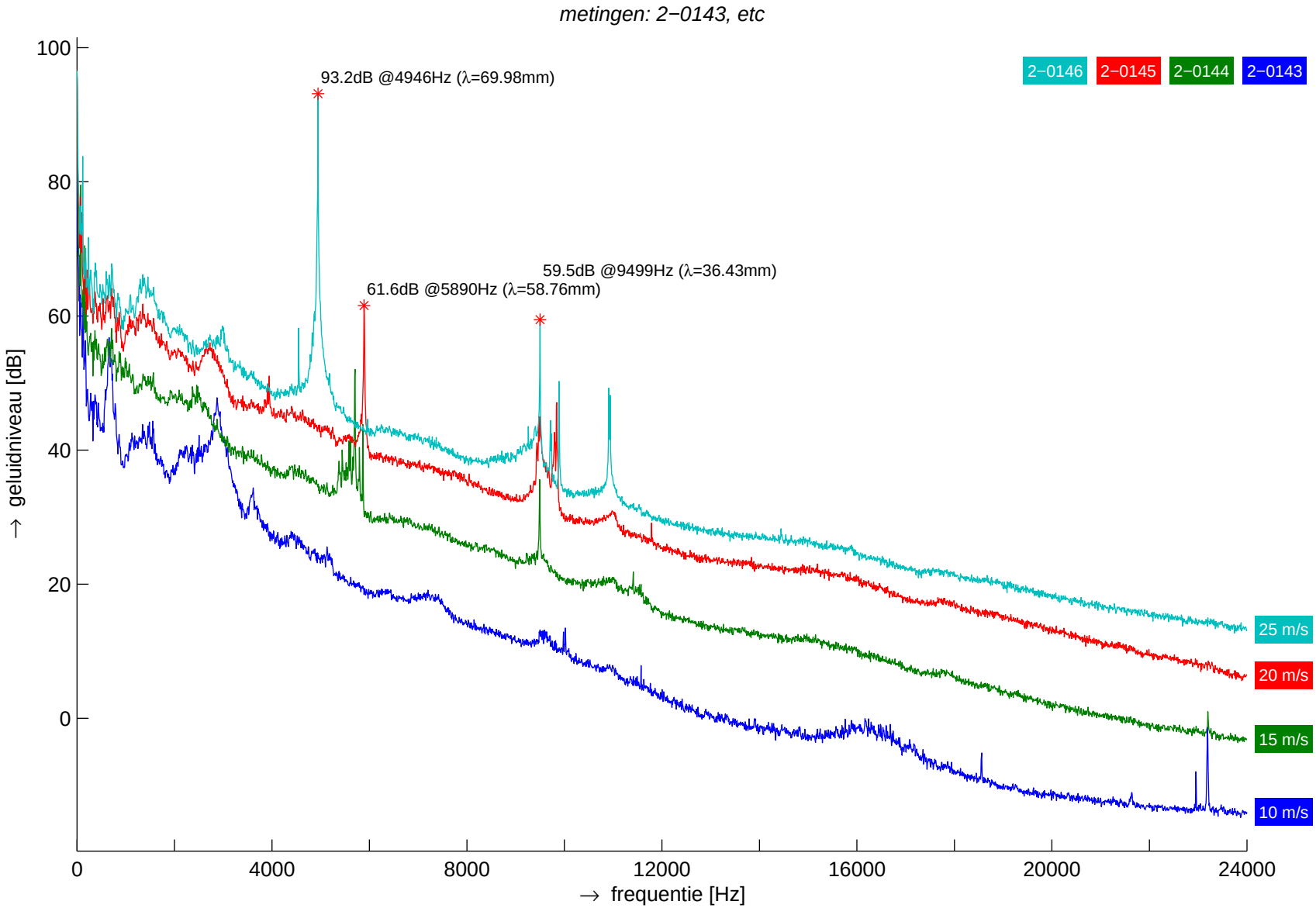

metingen: 2−0122, etc
2−0125
2−0124
2−0123
2−0122
90.5dB @5866Hz (λ=59.00mm)
84.6dB @5690Hz (λ=60.83mm)
74.8dB @4986Hz (λ=69.42mm)
77.1dB @4914Hz (λ=70.44mm)
72.8dB @4770Hz (λ=72.56mm)
67.5dB @4938Hz (λ=70.09mm)
51.9dB @5874Hz (λ=58.92mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]


metingen: 2−0126, etc
2−0129
2−0128
2−0127
2−0126
86.4dB @7146Hz (λ=48.43mm)
92.0dB @4353Hz (λ=79.50mm)
89.9dB @3937Hz (λ=87.90mm)
83.0dB @6354Hz (λ=54.47mm)
84.3dB @5458Hz (λ=63.41mm)
70.0dB @7114Hz (λ=48.65mm)
68.1dB @3089Hz (λ=112.04mm)
65.3dB @4089Hz (λ=84.63mm)
62.0dB @12716Hz (λ=27.22mm)
58.5dB @11820Hz (λ=29.28mm)
59.1dB @10924Hz (λ=31.68mm)
59.9dB @7875Hz (λ=43.95mm)
57.5dB @4770Hz (λ=72.56mm)
52.3dB @8291Hz (λ=41.75mm)
56.1dB @14293Hz (λ=24.22mm)
51.7dB @7875Hz (λ=43.95mm)
47.6dB @13476Hz (λ=25.68mm)
47.6dB @8715Hz (λ=39.71mm)
35.0dB @13068Hz (λ=26.48mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000


metingen: 2−0130, etc
2−0133
2−0132
2−0131
2−0130
95.4dB @5882Hz (λ=58.84mm)
83.6dB @7563Hz (λ=45.77mm)
83.0dB @7138Hz (λ=48.48mm)
81.2dB @4650Hz (λ=74.44mm)
81.1dB @4241Hz (λ=81.60mm)
66.2dB @8451Hz (λ=40.95mm)
73.0dB @11772Hz (λ=29.40mm)
67.7dB @4786Hz (λ=72.32mm)
63.5dB @5234Hz (λ=66.13mm)
56.5dB @3937Hz (λ=87.90mm)
57.4dB @14285Hz (λ=24.23mm)
51.5dB @9307Hz (λ=37.19mm)
48.9dB @8491Hz (λ=40.76mm)
44.0dB @8899Hz (λ=38.89mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000


metingen: 2−0134, etc
2−0137
2−0136
2−0135
2−0134
85.5dB @11540Hz (λ=29.99mm)
78.9dB @3593Hz (λ=96.32mm)
78.7dB @9859Hz (λ=35.10mm)
78.9dB @8435Hz (λ=41.03mm)
74.7dB @7018Hz (λ=49.31mm)
63.9dB @4289Hz (λ=80.69mm)
61.0dB @5818Hz (λ=59.49mm)
52.7dB @11284Hz (λ=30.67mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
100
80
60
40
20
0
−20
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000
→ frequentie [Hz]


metingen: 2−0139, etc
2−0142
2−0141
2−0140
2−0139
90.3dB @3617Hz (λ=95.68mm)
77.5dB @3569Hz (λ=96.97mm)
69.2dB @7018Hz (λ=49.31mm)
71.6dB @12724Hz (λ=27.20mm)
60.6dB @9819Hz (λ=35.25mm)
34.8dB @14045Hz (λ=24.64mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000


metingen: 2−0143, etc
2−0146
2−0145
2−0144
2−0143
93.2dB @4946Hz (λ=69.98mm)
61.6dB @5890Hz (λ=58.76mm)
59.5dB @9499Hz (λ=36.43mm)
25 m/s
20 m/s
15 m/s
10 m/s
→ geluidniveau [dB]
→ frequentie [Hz]
100
80
60
40
20
0
0
4000
8000
12000
16000
20000
24000

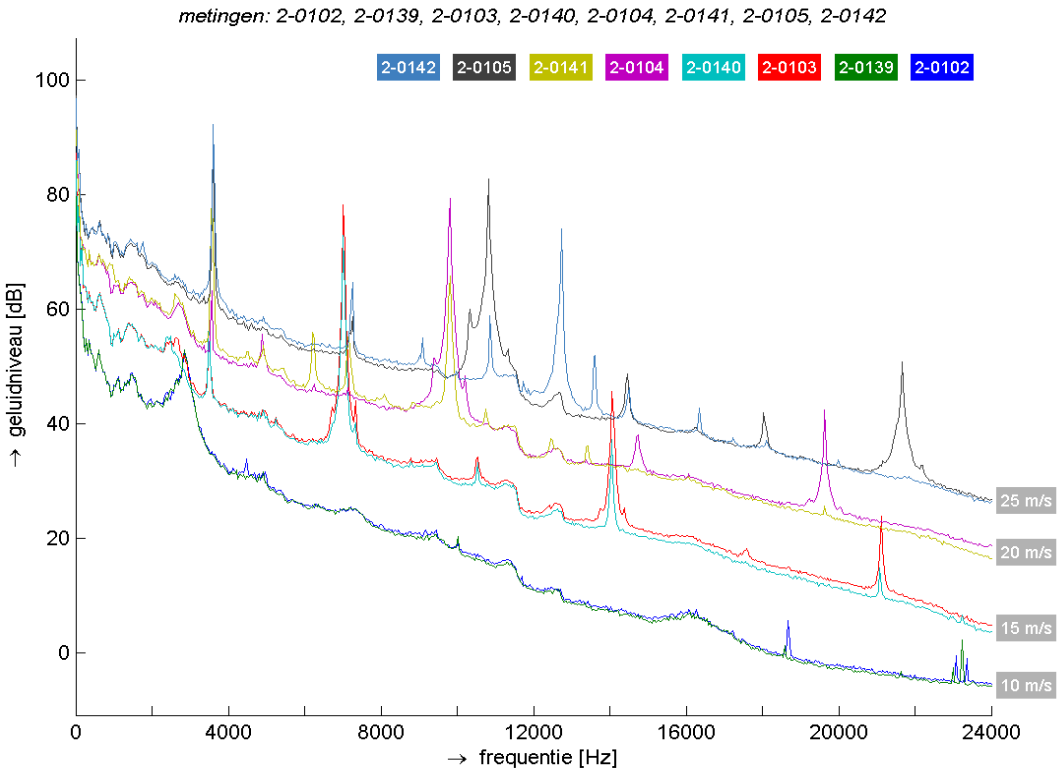
Bijlage 2 – Grafieken bij "RELATIES GEOMETRIE"

In deze bijlage zijn grafieken opgenomen waarin twee meetseries van verschillende roosters zijn gecombineerd, waarin de frequentie tegen het geluidniveau is uitgezet. Elke van deze maatseries bestaat uit vier metingen bij constante hoekverdraaiing maar met verschillende snelheden (tenzij anders aangegeven zijn dat 10, 15, 20 en 25 m/s). De nummers van de metingen zijn in iedere grafiek aangegeven en corresponderen met de kleuren van de lijnen in de grafiek. Tevens is steeds duidelijk gemaakt welke lijnen bij welke snelheden horen door een snelheidsaanduidingen aan de rechterkant.

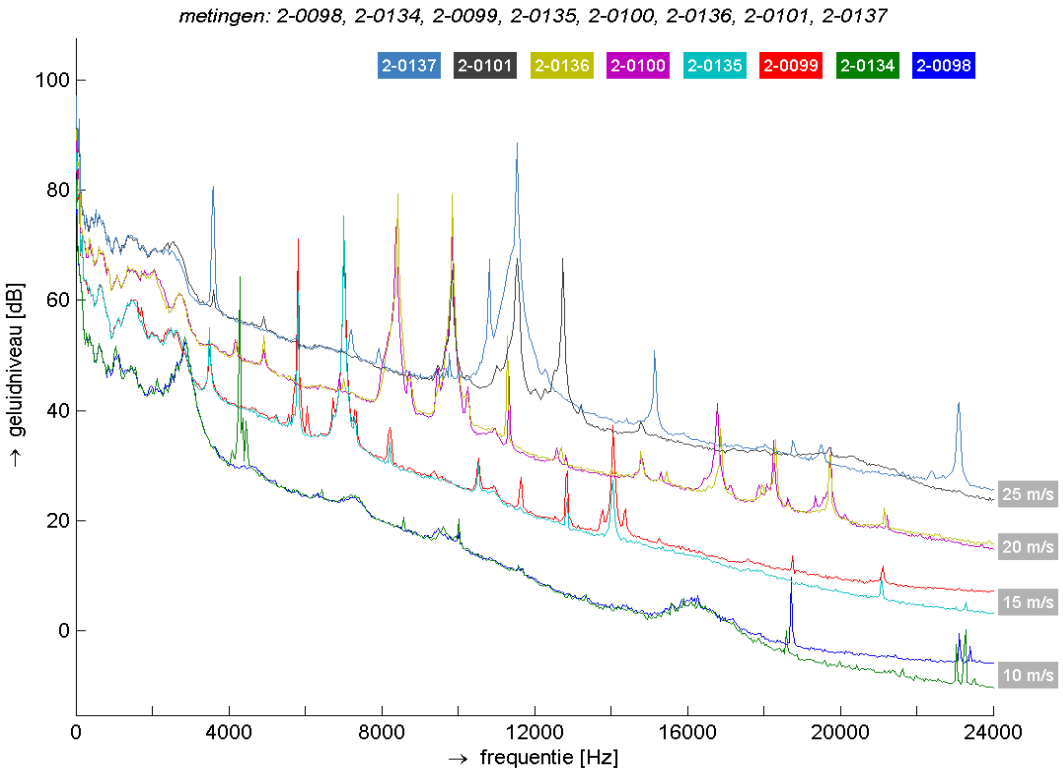
In het geval de twee sets van vier metingen in een grafiek elkaar precies overlappen dan zou de gevarieerde parameter in de geometrie van de roosters geen verschil voor het geproduceerde windgeluid; zijn er duidelijke verschillen tussen de twee series dan is dat juist wel het geval.

A) Afwerking van het bandstaal

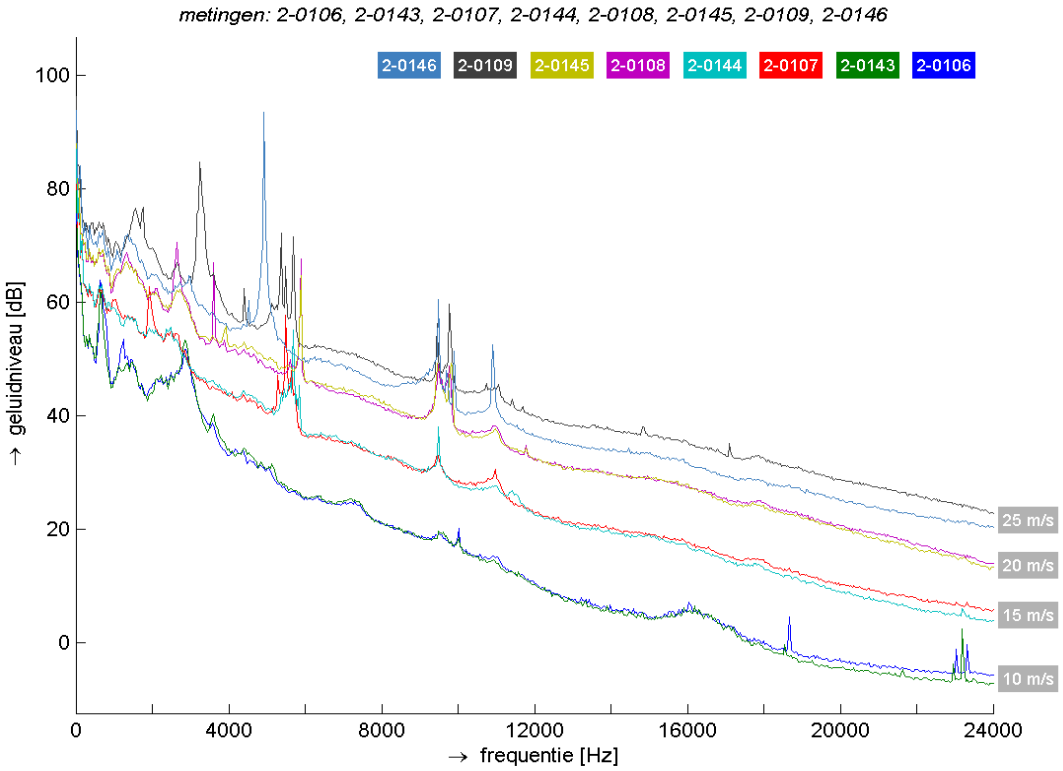
rooster 1 (scherpkantig, 2-0094 e.v.) vs. rooster 7 (afgerond, 2-0134 e.v.)



figuur 1 Rooster 1 en rooster 7 onder vergelijkbare hoeken (-37 resp. -36 achter)

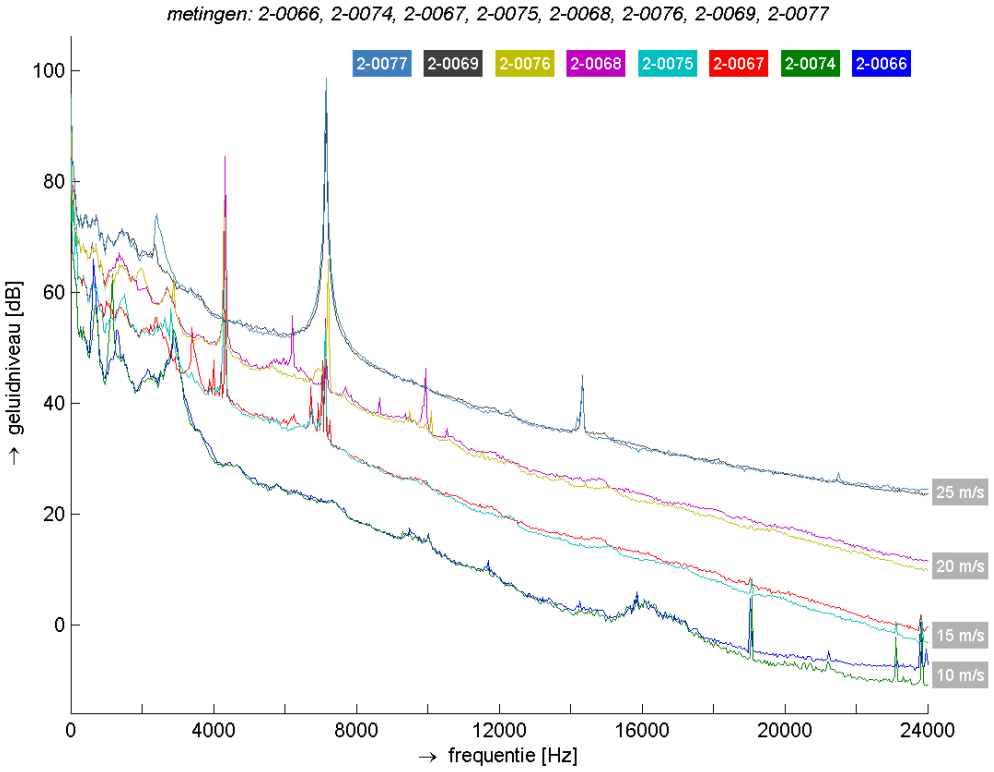


figuur 2 Rooster 1 en rooster 7 onder vergelijkbare hoeken (49 resp. 41 voor)

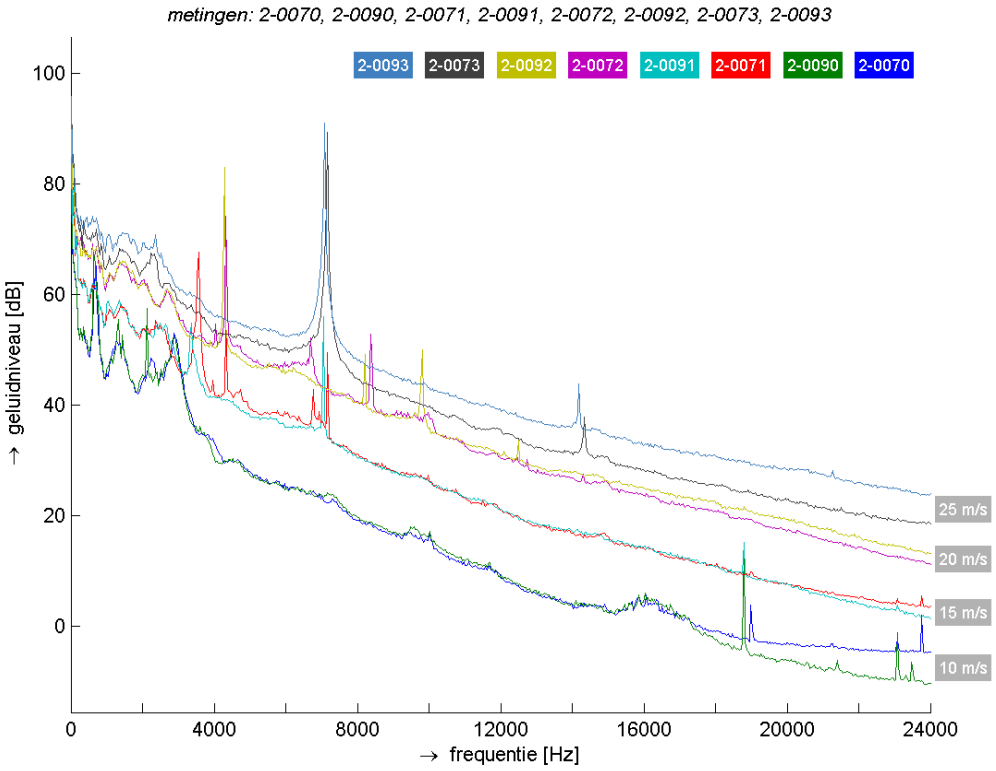


figuur 3 Rooster 1 en rooster 7 onder vergelijkbare hoeken (90 resp. 84 achter)

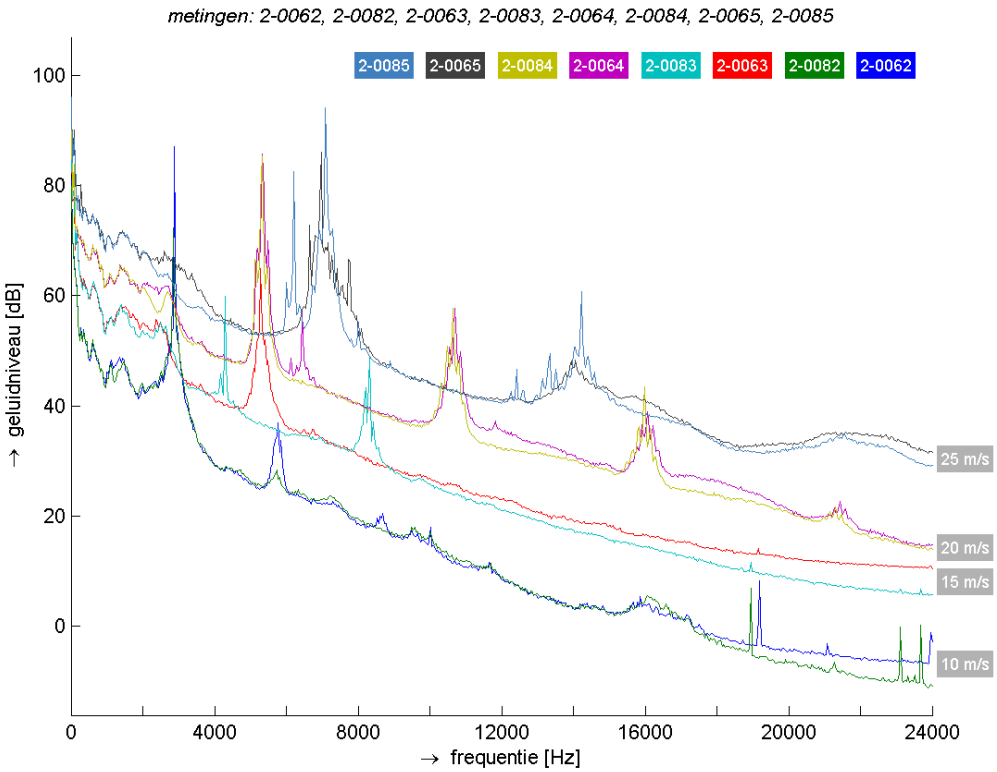
rooster 5 (scherpkantig, 2-0062 e.v.) vs. rooster 11 (afgerond, 2-0074 e.v.)



figuur 4 Rooster 5 en rooster 11 onder vergelijkbare hoeken (83 resp. 85 voor)

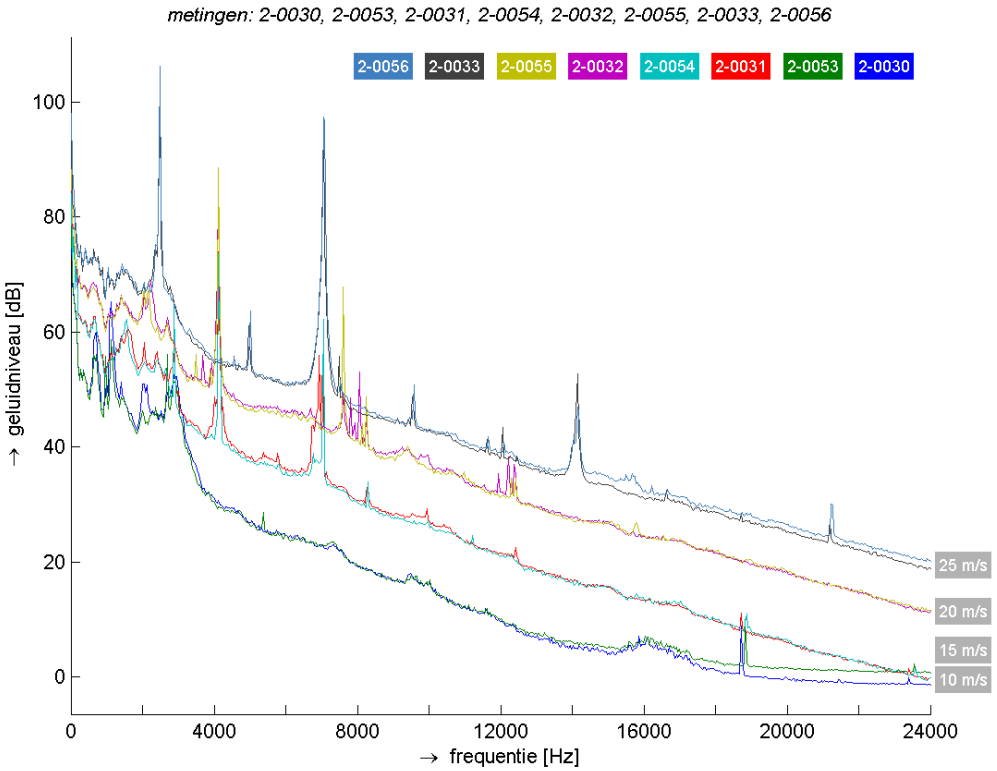


figuur 5 Rooster 5 en rooster 11 onder vergelijkbare hoeken (80 resp. 85 achter)

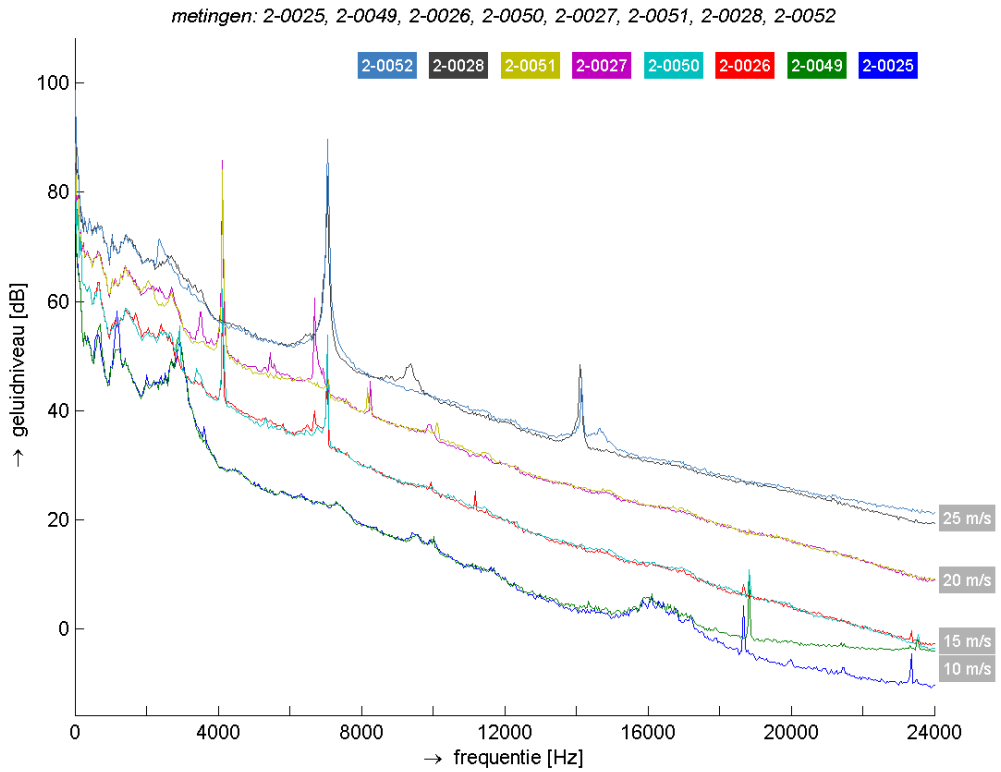


figuur 6 Rooster 5 en rooster 11 onder vergelijkbare hoeken (40 resp. 42 achter)

rooster 6 (scherpkantig, 2-0021 e.v.) vs. rooster 12 (afgerond, 2-0043 e.v.)



figuur 7 Rooster 6 en rooster 12 onder vergelijkbare hoeken (90 resp. 89 voor)



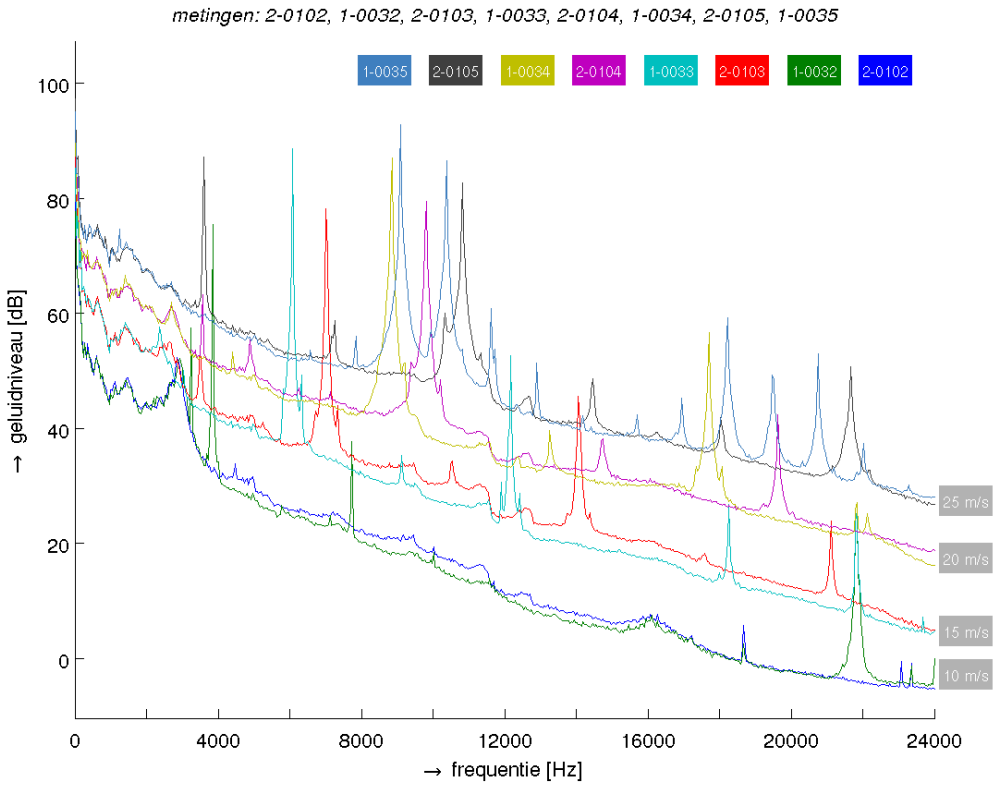
figuur 8 Rooster 6 en rooster 12 onder vergelijkbare hoeken (72 resp. 82 voor)

B) Dimensies van de draagstaaf

In de hiernavolgende grafieken zijn meetseries gecombineerd waarbij onder een vergelijkbare hoek tonaal geluid werd gevonden, bij roosters met verschillende draagstaven. De beproefde roosters kennen een drietal verschillende draagstaven, te weten 30x3, 30x2, en 40x2 (mm); de verhoudingen tussen hoogte en dikte van deze draagstaven ligt hiermee op 10:1, 15:1 en 20:1.

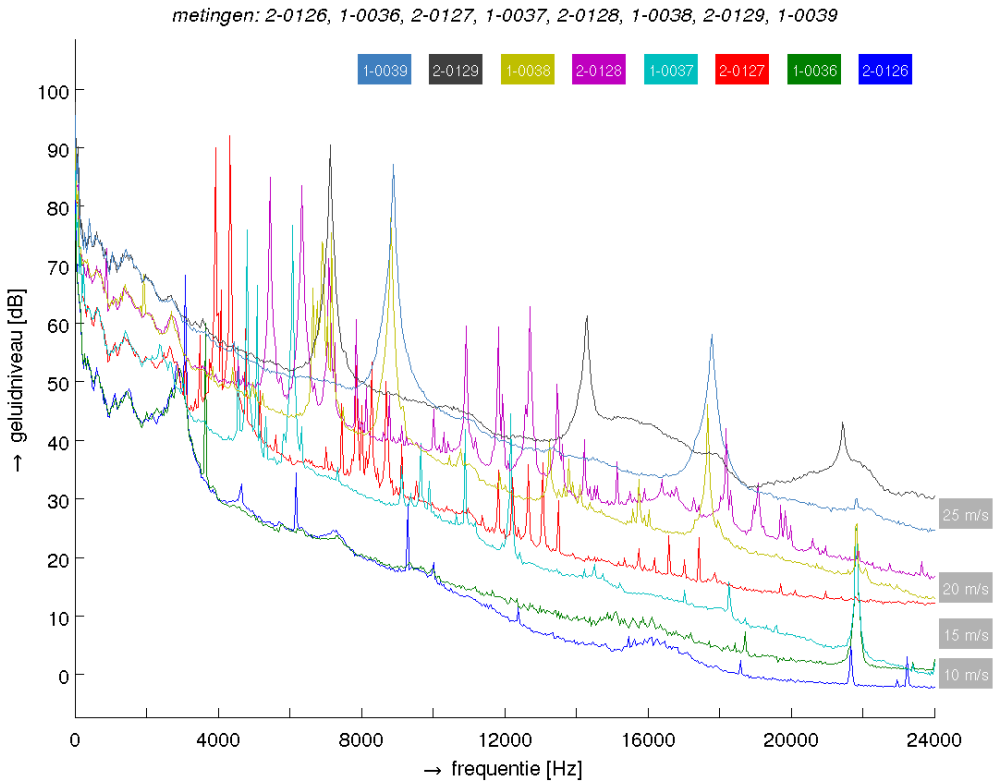
Wederom geldt dat in het geval de twee sets van vier metingen in een grafiek elkaar precies overlappen dan zou de gevarieerde parameter in de geometrie van de roosters geen verschil voor het geproduceerde windgeluid; zijn er duidelijke verschillen tussen de twee series dan is dat juist wel het geval.

rooster 1 (draagstaaf 30x2, 2-0094 e.v.) vs. rooster 3 (draagstaaf 40x2, 1-0032 e.v.)

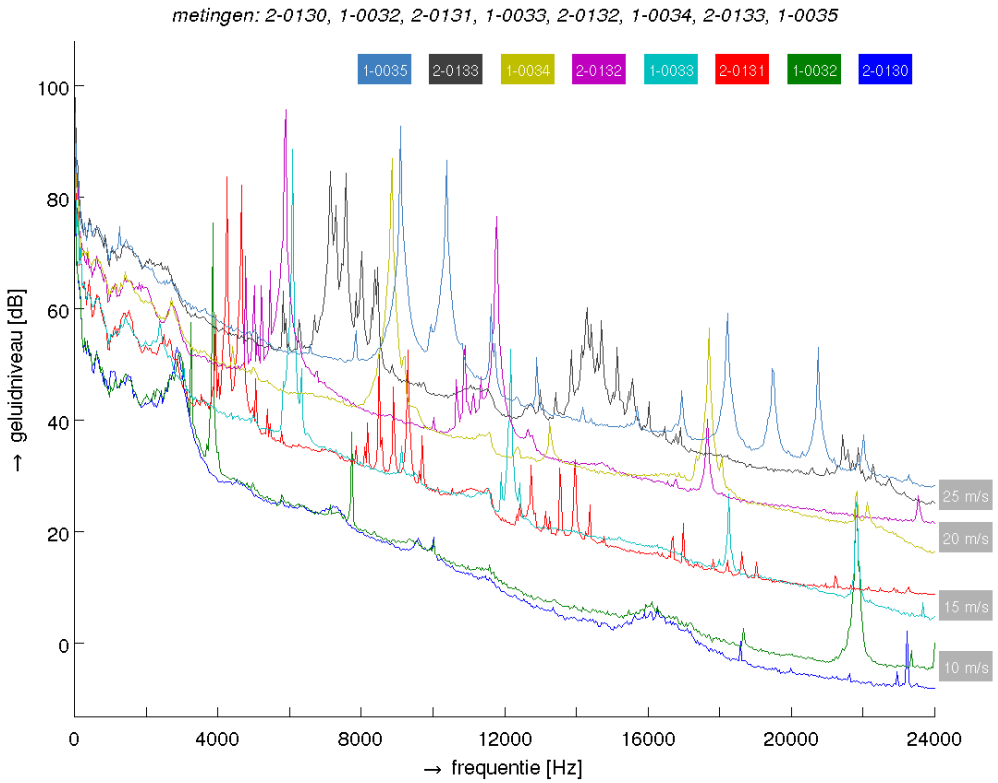


figuur 9 Rooster 1 en rooster 3 onder vergelijkbare hoeken (-37 resp. -30 achter)

rooster 2 (draagstaaf 30x3, 2-0114 e.v.) vs. rooster 3 (draagstaaf 40x2, 1-0032 e.v.)

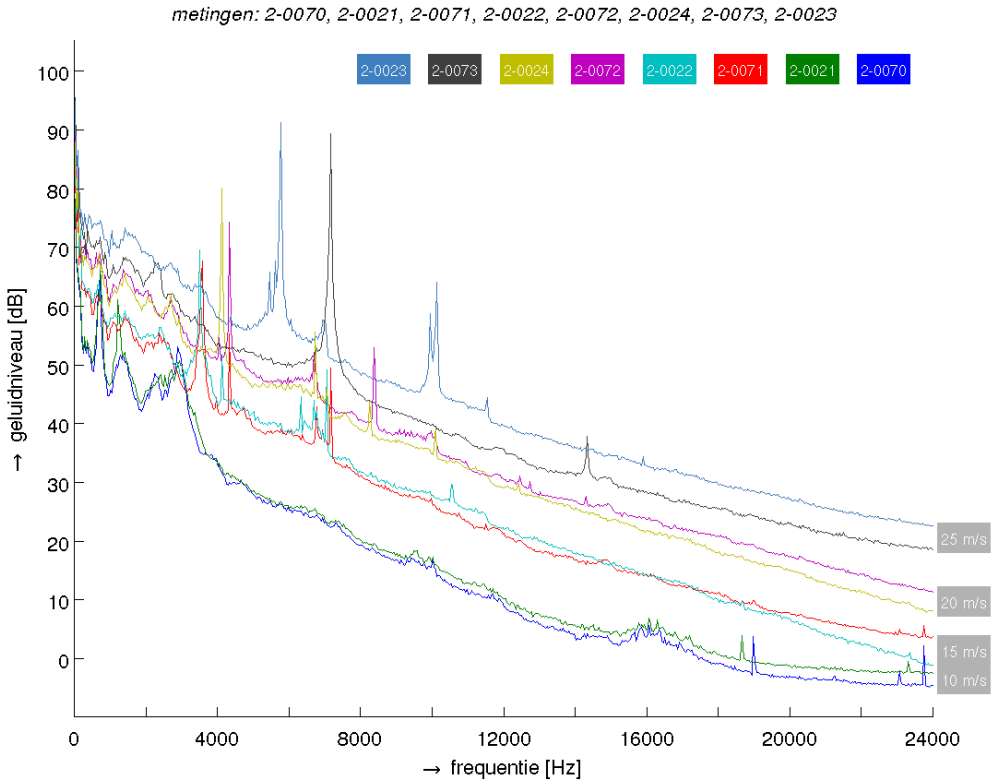


figuur 10 Rooster 2 en rooster 3 onder vergelijkbare hoeken (35 resp. 35 achter)



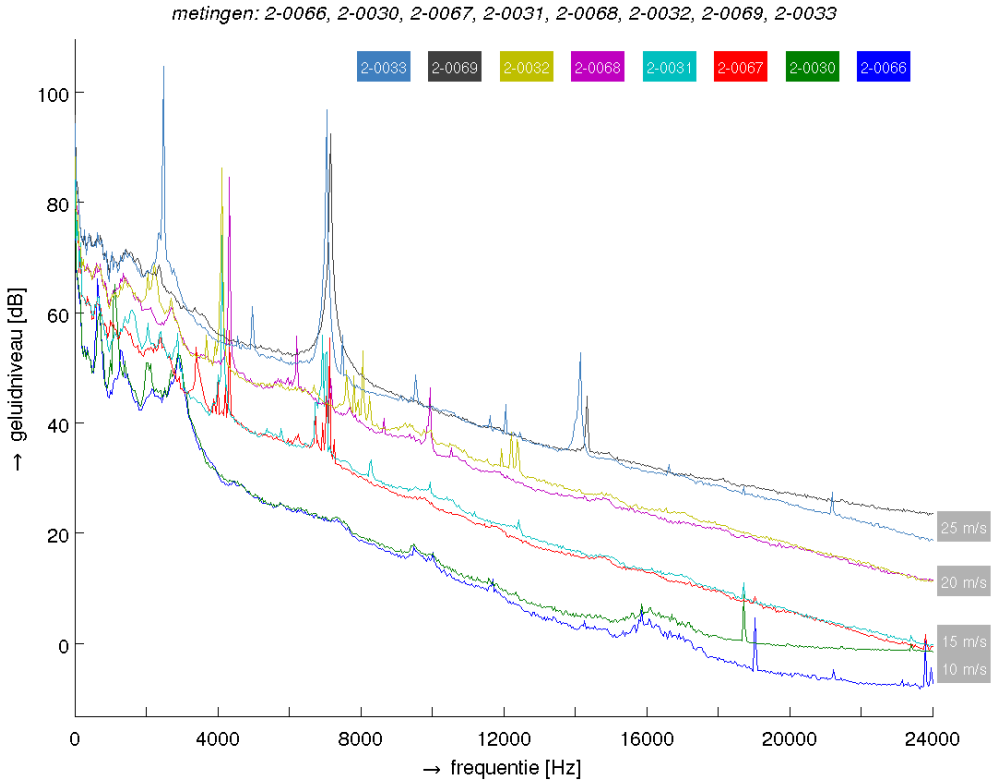
figuur 11 Rooster 2 en rooster 3 onder vergelijkbare hoeken (-29 resp. -30 achter)

rooster 5 (draagstaaf 30x3, 2-0062 e.v.) vs. rooster 6 (draagstaaf 40x2, 2-0021 e.v.)



figuur 12 Rooster 5 en rooster 6 onder vergelijkbare hoeken (80 resp. 78 achter)

NB: windsnelheid bij meting 2-0073 is 22.5 m/s; bij 25 m/s resteert alleen ruis.



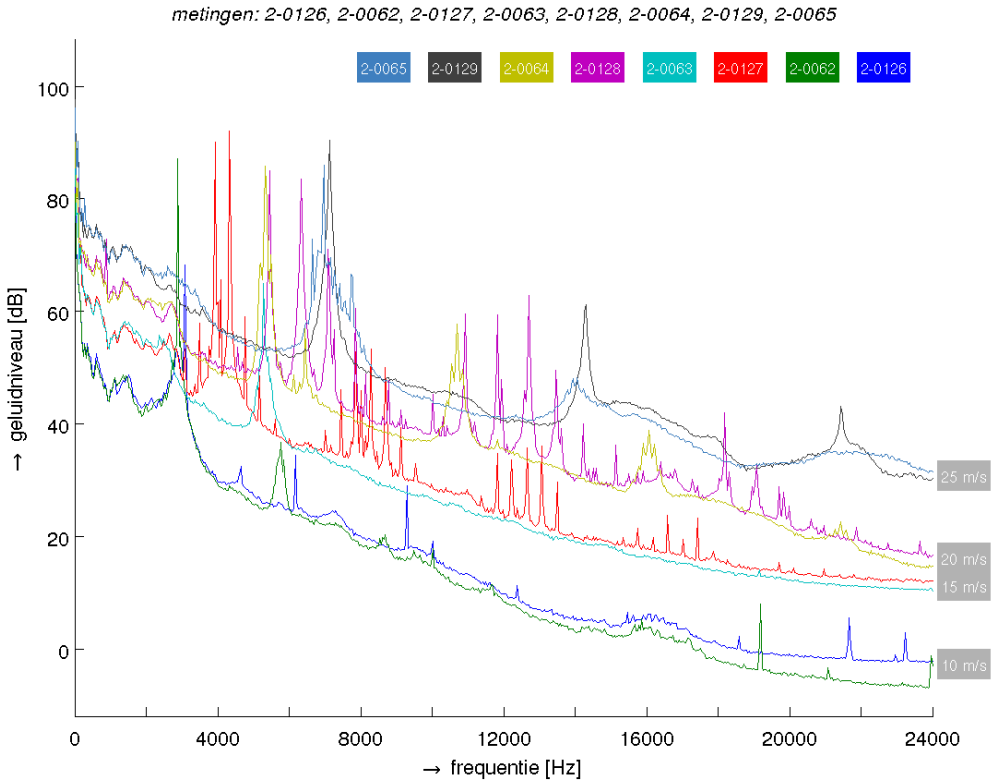
figuur 13 Rooster 5 en rooster 6 onder vergelijkbare hoeken (83 resp. 90 voor)

C) Maaswijdte

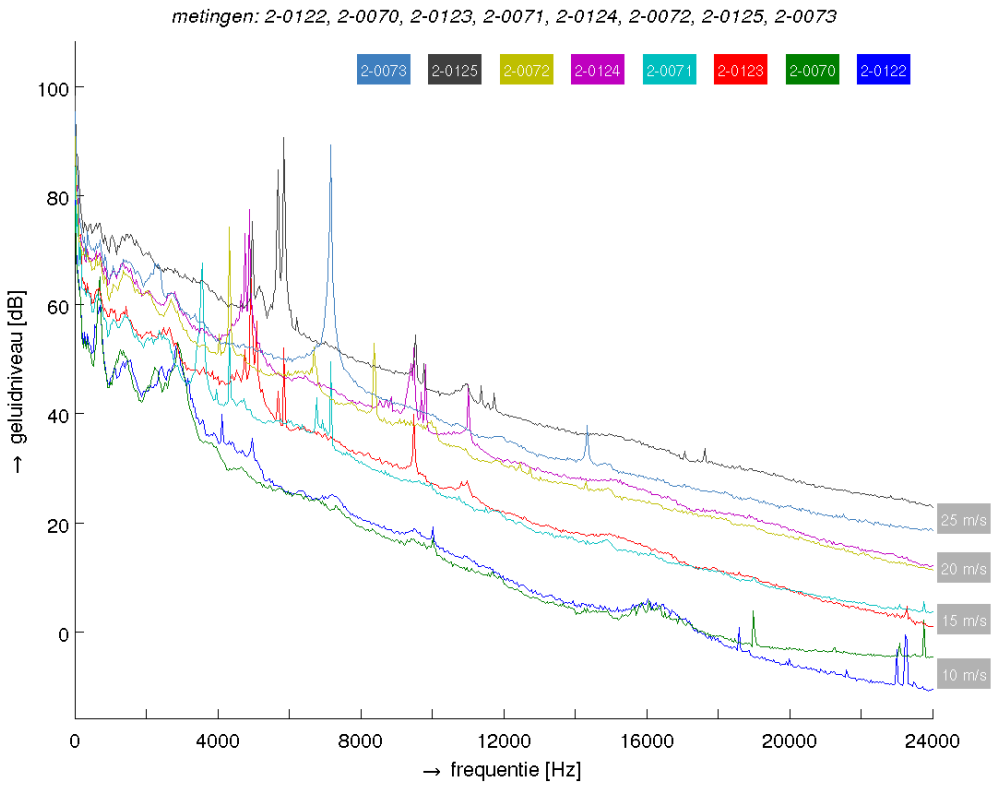
In de hiernavolgende grafieken zijn meetseries gecombineerd waarbij onder een vergelijkbare hoek tonaal geluid werd gevonden, bij roosters met verschillende maaswijdtes. De beproefde roosters kennen een tweetal verschillende maaswijdte, te weten 33.33x33.33 en 49.99x49.99 (mm).

Ook hier geldt weer dat in het geval de twee sets van vier metingen in een grafiek elkaar precies overlappen dan zou de gevarieerde parameter in de geometrie van de roosters geen verschil voor het geproduceerde windgeluid; zijn er duidelijke verschillen tussen de twee series dan is dat juist wel het geval.

rooster 2 (maaswijdte 33.33, 2-0114 e.v.) vs. rooster 5 (maasw. 49.99, 2-0062 e.v.)

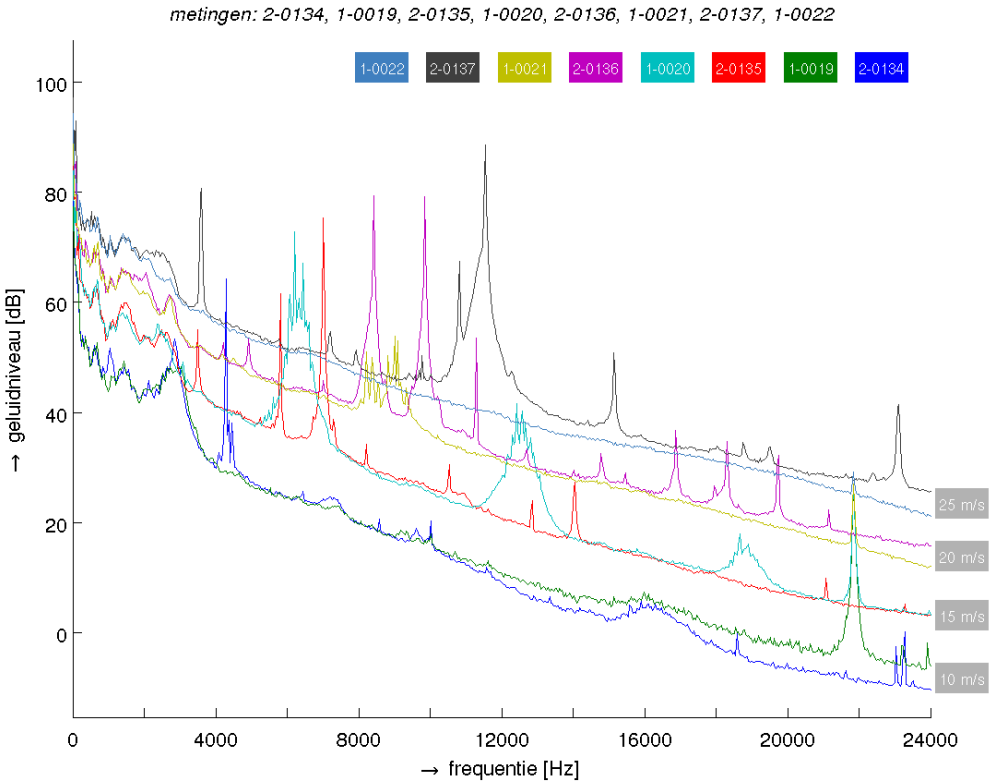


figuur 14 Rooster 2 en rooster 5 onder vergelijkbare hoeken (35 resp. 40 achter)

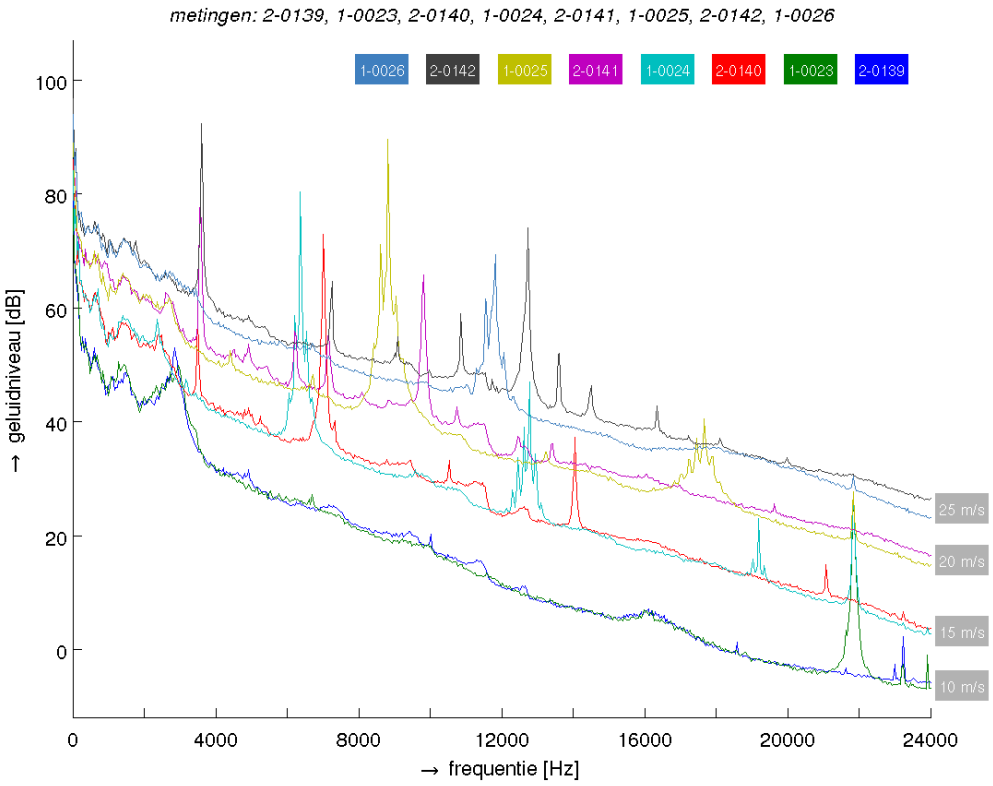


figuur 15 Rooster 2 en rooster 5 onder vergelijkbare hoeken (77 resp. 80 achter)
NB: 2-0073 betreft een meting bij 22.5 m/s; bij 25 resteerde hier slechts ruis

rooster 7 (maaswijdte 33.33, 2-0134 e.v.) vs. rooster 10 (maasw. 49.99, 1-0010 e.v.)

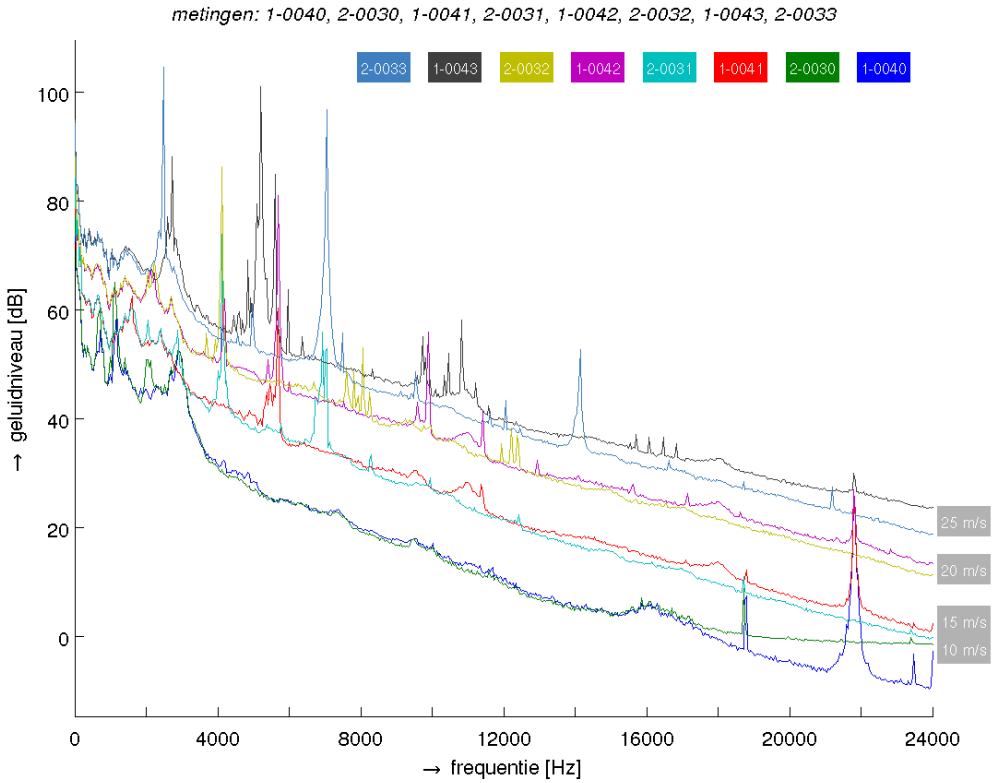


figuur 16 Rooster 7 en rooster 10 onder vergelijkbare hoeken (41 resp. 47 voor)



figuur 17 Rooster 7 en rooster 10 onder vergelijkbare hoeken (-36 resp. -42 achter)

rooster 3 (maaswijdte 33.33, 1-0032 e.v.) vs. rooster 6 (maasw. 49.99, 2-0021 e.v.)



figuur 18 Rooster 3 en rooster 6 onder vergelijkbare hoeken (-89 resp. 90 voor)

Bijlage 3 - DIMENSIELOZE VERGELIJKING, PER MEETSERIE (Strouhal)

In deze bijlage is voor iedere serie metingen onder een vaste hoek maar bij vier verschillende windsnelheden een grafiek opgenomen waarin de met behulp van het Strouhalgetal dimensieloos gemaakte frequentie tegen het met behulp van de dynamische druk dimensieloos gemaakte niveau is uitgezet.

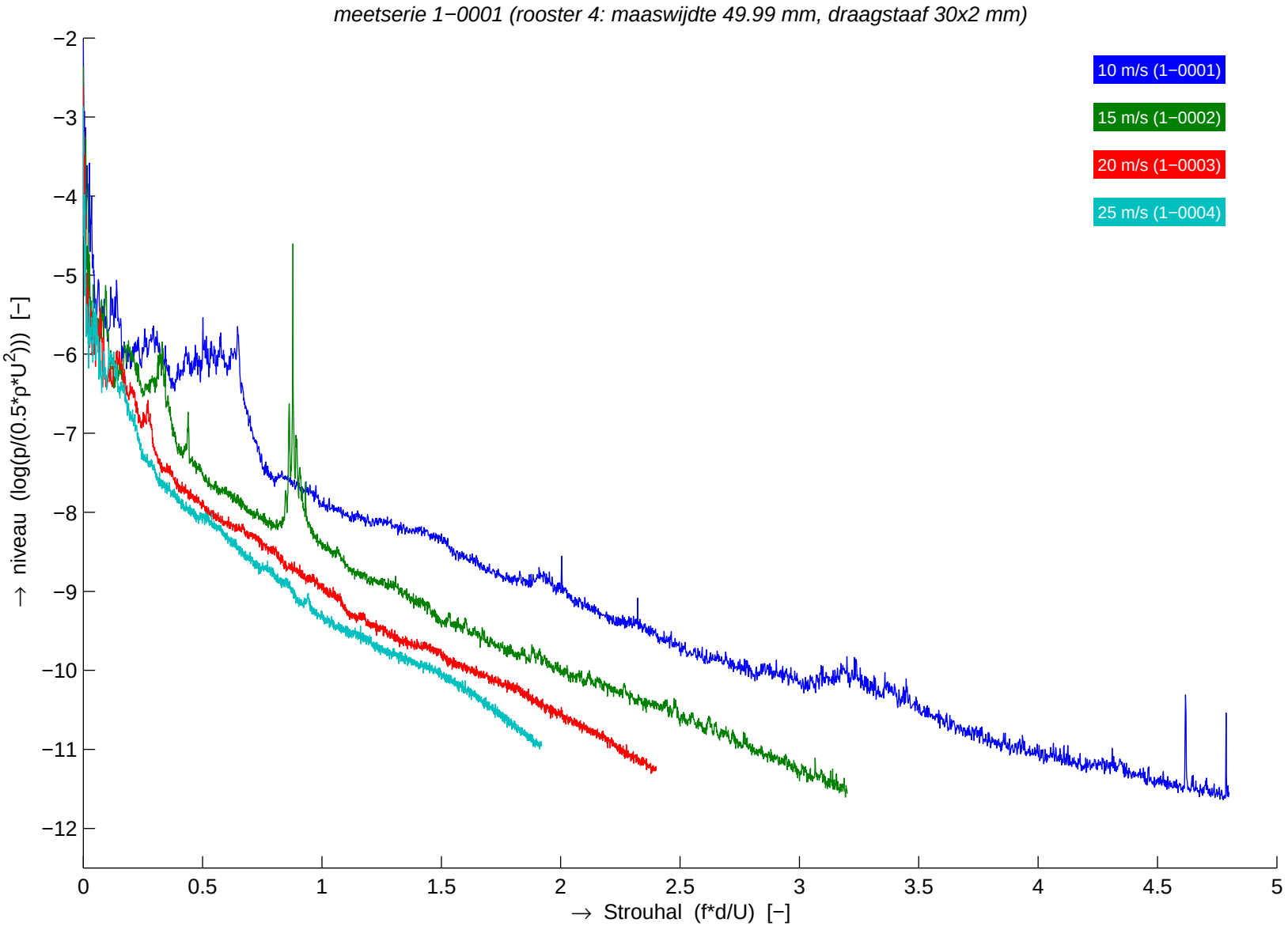
Voor de duidelijkheid worden vooraf nogmaals de kenmerken van de verschillende roosters en de nummers van de metingen benoemd.

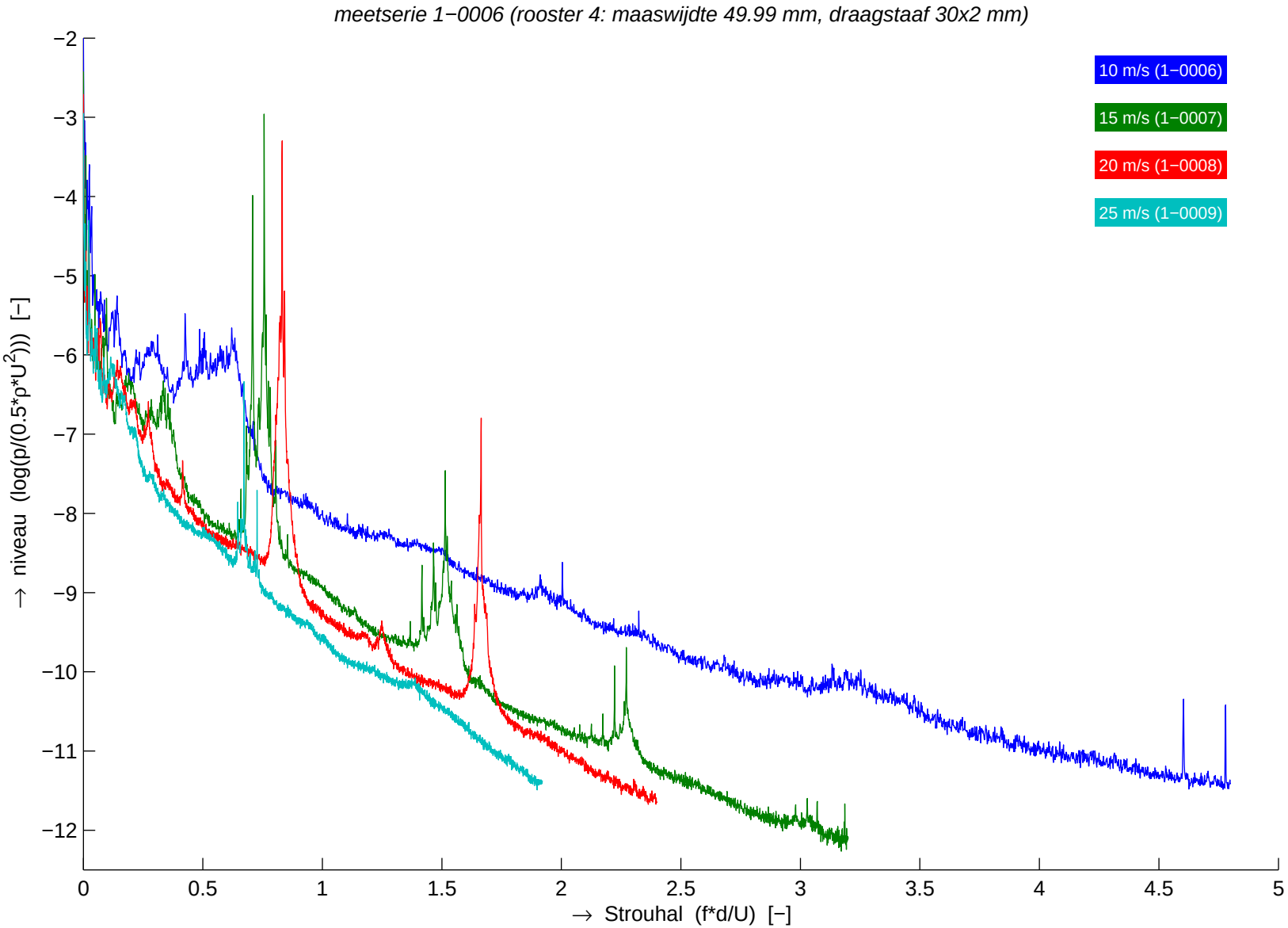
Roosterkenmerken

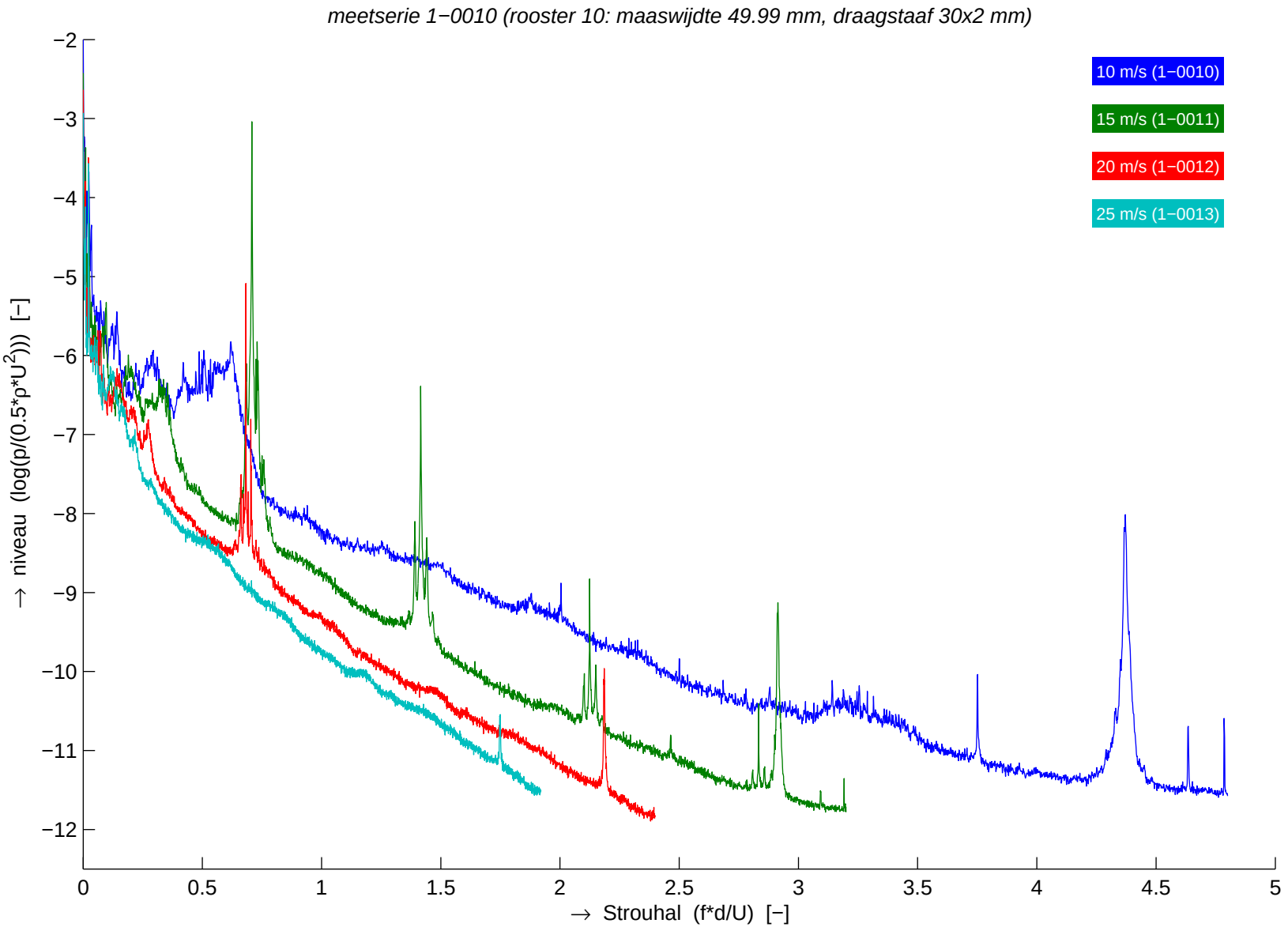
n°		afmeting	maaswijdte	dragerafstand	draagstaven	vulstaven
1	7	1000x1000	33.33x33.33	33.33x33.33	30x2	10x2
2	8	"	"	"	30x3	"
3	9	"	"	"	40x2	"
4	10	"	49.99x49.99	49.99x49.99	30x2	"
5	11	"	"	"	30x3	"
6	12	"	"	"	40x2	"

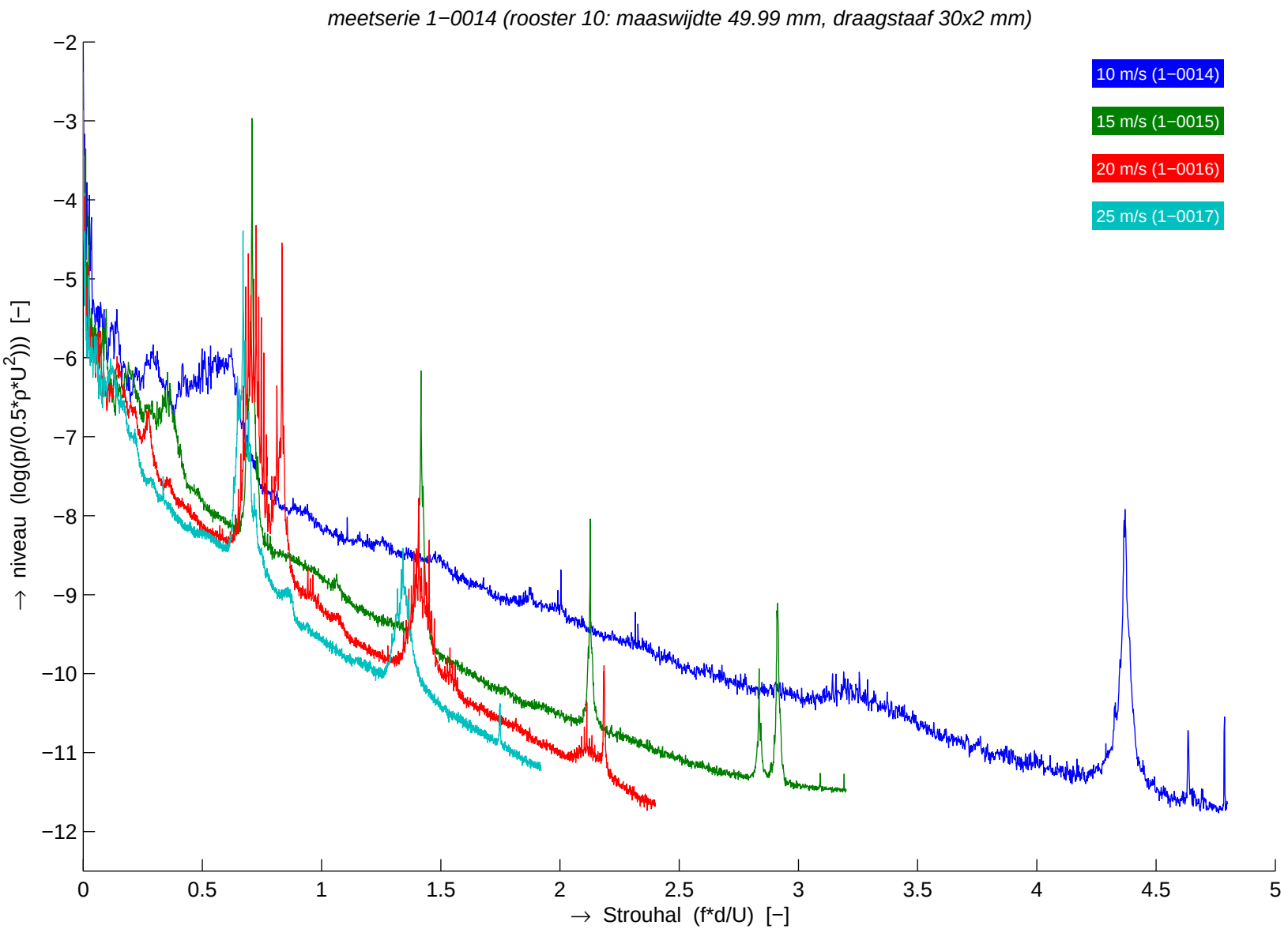
1 t/m 6 en 7 t/m 12 verschillen slechts in de afwerking; alle maten mm.

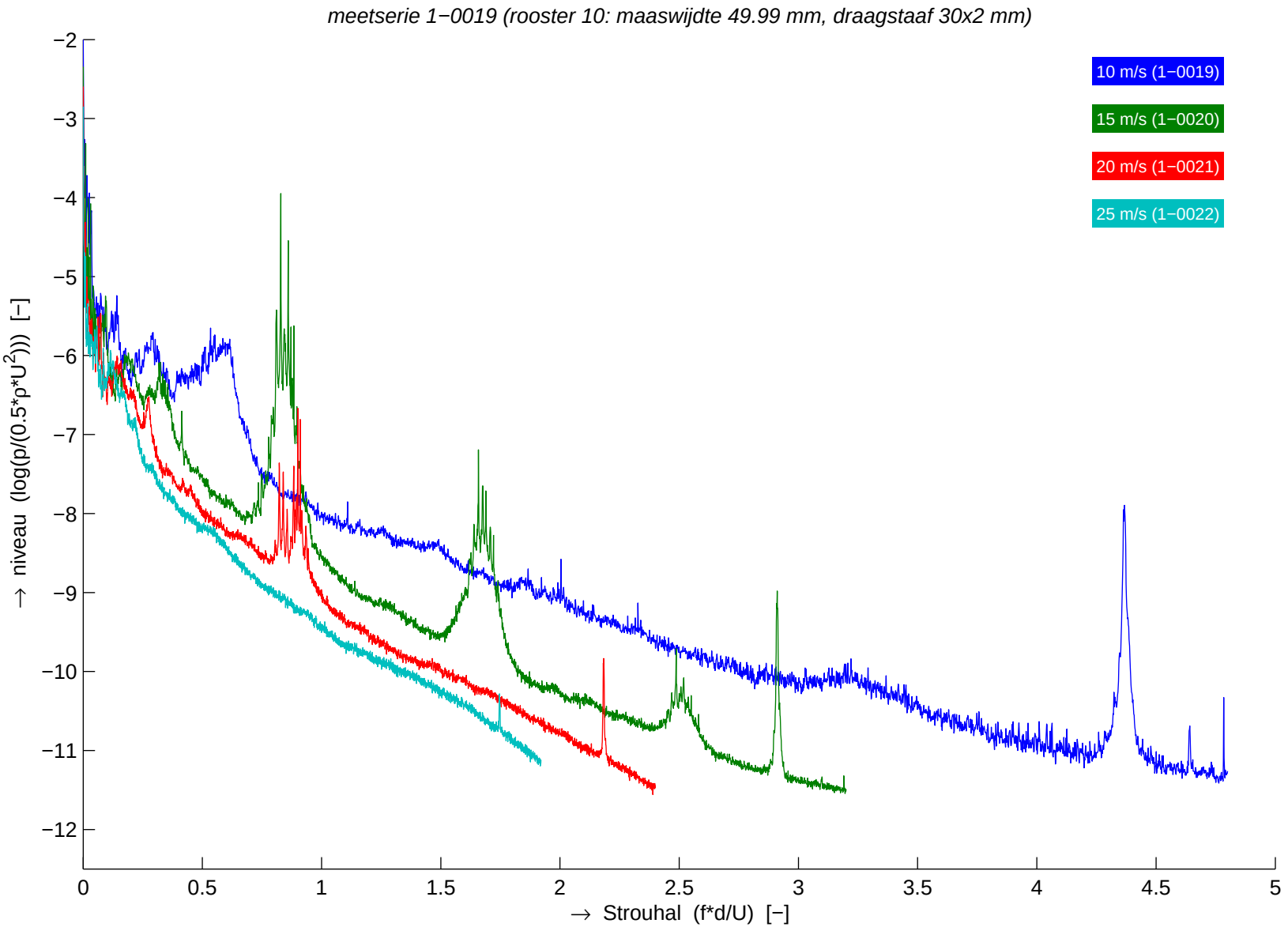
	beproefd		beproef + vulstaaf		niet beproefd

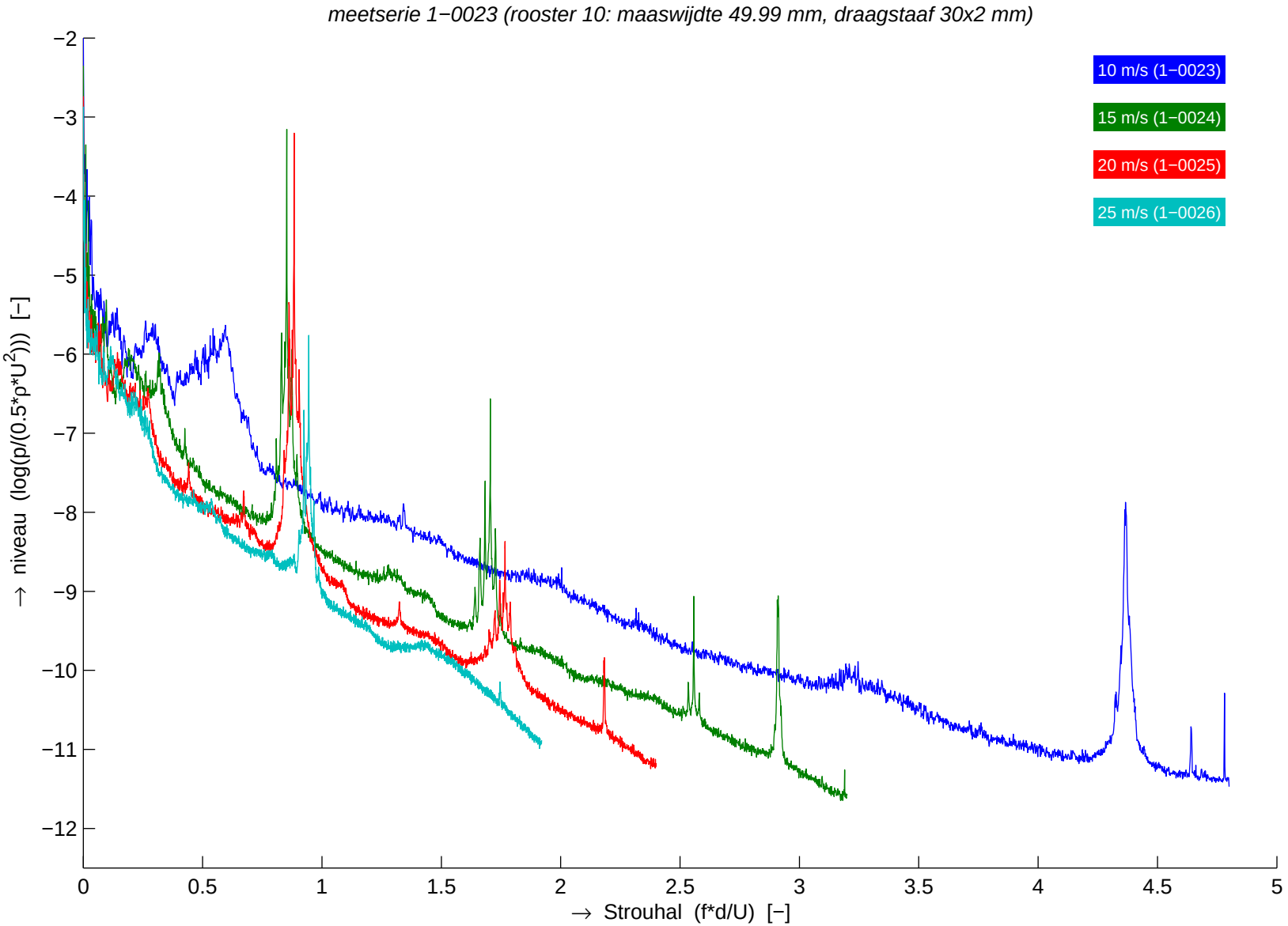

meetserie 1−0001 (rooster 4: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (1−0001)
15 m/s (1−0002)
20 m/s (1−0003)
25 m/s (1−0004)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
→ Strouhal (f*d/U) [−]

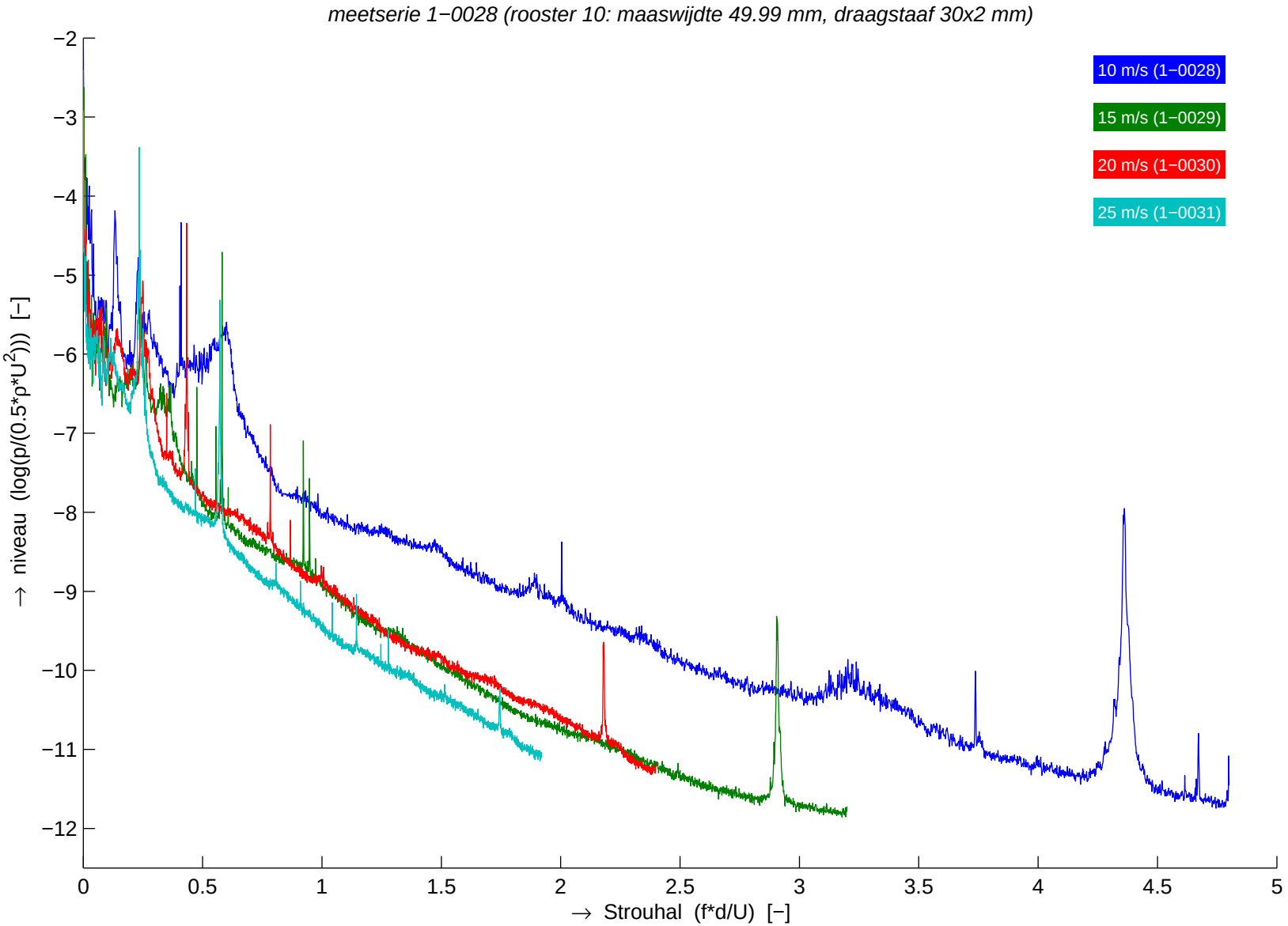

meetserie 1−0006 (rooster 4: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (1−0006)
15 m/s (1−0007)
20 m/s (1−0008)
25 m/s (1−0009)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

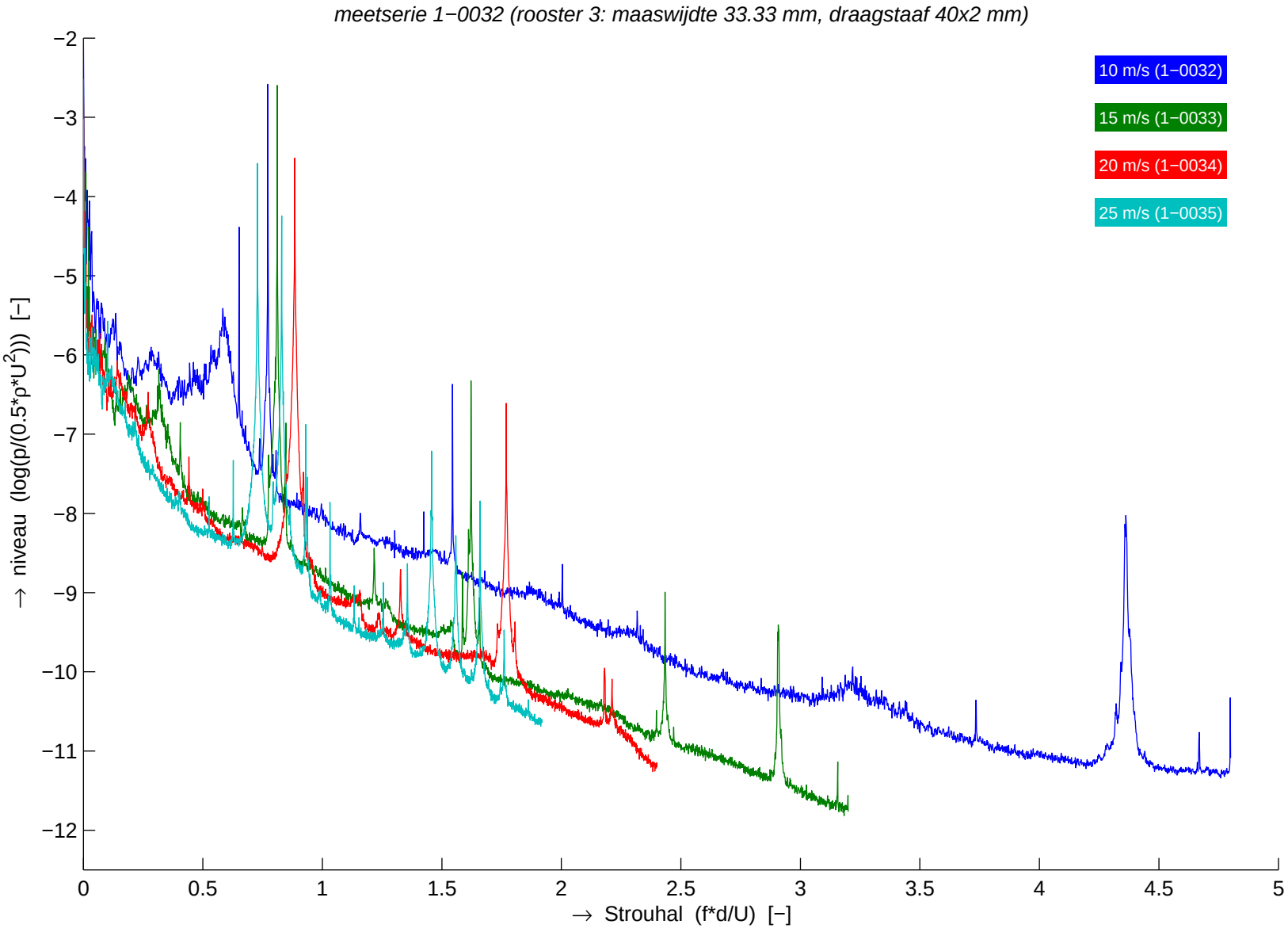

meetserie 1−0010 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (1−0010)
15 m/s (1−0011)
20 m/s (1−0012)
25 m/s (1−0013)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
→ Strouhal (f*d/U) [−]

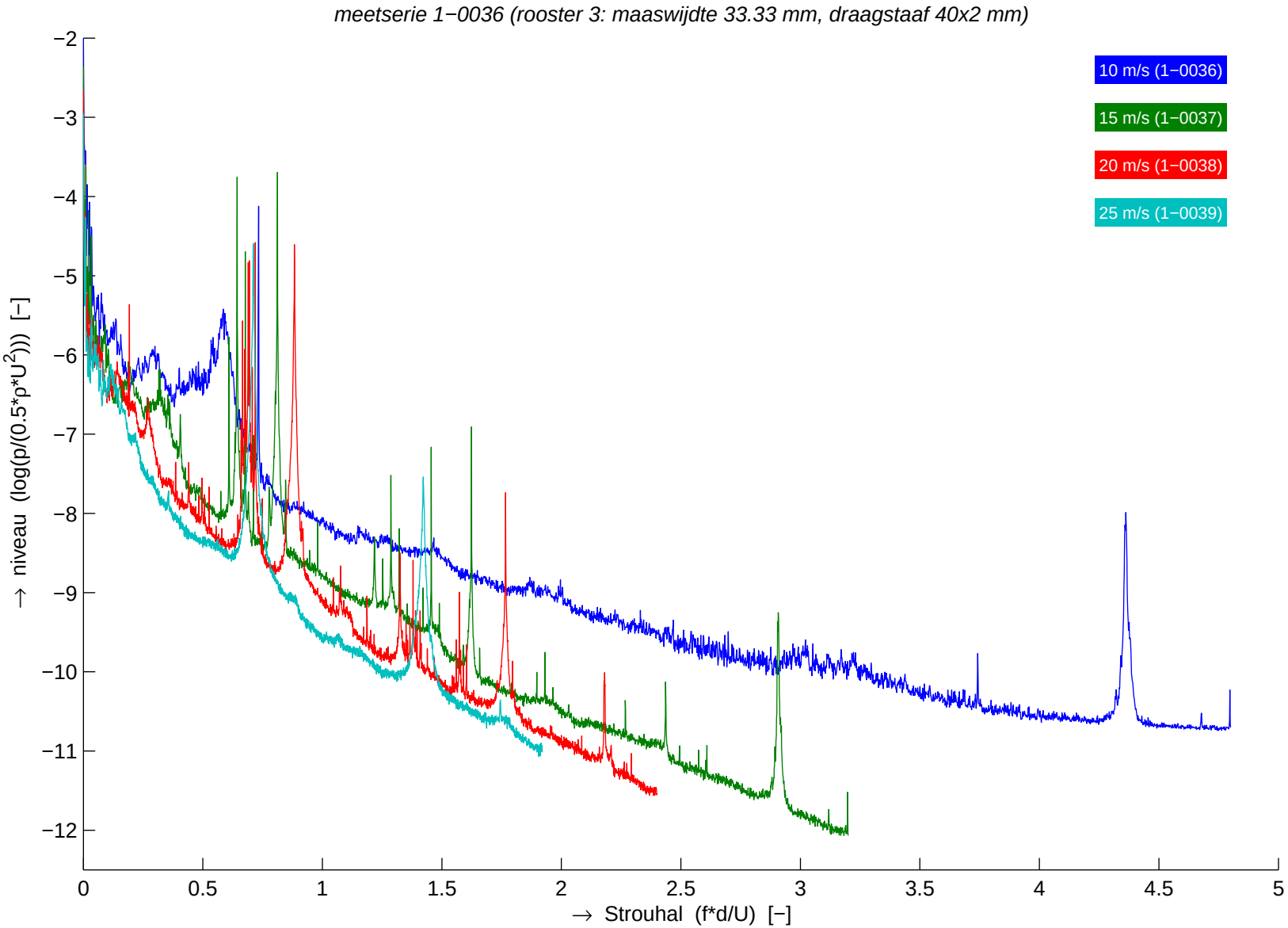

meetserie 1−0014 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (1−0014)
15 m/s (1−0015)
20 m/s (1−0016)
25 m/s (1−0017)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
→ Strouhal (f*d/U) [−]

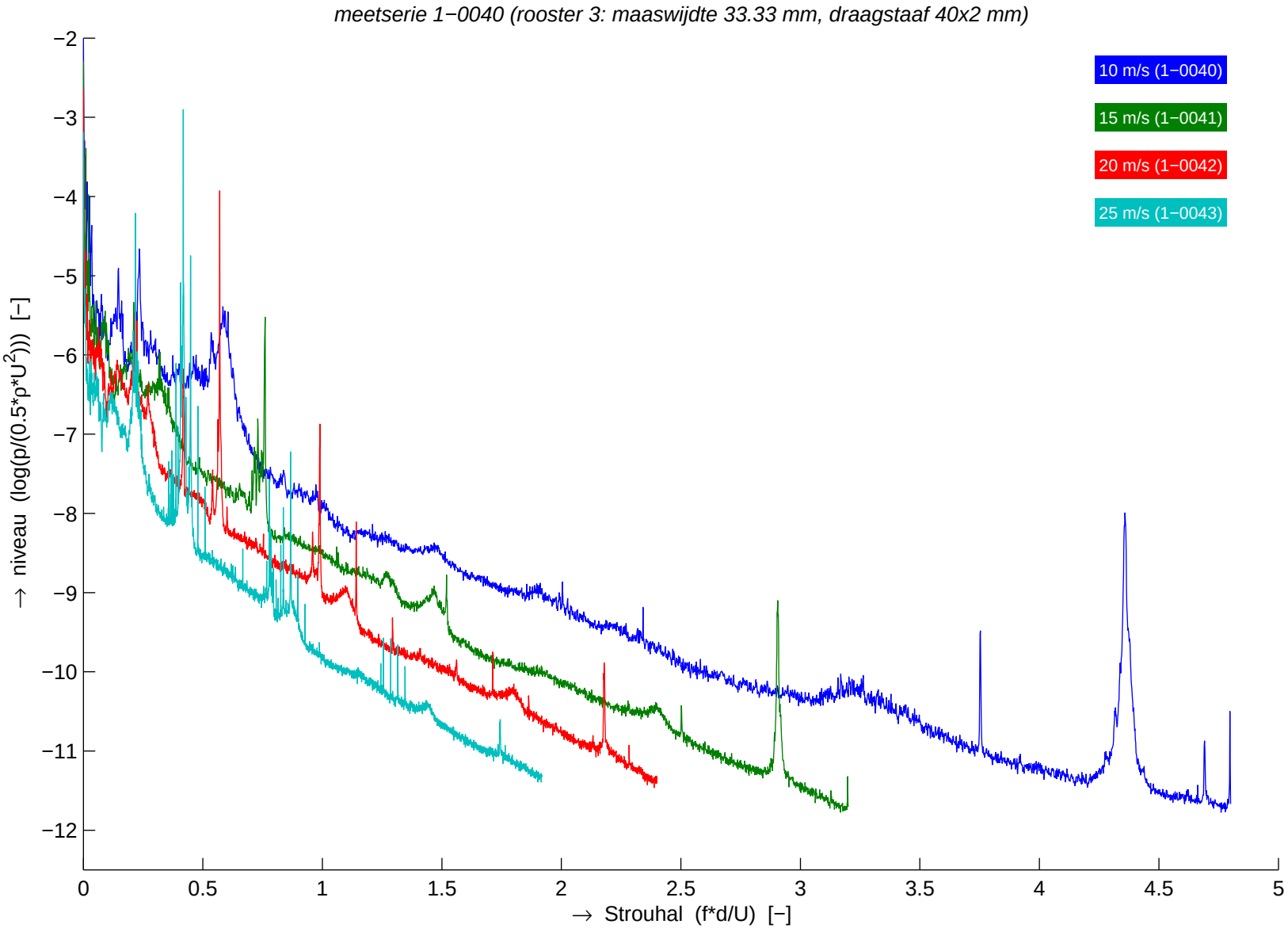

meetserie 1−0019 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (1−0019)
15 m/s (1−0020)
20 m/s (1−0021)
25 m/s (1−0022)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

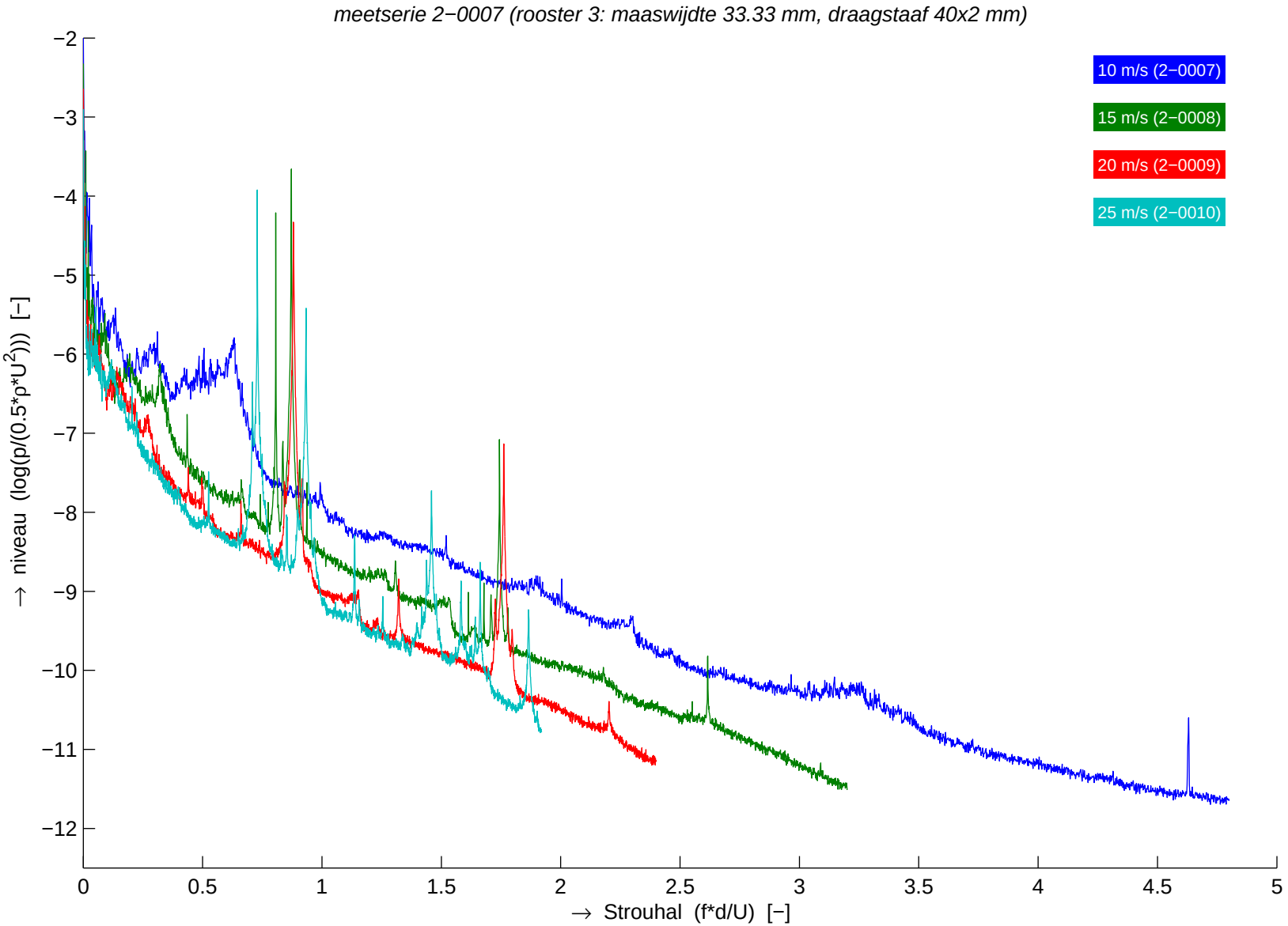

meetserie 1−0023 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (1−0023)
15 m/s (1−0024)
20 m/s (1−0025)
25 m/s (1−0026)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
→ Strouhal (f*d/U) [−]

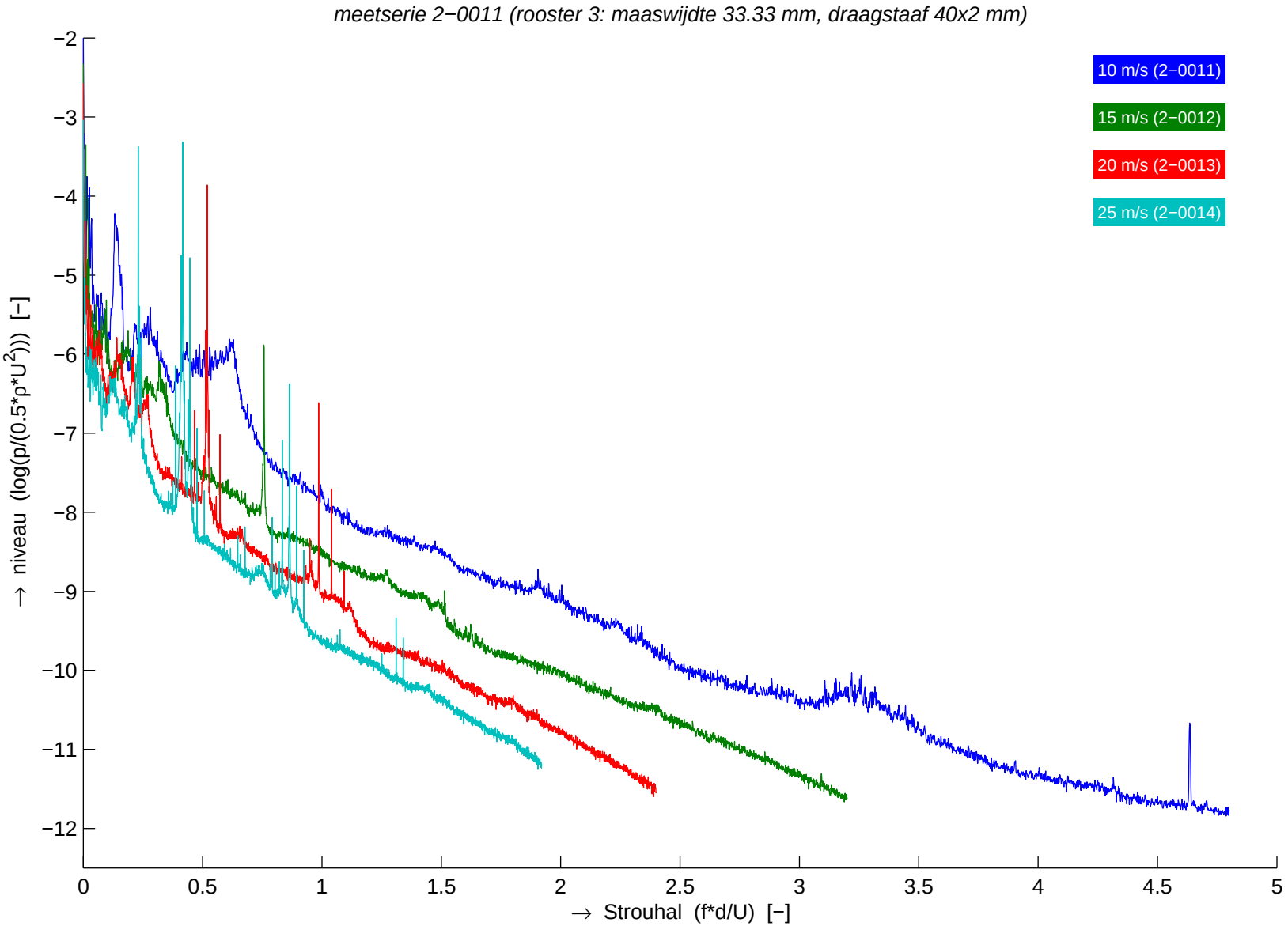

meetserie 1−0028 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (1−0028)
15 m/s (1−0029)
20 m/s (1−0030)
25 m/s (1−0031)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

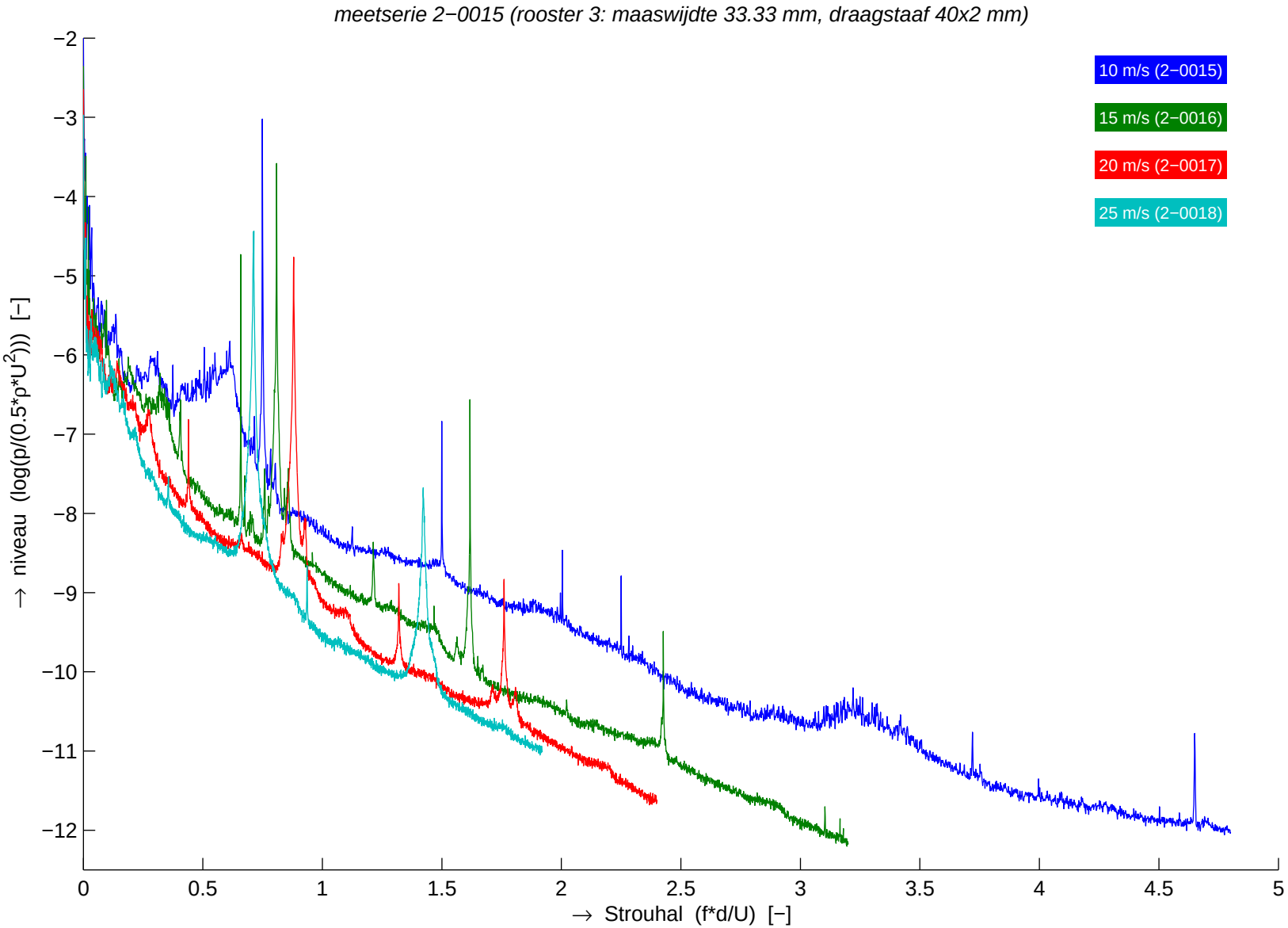

meetserie 1−0032 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (1−0032)
15 m/s (1−0033)
20 m/s (1−0034)
25 m/s (1−0035)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

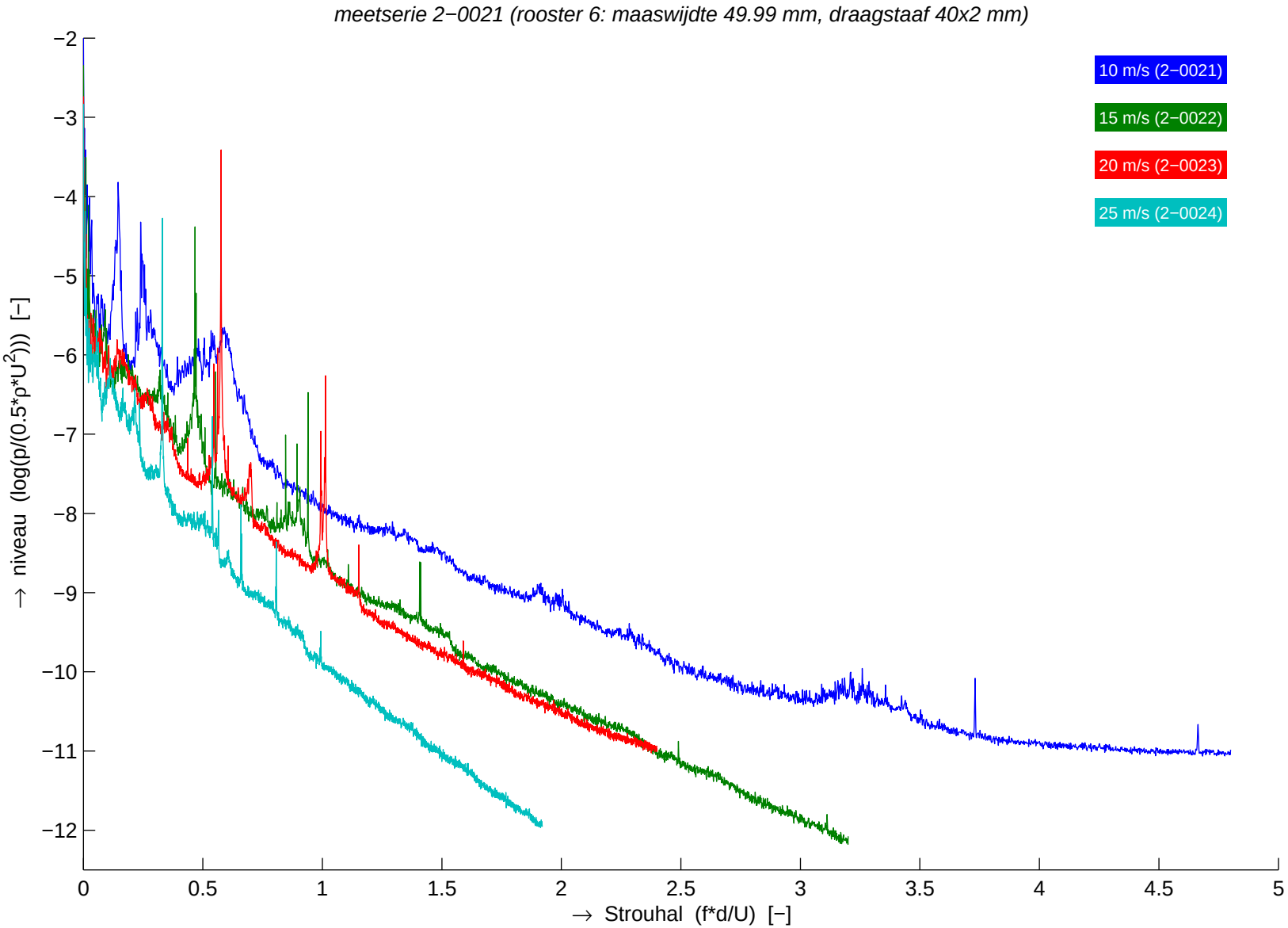

meetserie 1−0036 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (1−0036)
15 m/s (1−0037)
20 m/s (1−0038)
25 m/s (1−0039)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

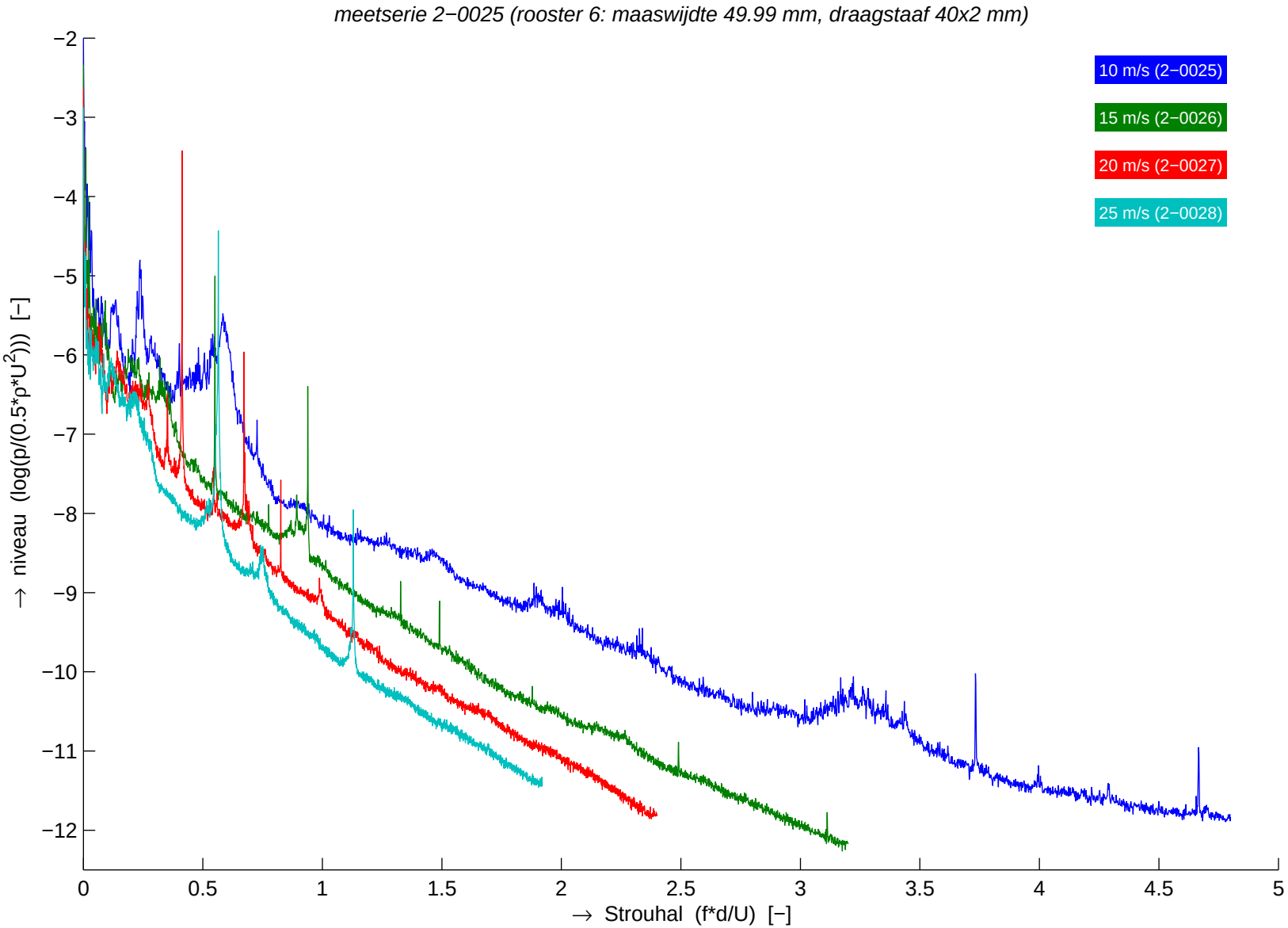

meetserie 1−0040 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (1−0040)
15 m/s (1−0041)
20 m/s (1−0042)
25 m/s (1−0043)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

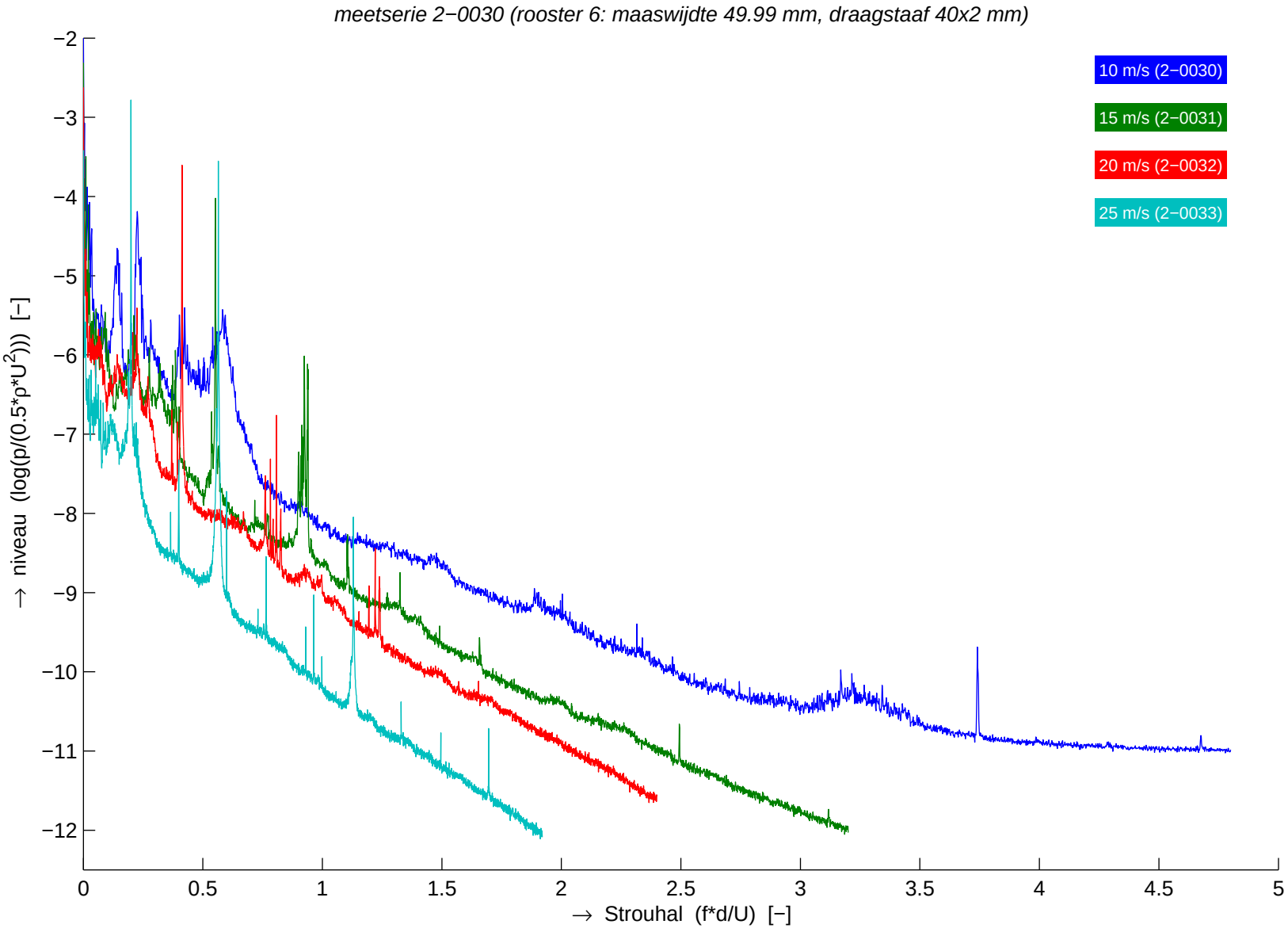

meetserie 2−0007 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0007)
15 m/s (2−0008)
20 m/s (2−0009)
25 m/s (2−0010)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

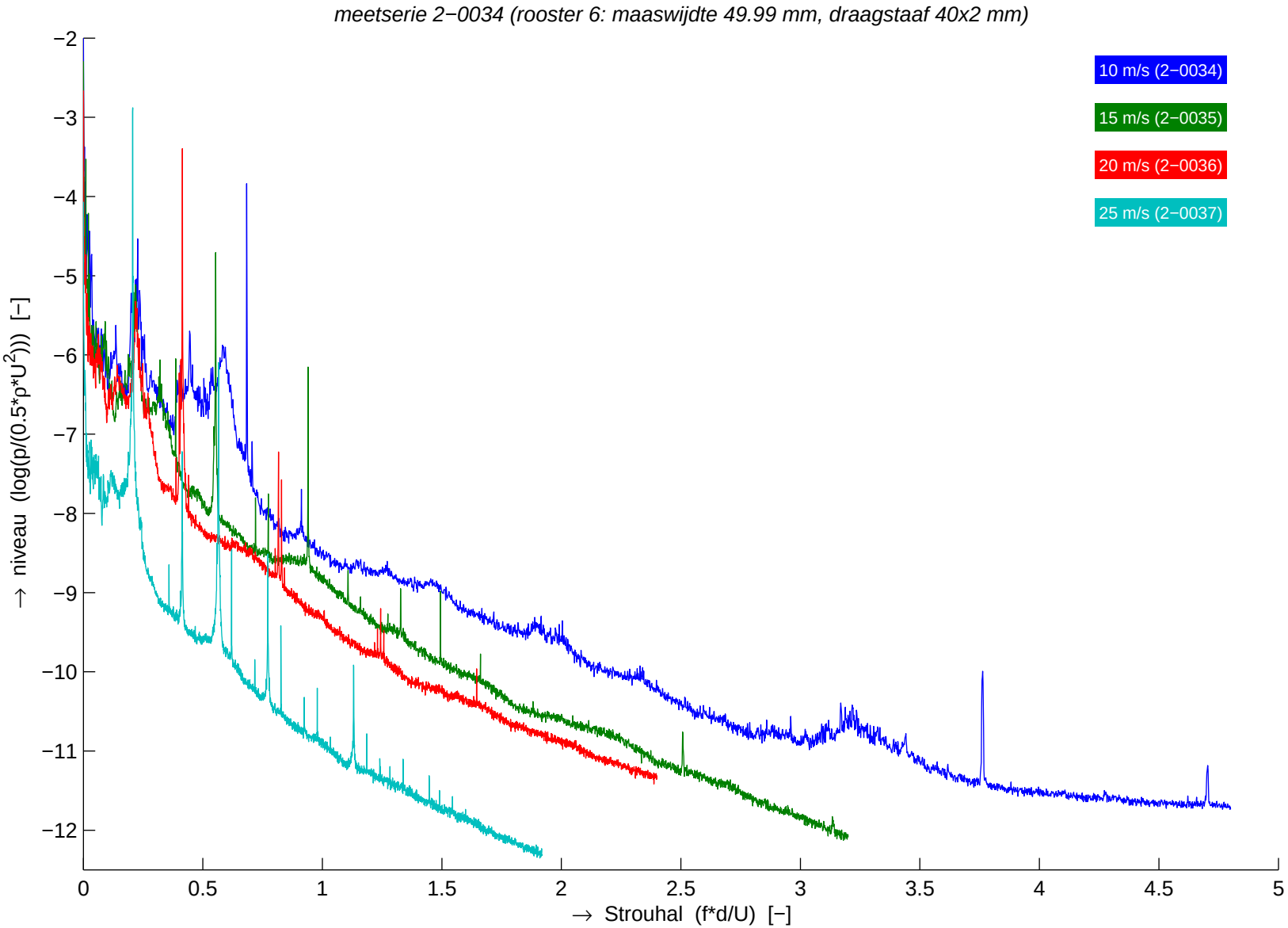

meetserie 2−0011 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0011)
15 m/s (2−0012)
20 m/s (2−0013)
25 m/s (2−0014)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

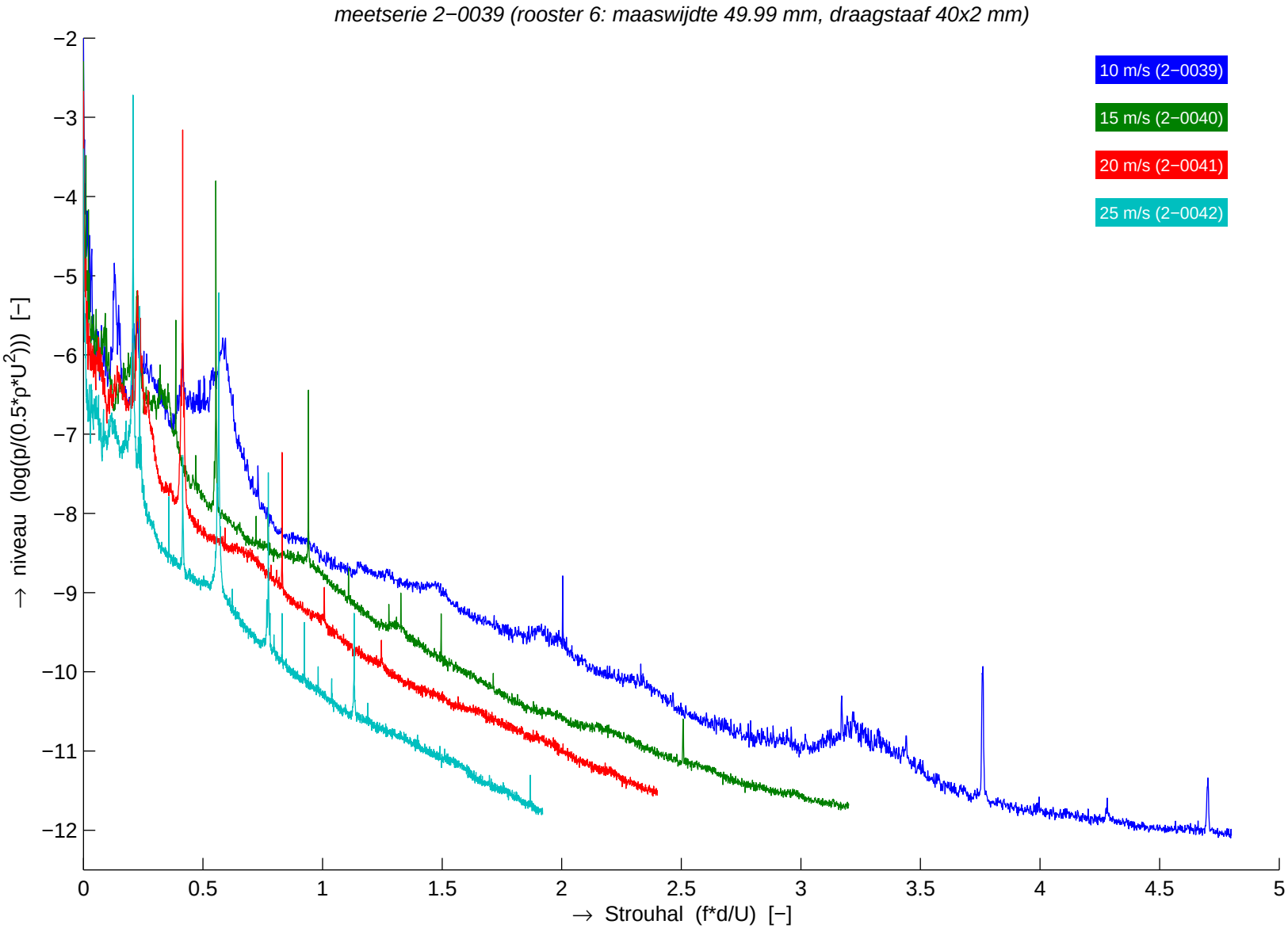

meetserie 2−0015 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0015)
15 m/s (2−0016)
20 m/s (2−0017)
25 m/s (2−0018)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

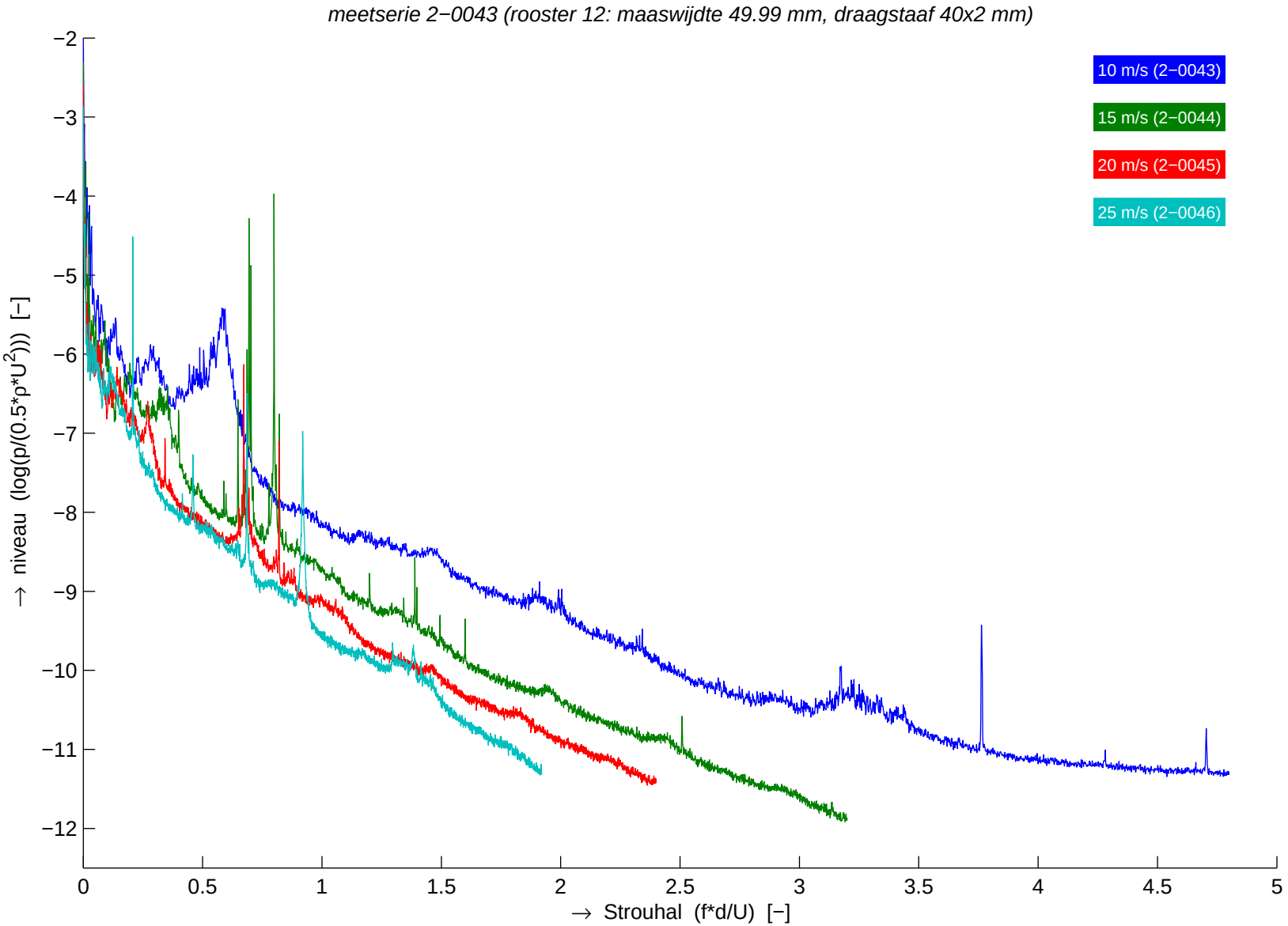

meetserie 2−0021 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0021)
15 m/s (2−0022)
20 m/s (2−0023)
25 m/s (2−0024)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

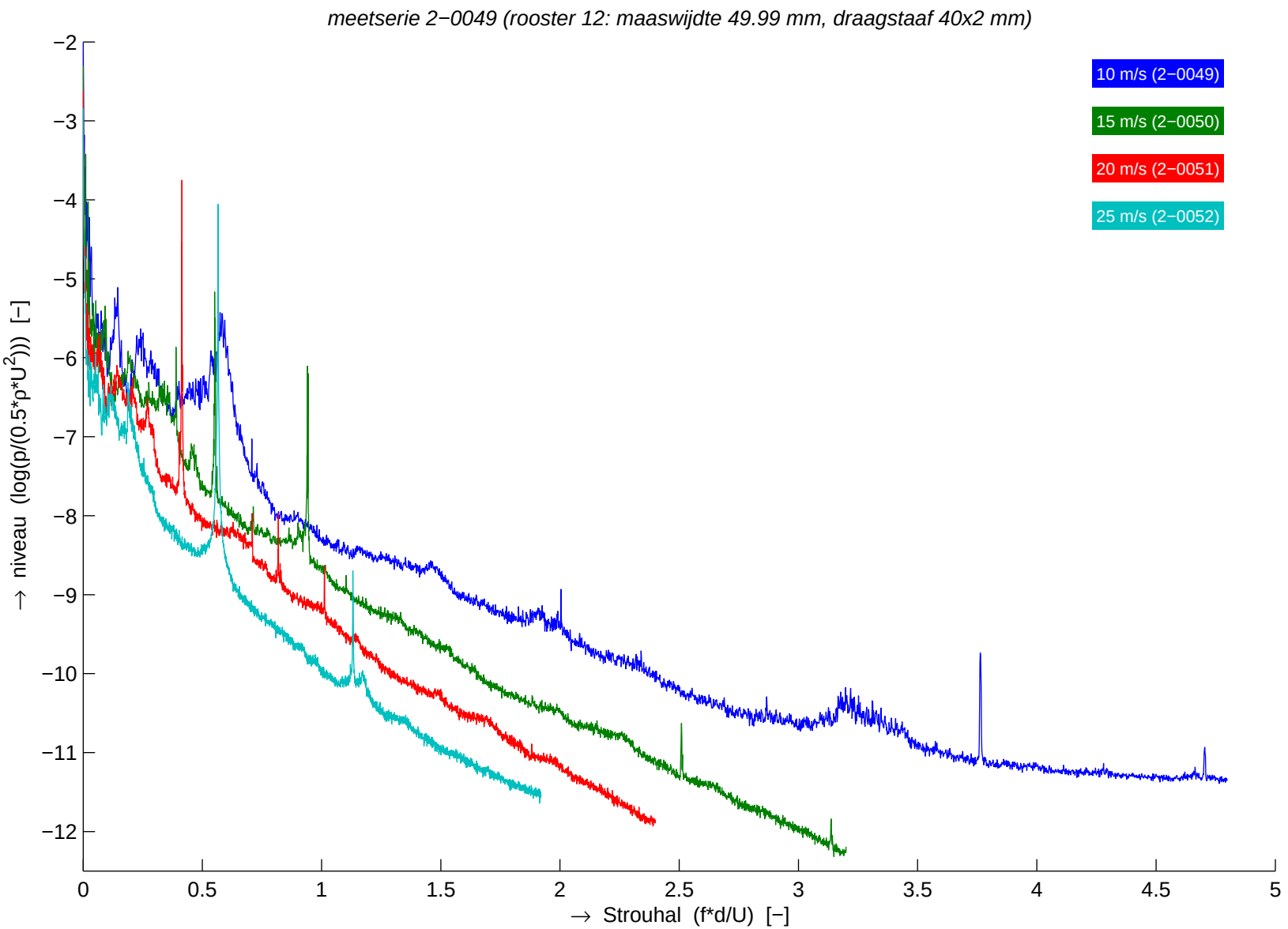

meetserie 2−0025 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0025)
15 m/s (2−0026)
20 m/s (2−0027)
25 m/s (2−0028)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

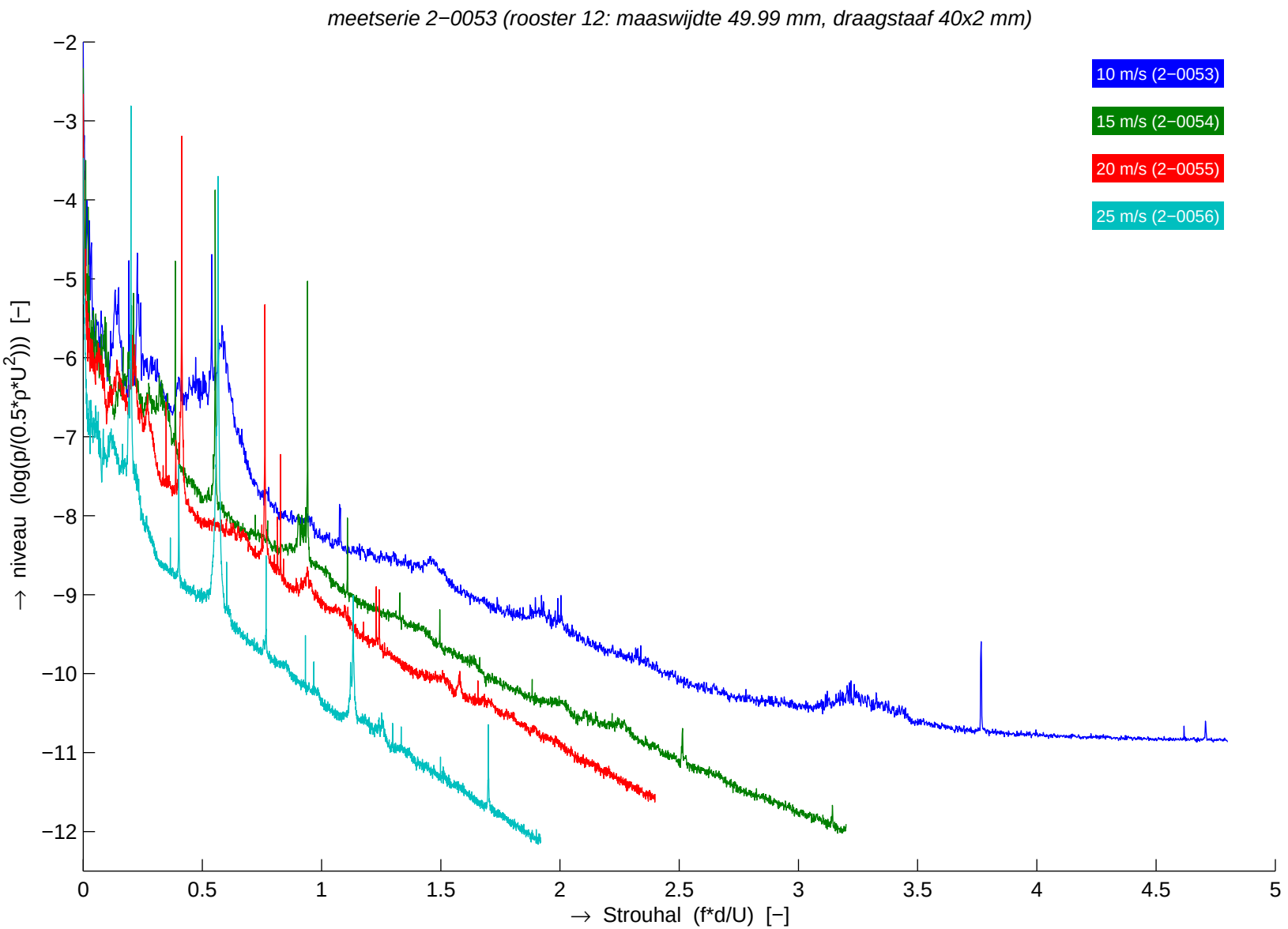

meetserie 2−0030 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0030)
15 m/s (2−0031)
20 m/s (2−0032)
25 m/s (2−0033)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

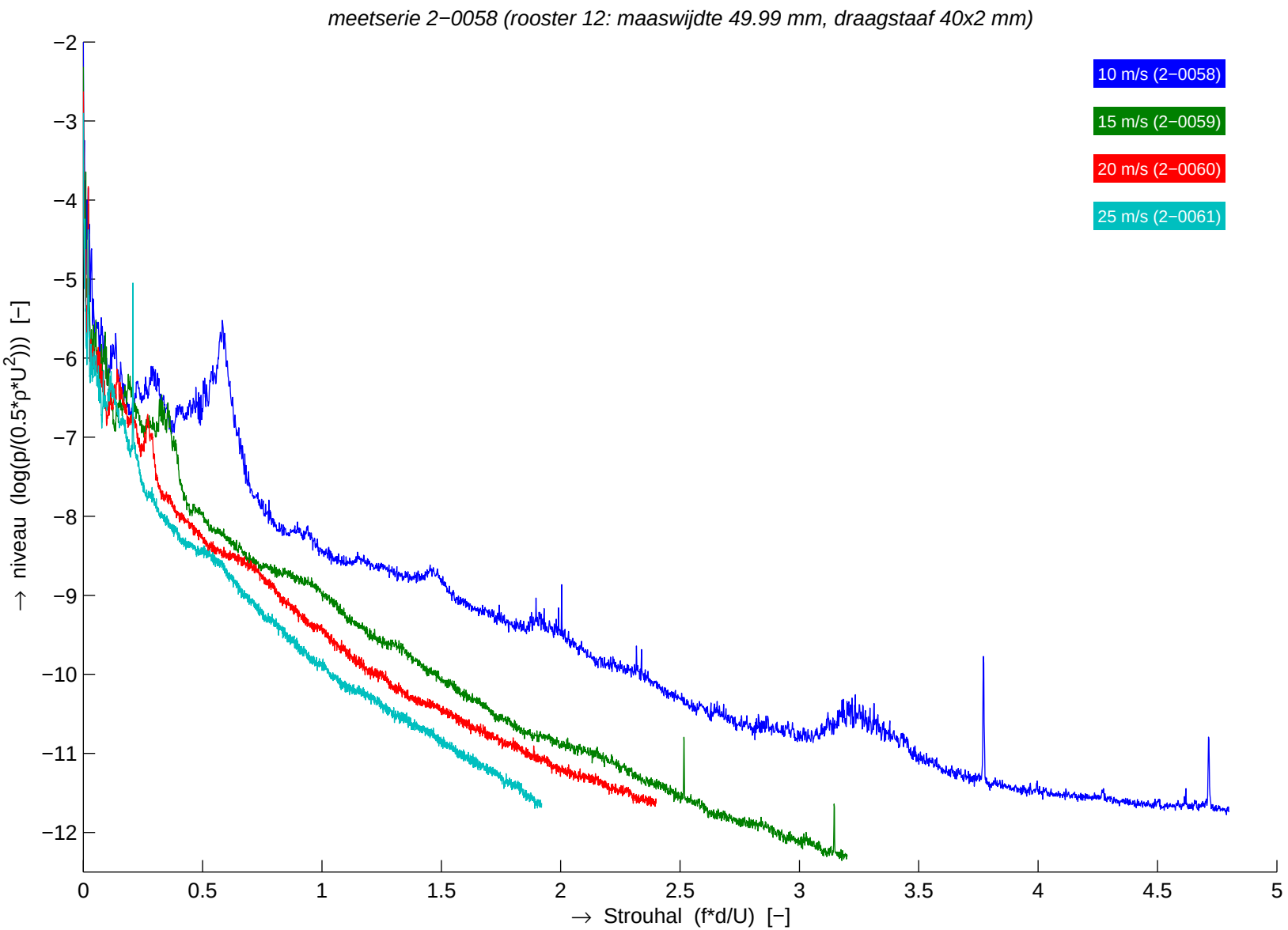

meetserie 2−0034 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0034)
15 m/s (2−0035)
20 m/s (2−0036)
25 m/s (2−0037)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

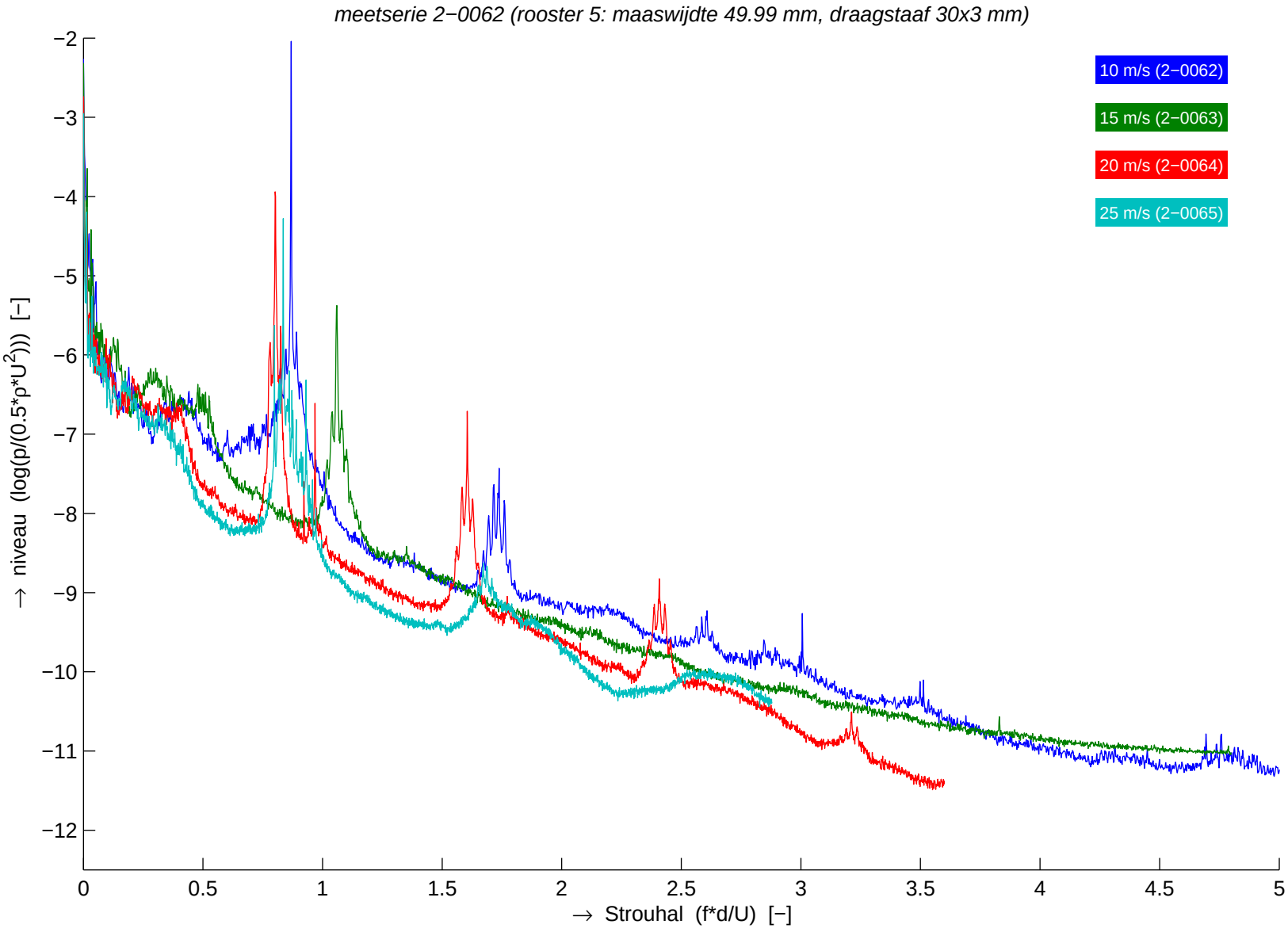

meetserie 2−0039 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0039)
15 m/s (2−0040)
20 m/s (2−0041)
25 m/s (2−0042)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

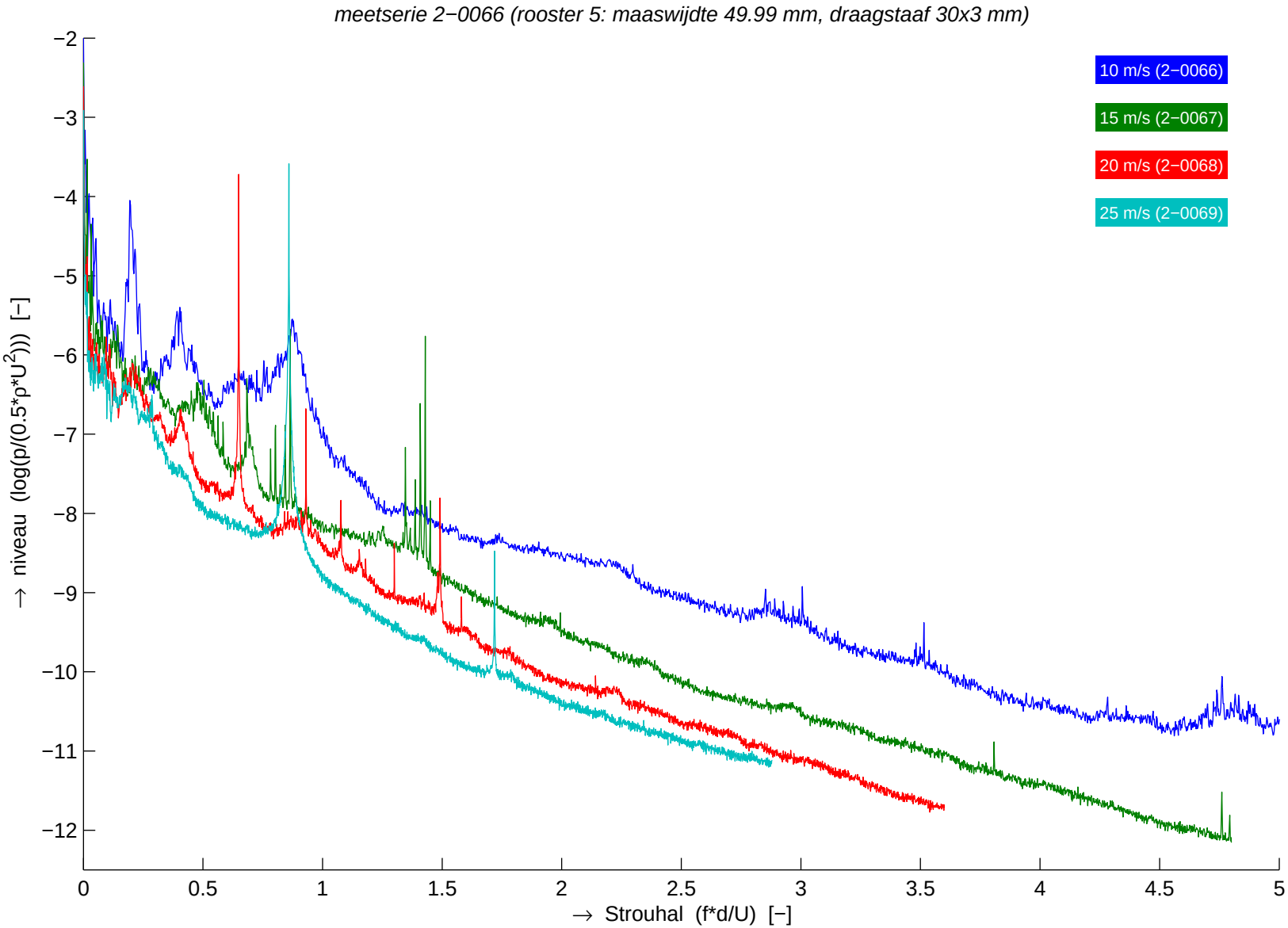

meetserie 2−0043 (rooster 12: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0043)
15 m/s (2−0044)
20 m/s (2−0045)
25 m/s (2−0046)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

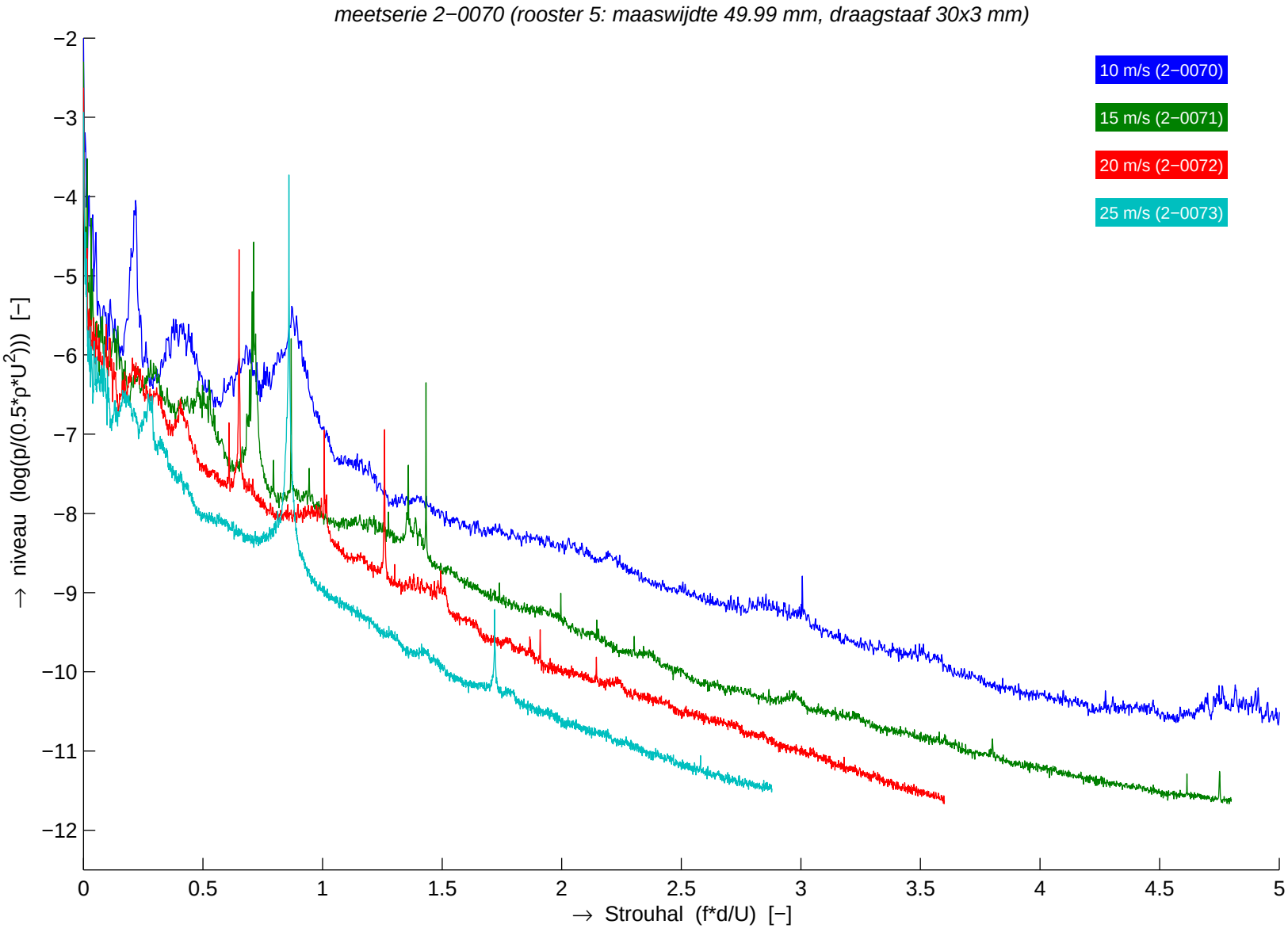

meetserie 2−0049 (rooster 12: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0049)
15 m/s (2−0050)
20 m/s (2−0051)
25 m/s (2−0052)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

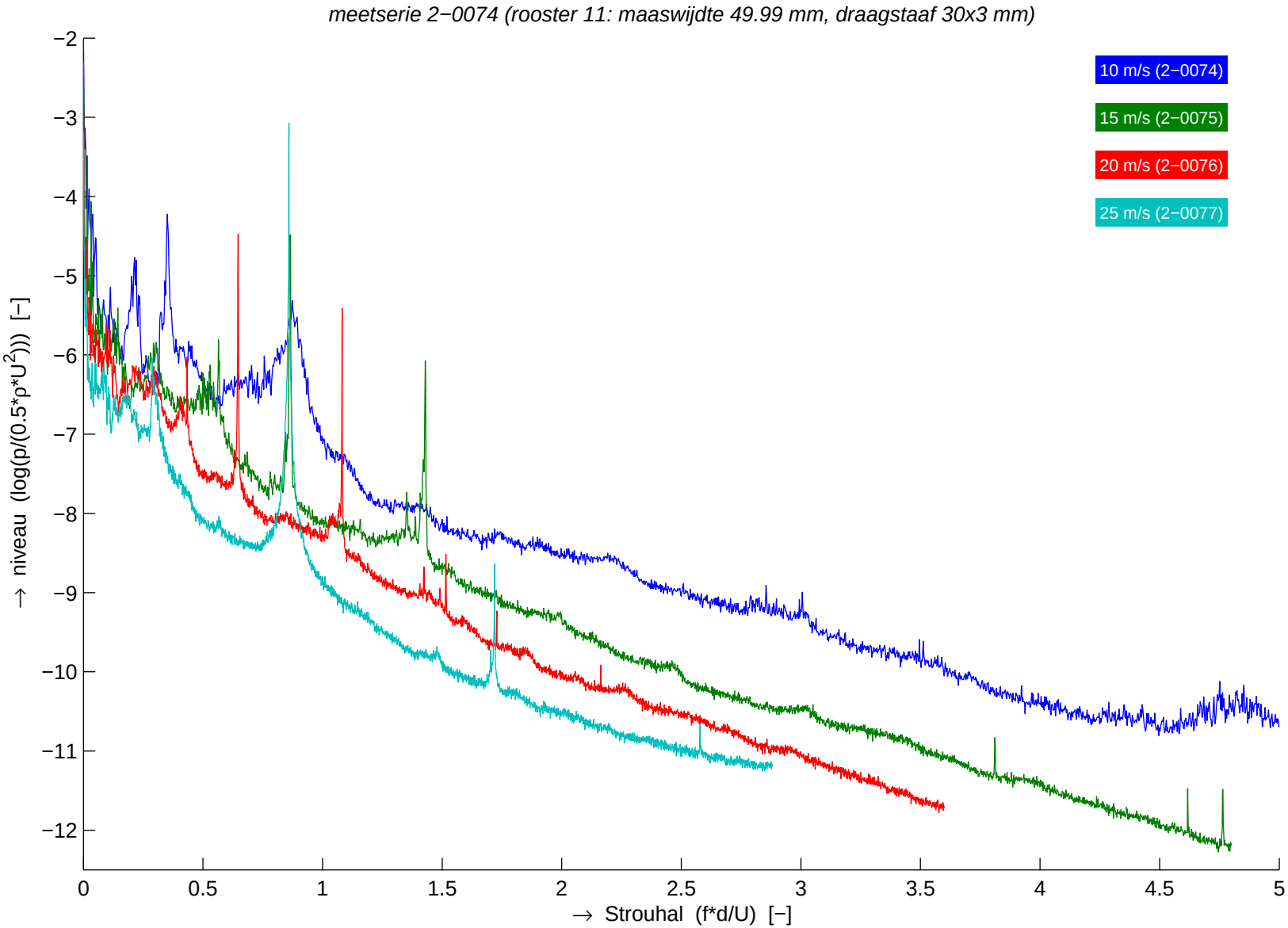

meetserie 2−0053 (rooster 12: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0053)
15 m/s (2−0054)
20 m/s (2−0055)
25 m/s (2−0056)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

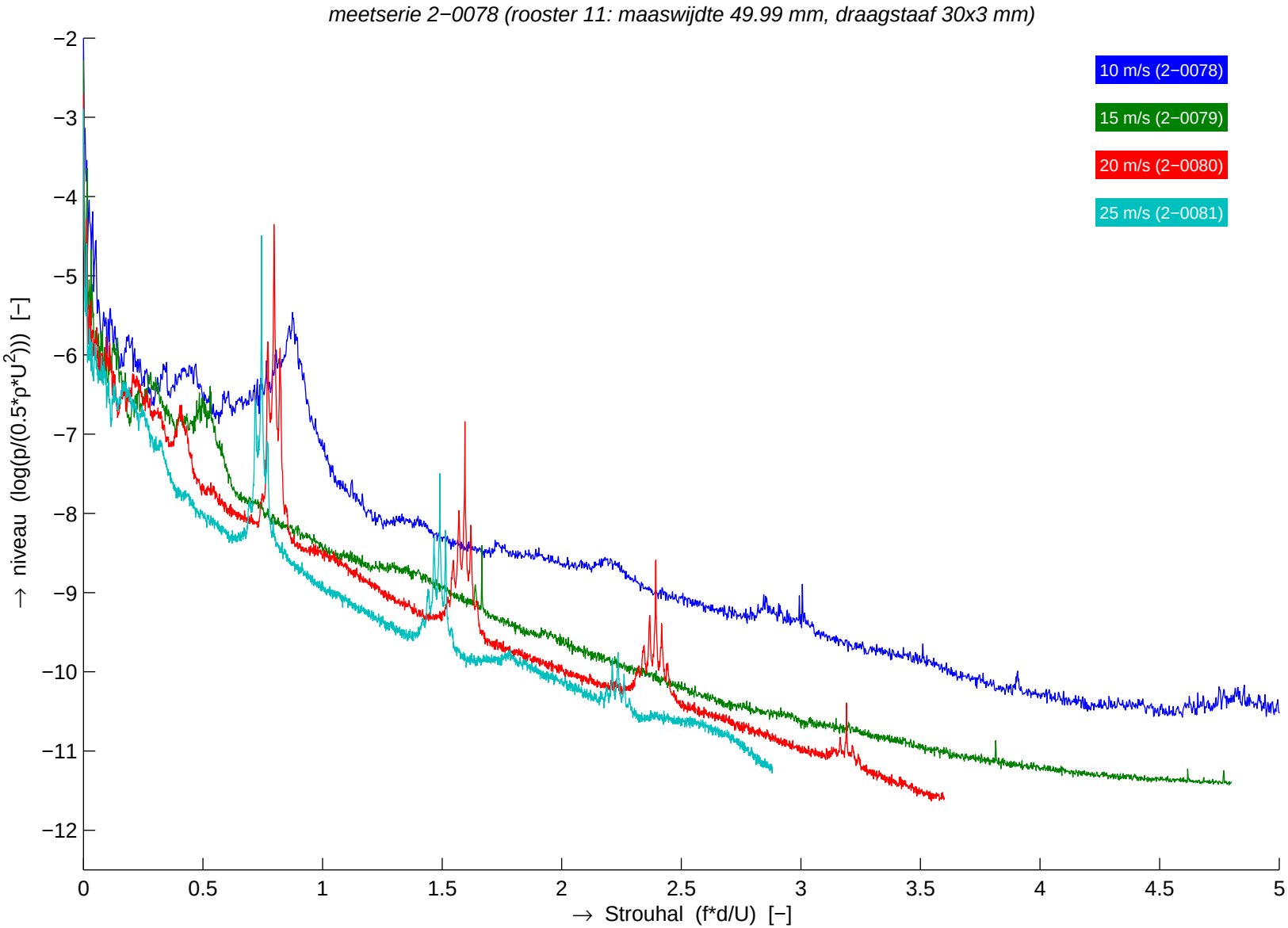

meetserie 2−0058 (rooster 12: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)
10 m/s (2−0058)
15 m/s (2−0059)
20 m/s (2−0060)
25 m/s (2−0061)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
→ Strouhal (f*d/U) [−]

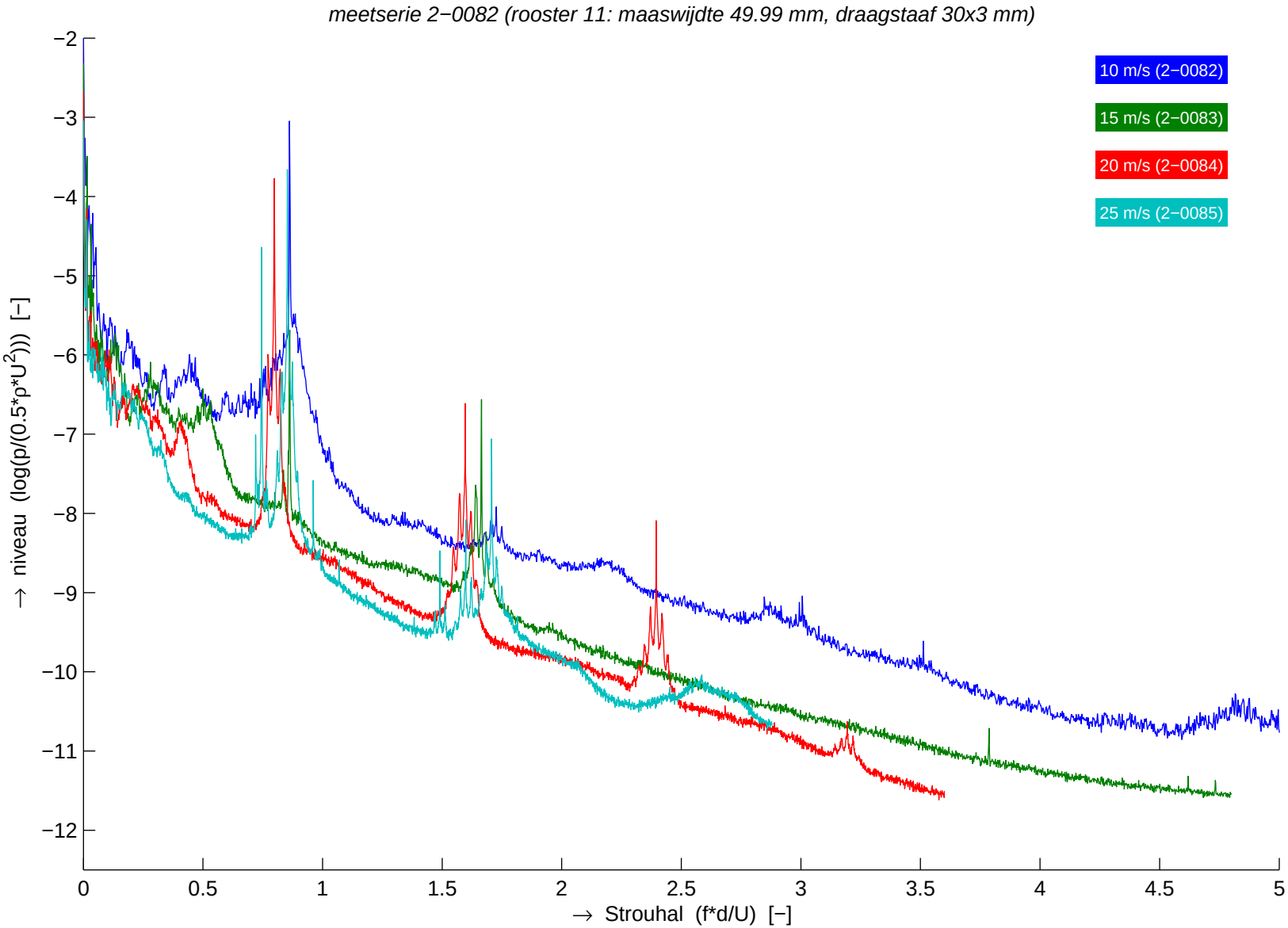

meetserie 2−0062 (rooster 5: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0062)
15 m/s (2−0063)
20 m/s (2−0064)
25 m/s (2−0065)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
→ Strouhal (f*d/U) [−]

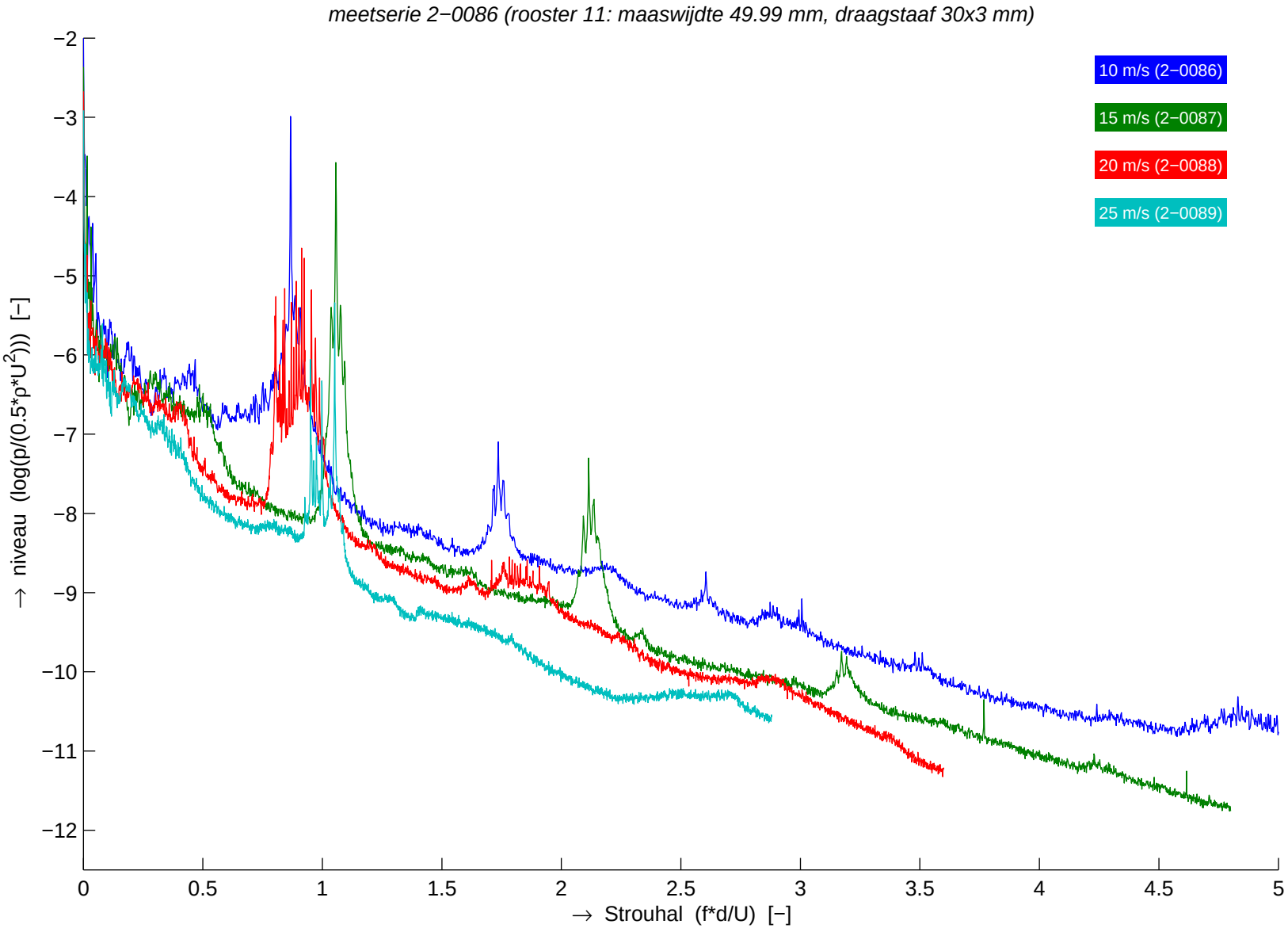

meetserie 2−0066 (rooster 5: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0066)
15 m/s (2−0067)
20 m/s (2−0068)
25 m/s (2−0069)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

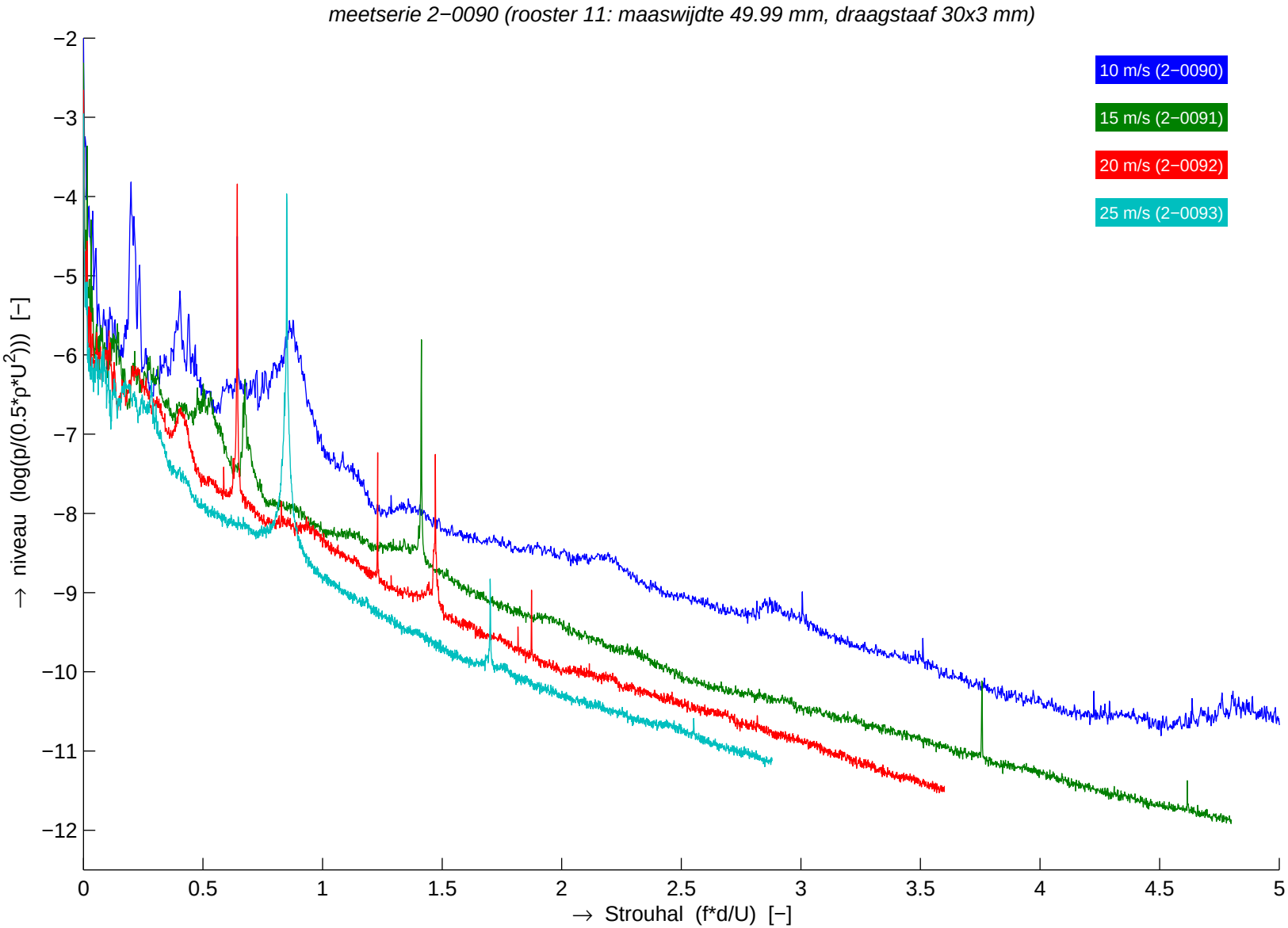

meetserie 2−0070 (rooster 5: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0070)
15 m/s (2−0071)
20 m/s (2−0072)
25 m/s (2−0073)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

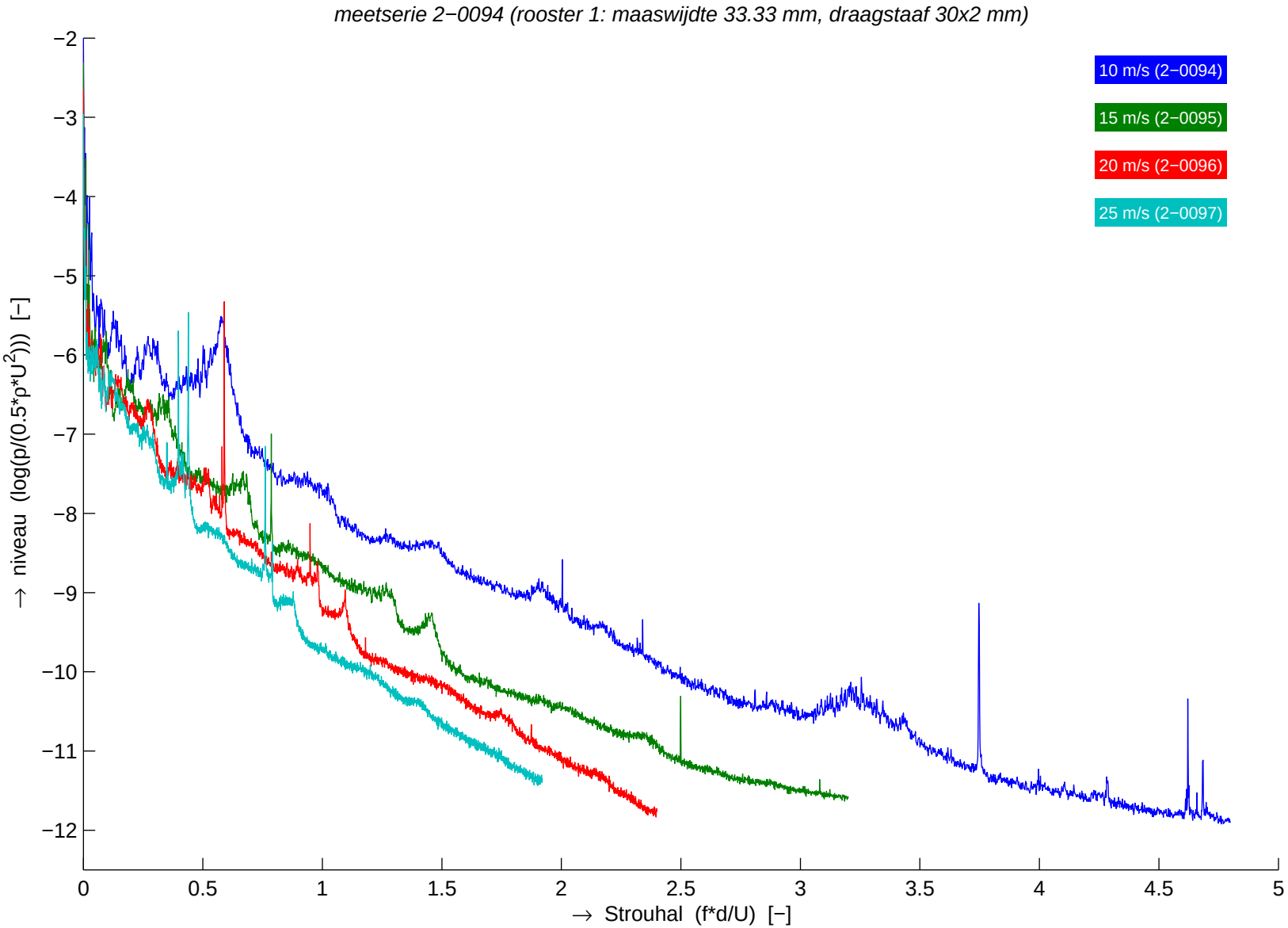

meetserie 2−0074 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0074)
15 m/s (2−0075)
20 m/s (2−0076)
25 m/s (2−0077)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
→ Strouhal (f*d/U) [−]

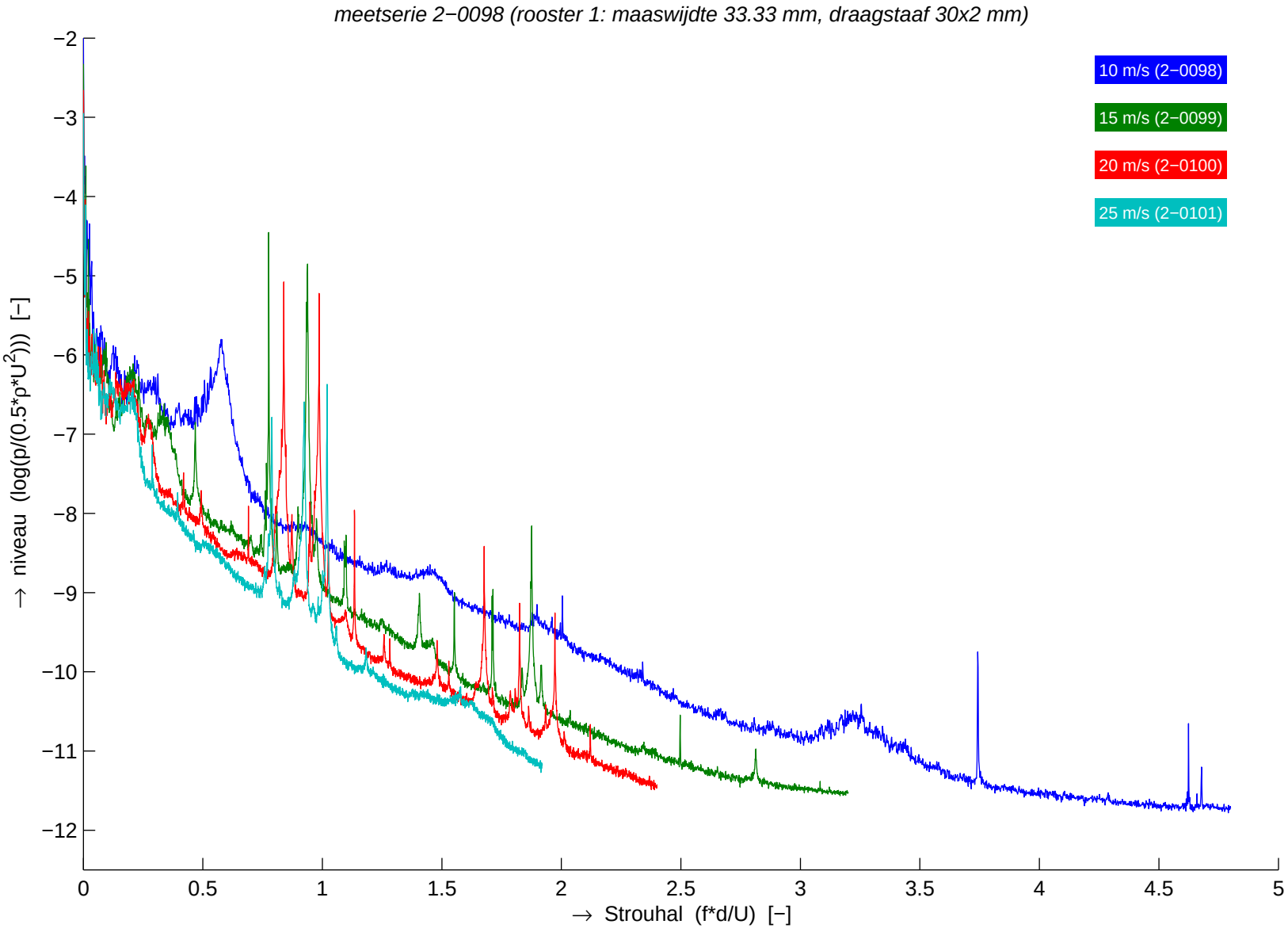

meetserie 2−0078 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0078)
15 m/s (2−0079)
20 m/s (2−0080)
25 m/s (2−0081)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

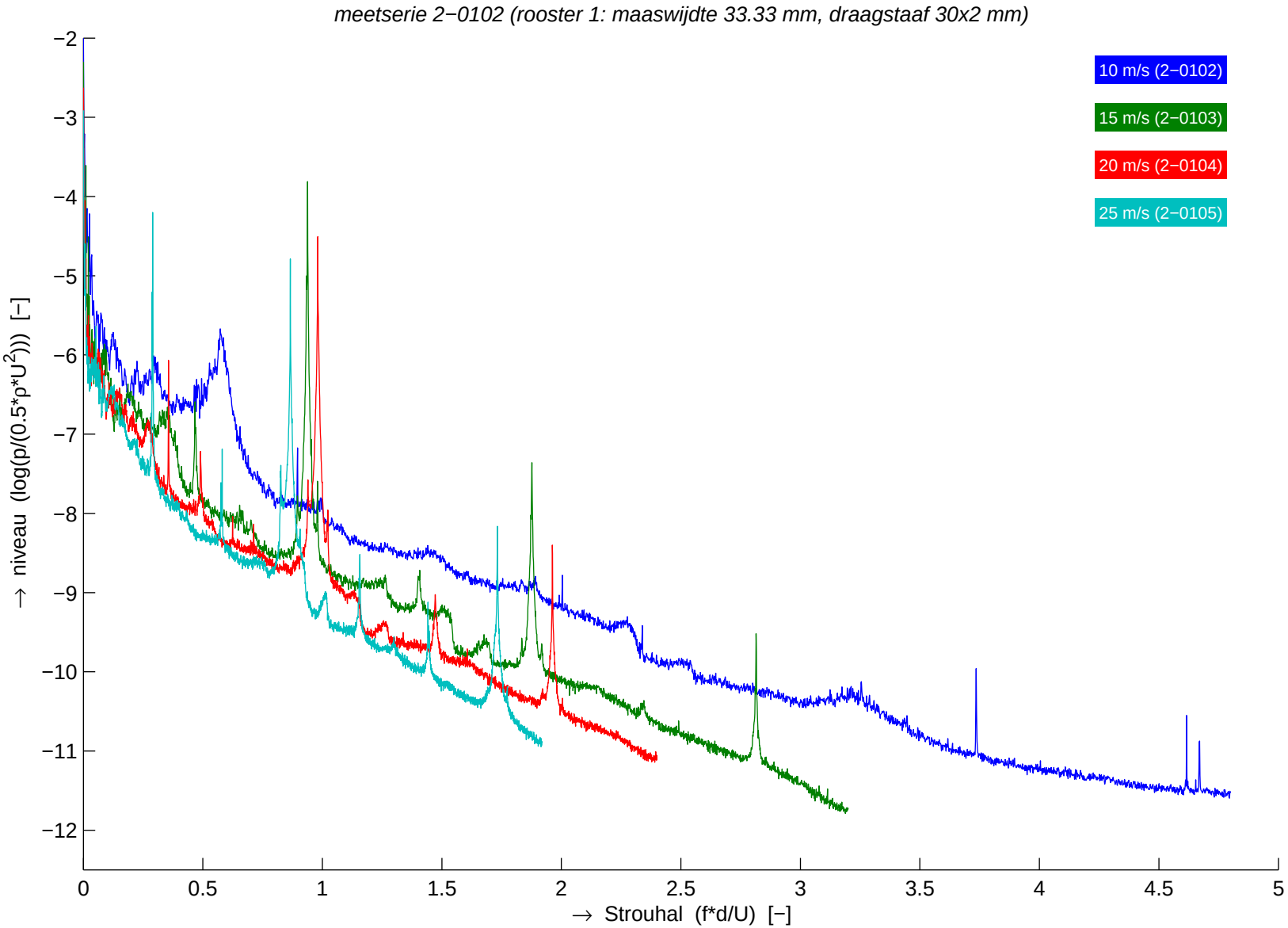

meetserie 2−0082 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0082)
15 m/s (2−0083)
20 m/s (2−0084)
25 m/s (2−0085)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5
→ Strouhal (f*d/U) [−]

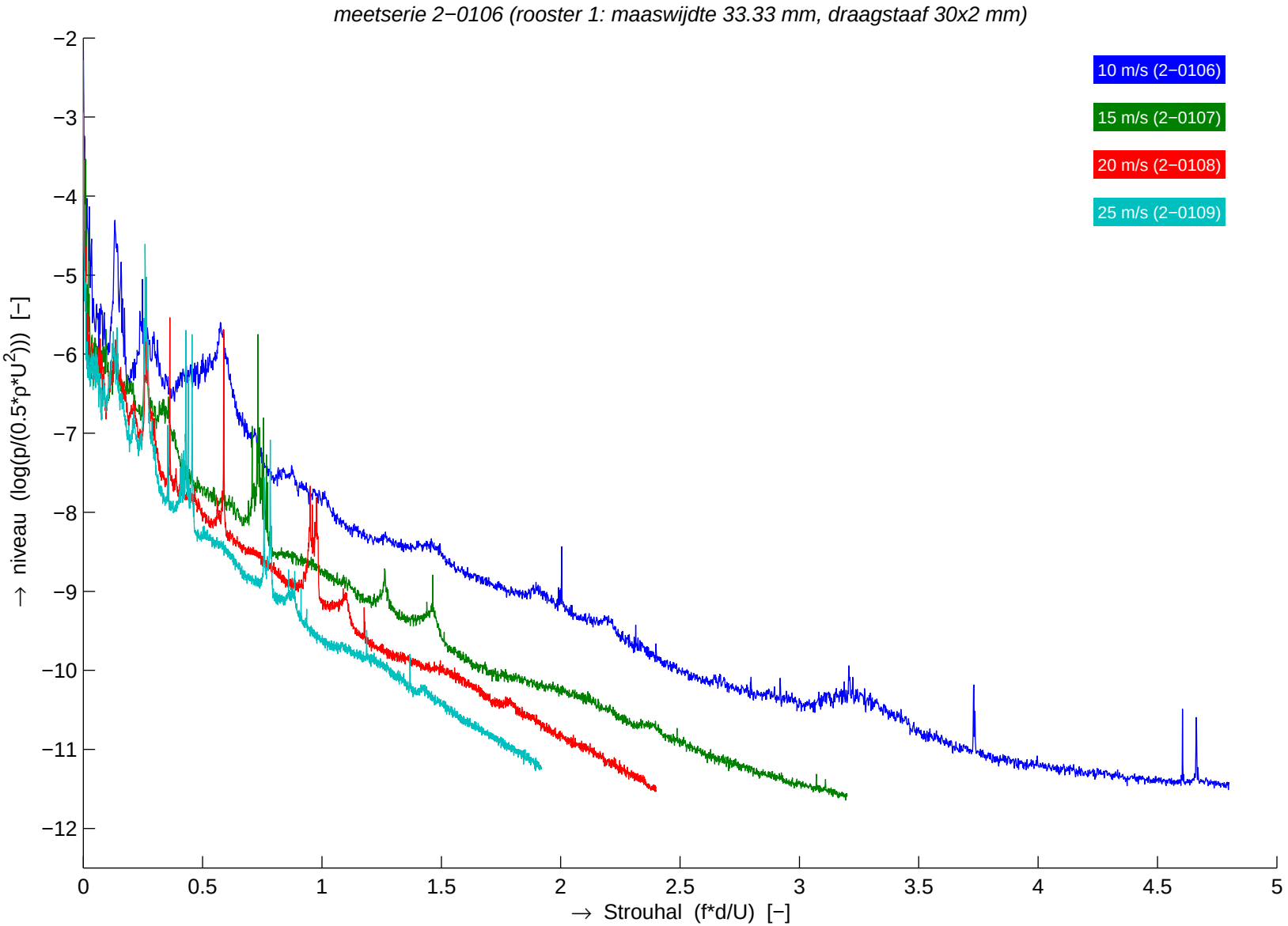

meetserie 2−0086 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0086)
15 m/s (2−0087)
20 m/s (2−0088)
25 m/s (2−0089)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

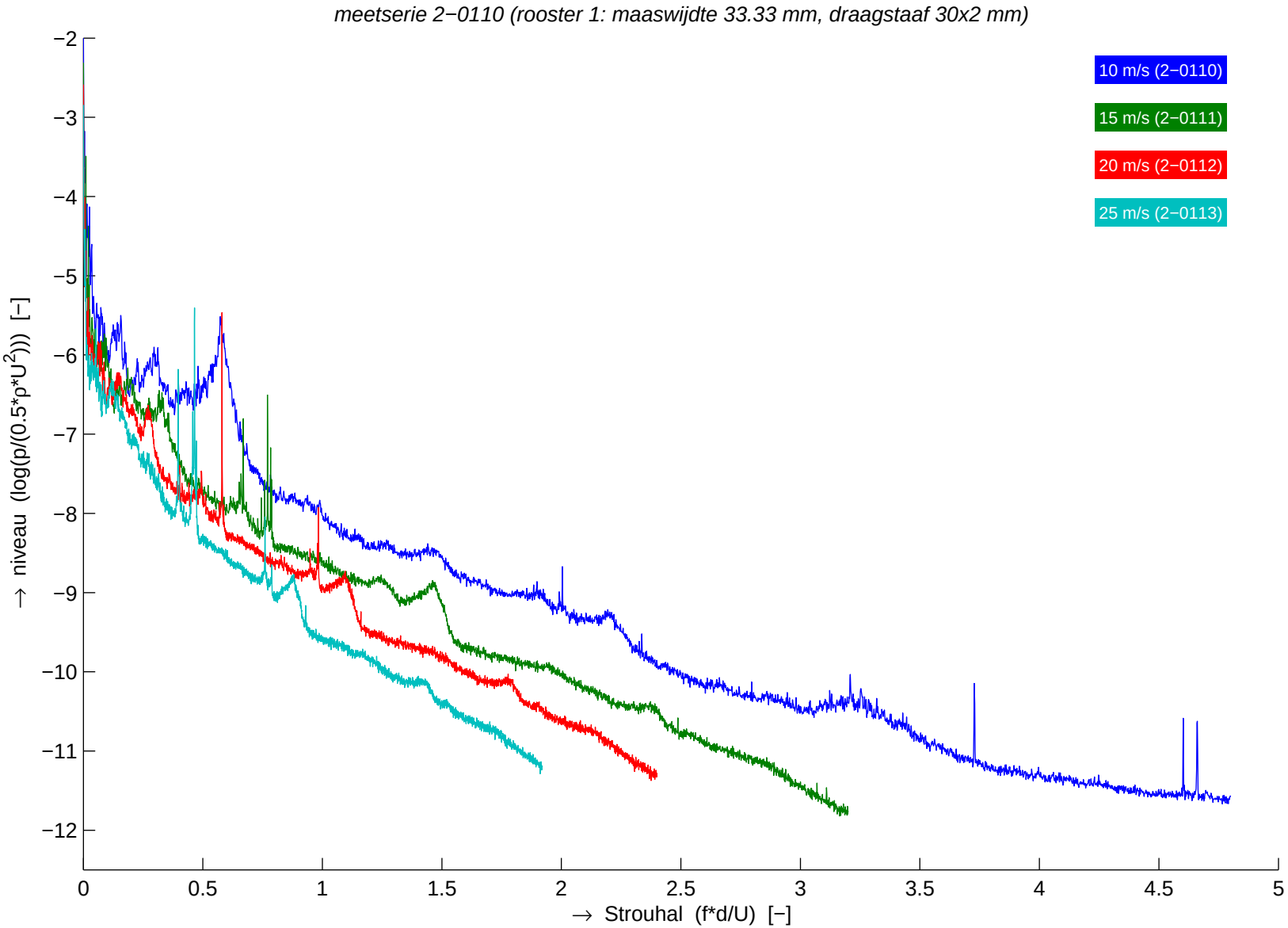

meetserie 2−0090 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0090)
15 m/s (2−0091)
20 m/s (2−0092)
25 m/s (2−0093)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

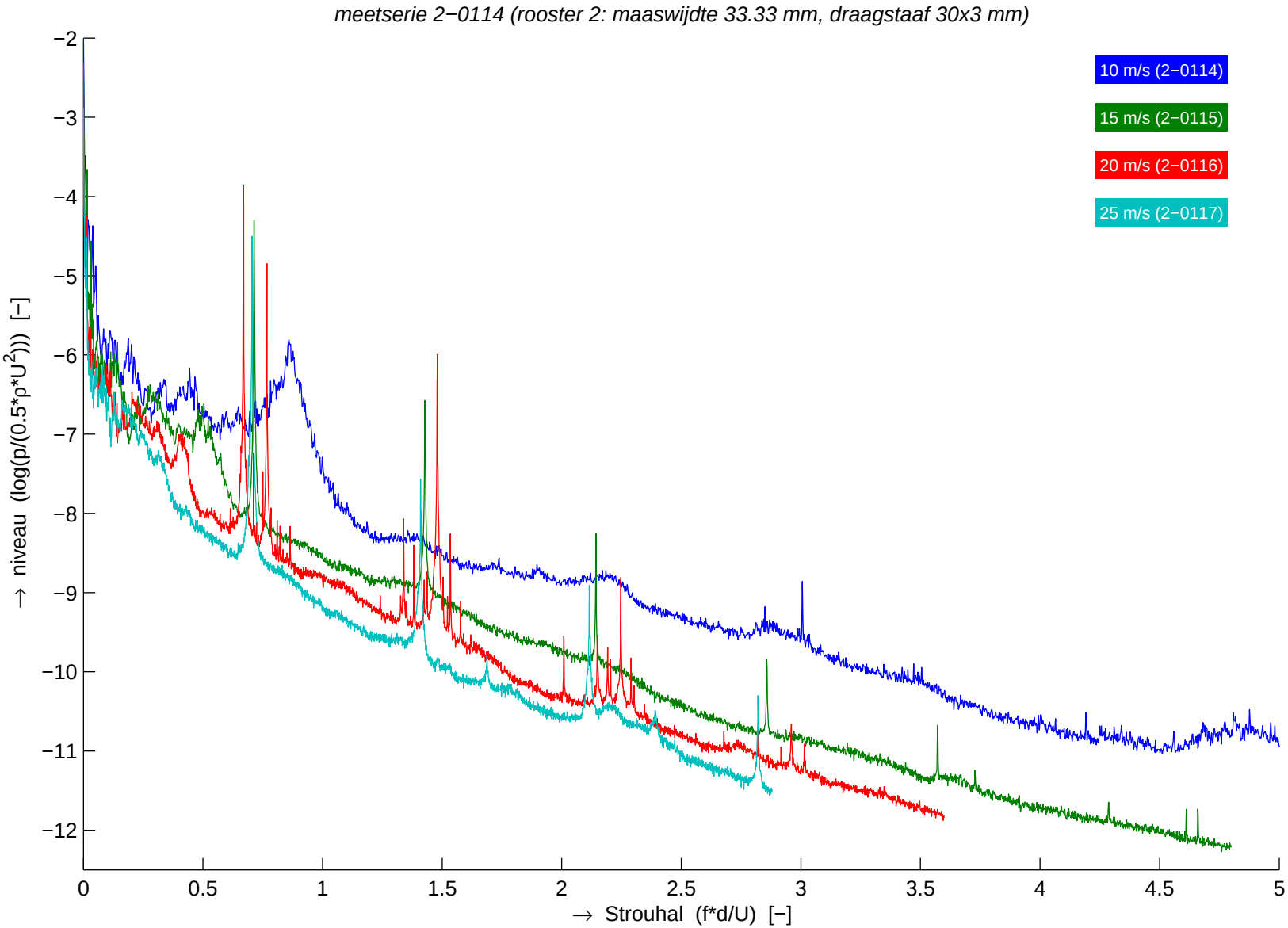

meetserie 2−0094 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (2−0094)
15 m/s (2−0095)
20 m/s (2−0096)
25 m/s (2−0097)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

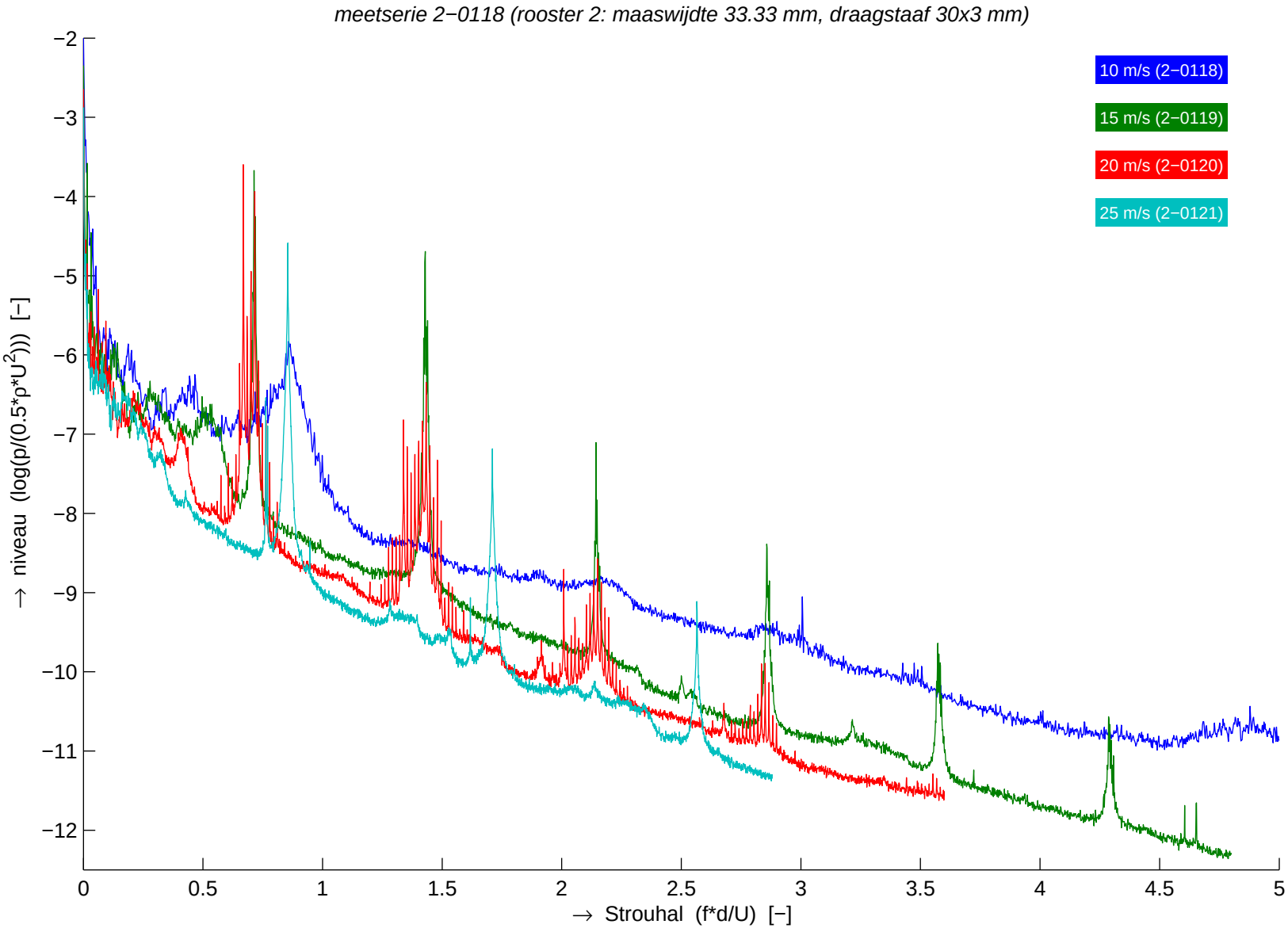

meetserie 2−0098 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (2−0098)
15 m/s (2−0099)
20 m/s (2−0100)
25 m/s (2−0101)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

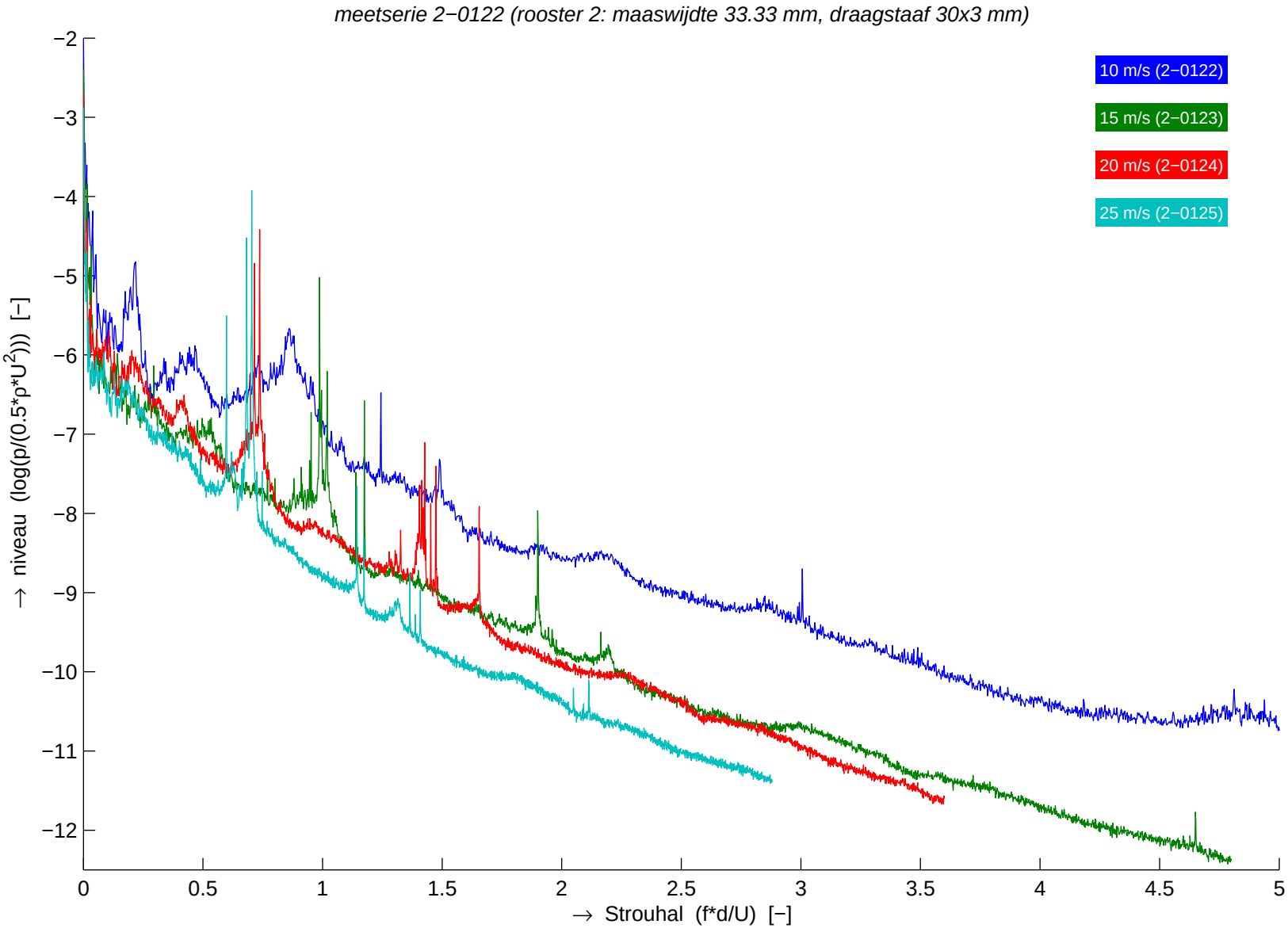

meetserie 2−0102 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (2−0102)
15 m/s (2−0103)
20 m/s (2−0104)
25 m/s (2−0105)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

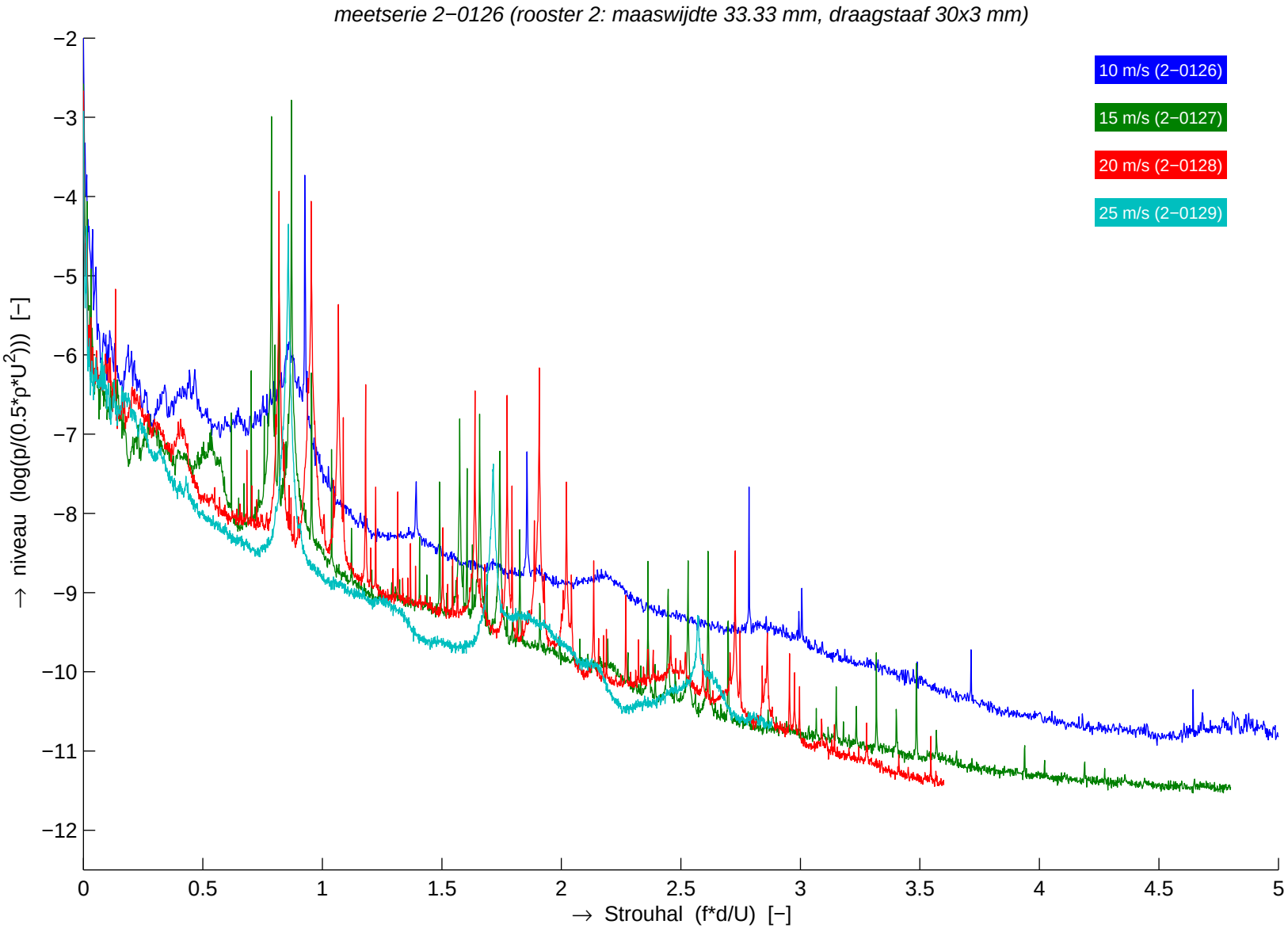

meetserie 2−0106 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (2−0106)
15 m/s (2−0107)
20 m/s (2−0108)
25 m/s (2−0109)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

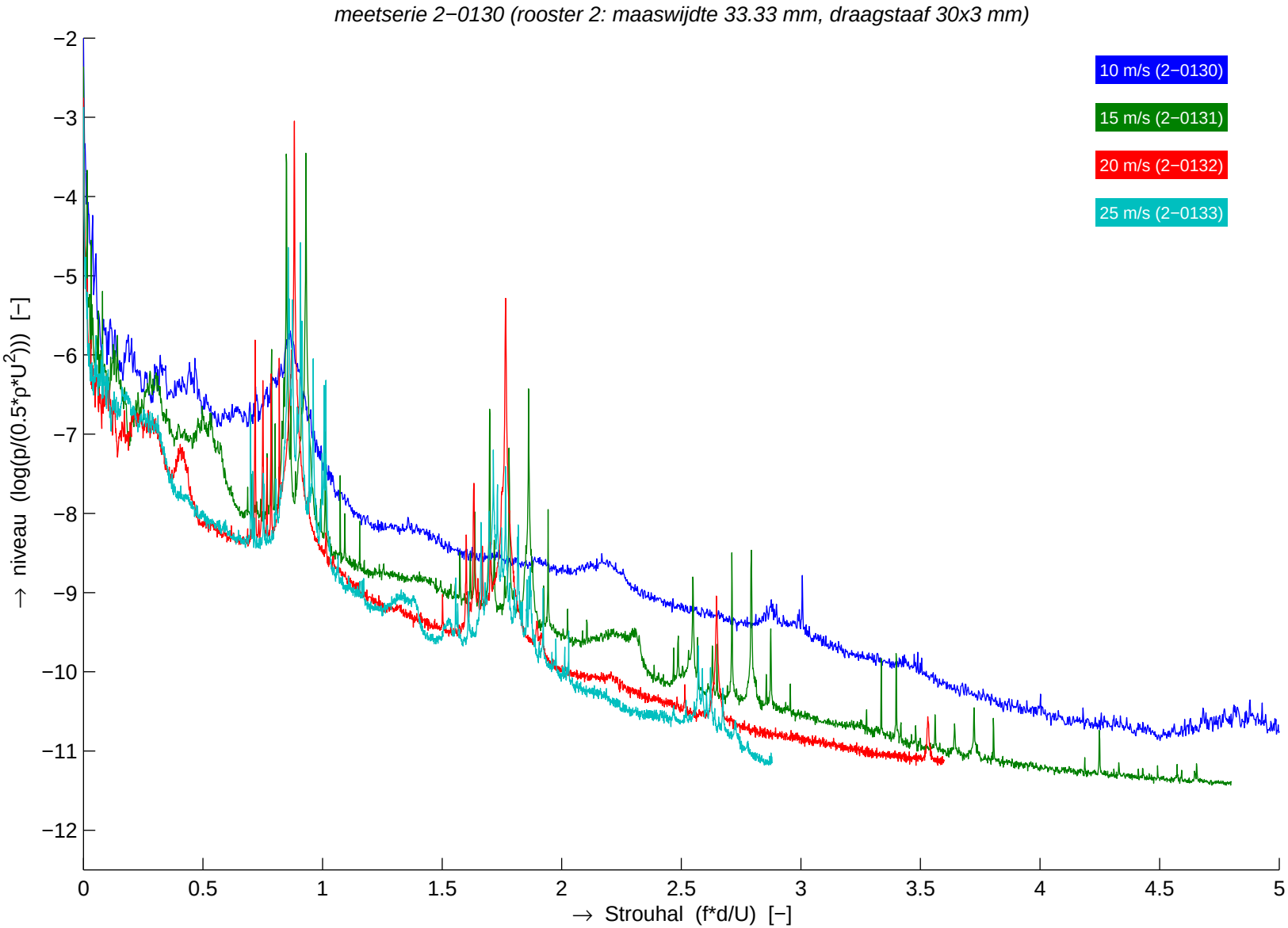

meetserie 2−0110 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (2−0110)
15 m/s (2−0111)
20 m/s (2−0112)
25 m/s (2−0113)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

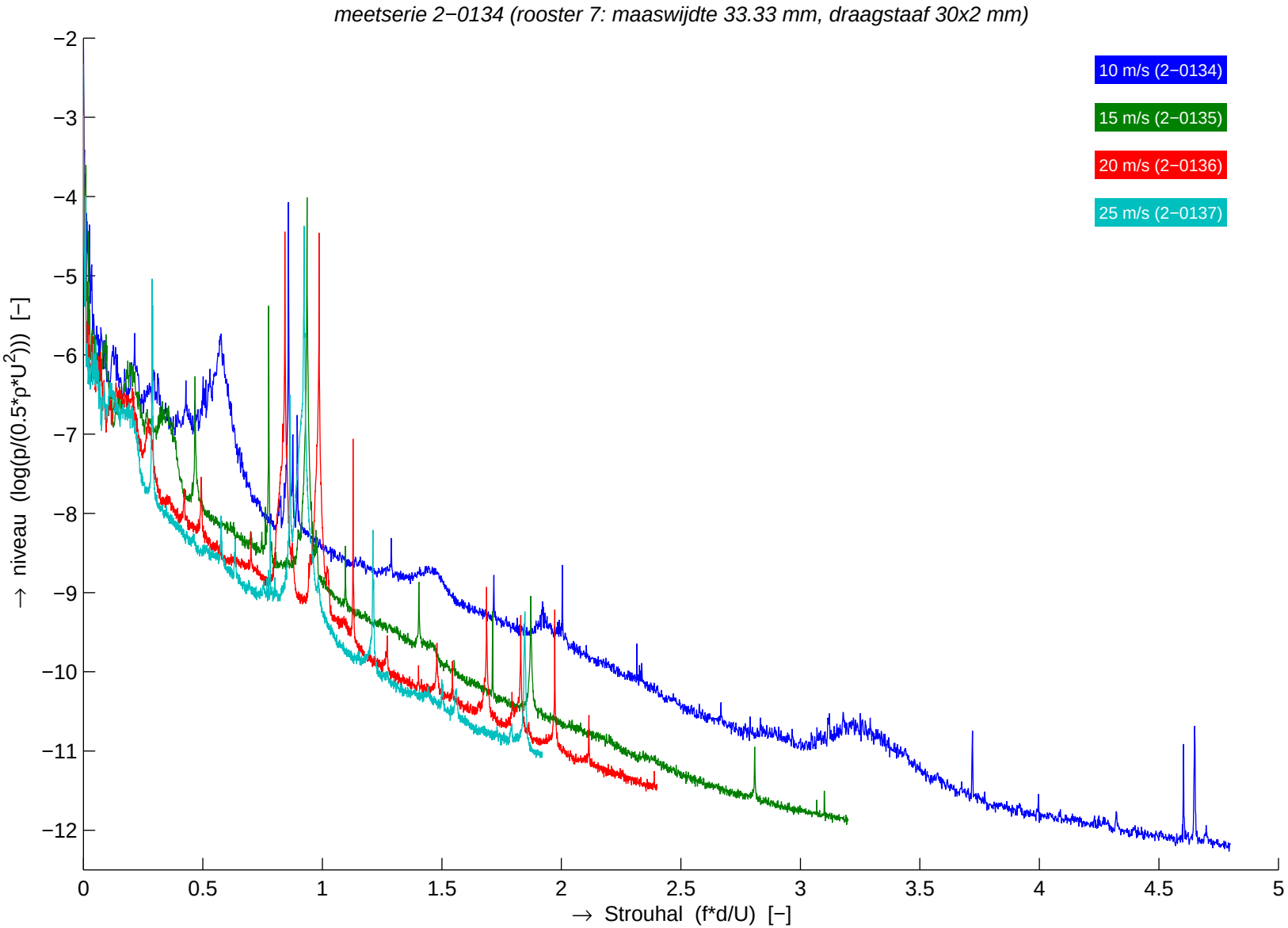

meetserie 2−0114 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0114)
15 m/s (2−0115)
20 m/s (2−0116)
25 m/s (2−0117)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

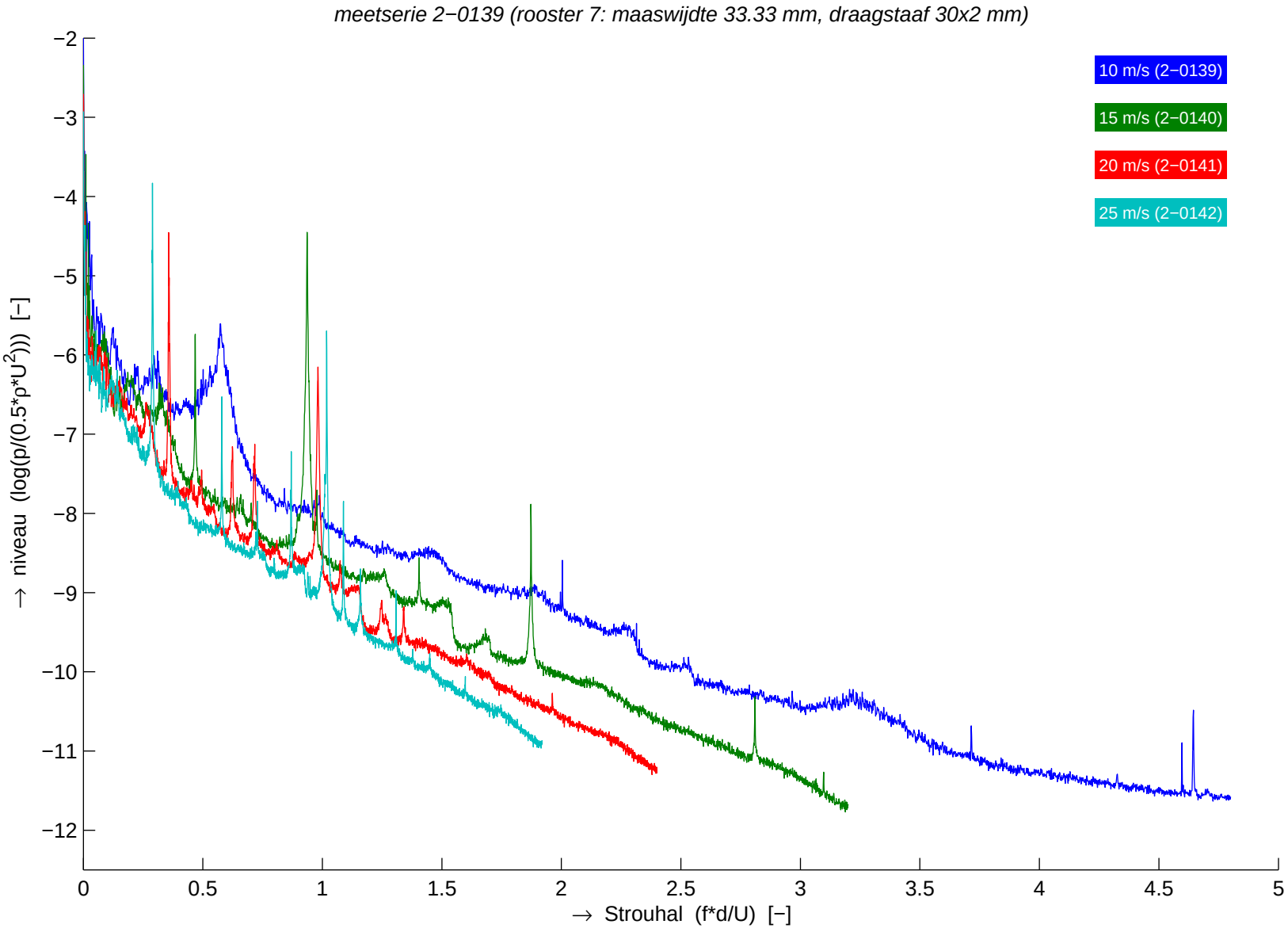

meetserie 2−0118 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0118)
15 m/s (2−0119)
20 m/s (2−0120)
25 m/s (2−0121)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

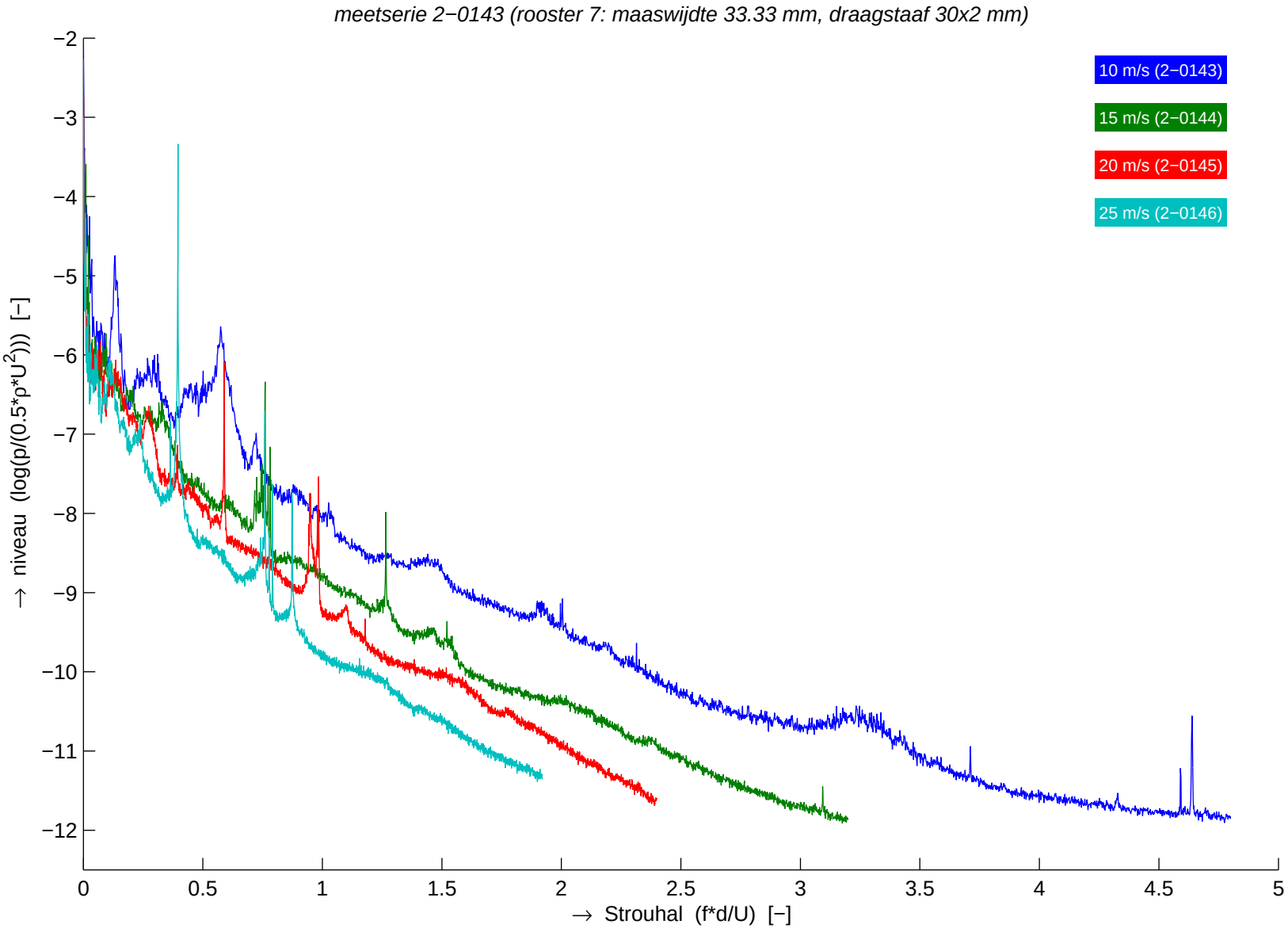

meetserie 2−0122 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0122)
15 m/s (2−0123)
20 m/s (2−0124)
25 m/s (2−0125)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5


meetserie 2−0126 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0126)
15 m/s (2−0127)
20 m/s (2−0128)
25 m/s (2−0129)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5


meetserie 2−0130 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)
10 m/s (2−0130)
15 m/s (2−0131)
20 m/s (2−0132)
25 m/s (2−0133)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5


meetserie 2−0134 (rooster 7: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (2−0134)
15 m/s (2−0135)
20 m/s (2−0136)
25 m/s (2−0137)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5


meetserie 2−0139 (rooster 7: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (2−0139)
15 m/s (2−0140)
20 m/s (2−0141)
25 m/s (2−0142)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5


meetserie 2−0143 (rooster 7: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)
10 m/s (2−0143)
15 m/s (2−0144)
20 m/s (2−0145)
25 m/s (2−0146)
→ niveau (log(p/(0.5*ρ*U^2))) [−]
→ Strouhal (f*d/U) [−]
−2
−3
−4
−5
−6
−7
−8
−9
−10
−11
−12
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
4.5
5

Bijlage 5.

OVER HET VOORKOMEN VAN WINDGELUID BIJ GEBOUWEN

Stromende lucht veroorzaakt bijna altijd geluid, maar soms ligt dat buiten het hoorbereik. Rondom huizen en andere gebouwen is sterke wind meestal hoorbaar als 'loeien'. Hogere gebouwen 'vangen meer wind' en windgeluid treedt daar dan ook eerder op. Windgeluid heeft gewoonlijk geen duidelijke toonhoogte, maar toch klinkt het geluid hoger als de wind toeneemt en lager als de wind afneemt. Dit loeien van de wind is zelden echt hinderlijk.

Wel treedt regelmatig geluidoverlast op die wordt veroorzaakt door objecten op gebouwen en viaducten bij bepaalde windsnelheden en –richtingen. Dit geluid kan meer duidelijke toonhoogtes hebben, harmonisch of vals en schril. Het kan onder meer optreden bij kleine kieren rondom ramen of deuren, bij buizen met openingen, bij balkonhekken en roosters. In de meeste gevallen gaat het om stalen roosters, zie figuur 1.

Vanwege de vele metingen die ondermeer door Peutz B.V. zijn gedaan in de praktijk en in het akoestisch laboratorium, is al veel bekend over de relevante parameters. Om meer structurele kennis op te doen en om al in de ontwerpfase het risico op fluitgeluiden te kunnen verminderen, is door Peutz B.V. onder laboratoriumcondities systematisch onderzoek gedaan. Hiervoor zijn het geluidvermogenniveau en de frequentiekarakteristiek van de fluitgeluiden, afhankelijk van de windsnelheid, hoek van inval en roosterconfiguratie onderzocht. Ook zijn mogelijkheden onderzocht om de fluitgeluiden van roosters te reduceren.

OPZET METINGEN AAN ROOSTERS

Er spelen diverse aspecten van een rooster een rol bij het ontstaan van hinderlijke tonen. Een afgewogen keuze is gemaakt om met name maaswijdte en draagstaafhoogte te onderzoeken. In figuur 2 is weergegeven op welke manier in maaswijdte en draagstaafhoogte is gevarieerd. Voor het onderzoek zijn draagstaafhoogtes onderzocht van 20 tot 40 mm. In maaswijdte (afstand wordt bepaald door h.o.h. afstand) is gevarieerd van 20 tot 60 mm. Alle roosterstaven hebben in dit onderzoek een dikte van 2 mm.

RESULTATEN

Hoogfrequente 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 toon niet. Zie figuur 3, waarin het geluidniveau als functie van de frequentie is uitgezet voor meerdere windsnelheden.

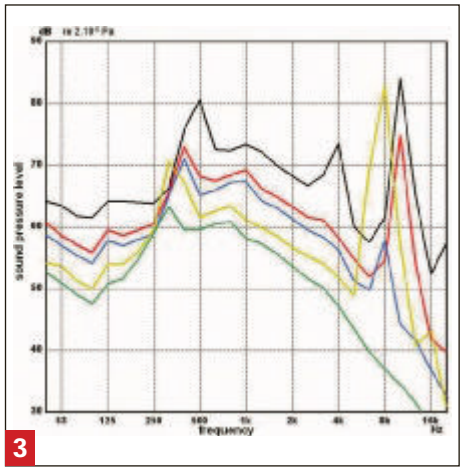
1 Stalen looprooster langs Randstadrail

2 Instelbaar stalen rooster in laboratorium

Bij een bepaalde luchtstroomsnelheid verspringt de 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 belangrijk, omdat geen van deze tonen ontstaat bij een klein aantal draagstaven, maar pas vanaf negen staven. De luchtstroomsnelheden waarbij hinderlijke tonen ontstaan is 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 tonen ontstaan. Tot nu toe is er tevens nog geen relatie gevonden tussen de frequenties van de tonen en de afmetingen (hoogte en dikte) en de afstand van de draagstaven ten opzichte van elkaar (maaswijdte). Voor alle onderzochte configuraties werden geen tonen meer waargenomen bij een h.o.h. afstand van 50 mm of meer.

Het ontstaan van hinderlijke tonen blijkt sterk samen te hangen met de scherpte van de draagstaafranden. Door deze randen af te ronden, met bijvoorbeeld strips of tape, wordt hetontstaan sterk verhinderd. Ook het profiel van de lucht die het rooster treft, is van invloed op het ontstaan van hinderlijke tonen. Wanneer dit profiel wordt verstoord door bijvoorbeeld gaas of een net, wordt de kans op het ontstaan sterk verkleind.



3 Gemeten geluidsniveaus bij roosters, bij verschillende windsnelheden

TOEKOMST

Naarmate de ervaring met de hinderlijke vormen van windgeluid toeneemt, zal beter voorspeld kunnen worden welke constructies een risico op windgeluid in zich hebben. Dit ondanks het feit dat uit de getoonde resultaten vooralsnog geen bruikbare theoretische verbanden zijn af te leiden. De faciliteiten om dat in het laboratorium te verifiëren en het effect van mogelijke remedies te bepalen, zullen in de komende tijd naar verwachting eveneens toenemen. De kans op gebouwen die bij sterke wind hinderlijk geluid produceren, kan zodoende wezenlijk verminderd worden. ■

ir. G.M. (Marcel) van Uffelen, Peutz B.V., Mook

Bijlage 6.

UNIVERSITEIT VAN AMSTERDAM

Een analyse van het windklimaat in Nederland

Bachelorthesis Aardwetenschappen

Eric de Jong
Eric.deJong@student.uva.nl
0336149

Begeleider:

Dr. Ir. J.H. van Boxel

Het klimaat verandert. Welk effect dat heeft op het windklimaat is nog onduidelijk. Dit onderzoek is bedoeld om daar meer inzicht in te verwerven. Met behulp van de nieuwste dataset met potentiële windsnelheden wordt een antwoord gegeven op hoe het windklimaat in Nederland aan het oppervlak is veranderd in de periode 1962-2008. Dit onderzoek toont aan dat er sprake is van een duidelijke ruimtelijke variatie wat betreft veranderingen in het windklimaat. Aan de kust is er sprake van een toename in frequentie van hardere en krachtige wind terwijl er in het binnenland sprake is van een toename bij zwakke windkrachten. Dit is ook het geval voor het aantal stormen.

Inhoudsopgave

1. Introductie 3

2. Methode 4

    2.1 Dataset 5

    2.2 Datareductie 6

    2.3 Kwaliteitscontrole 6

    2.4 Intensiteit 8

    2.5 Stormen 8

    2.6 Kust en binnenland 10

3. Resultaten 12

    3.1 Intensiteit van de wind 12

    3.2 Frequentie van stormen 18

    3.3 Herhalingstijden 20

4. Discussie 22

5. Conclusie 24

6. Nawoord 25

Literatuurlijst

Bijlagen

1. Introductie

Het globale klimaat is aan het veranderen. Dit is te wijten aan antropogene invloeden en het bewijs daarvoor wordt door het Intergovernmental Panel for Climate Change ondubbelzinnig genoemd (IPCC, 2007). In de toekomst zal klimaatverandering een steeds grotere rol gaan spelen in het dagelijks leven. Een voorspelling van het IPCC (2007) over de regio waar Nederland toe behoort zijn onder andere:

- *hogere maximum- en minimumtemperaturen;*
- *kans op meer en extremere hittegolven;*
- *kans op meer zware neerslag in de winter;*
- *kans op toenemende droogte;*
- *kans op afname van het aantal stormen.*

Wat betreft klimaatverandering is er uitgebreid onderzoek verricht op het gebied van temperatuur en neerslag. Over het effect van klimaatverandering op het windklimaat is echter minder bekend. Cowie (2007) beweert dat klimaatverandering globaal zal leiden tot zwaardere stormen, waarbij deze niet in frequentie, maar wel in intensiteit zullen toenemen. Pryor en Barthelmie (2010) verklaren dat de jaarlijkse gemiddelde windsnelheid in Noord Europa zal toenemen. Deze conclusie wordt bevestigd door Pryor et al. (2012), echter benadrukken de auteurs dat er veel verschil zit tussen de modellen wat te verklaren is door het verschil in methodologie. De reden dat er nog maar weinig onderzoek is gedaan naar het windklimaat aan het oppervlak is het gebrek aan kwalitatief goede data (Smits et al., 2005; Della Marta et al., 2009). Volgens deze auteurs wordt dit in veel modellen en onderzoeken omzeild door zich te baseren op de geostrofische wind afgeleid van luchtdruk metingen aan het oppervlak. In het onderzoek van Smits et al. (2005) over stormen in Nederland is daarom gebruik gemaakt van een verbeterde dataset van windgegevens afkomstig van meetstations van het KNMI. De conclusie uit dat onderzoek luidt dat er een afname is van stormen in Nederland over de periode 1962 – 2002. Deze conclusie komt overeen met het KNMI (2008) en het IPCC (2007) die spreken over een afname van het aantal periodes met sterke wind in Nederland. Beide instanties gaan hier echter alleen in op de frequentie van sterke wind en stormen.

Wind speelt een belangrijke rol in het Nederlandse klimaat. Wind was mede de oorzaak achter de overstroming van 1953 en heeft geleid tot het bouwen van de deltawerken. Een ander voorbeeld van begin 20ste eeuw is de bouw van de afsluitdijk als direct gevolg van een zware storm in 1916 (Wieringa en Rijkoort, 1983). Een kleine toename van de intensiteit van stormen in Nederland zal een groot effect hebben op de jaarlijkse schade aan huizen en de industrie (Dorland et al., 1999). Kennis over de herhalingstijd van stormen is een belangrijke parameter in de wettelijke vijfjaarlijkse analyse naar van het veiligheidsniveau van de

waterkeringen in Nederland (Wever en Groen, 2009) en voor de risico analyses van verzekeringsmaatschappijen (Della Marta et al., 2009).

Wind heeft ook positieve eigenschappen: windenergie neemt wereldwijd de 2de plaats in op het gebied van energie opgewekt uit duurzame energiebronnen, alleen overtroffen door energie opgewekt uit waterkracht (Pryor en Barthelmie, 2010). Nederland haalt ongeveer 4.4% van haar totale energiebehoefte uit windenergie (The European Wind Energy Association, 2012). De Europese Unie heeft zich het bindende doel gesteld om in het jaar 2020 20% van haar energiebehoefte te halen uit duurzame energiebronnen (Harmsen et al., 2011). Het is wereldwijd een snel groeiende bron van energie (Pryor en Barthelmie, 2010). Net als veel andere hernieuwbare energiebronnen is ook windenergie gevoelig voor klimaatverandering (Breslow en Sailor, 2002; Pryor en Barthelmie, 2010; Pryor et al., 2012). Een verandering van het windklimaat zal een effect hebben op de windenergie productie. Mogelijk moeten windturbines worden aangepast om te kunnen omgaan met andere windsnelheden of er zal bijvoorbeeld rekening gehouden moeten worden met een verminderende windenergieproductie (Breslow en Sailor, 2002; Pryor en Barthelmie, 2010)

Doelstelling

Er bestaat niet alleen verdeling in de literatuur over hoe het windklimaat in Nederland veranderd in de toekomst, ook de verandering van het windklimaat in de afgelopen decennia is onderwerp van discussie (Smits et al., 2005). Dit is voornamelijk te wijten aan het gebrek van goede windgegevens aan het oppervlak (Smits et al., 2005). Voor de analyse van extreme windsnelheden is dit geen groot probleem en daar zijn meer studies van te vinden (Della Marta et al., 2009). De vraag of er veranderingen optreden in de lagere windsnelheden blijft daarom onbeantwoord. Het doel van dit onderzoek is om meer kennis te vergaren over veranderingen in het windklimaat van Nederland. Door gebruik te maken van de nieuwste dataset is het mogelijk een analyse te maken voor alle windsnelheden. Dit uit zich in de volgende hoofdvraag:

Hoe is het windklimaat in Nederland veranderd in de periode 1962 – 2008?

De beantwoording van de hoofdvraag zal gebeuren aan de hand van de volgende deelvragen om zo tot een compleet beeld te komen van het windklimaat:

1. Hoe is de intensiteit van de wind in Nederland veranderd?
2. Hoe is de frequentie van stormen veranderd in Nederland?
3. Hoe is de herhalingstijd van de wind in Nederland veranderd?

2. Methode

2.1 Dataset

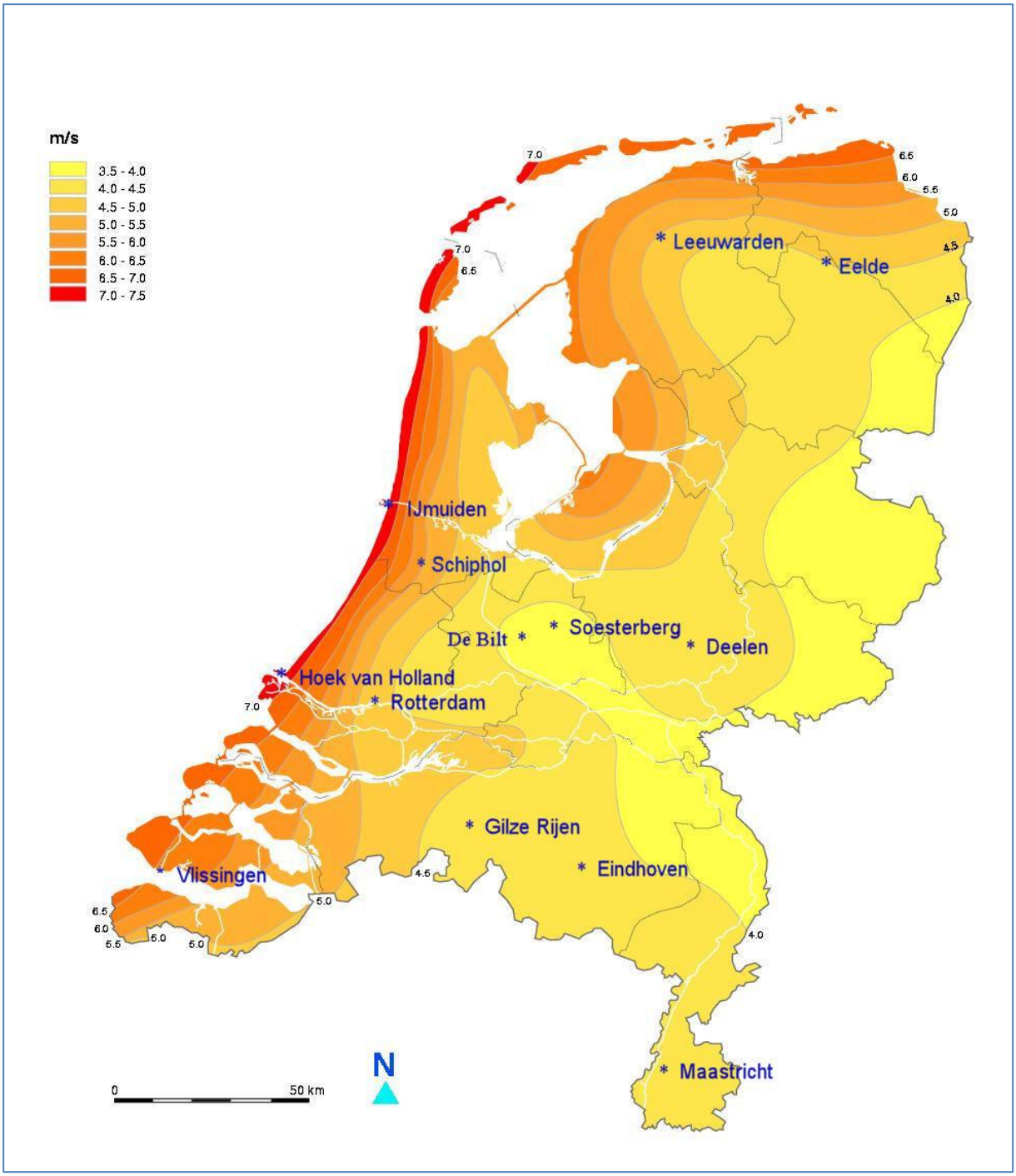
In de jaren ‘80 onderkende Wieringa en Rijkoort (1983) het probleem van de matige kwaliteit van winddata vergaard door de meetstations van het KNMI. De meetgegevens voor wind worden door veel omgevingsfactoren beïnvloed, zoals vegetatie, bebouwing, verplaatsingen van meetstations. Deze auteurs passen daarom een beschuttingscorrectie toe die corrigeert voor lokale invloeden. Deze beschuttingscorrectie werd berekend aan de hand van gegevens over de vlagerigheid van de wind per locatie. De data na correctie wordt de potentiële windsnelheid genoemd. Deze theorie van Wieringa en Rijkoort (1983) staat aan de basis voor het KNMI-HYDRA project dat de KNMI eind jaren ’90 is aangegaan met de Waterdienst en Deltaris voor correcties op de dataset van het KNMI voor windrichting en windsnelheden. Dit HYDRA project is later weer verbeterd door Wever en Groen (2009).

Dit onderzoek maakt gebruik van deze nieuwste dataset ontwikkeld door Wever en Groen (2009). Deze dataset bevat de potentiële windsnelheden en windrichting per uur voor diverse locaties. Om uitspraken te kunnen doen over een trend in het windklimaat is een zo lang mogelijke periode gewenst. De langste reeks is die van het weerstation op Schiphol die begint in 1950. In totaal zijn 13 meetstations geselecteerd met de langste reeksen (zie tabel 2.1 en figuur 2.1). Lichteiland Goeree heeft ook een lange meetreeks, echter na analyse bleek dat in de periode van 1951-1966 maar eens in de 3 uur te zijn gemeten. De kortste reeks is afkomstig van het meetstation Hoek van Holland, beginnend in 1962. Trends die gelden voor meer dan een individueel station, bijvoorbeeld kust en binnenland, zijn daarom beperkt door dat beginpunt. Analyses uitgevoerd voor individuele meetstations zijn wel uitgevoerd over de volledig beschikbare periode van dat meetstation. De dataset is afkomstig van een aparte KNMI website (2012) gewijd aan potentiële windsnelheden. De gegevens die zijn gebruikt voor de analyse is de windsnelheid gemeten per uur.

Tabel 2.1: Meetstations geselecteerd voor de analyse

Locatie	Begindatum reeks	ID	K/I/B*
Schiphol	01-03-1950	240	I
IJmuiden	01-04-1952	225	K
Soesterberg	01-03-1958	265	B
Vlissingen	01-01-1959	310	K
Eindhoven	01-01-1960	370	B
Gilze Rijen	01-01-1961	350	B
De Bilt	01-01-1961	260	B
Deelen	01-01-1961	275	B
Eelde	01-01-1961	280	I
Leeuwarden	01-04-1961	270	I
Maastricht	01-08-1961	380	B
Rotterdam	01-10-1961	344	I
Hoek van Holland	01-01-1962	330	K

** K = Kust, I = Intermediair, B = Binnenland*

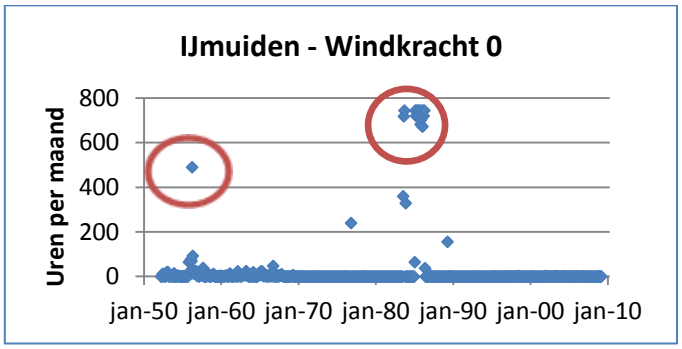


Figuur 2.1: Locatie meetstations. Weergegeven op een kaart met jaarlijkse gemiddelde windsnelheden (KNMI, 2002).

2.2 Datareductie

Om een analyse uit te voeren over de 5.707.920 beschikbare metingen zijn de data gereduceerd met behulp van het programma Matlab. De frequentieverdeling vormt de belangrijkste data. Hiervoor zijn alle windsnelheden ingedeeld in categorieën aan de hand van de schaal van Beaufort. Vervolgens zijn de data gereduceerd door alle waarden per maand bij elkaar op te tellen. Hierdoor is er een tabel verkregen waar precies te zien is hoeveel uur een bepaalde windkracht is waargenomen per meetstation en per maand. Er is ook een dataset gemaakt met een tijdsinterval van jaren.

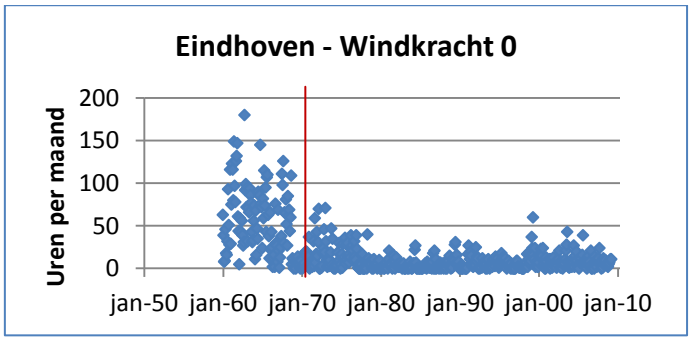
Een opmerking dient gemaakt te worden wat betreft de Beaufort schaal: de indeling in klassen, oftewel de windkracht, geschied daar op basis van gemeten waarden over een gemiddelde van 10 minuten. Deze gegevens worden echter niet verstrekt door het KNMI. In dit onderzoek is daarom gebruik gemaakt van de windsnelheid per uur.



Figuur 2.2: Voorbeeld voor extreme waarden in dataset bij windkracht 0.

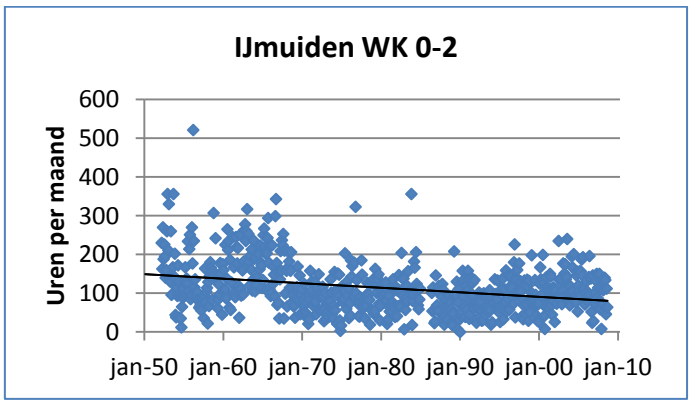
2.3 Kwaliteitscontrole

Ondanks dat een gecorrigeerde dataset is gebruikt, valt op dat er extreme waarden in de dataset zitten. Dit is zichtbaar in de frequentieverdeling van het aantal uren per windkracht per maand, met name bij windkracht 0. Een spreidingsdiagram van de desbetreffende windkracht bevestigt dat beeld (figuur 2.2). Er zijn waarden te zien die duidelijk boven de normale reikwijdte van meetgegevens zitten. Een voorbeeld is het meetstation IJmuiden, maar andere meetstations toonden hetzelfde beeld.



Figuur 2.3: Afwijking registratie windkracht 0 in de tijd.

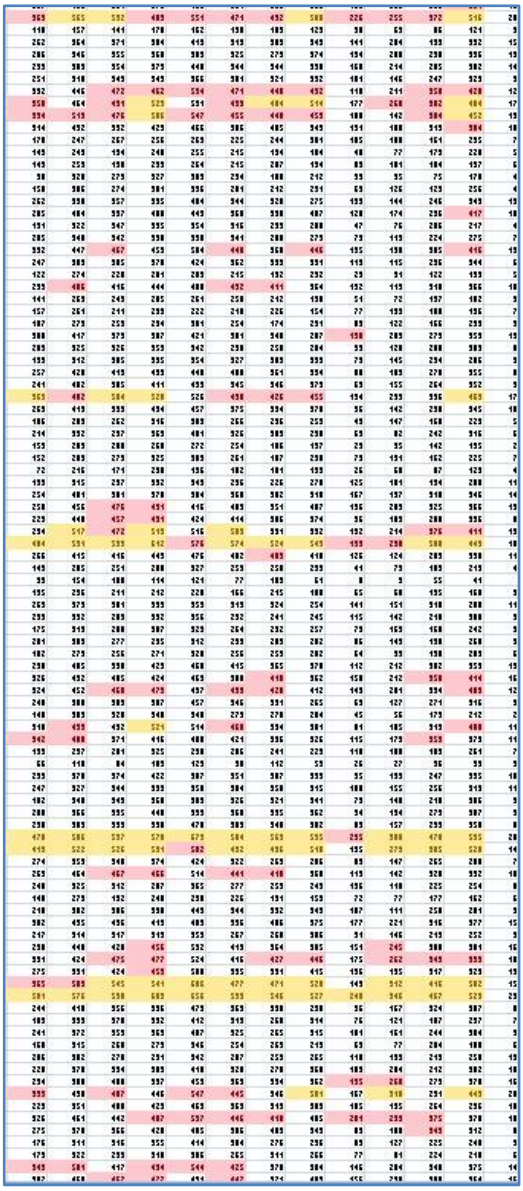
Ook zijn bij meetstations veel windstille periodes gemeten in de jaren voor 1970. Dit fenomeen uitte zich bij vrijwel alle meetstations waarvan een spreidingsdiagram voor Eindhoven wordt weergegeven in figuur 2.3. Dit patroon is echter ook goed waar te nemen bij de meetstations Gilze Rijen, De Bilt, Deelen en Rotterdam.



Figuur 2.4: Verbeterde kwaliteit door samenvoegen windkrachten en verwijderen van extremen.

De frequentieverdeling voor windkracht 0 levert een vertekent beeld op. Een mogelijke verklaring is dat de weerstand in de windmeter destijds dusdanig hoog was, dat bij zeer lage windsnelheden de meter niks meer registreerde. Het combineren van de windkrachten 0 t/m 2 leverde een betere verdeling op (figuur 2.4). Hierbij verdwenen vrijwel alle extremen waarden en was er geen scheiding meer te zien tussen gegevens rond 1970.

Ter controle is er gekeken naar de hoogste 3% van de gemeten waarden in de categorie windkracht 0 t/m 2 (figuur 2.5). De 3% is gekozen aangezien daar de meest extreme waarden mee worden geïdentificeerd. Als deze 3% waarden samen vallen met de bovenste 10% van andere stations is het aannemelijk dat er in die maand een lage windsnelheid heerste. Immers, meerdere stations bevestigen dat beeld en dat maakt de kans gering dat het een meetfout betreft.



Figuur 2.5. De gele waarden representeren de hoogste 3% waarde. De rode waarden de hoogste 10%.

Bij deze methode kwam naar voren dat de reeks van IJmuiden enkele fouten bevatte. In de periode februari 1985 t/m juni 1986 is er volgens de data een maandenlange periode geweest met alleen windkracht 0. Dit is een duidelijke meetfout en deze reeks is uit de data verwijderd. Hetzelfde gold voor augustus t/m oktober 1983 (figuur 2.4)

Met deze criteria werden verder nog 9 verdachte waarden aangemerkt: wel behorend tot de hoogste 3% van één station, maar niet overeenkomend met de hoogste 10% van de waarden van andere stations. Deze verdachte waarden zijn echter sterk verspreid over zowel tijd als meetstations. Hierdoor is het niet uit te sluiten dat deze waarden een lokale extreme gebeurtenis representeren. Wordt echter het criterium verhoogt van 10% naar 15%, dan blijken slechts 5 waarden als verdacht te kunnen worden aangemerkt, wat het beeld versterkt dat deze waarden geen meetfouten betreffen.

Enkele resultaten die buiten het bereik van het onderzoek vallen is dat augustus en september van zowel 2002 als 2003 landelijk gezien uitzonderlijk veel uren kenden waarin een zwakke tot stille wind heerste. Dit is goed te zien in de 2 horizontale banden in figuur 2.4. Het samen nemen van verschillende windkrachten is in de rest van het onderzoek voortgezet (tabel 2.2).

2.4 Intensiteit

Tabel 2.2: Indeling categorieën

Categorie	Windkracht
Zwak	0-2
Matig	3-4
Krachtig	5-6
Hard	7-8
Storm	≥ 9

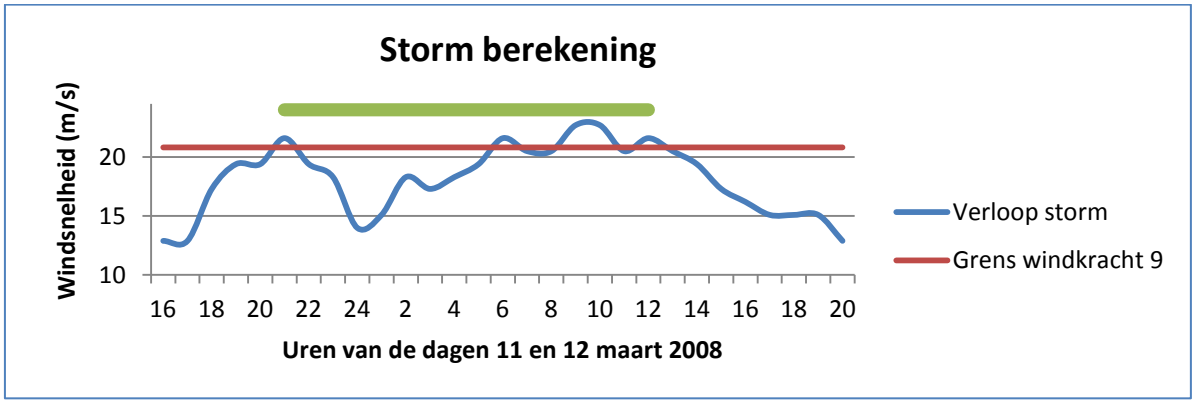
In dit onderzoek is de intensiteit van de wind in verschillende categorieën van windkrachten onderzocht. De data die hiervoor gebruikt is zijn de frequentiegegevens uitgedrukt per maand. Voor het overzicht en voor de kwaliteit zijn de windkrachten opgedeeld in 5 categorieën (tabel 2.2). Voor elke categorie is per meetstation geanalyseerd hoe de intensiteit is veranderd over de gehele meetperiode.

De analyse van alle uitvoer van Matlab is met behulp van Excel uitgevoerd. Hiermee zijn de data van verschillende stations vergeleken, samengevoegd, spreidingsdiagrammen gemaakt en trendanalyses uitgevoerd. Het samenvoegen van de data gebeurde aan de hand van een indeling in kust en binnenlandse meetstations. De trendanalyse is uitgevoerd met behulp van een enkelvoudige lineaire regressie analyse volgens de kleinste kwadratenmethode. De significantie van de gevonden trend is bepaald met behulp van ANOVA (Mac Berthouex en Brown, 2002). Aangezien een voorwaarde van de ANOVA analyse is dat waarden onafhankelijk van elkaar dienen te zijn, dus geen seriële correlatie mogen vertonen, wordt in deze analyse de maandgegevens gebruikt. Er wordt uitgegaan dat op deze manier de waarden als onafhankelijk van elkaar beschouwd kunnen worden. De afhankelijke variabele in deze analyse zijn de gemeten waarden, de onafhankelijke variabele is de tijd. De P(F) waarde die voortkomt uit de ANOVA geeft de kans aan in hoeverre de gegevens berusten op toeval. Er wordt hier uitgegaan van een drempelwaarde van 5%. Er kan dan worden aangenomen dat de gevonden trends niet op toeval berusten en significant zijn.

2.5 Stormen

Voor de analyse van de frequentie van stormen is een apart programma in Matlab geschreven. Dit programma analyseert alle windsnelheden van windkracht 9 en hoger, oftewel alle windsnelheden boven de 20,8 m/s. Aangezien tijdens een storm de gemiddelde windsnelheid enkele uren onder de windkracht 9 uit kan komen wordt voor de classificatie van 1 storm gekeken naar een bepaalde tijdsperiode (figuur 2.6).

Het criterium dat daarvoor is gebruikt, is gebaseerd op het onderzoek van Smits et al. (2005) waarin een tijdsperiode van 97 uur rond een piek in de windsnelheid wordt genomen. Deze auteurs verklaren dat de waarde van 48 uur tussen extreme wind ‘events’ vaak gebruikt wordt om de onafhankelijkheid van de extreme gebeurtenissen te garanderen.



Figuur 2.6: Visuele weergave berekening storm. De groene balk geeft de lengte van de storm aan volgens de gebruikte methode. Deze waarden zijn gemeten in Vlissingen.

Om dit principe te testen is het programma enkele keren gedraaid met een andere tijdsperiode voor de 5 stations met de meeste stormen. In tabel 2.3 staan het aantal stormen dat wordt geregistreerd met verschillende tijdsperioden. Deze bevestigen inderdaad de conclusie van Smits et al. (2005). Bij een tijdsperiode van 49 uur zijn er een aantal stormen die bij een grotere tijdsperiode als 1 storm geclassificeerd worden. Wordt de tijdsperiode vergroot met een identieke tijdstap, waardoor er geen 48 uur tussen de stormen moet zitten maar 72 uur, dan is het verschil tussen het aantal dat als 1 storm geclassificeerd wordt veel kleiner. Bij een tijdsperiode van 49 uur zouden er dus teveel stormen geteld worden. Bij de binnenland stations maakt de tijdsperiode niets uit. Het aantal stormen blijft gelijk.

Tabel 2.3: Verschil in tijdsperiodes

Meetstation	49 uur	*verschil*	97 uur	*verschil*	145 uur
Schiphol	**33**	*1*	32	*0*	32
IJmuiden	**210**	*16*	194	*5*	189
Vlissingen	**100**	*7*	93	*1*	92
Leeuwarden	**12**	*0*	12	*0*	12
Hoek van Holland	**93**	*7*	86	*0*	86
Totaal	**448**	*31*	417	*6*	411

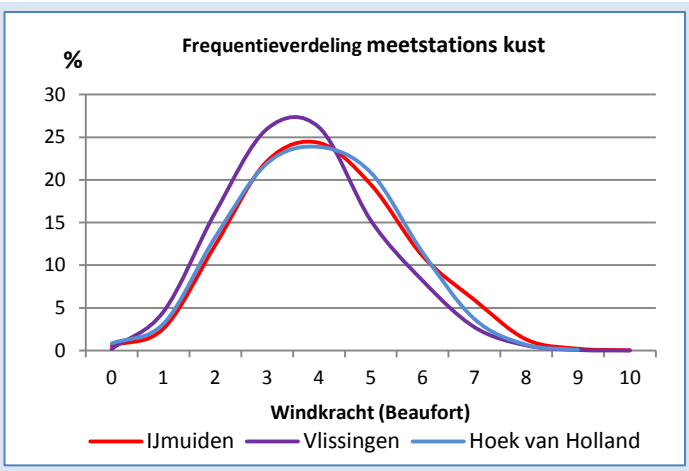
De uitvoer van het programma is voor iedere storm de begin en starttijd, de duur, het maximum, en het totaal aantal stormen. Voor het maximum is de hoogst gemeten gemiddelde uurwaarde genomen. Het maximum en de duur worden ook geanalyseerd met behulp van een enkelvoudige lineaire regressie analyse en getoetst op hun significantie.

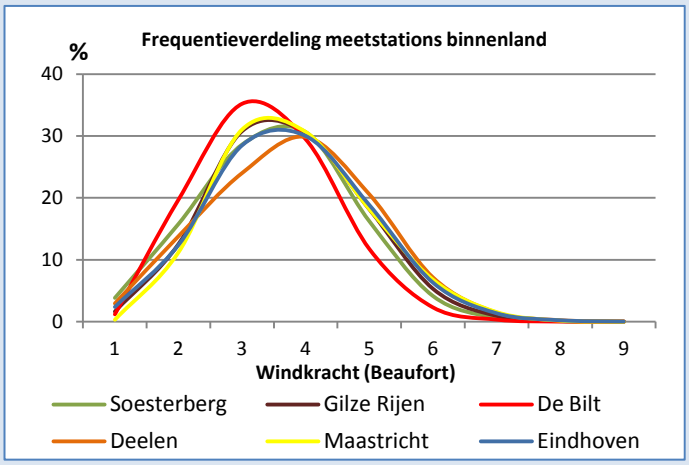
2.6 Kust en binnenland

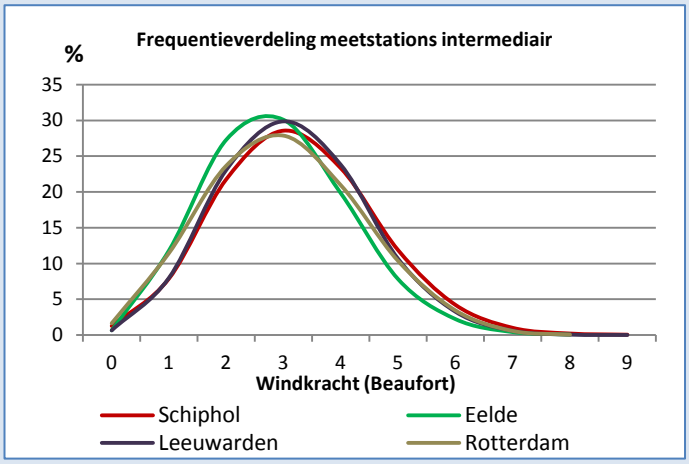
Nederland kan qua windklimaat niet gezien worden als een homogeen gebied (Wieringa en Rijkoort, 1983). In dit onderzoek is een onderscheid gemaakt tussen binnenland, kust en intermediaire stations. Deze indeling is tot stand gekomen na bestudering van de eerste resultaten waaruit bleek dat 3 categorieën het windklimaat beter representeert dan 2 categorieën. Dit is ook terug te zien in de frequentieverdeling (figuur 2.7), de gemiddelde windsnelheid (tabel 2.4) en de jaarlijkse gemiddelde windsnelheden (figuur 2.1).

Bij de kuststations liggen de pieken bij de windkrachten 3 en 4. De binnenlandstations Soesterberg, Gilze Rijen, De Bilt, Deelen, Maastricht en Eindhoven vertonen duidelijke pieken bij de lagere windkrachten, namelijk bij windkracht 2 en 3. Bij hogere windkrachten loopt het verschil tussen binnenland- en de kuststations verder op.

Zowel geografisch als aan de hand van de windsnelheden is hieruit een verdeling op te maken tussen kuststations en binnenlandstations. Enkele stations horen echter in een schemergebied waarbij de grens tussen kust- en binnenlandstation niet simpel te verdelen is. Hierbij is gekeken naar de eerste resultaten waarbij 2 categorieën waren gehanteerd. De patronen van verandering in het windklimaat over tijd van Schiphol en Leeuwarden, in eerste instantie ingedeeld onder de kuststations, bleken echter niet bij die categorie te passen. Om die reden is een nieuwe categorie gecreëerd: Intermediair. Aan de hand van de geografische ligging, gemiddelde windsnelheden en jaarlijkse gemiddelde windsnelheid (fig. 2.1) is besloten ook Eelde en Leeuwarden in deze categorie op te nemen.





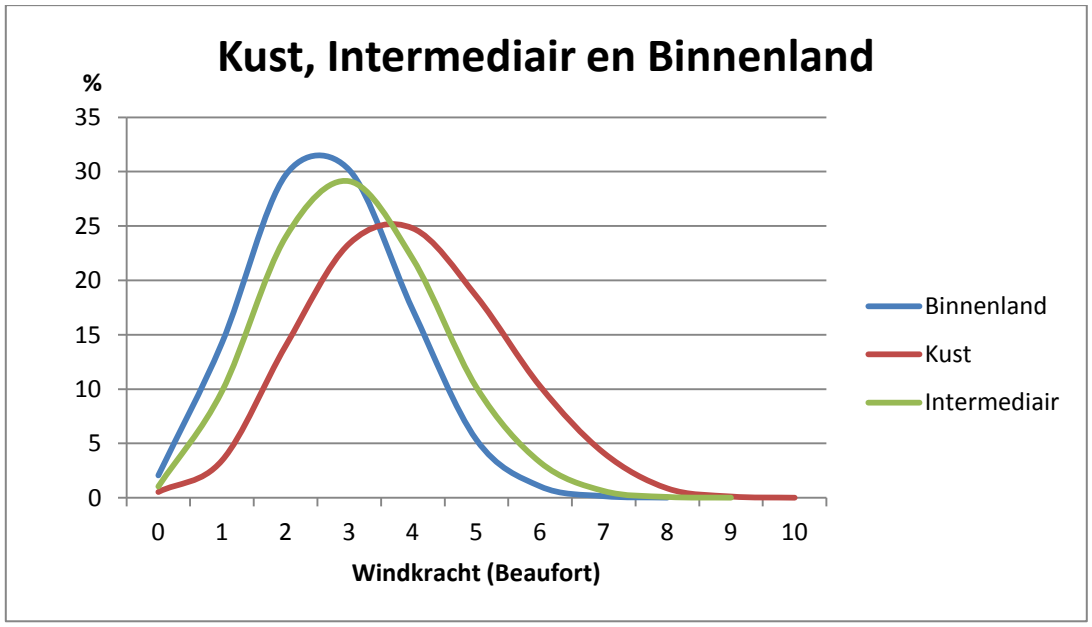


Figuur 2.7: Frequentieverdeling per meetstation. De berekening is uitgevoerd over de hele lengte van de individuele meetreeksen.

Wanneer de gegevens voor kust, binnenland en intermediaire meetstations worden samengevoegd is het verschil in de frequentieverdelingen duidelijk te zien (figuur 2.8). De gemiddelde windsnelheid van de binnenlandstations is 3,97 m/s. Van de intermediaire stations is dit 4,84 m/s, en de gemiddelde windsnelheid van de kuststations is 6,8 m/s. De windsnelheid van de kuststations ligt 71% hoger dan bij de binnenlandstations.

Tabel 2.4: Gemiddelde windsnelheid per meetstation

Locatie	(m/s)	
De Bilt	3,45	Binnenland
Soesterberg	3,73	
Gilze Rijen	4,02	
Eindhoven	4,14	
Deelen	4,24	
Maastricht	4,26	
Eelde	4,45	Inter-mediair
Rotterdam	4,74	
Leeuwarden	4,98	
Schiphol	5,17	
Vlissingen	6,30	Kust
Hoek van Holland	6,98	
IJmuiden	7,13	



Figuur 2.8: Frequentieverdeling. Gemiddelde waarden van alle kust, intermediaire en binnenlandstations.

3. Resultaten

3.1 De intensiteit van de wind

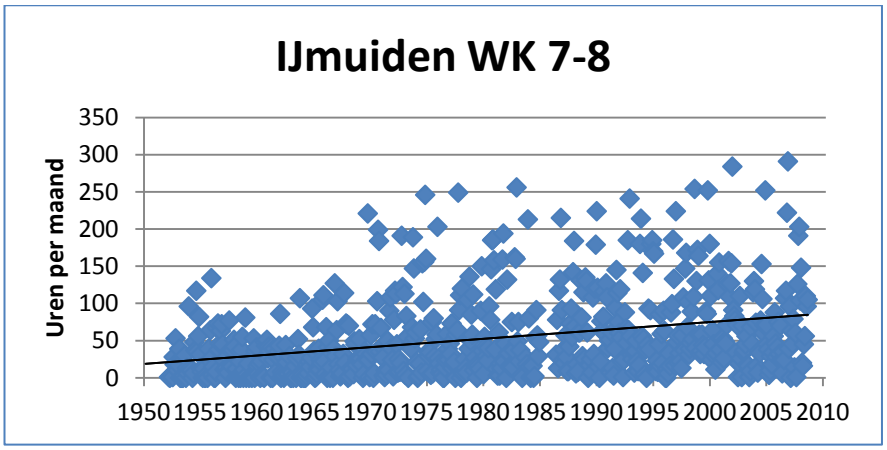
De meetstations laten verschillende trends zien. In figuur 3.2 is de trend, uitgevoerd met een lineaire regressie analyse, per kuststation weergegeven. De verschillende beginpunten van de lijnen worden veroorzaakt door het verschil in lengte van de meetreeksen. In de categorie voor windkracht 0 t/m 2 is alleen de trend voor Vlissingen (P(F) = 63% bij een 5% betrouwbaarheidsinterval) niet significant. De overige kuststations IJmuiden en Hoek van Holland laten in deze categorie een significant dalende trend zien.

De richtingscoëfficiënt van de lineaire regressie wordt weergegeven in tabel 3.2. Deze laat de verandering per jaar in uren zien voor het betreffende station en categorie. In IJmuiden kwam per jaar windkracht 0-2 gemiddeld 14 uur minder voor in de geanalyseerde periode.

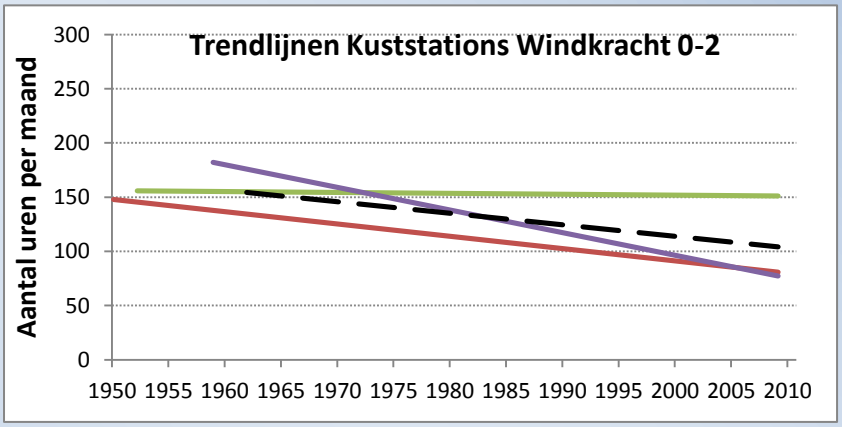
De categorie voor windkracht 3-4 laat significant dalende trends zien voor alle kuststations. Het totaal voor de gehele kuststreek toont aan dat windkracht 3-4 in 2008 13% minder vaak voor komt ten opzichte van 1962 (tabel 3.3).

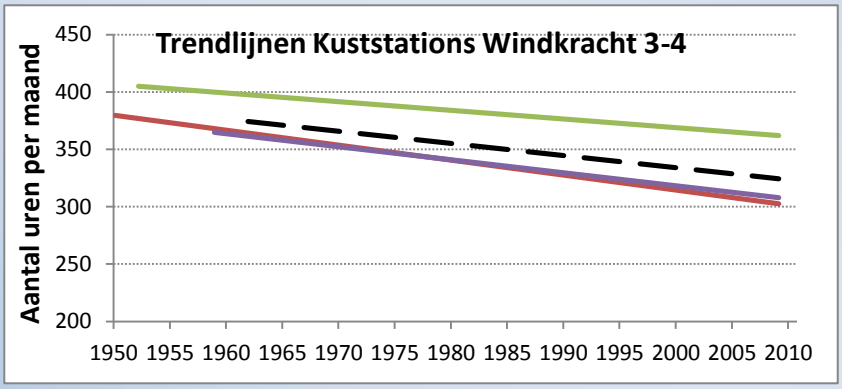
In tegenstelling tot een sterk dalende trend van de windkrachten 3-4, is juist een sterke toename geregistreerd in de categorieën voor de krachtige en harde wind (windkracht 5-6 en 7-8). De toename van windkracht 7-8 in de periode van 1962-2008 is voor IJmuiden 147%; de sterkste procentuele verandering van alle meetstations en alle categorieën. Een vergelijking van de verhoudingen tussen IJmuiden en de andere 2 kuststations levert geen verklaring op voor deze sterke toename, evenals het spreidingsdiagram weergegeven in figuur 3.1. Spreidingsdiagrammen voor alle ander meetstations zijn weergegeven in bijlage 2.

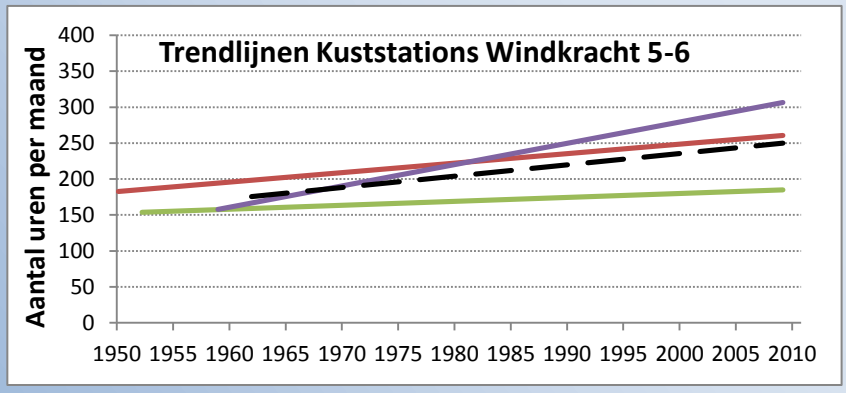
Voor de totale kuststrook zijn alle trends significant. Met name bij de hogere windsnelheden (windkracht 5 t/m 8) is voor de totale kustzone een sterke toenemende trend zichtbaar.

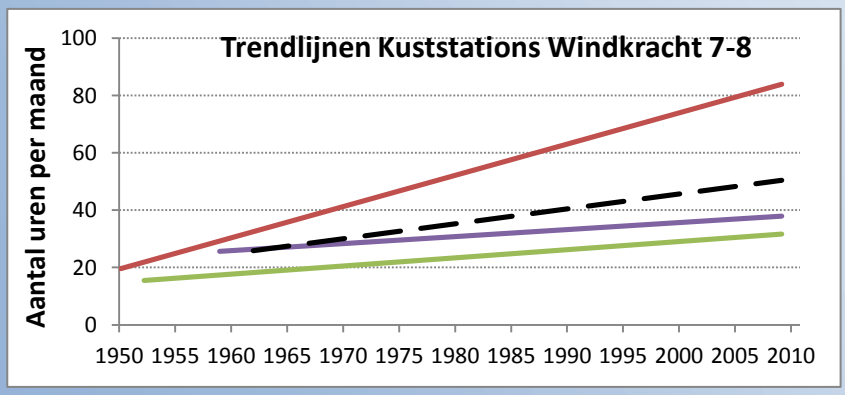


Figuur 3.1: Spreidingsdiagram van IJmuiden voor windkracht 7-8. Hierin is de frequentie in uren per maand weergegeven.









*Tabel 3.1: P(F) waarden ANOVA analyse**

	WK 0-2	WK 3-4	WK 5-6	WK 7-8
Vlissingen	63%	0%	1%	0%
Hoek van H	0%	0%	0%	5%
IJmuiden	0%	0%	0%	0%
Totaal Kust	0%	0%	0%	0%

*Tabel 3.2: Richtingscoëfficiënt ((uur/jaar)/jaar)**

	WK 0-2	WK 3-4	WK 5-6	WK 7-8
Vlissingen	-1	-9	7	3
Hoek van H	-25	-14	36	3
IJmuiden	-14	-16	16	13
Totaal Kust	-13	-13	20	7

*Tabel 3.3: Verandering in procenten over periode 1962-2008**

	WK 0-2	WK 3-4	WK 5-6	WK 7-8
Vlissingen	-2%	-9%	16%	74%
Hoek van H	-56%	-15%	84%	44%
IJmuiden	-40%	-17%	31%	147%
Totaal Kust	-33%	-13%	44%	101%

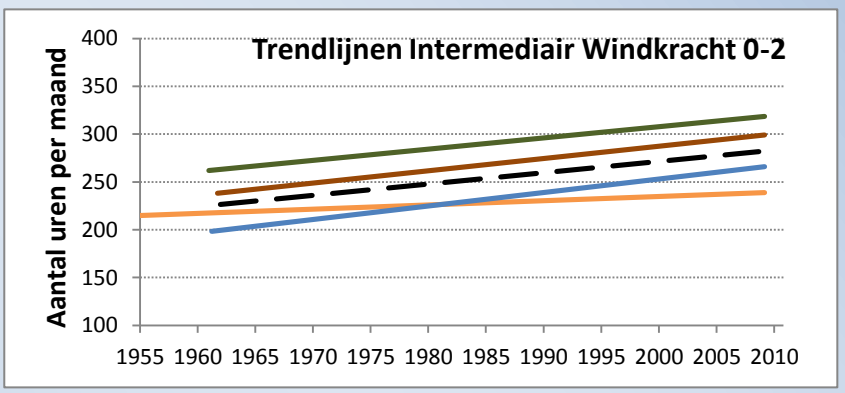
** De niet significante waarden zijn in het rood weergegeven, de significante waarden in het zwart.*

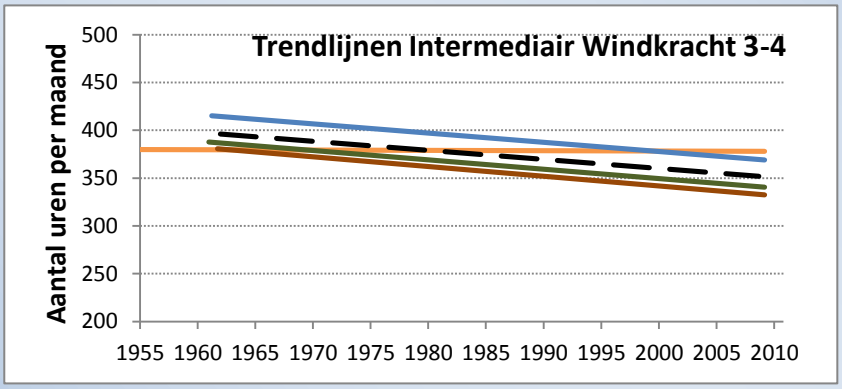
Figuur 3.2: Trendlijnen van alle kuststations per windkracht categorie, inclusief trendlijn voor het totaal.

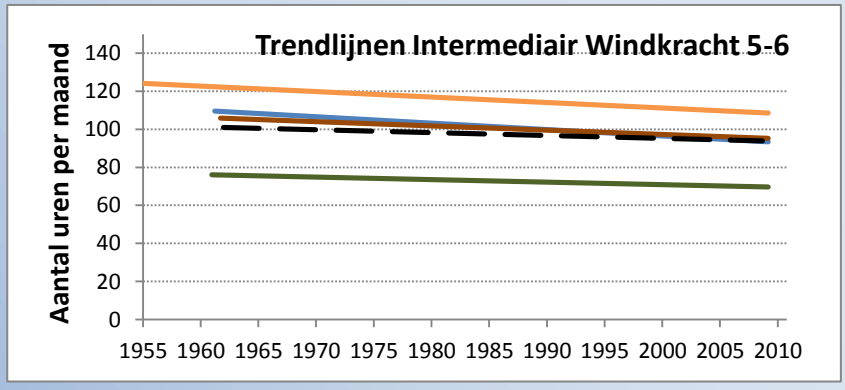
In tegenstelling tot de kust heeft de intermediaire zone te maken gehad met een stijging in het aantal uren dat windkracht 0-2 geregistreerd is (figuur 3.3). Voor de totale intermediaire zone betreft dit 24%, berekend over de periode 1962-2008 (tabel 3.6). Voor elk individueel station is deze stijging significant (tabel 3.4). De richtingscoëfficiënten van de verandering is bij Rotterdam, Leeuwarden en Eelde liggen dicht bij elkaar, variërend van 14 t/m 17 uur per jaar. De stijging van Schiphol is minder groot, te zien aan het richtingscoëfficiënt en de procentuele verandering.

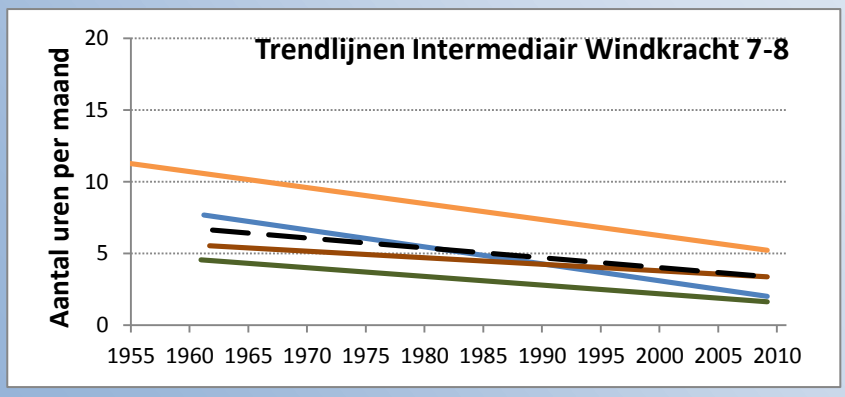
De frequentie van windkracht 3-4 is in de intermediaire zone in de geanalyseerde periode afgenomen met 11%. Ook deze verandering is het sterkst bij de meetstations Rotterdam, Leeuwarden en Eelde. De trend voor Schiphol is in de categorie 3-4 niet significant.

De rode waarden in de tabel 3.4 t/m 3.6 laten zien dat voor windkracht 5-6 er geen verandering is vast te stellen. De trendlijnen voor alle intermediaire stations zijn niet significant. Bij windkracht 7-8 is alleen de trend voor Rotterdam niet significant. Voor de intermediaire zone als totaal is de grootste procentuele verandering gemeten bij windkracht 7-8 (49%), waarbij Leeuwarden de grootste daling laat zien.









*Tabel 3.4: P(F) waarden ANOVA analyse**

	WK 0-2	WK 3-4	WK 5-6	WK 7-8
Rotterdam	0%	0%	32%	14%
Schiphol	1%	77%	6%	0%
Leeuwarden	0%	0%	10%	0%
Eelde	0%	0%	47%	1%
Interm. Tot.	0%	0%	46%	3%

*Tabel 3.5: Richtingscoëfficiënt ((uur/jaar)/jaar)**

	WK 0-2	WK 3-4	WK 5-6	WK 7-8
Rotterdam	15	-12	-3	-1
Schiphol	5	0	-3	-1
Leeuwarden	17	-12	-4	-1
Eelde	14	-12	-2	-1
Interm. Tot.	14	-11	-2	-1

*Tabel 3.6: Verandering in procenten over periode 1962-2008**

	WK 0-2	WK 3-4	WK 5-6	WK 7-8
Rotterdam	25%	-13%	-10%	-39%
Schiphol	9%	0%	-11%	-50%
Leeuwarden	33%	-11%	-14%	-73%
Eelde	21%	-12%	-8%	-63%
Interm. Tot.	24%	-11%	-7%	-49%

** De niet significante waarden zijn in het rood weergegeven, de significante waarden in het zwart.*

Figuur 3.3: Trendlijnen van alle intermediaire stations per windkracht categorie, inclusief trendlijn voor het totaal.

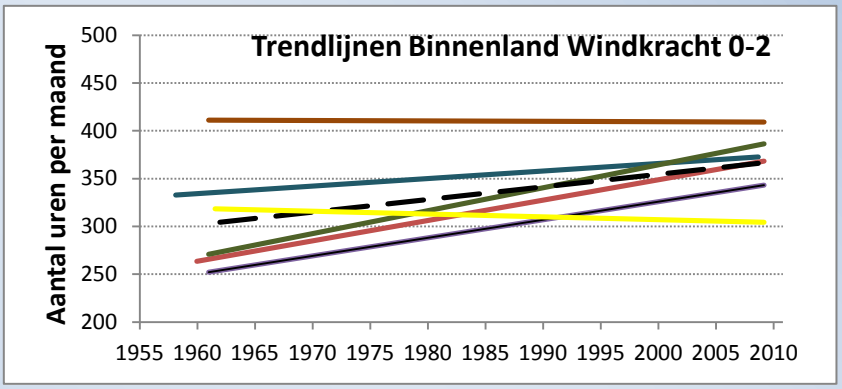
De windkrachtcategorie 0-2 vertoont voor het binnenland als geheel een stijging in het aantal geregistreerde uren over de gemeten periode (figuur 3.4). De totale stijging is 20% (tabel 3.6) en de meeste meetstations laten dit zien, op De Bilt en Maastricht waar geen significante verandering is gemeten (tabel 3.7).

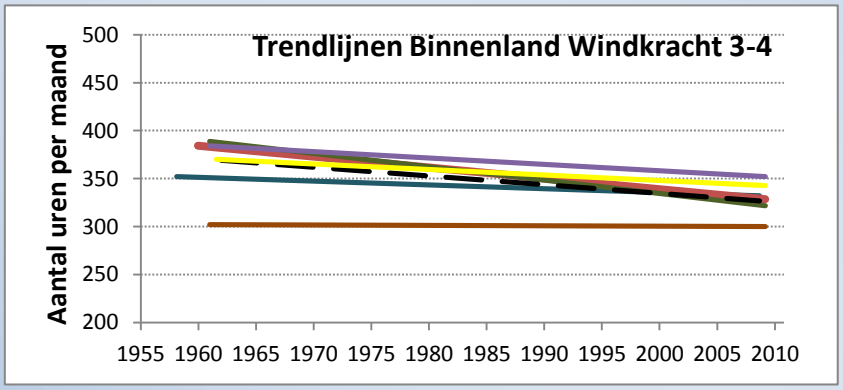
Voor de windkrachtcategorie 3-4 zijn voornamelijk dalende trends waar te nemen. Bij de Bilt en Soesterberg zijn de trends niet significant. De totale verandering is met 11% het minst sterk van alle windkrachtcategorieën voor het binnenland.

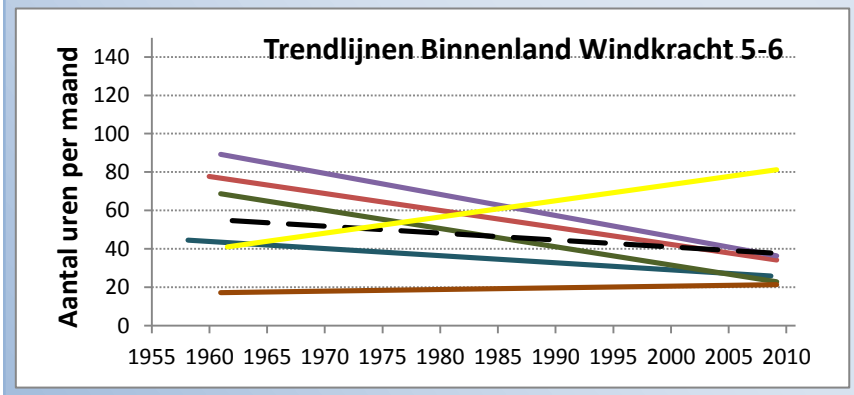
Bij de categorie van windkracht 5-6 is de trend gemeten bij De Bilt wederom niet significant. De afwijkende waarden van Maastricht in de windkrachtcategorie 0-2 zet zich voort in de windkrachtcategorie 5-6. In tegenstelling tot alle andere binnenlandse stations neemt het aantal uren in de geanalyseerde periode toe. Het aantal uren met windkracht 5-6 is in Maastricht bijna verdubbeld in 2008 ten opzichte van 1962 (tabel 3.6). Dit staat in contrast met de gemiddelde daling voor het binnenland van 31%.

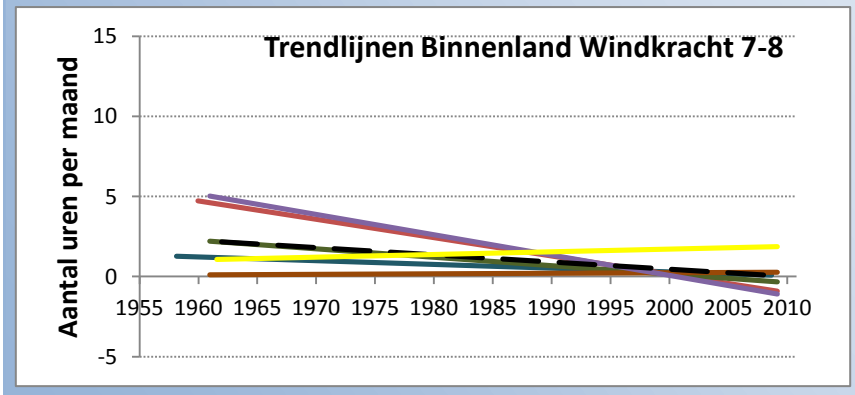
Het beeld van windkrachtcategorie 7-8 vertoont overeenkomsten met windkrachtcategorie 5-6. Voor de Bilt is geen significante trend gevonden. Ook wijkt Maastricht weer af vanwege een niet significante verandering. De hoge percentages in tabel 3.6 voor deze categorie wordt verklaard door het geringe aantal uren dat windkracht 7-8 in het binnenland voorkomt. Elke verandering is daarom al snel hoog. Dit probleem uit zich ook in enkele trendlijnen die door het 0 punt gaan. Dit is onmogelijk, het kan immers nooit een negatief aantal uren waaien. De verandering in intensiteit voor windkracht 5-8 is bij de binnenlandstations gering. De licht dalende trend contrasteert met dezelfde trends bij de kuststations, waar een stijgende trend is waar te nemen.

De Bilt vormt in alle categorieën een afwijkend resultaat. Er zijn geen significante trends gevonden.









*Tabel 3.7: P(F) waarden ANOVA analyse**

	WK 0-2	WK 3-4	WK 5-6	WK 7-8
Soesterberg	0%	7%	0%	0%
Eindhoven	0%	0%	0%	0%
Gilze Rijen	0%	0 %	0%	0%
De Bilt	89%	86%	32%	20%
Deelen	0%	0%	0%	0%
Maastricht	32%	0%	0%	18%
Binnenland tot.	0%	0%	1%	0%

*Tabel 3.8: Richtingscoëfficiënt ((uur/jaar)/jaar)**

	WK 0-2	WK 3-4	WK 5-6	WK 7-8
Soesterberg	9	-5	-4	0
Eindhoven	26	-14	-11	-1
Gilze Rijen	29	-17	-11	-1
De Bilt	-1	-1	1	0
Deelen	23	-8	-13	-2
Maastricht	-4	-7	10	0
Binnenland tot.	16	-11	-4	-1

*Tabel 3.9: Verandering in procenten over periode 1962-2008**

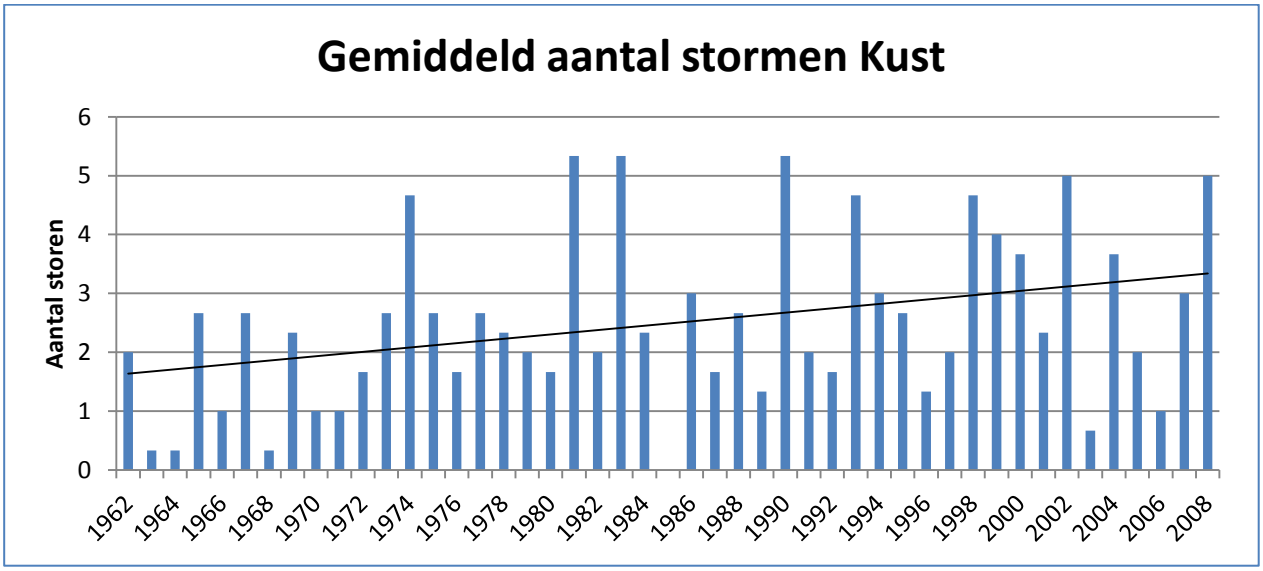
	WK 0-2	WK 3-4	WK 5-6	WK 7-8
Soesterberg	11%	-5%	-40%	-93%
Eindhoven	37%	-14%	-55%	-120%
Gilze Rijen	41%	-17%	-66%	-115%
De Bilt	0%	-1%	23%	140%
Deelen	35%	-8%	-58%	-122%
Maastricht	-4%	-7%	96%	74%
Binnenland tot.	20%	-11%	-31%	-97%

** De niet significante waarden zijn in het rood weergegeven, de significante waarden in het zwart.*

Figuur 3.4: Trendlijnen van alle binnenland stations per windkracht categorie, inclusief trendlijn voor het totaal.

3.2 Frequentie van stormen

Aan de kust zijn er in de periode 1962- 2008 gemiddeld 117 stormen gemeten. Voor de intermediaire zone zijn dat er 12 en voor het binnenland 3. De meeste stormen zijn gemeten in IJmuiden (tabel 3.10).



Figuur 3.5: Gemiddeld aantal stormen geregistreerd per jaar in de kustzone.

De lineaire trendanalyse over aantal stormen gemeten per jaar over de periode 1962- 2008 laat een significante (P(F) = 2%) verandering zien (figuur 3.4). Het aantal stormen aan de kust is toegenomen.

Bij het binnenland wordt een daling geregistreerd in het aantal stormen over de gemeten periode. Ondanks het geringe aantal gemeten stormen is deze significant. Voor de intermediaire zone is dat niet het geval. Daar is geen trend waar te nemen.

Wanneer gekeken wordt naar alle individuele stations (tabel 3.10) valt op dat er bij de helft van de stations geen significante verandering berekend is. Voor kuststations is de significantie beter dan bij de binnenlandstations. IJmuiden en Vlissingen laten een stijging in het aantal stormen zien. Bij Schiphol en Leeuwarden is een daling waar te nemen. De significante trends laten een beeld zien waarbij het aantal stormen toe- of afneemt met een factor van ongeveer 2.

Voor de analyse van stormen is er ook gekeken of er een verandering is in de duur en intensiteit van de storm. Hier is echter geen enkele verandering waar te nemen.

Tabel 3.10: Richtingscoëfficiënt, significantie en verandering per meetstation

Kust	Vlissingen	Hoek van	IJmuiden			
Richting*	1,8	0,9	2,6			
Significantie*	1%	23%	0%			
Verandering %*	169%	62%	108%			
Aantal*	91	86	174			
Intermediair	**Rotterdam**	**Schiphol**	**Leeuwarden**	**Eelde**		
Richting*	0,0	-0,8	-0,6	-0,1		
Significantie*	93%	1%	3%	52%		
Verandering %*	-9%	-91%	-109%	-58%		
Aantal*	8	19	12	8		
Binnenland	**Soesterberg**	**Eindhoven**	**Gilze Rijen**	**Deelen**	**Maastricht**	**De Bilt**
Richting*	-0,1	-0,4	-0,1	-0,4	-0,0	-
Significantie*	46%	2%	41%	1%	51%	-
Verandering %*	-93%	-135%	-117%	-120%	-106%	-
Aantal*	2	4	1	7	1	0

** Eenheid van richting is in uur over de periode 1962-2008. Eenheid van verandering % is de procentuele stijging van het aantal stormen in de periode 1962-2008. Het aantal is het totale aantal stormen geregistreerd in de periode 1962-2008. De Bilt is niet opgenomen in de tabel omdat hier geen stormen gemeten zijn.*

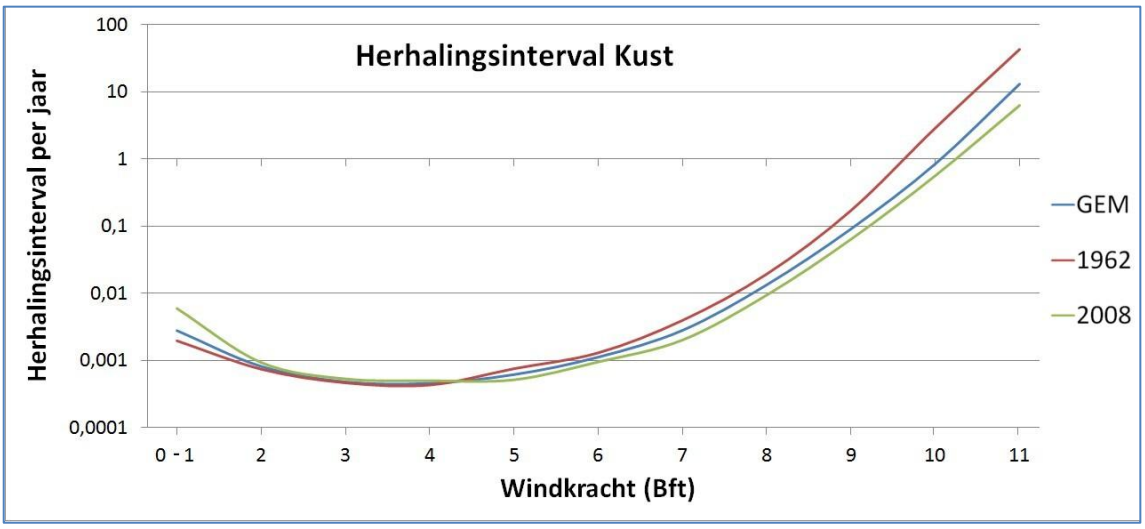
3.3 Herhalingstijden

In figuur 3.6 t/m 3.8 wordt precies weergegeven wat statistisch gezien de kans is dat een bepaalde windkracht in het jaar 1962 en in het jaar 2008 voorkomt. Dit is niet de werkelijk gemeten waarde, maar een benadering aan de hand van de lineaire regressie die per windkracht is uitgerekend. Hierbij is te zien dat voor het binnenland de kans in 2008 voor alle windkrachten van hoger dan 3 is afgenomen ten opzichte van 1962. In 2008 was de kans op windkracht 6 (eens in de 0.02 jaar = 50x per jaar) in het binnenland kleiner dan in 1962 (132x per jaar). Voor de windkrachten tot 3 is de kans op een van deze windkrachten toegenomen. De lagere windkrachten komen in 2008 vaker voor per jaar dan in 1962. Om precies te zijn geldt dit volgens de grafiek niet voor windkracht 0-1, al zijn de verschillen klein.

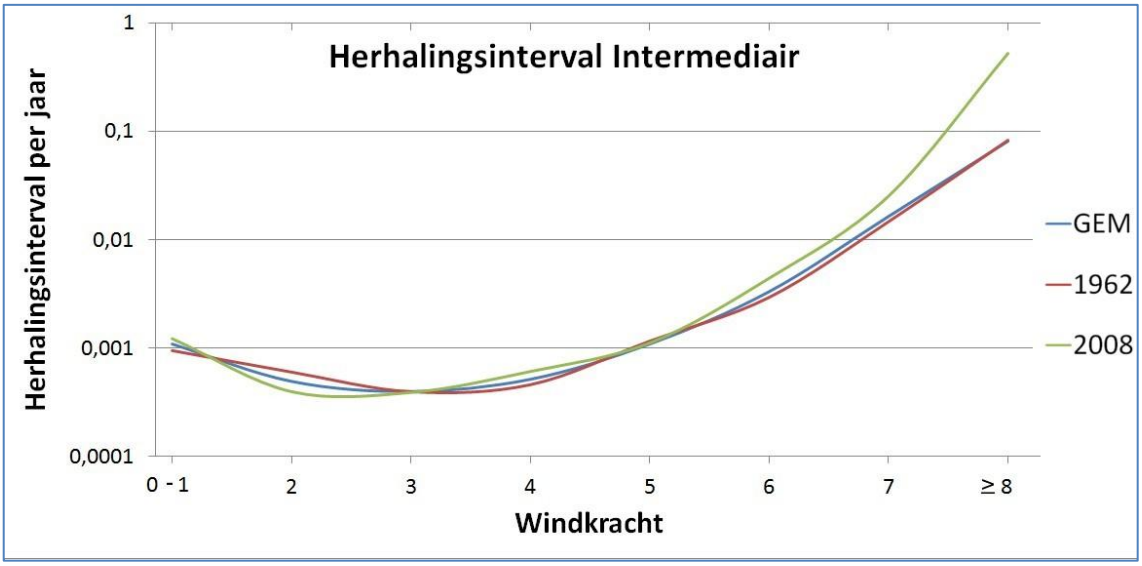
Bij de kust is een ander beeld te zien. Bij de hogere windkrachten is het beeld tegenovergesteld van het windbeeld van het binnenland. De hogere windsnelheden zullen per jaar vaker voorkomen. Windkracht 10 kwam statistisch gezien in 2008 (eens in de 0.56 jaar = 1.8 x per jaar) vaker voor dan in 1962 (eens in de 3 jaar). Bij de windkrachten 2 t/m 4 zit er weinig verschil in het herhalingsinterval tussen 1962 en 2008.

De herhalingsintervallen voor de intermediaire zone (figuur 3.7) laat veel overeenkomsten zien met het herhalingsinterval voor het binnenland. Ook hier is de kans windkrachten boven de 3 toegenomen ten opzichte van 1962. Bij windkracht 5 is dit niet het geval. Daarop is de kans vrijwel gelijk gebleven.

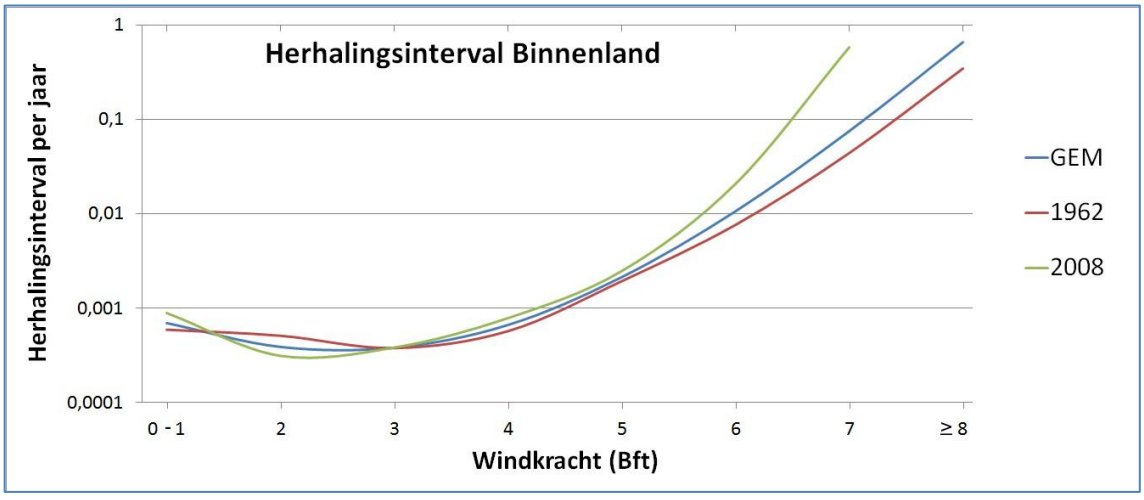
Een vergelijking tussen het herhalingsinterval van de kust en het binnenland laat zien dat de hogere windkrachten veel vaker voorkomen aan de kust dan in het binnenland. Gemiddeld komt windkracht 7 in het binnenland 13x per jaar voor, aan de kust is dit 354x per jaar.



Figuur 3.6: Herhalingsinterval per jaar. De y-as is weergegeven per jaar op een logaritmische schaal. 0,001 betekent 1x per 0,001 jaar, oftewel 10.000x per jaar.



Figuur 3.7: Herhalingsinterval per jaar. De y-as heeft een logaritmische schaal.



Figuur 3.8: Herhalingsinterval per jaar. De y-as heeft een logaritmische schaal.

4. Discussie

De resultaten laten een duidelijk patroon zien wat betreft veranderingen in het windklimaat in Nederland. De zwakke winden (windkracht 0-2) zijn in het binnenland toegenomen. Voor de kust is de situatie tegenovergesteld. De zwakke winden zijn afgenomen in frequentie en de krachtige en harde winden (windkracht 5-8) toegenomen. Bij de meetstations in het binnenland zijn er locaties die afwijkend gedrag vertonen. Dit levert geen problemen op voor de significantie. Een van de uitschieters is Maastricht, geografisch gezien duidelijk een binnenlandstation maar met een 96% toename in frequentie van windkracht 5-6. Deze afwijkende waarden van Maastricht ten opzichte van het gemiddelde patroon voor binnenlandstations viel ook Wieringa en Rijkoort (1983) op. Als verklaring kan worden gegeven dat er veel berg- en daleffecten meespelen die invloed hebben op de windsnelheid in die regio (Wieringa en Rijkoort, 1983). Zij laten om die reden ook Zuid-Limburg geheel buiten hun analyse. Ook noemen deze auteurs de locatie van het meetstation Deelen weinig representatief vanwege de open ligging van het vliegveld. Inderdaad valt de hoge gemiddelde windsnelheid op, maar qua trend is Deelen in dit onderzoek weinig afwijkend te noemen.

Meetstation de Bilt is afwijkend omdat er geen enkele significante trend is gevonden. Dit maakt de Bilt tot het meest stabiele station. Dat is opvallend aangezien de Bilt bekend staat als een station dat juist veel hinder ondervindt van menselijke activiteiten (Wever en Groen, 2009; Wieringa en Rijkoort , 1983). Wever en Groen (2009) verklaren hiervoor te hebben gecorrigeerd. Zij beweren dat doordat het meetpunt in de Bilt in 1993 werd verhoogd van 10 naar 20 meter voldoende is gecorrigeerd voor de ruwheid aan het oppervlak. Uit dit onderzoek blijkt dat de Bilt geen enkele significante trend vertoond. Echter Soesterberg, dat praktisch op steenworp afstand ligt, vertoond wel bij 3 van de 4 windkrachtcategorieën een significante trend. Dit werpt vragen op over de representativiteit van De Bilt als meetstation voor het binnenlandse windklimaat van Nederland.

Bij de kuststations is IJmuiden enigszins opvallend. Deze vertoont een zeer sterke stijging in bij windkracht 7-8. Om hier een verklaring voor te vinden is de verhouding bestudeerd tussen IJmuiden en de andere 2 kuststations. Een discontinuïteit daarin zou kunnen betekenen dat er iets met het meetstation is gebeurd. Er is echter geen discontinuïteit waar te nemen. De toename lijkt daadwerkelijk het resultaat te zijn van een toegenomen intensiteit in windkracht 7-8.

Bij de intermediaire stations vertonen de procentuele verandering voor alle windkrachtcategorieën zeer veel overeenkomsten. Dit vormt een bevestiging voor het creëren van deze categorie. De analyse waarbij maar 2 categorieën waren gevormd, kust en binnenland, vertoonden minder significante trends.

De analyse voor stormen leverde weinig significante resultaten en daarom kan alleen met grote voorzichtigheid hier uitspraken over worden gedaan. Er is wel een significante toename gemeten van het aantal stormen aan de kust, en een significante afname in het binnenland. Echter in het binnenland zijn er zeer weinig stormen gemeten. De resultaten komen wel overeen met de trends gemeten voor windkracht 7-8. Achteraf gezien was het beter geweest om andere criteria te gebruiken voor deze analyse. Smits et al. (2005) hebben het daarom ook over 'stormyness' waarbij pieken in de windreeksen worden geanalyseerd. Het KNMI (2008) analyseert 'sterke wind', waarbij >7 Bft als ondergrens geldt voor de kustzone en >6 Bft voor het binnenland. Echter dit onderzoek richtte zich op stormen (≥ 9 Bft), deze komen in Nederland te weinig voor om een grondige analyse op uit te voeren. Dit is een nadeel van de gekozen criteria, niet de methodiek. Ook voor de criteria voor de indeling van kust- en binnenlandstations geldt dit principe. De methode is zo ontworpen dat deze criteria eenvoudig aangepast kunnen worden voor toekomstig vervolgonderzoek.

Een beperking van dit onderzoek is de korte datareeks. Deze is amper 50 jaar en eigenlijk te kort om veranderingen in het klimaat, vaak gedefinieerd als een periode van 30 jaar, te kunnen analyseren. Langere datareeksen van wind aan het oppervlak zijn echter niet beschikbaar.

Dit onderzoek roept vragen op waarom de veranderingen in het windklimaat een grote ruimtelijke variabiliteit vertonen. Het kust en binnenland staan bloot aan vrijwel dezelfde geostrofische forcering. De verklaring moet dan ook gezocht worden aan invloeden in Nederland zelf. De hoofdredenen voor de correcties uitgevoerd op de dataset spelen daarbij de grootste rol, veelvuldig aangehaald in de literatuur: vegetatie en bebouwing (Wever en Groen, 2005; Wieringa en Rijkoort, 1983).

Het oppervlakte in Nederland dat is bedekt met bos is in de afgelopen eeuw inderdaad toegenomen van 4% in begin 20ste eeuw tot 10% in 1993 (Buis, 1993). Daarnaast is de bevolking (en urbanisatie) toegenomen van 9,6 miljoen in 1947 tot 16,4 miljoen in 2010 (de Klerk, 2010). Dit leidt tot een toename van de ruwheid aan het oppervlak. Het gevolg is dat de windsnelheid aan het oppervlak afneemt. Dit vormt de meest waarschijnlijke verklaring van de resultaten in dit onderzoek. Bij analyses van de geostrofische wind werd juist vaker een toename in de hogere windkrachtcategorieën gevonden (Pryor en Barthelmie, 2010; Pryor et al., 2012; Smits et al., 2005). Dit komt overeen met de toename gemeten bij de kuststations die door hun ligging veel minder invloed ondervinden van de ruwheid aan het oppervlak. Mogelijk neemt de geostrofische wind toe, terwijl de ruwheid aan het oppervlak de intensiteit van de wind in het binnenland doet afnemen.

5. Conclusie

Dit onderzoek was vormgegeven rond de vraag hoe het windklimaat in Nederland de afgelopen decennia is veranderd. Zodoende werd beoogd bij te dragen aan inzicht op het gebied van het windklimaat aan het oppervlak. Wat dit onderzoek heeft uitgewezen is precies waar de veranderingen in het windklimaat zitten, zowel in locatie als bij welke windsnelheden de verandering optreedt. Er is een duidelijk verschil te zien tussen het windklimaat van de kust en van het binnenland. Bij de kust is er een daling te zien in de lagere windkrachten (windkracht 0-4). Windkracht 5 en hoger zullen juist vaker aan de kust voorkomen. Dit patroon is zowel zichtbaar bij de gemeten trendlijnen als bij de herhalingsintervallen. Dit is logisch aangezien deze van dezelfde gegevens uitgaan, alleen de methodiek verschilt.

Bij binnenlandstations is dit tegenovergesteld. Hier is gemiddeld gezien een stijgende trend gemeten voor windkracht 0-2, en een afname bij alle hogere windkrachten. De intermediaire stations passen qua trends meer bij de binnenlandstations dan bij de kuststations. Ook hier is een afname gemeten in de windkracht 0-2, en een toename bij de windkrachten 5-8.

Er zijn een aantal meetstations in het binnenland die een afwijkende trend vertonen, maar ondanks de afwijkingen is de hoofdvraag van het onderzoek goed te beantwoorden. Er is significant aangetoond dat aan de kust de matige winden zullen afnemen in frequentie, terwijl de krachtige en harde winden zullen toenemen. Hierbij zijn alle trends voor de totale regio's significant.

Over een verandering in het aantal stormen in Nederland is minder goed iets te zeggen wat te maken heeft met het geringe aantal waargenomen stormen en de grote temporele variabiliteit. Enkele trends zijn significant maar voorzichtigheid is geboden. De conclusie luidt dat het aantal stormen in het binnenland afneemt, en aan de kust toeneemt. Vervolgonderzoek met andere criteria zal moeten uitwijzen of deze conclusies bevestigd kunnen worden.

6. Nawoord

Het doel van dit onderzoek was een bijdrage te leveren aan het onderzoek naar het windklimaat in Nederland aan het oppervlak. Dat doel is behaald, er zijn veel significante trends aangetoond die bewijzen dat het windklimaat een verandering ondergaat. Er is duidelijkheid verkregen over in welke windkrachtcategorieën deze veranderingen plaatsvinden.

Aangezien nog geen beproefde methoden ontwikkeld waren voor het analyseren van het windklimaat aan het oppervlak, is in dit onderzoek veel aandacht besteed aan de methodiek. Hiermee wordt de betrouwbaarheid gewaarborgd. Dit onderzoek is hierdoor controleerbaar en reproduceerbaar. Een vervolgonderzoek zou zich kunnen beperken tot een aanpassing van enkele criteria. Verder is er nog veel meer mogelijk met de enorme dataset. Aanbevelingen zijn: het analyseren van de trends van seizoensvariaties of correlaties onderzoeken met andere klimaatdata zoals de North Atlantic Oscillation index.

Dit onderzoek heeft mij veel geleerd, met name over het uitvoeren van onderzoeken zelf. Een uitdaging was de efficiëntie. De methoden, waaronder het ontwikkelen van de programma's in Matlab en het opstellen van criteria, nam meer tijd in beslag dan gepland. Ook blijkt het aantal analyses dat kan worden uitgevoerd met de dataset eindeloos waardoor het overzicht verminderd werd. De geleerde les is om je goed te houden aan de onderzoeksvragen en niet te laten afleiden door alle andere mogelijkheden.

Tot slot een woord van dank aan mijn begeleider tijdens deze bachelor scriptie, dr. Ir. J.H. van Boxel die altijd de tijd nam om rustig de voortgang te bespreken en me van waardevolle adviezen te voorzien.

Zaandam, 2-7-2012

Eric de Jong

Literatuurlijst

Breslow, P.B., Sailor, D.J., 2002. Vulnerability of Wind Power Resource to Climate Change in the Continental United States. Renewable Energy. 27, 585-598.

Buis, J., 1993. Holland Houtland. Een Geschiedenis van het Nederlandse Bos. Prometheus, Amsterdam, 243 pp.

Cowie, J., 2007. Climate Change: Biological and Human Aspects. Cambridge University Press, Cambridge.

Della Marta, P.M., Mathis, H., Frei, C., Liniger, M.A., Klein, J., Appenzeller, C., 2009. The Return Period of Wind Storms over Europe. International Journal of Climatology. 29, 437-459.

Dorland, C., Tol, R.S.J., Palutikof, J.P., 1999. Vulnerability of the Netherlands and Northwest Europe to Storm Damage under Climate Change: A Model Approached Based on Storm Damage in the Netherlands. Climate Change. 43, 513-535.

Harmsen, R., Wesselink, B., Eichhammer, W., Worrell, E., 2011. The Unrecognized Contribution of Renewable Energy to Europe's Energy Savings Target. Energy Policy. 39, 3425-3433.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

Klerk, de, L., 2010. Verstedelijking 5.0: Bespiegelingen over groei, stagnatie en contractie. Rooilijn. 43, 5, 316-329.

KNMI, 2002. Klimaatatlas van Nederland, de normaalperiode 1971-2000.Uitgeverij Elmar BV, Rijswijk, 182 pp.

KNMI, 2008. De Toestand van het Klimaat in Nederland 2008. KNMI, De Bilt, 48 pp.

KNMI website, 2012. Klimatologie: uurgegevens van het weer in Nederland. Opgehaald 6-5-2012, van http://www.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/potentiele_wind/up_upd/

Mac Berthouex, P. Brown, L.C., 2002. Statistics for Environmental Engineers. CRC Press LCC, Boca Raton.

Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., 2010. Climate change impacts on wind energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14, 430-437.

Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., Clausen, N.E., Drews, M., MackKellar, N., Kjellström, E., 2012. Analyses of Possible Changes in Intense and Extreme Wind Speeds over Northern Europe under Climate Change Scenarios. Climate Dynamics. 38, 189-208.

Smits, A., Klein Tank, A.M.G., Können, G.P., 2005. Trends in Storminess over the Netherlands, 1962 – 2002. International Journal of Climatology. 25, 1331-1344.

The European Wind Energy Association, 2012. Wind in Power: 2011 European Statistics. Opgehaald 2-5-2012 van http://www.ewea.org/index.php?id=1486

Wever, N., Groen, G., 2009. Improving potential wind for extreme wind statistics. KNMI scientific report; WR 2009-02.

Wieringa, J., Rijkoort, P.J., 1983. Klimaat van Nederland 2: Windklimaat van Nederland. Staatsuitgeverij ’s-Gravenhage, Den Haag.

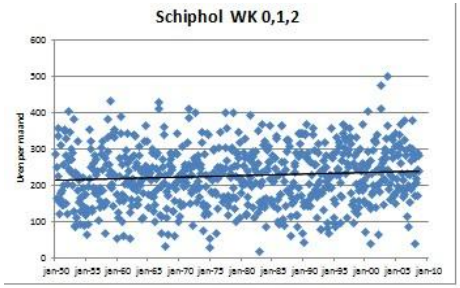
Bijlage 1 – Schaal van Beaufort*

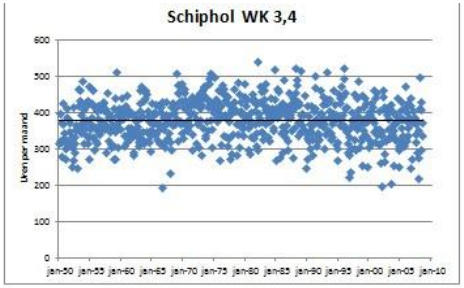
kracht*	benaming	wind gemiddelde snelheid over 10 minuten	wind gemiddelde snelheid over 10 minuten	uitwerking boven land en bij mens
		km/h	m/sec	
0	stil	0-1	0-0,2	rook stijgt recht of bijna recht omhoog
1	zwak	1-5	0,3-1,5	windrichting goed af te leiden uit rookpluimen
2	zwak	6-11	1,6-3,3	wind merkbaar in gezicht
3	matig	12-19	3,4-5,4	stof waait op
4	matig	20-28	5,5-7,9	haar in de war; kleding flappert
5	vrij krachtig	29-38	8,0-10,7	opwaaiend stof hinderlijk voor de ogen; gekuifde golven op meren en kanalen; vuilcontainers waaien om
6	krachtig	39-49	10,8-13,8	paraplu's met moeite vast te houden
7	hard	50-61	13,9-17,1	het is lastig tegen de wind in te lopen of te fietsen
8	stormachtig	62-74	17,2-20,7	voortbewegen zeer moeilijk
9	storm	75-88	20,8-24,4	schoorsteenkappen en dakpannen waaien weg; kinderen waaien om
10	zware storm	89-102	24,5-28,4	grote schade aan gebouwen; volwassenen waaien om
11	zeer zware storm	103-117	28,5-32,6	enorme schade aan bossen
12	orkaan	>117	>32,6	verwoestingen

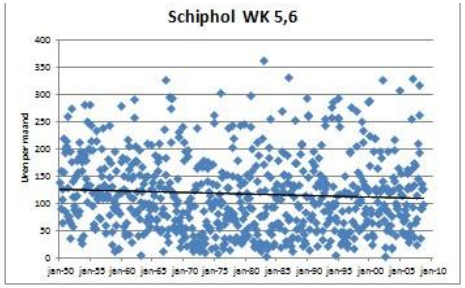
*Bron: KNMI website: Opgehaald 1-5-2012 van:
http://www.knmi.nl/cms/content/28976/windschaal_van_beaufort_compleet

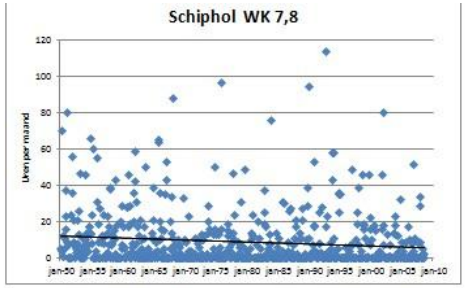
Bijlage 2 – Spreidingsdiagrammen en trendlijn per meetstation

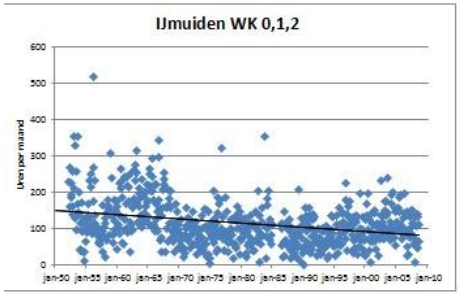
De spreidingsdiagrammen geven de frequentie in uren per maand weer. Voor elk meetstation en alle categorieën is dit berekend. Daar is vervolgens een lineaire regressie op uitgevoerd. Vanwege de beperkte leesbaarheid zijn deze grafieken ook online beschikbaar via: https://www.dropbox.com/s/ea1ny412087nlur/Richtingsco%C3%ABffici%C3%ABnten%20van%20alle%20meetstations%20per%20categorie.xlsx

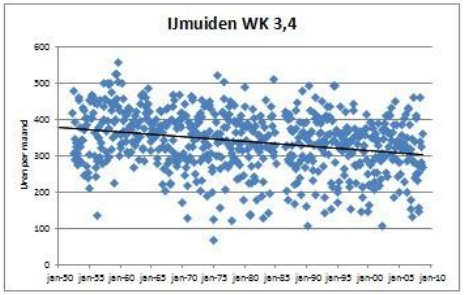


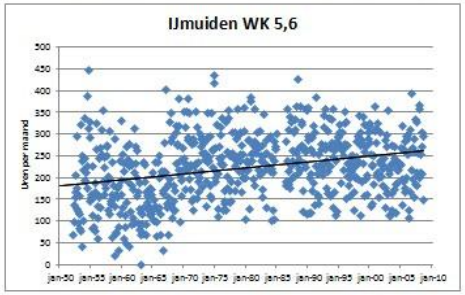


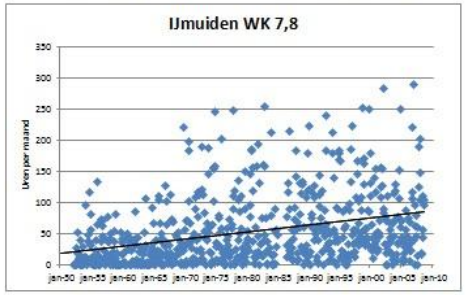


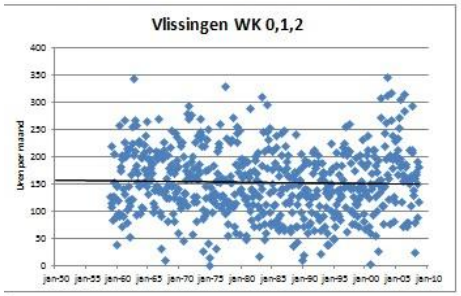


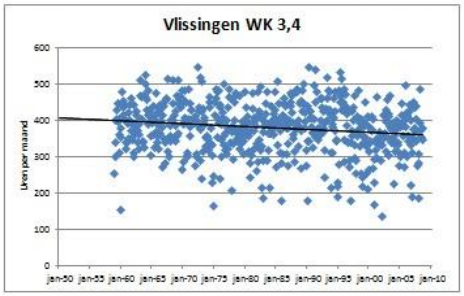


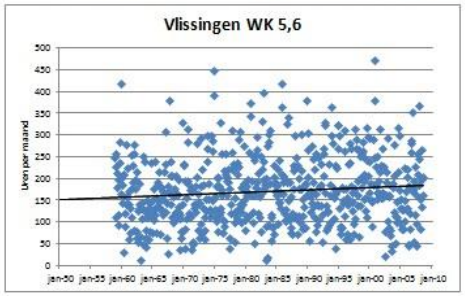


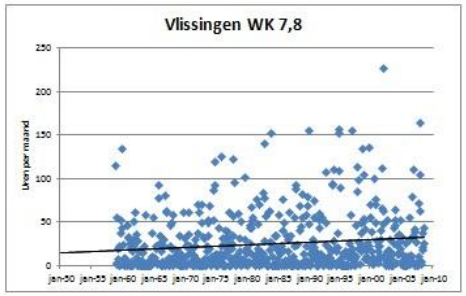


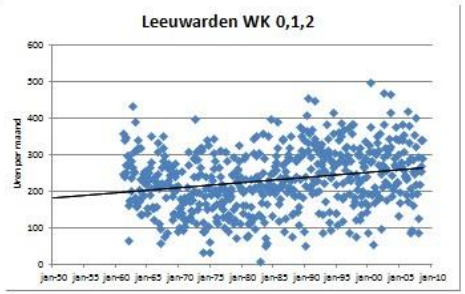


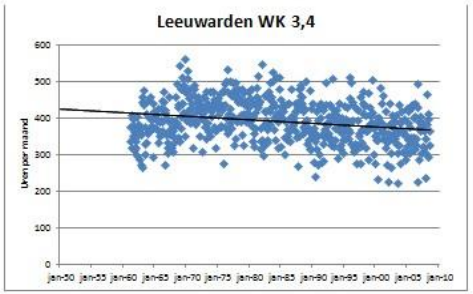


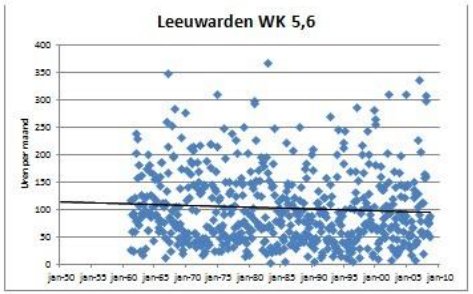


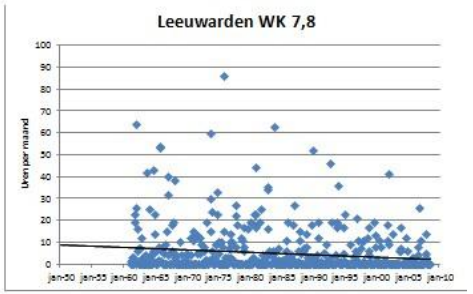


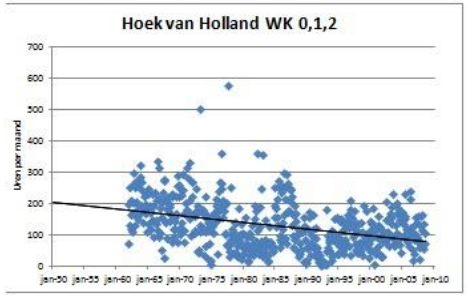


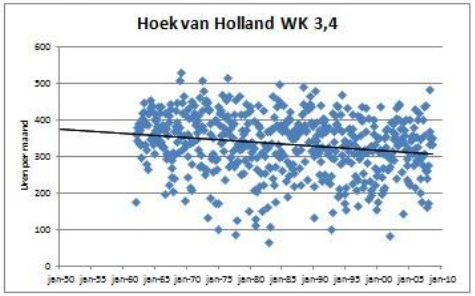

Leeuwarden WK 0,1,2
Uren per maand

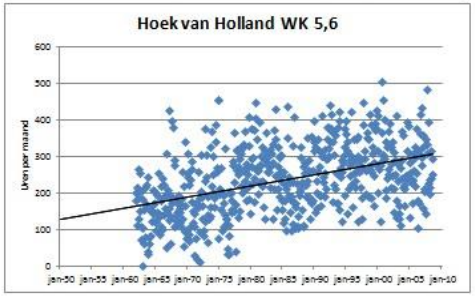

Leeuwarden WK 3,4
Uren per maand

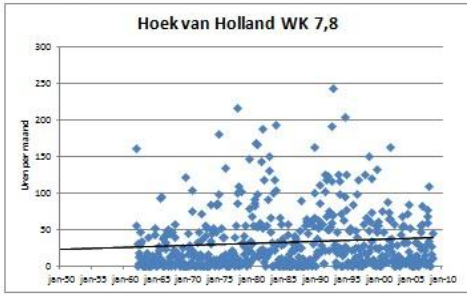

Leeuwarden WK 5,6
Uren per maand

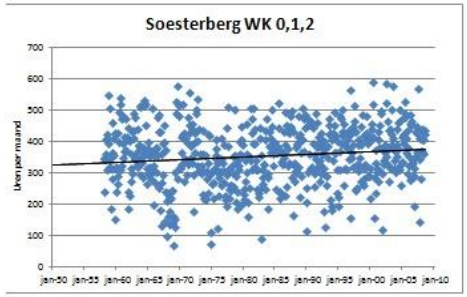

Leeuwarden WK 7,8
Uren per maand

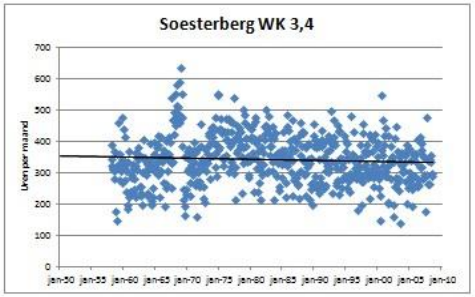

Hoek van Holland WK 0,1,2
Uren per maand

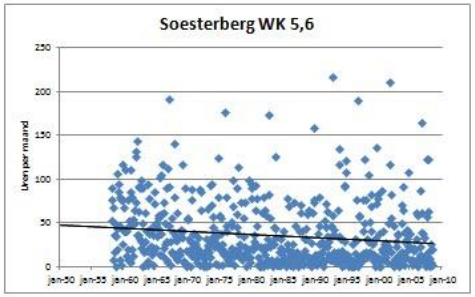

Hoek van Holland WK 3,4
Uren per maand

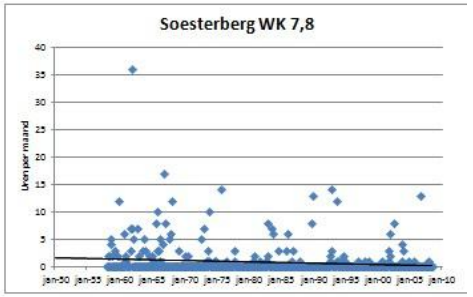

Hoek van Holland WK 5,6
Uren per maand

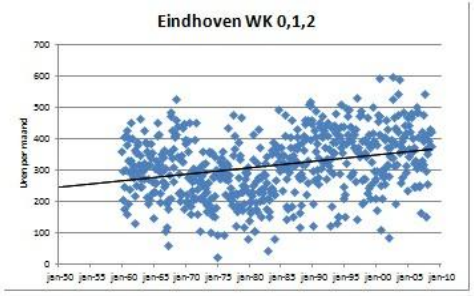

Hoek van Holland WK 7,8
Uren per maand

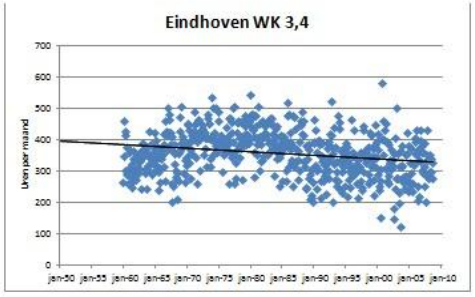

Soesterberg WK 0,1,2
Uren per maand

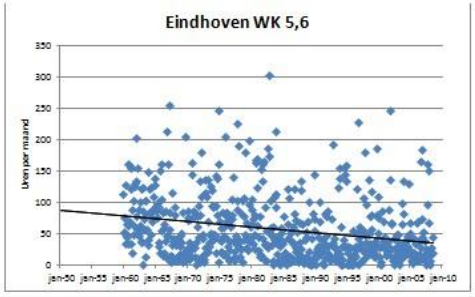

Soesterberg WK 3,4
Uren per maand

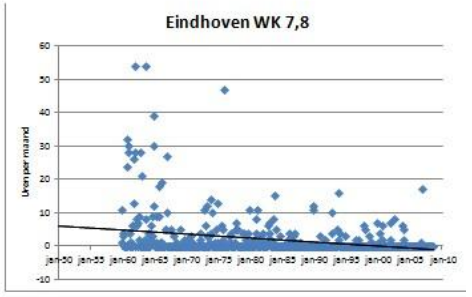

Soesterberg WK 5,6
Uren per maand

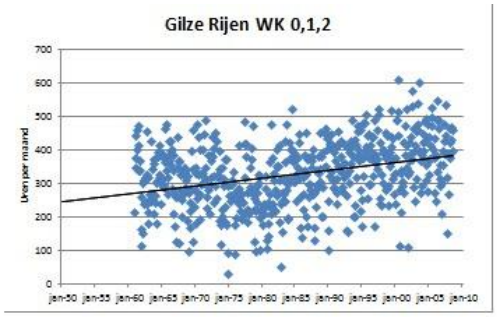

Soesterberg WK 7,8
Uren per maand

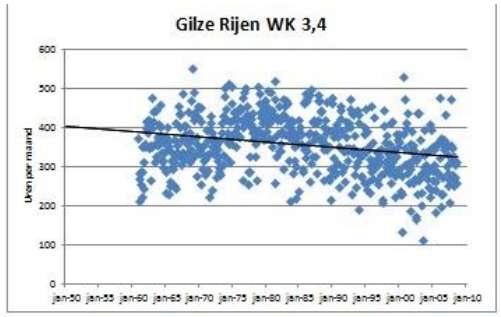

Eindhoven WK 0,1,2
Uren per maand

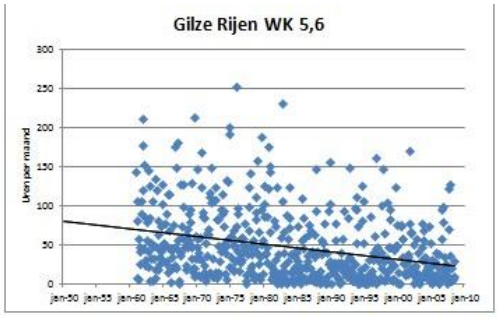

Eindhoven WK 3,4
Uren per maand

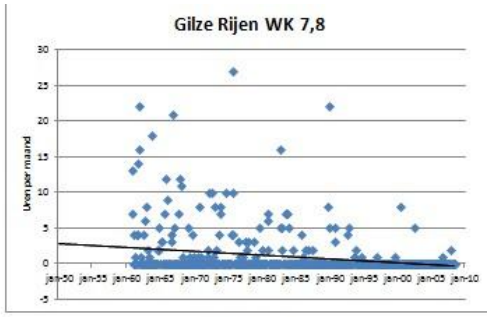

Eindhoven WK 5,6
Uren per maand

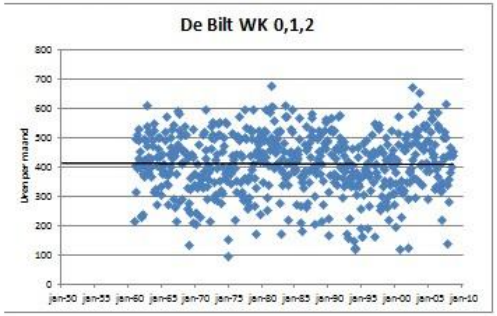

Eindhoven WK 7,8
Uren per maand

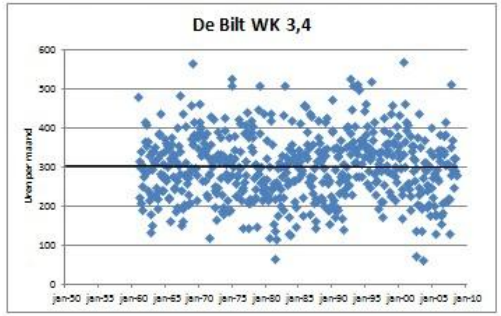

Gilze Rijen WK 0,1,2
Uren per maand

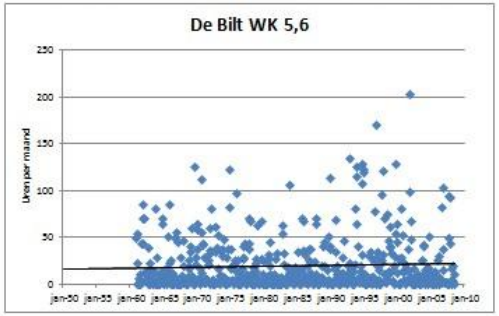

Gilze Rijen WK 3,4
Uren per maand

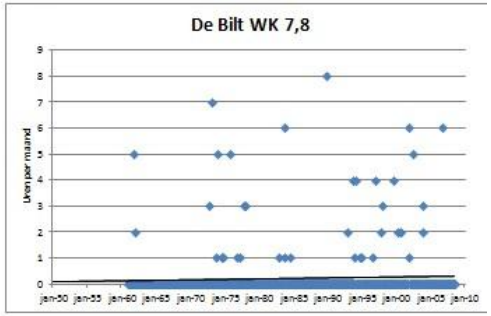

Gilze Rijen WK 5,6
Uren per maand

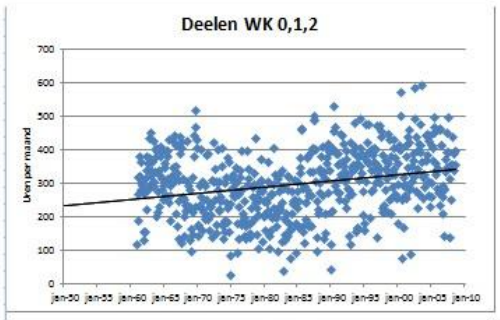

Gilze Rijen WK 7,8
Uren per maand

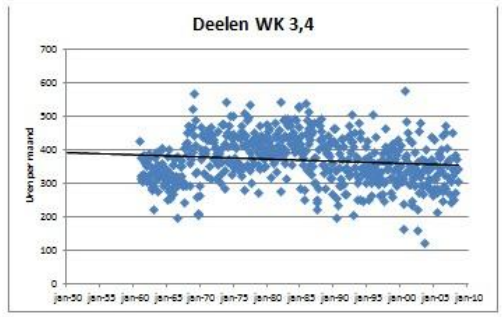

De Bilt WK 0,1,2
Uren per maand

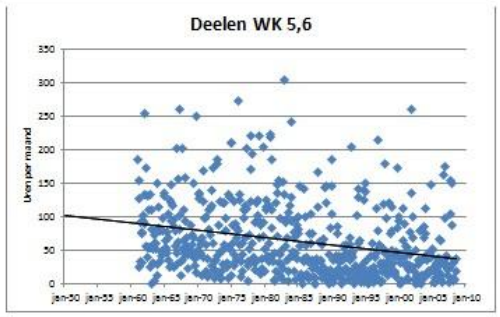

De Bilt WK 3,4
Uren per maand

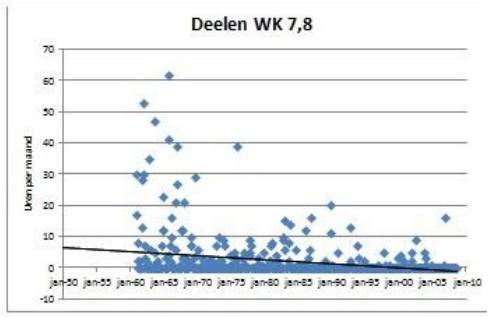

De Bilt WK 5,6
Uren per maand

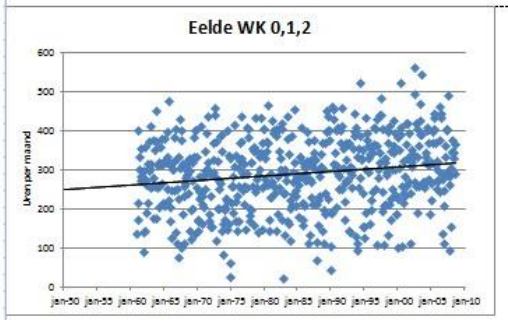

De Bilt WK 7,8
Uren per maand

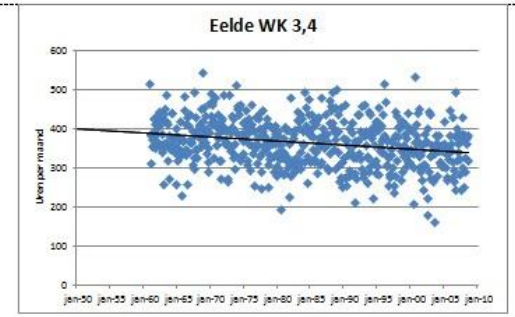

Deelen WK 0,1,2
Uren per maand

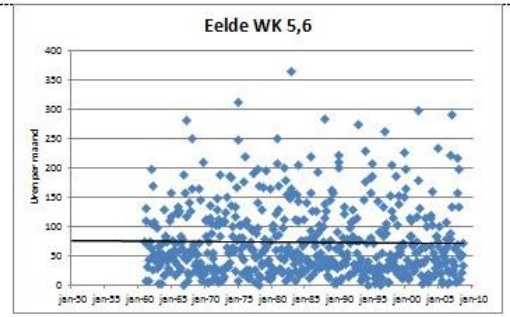

Deelen WK 3,4
Uren per maand

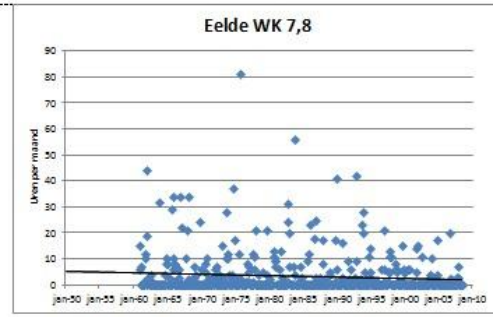

Deelen WK 5,6
Uren per maand

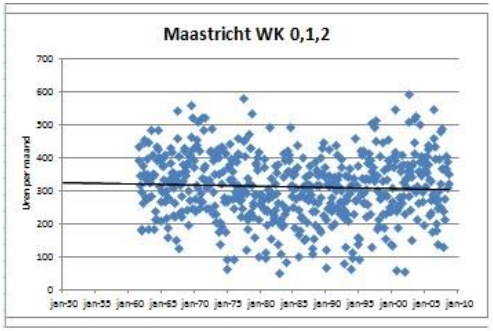

Deelen WK 7,8
Uren per maand

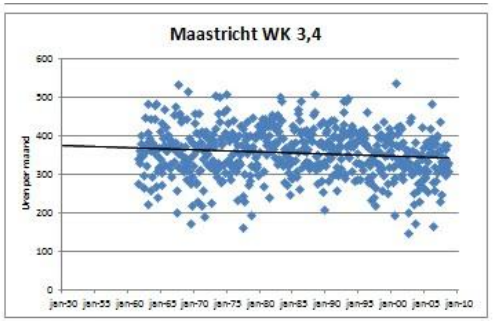

Eelde WK 0,1,2
Uren per maand

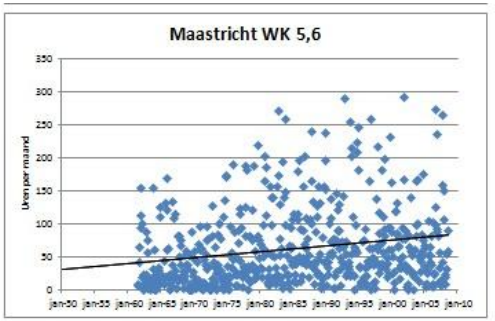

Eelde WK 3,4
Uren per maand

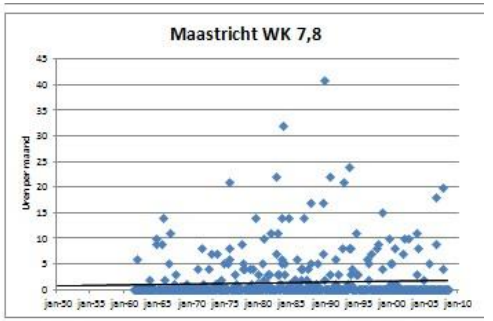

Eelde WK 5,6
Uren per maand

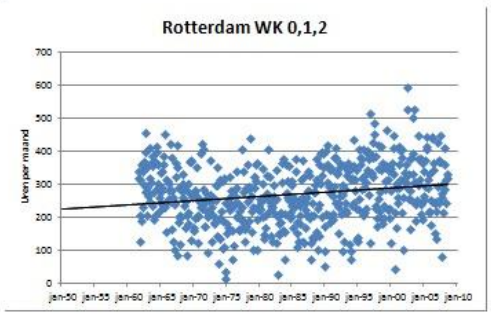

Eelde WK 7,8
Uren per maand

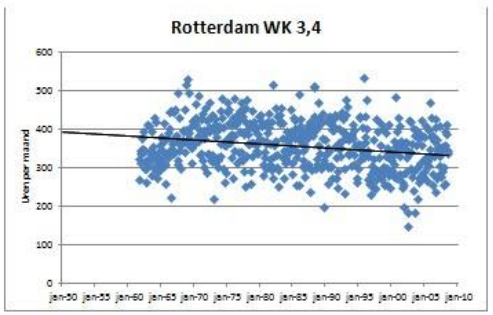

Maastricht WK 0,1,2
Uren per maand

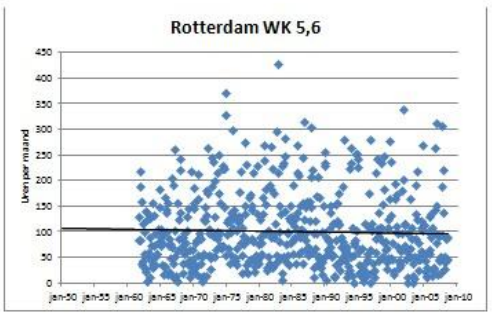

Maastricht WK 3,4
Uren per maand

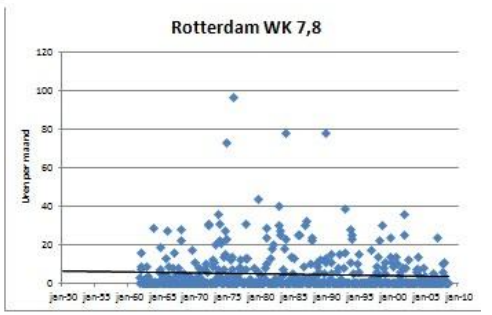

Maastricht WK 5,6
Uren per maand


Maastricht WK 7,8
Uren per maand


Rotterdam WK 0,1,2
Uren per maand


Rotterdam WK 3,4
Uren per maand


Rotterdam WK 5,6
Uren per maand


Rotterdam WK 7,8
Uren per maand