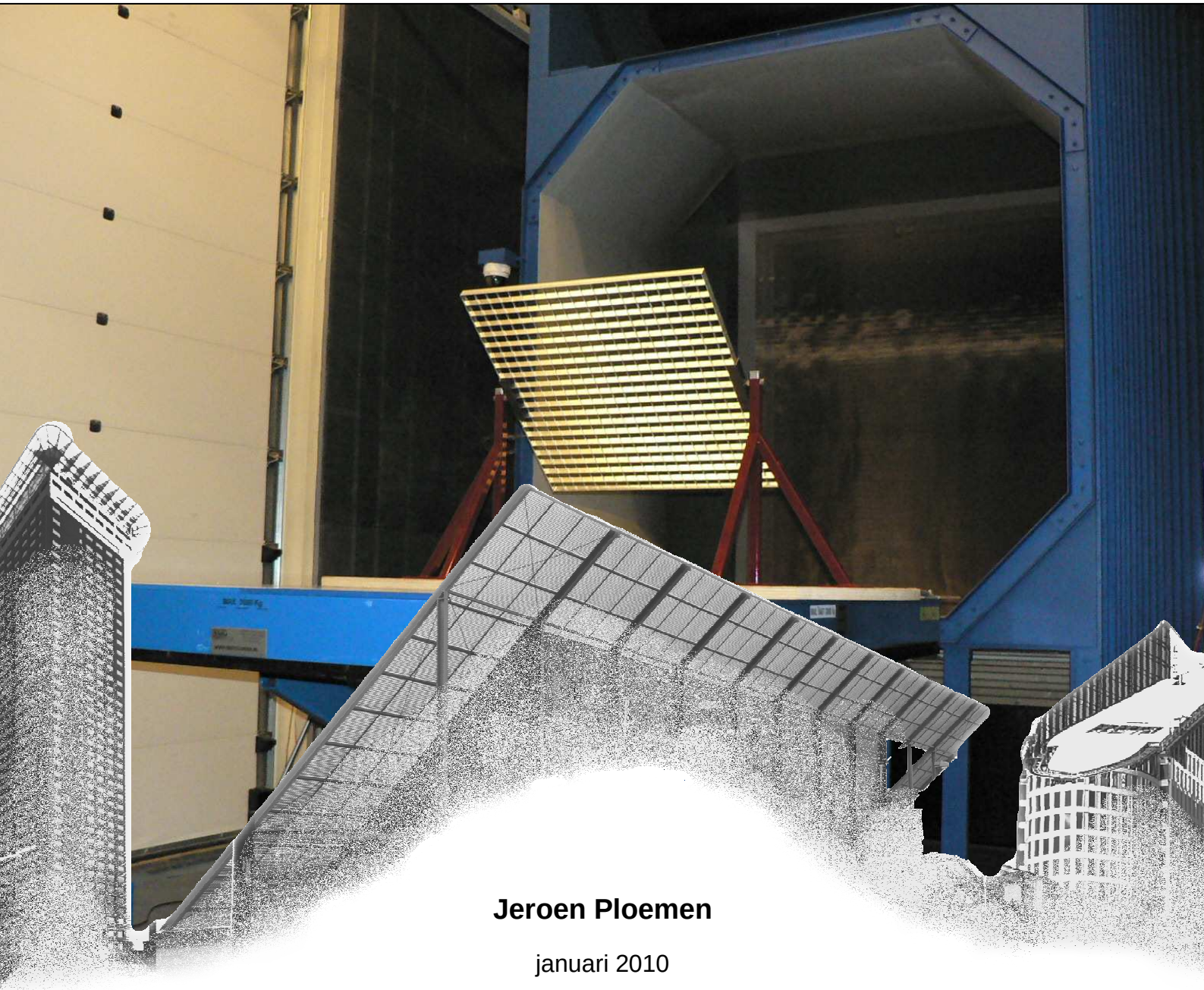


Eindrapport

Wind-geïnduceerd geluid aan gebouwen en constructies



Jeroen Ploemen

januari 2010

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	<i>Afwerking van het bandstaal</i>	71
	Roosters 1 en 7	71
	Roosters 5 en 11	73
	Roosters 6 en 12	73
	Totaalbeeld.....	74
5.7.2	<i>Dimensies van de draagstaaf</i>	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	<i>Maaswijdte</i>	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	<i>Vergelijking op basis van het Strouhalgetal</i>	81
5.9.2	<i>Invloed van c/t</i>	84
5.9.3	<i>Elimineren van de invloed van de maasafmetingen</i>	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 benodigde 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 ▪ geluidsdrukkniveau (*‘level of pressure’*)
- m ▪ massa
- p ▪ druk, drukverschil t.o.v. p_0
- p_0 ▪ statische druk (circa 1 bar)
- p_{rms} ▪ effectieve geluidsdruk (*‘root mean square pressure’*)
- St ▪ getal van Strouhal
- U ▪ snelheid van de stroming
- y ▪ gemeten signaal / set meetwaarden
- 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 verschillen 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 1m² 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 mogelijk ook 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} .

$$p_{rms} = \frac{\hat{p}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Als waarde voor de minimale nog waarneembare effectieve geluiddruk, de zogenaamde gehoordrempel, wordt doorgaans $2 \cdot 10^{-5}$ 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 geluiddrukkniveau L_p , waarin de gehoordrempel als referentiewaarde wordt gebruikt:

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

Vanwege het logaritmische karakter geldt bij een 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 geluiddrukkniveau

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:

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

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:

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

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

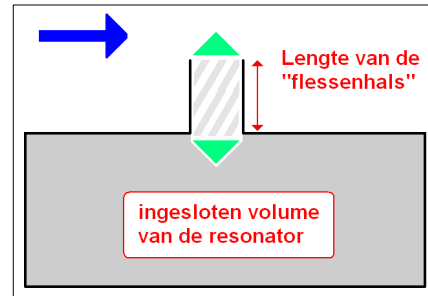
De frequentie van het aldus geproduceerde geluid wordt slechts bepaald door de verhouding tussen het afgesloten luchtvolume en de afmetingen van de nauwe instroomopening; het is niet vereist dat de holte groot genoeg moet zijn om plaats te bieden aan de golflengte. Deze eigenschappen maken dit soort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

2.2.4 Vortex shedding en Eolische tonen

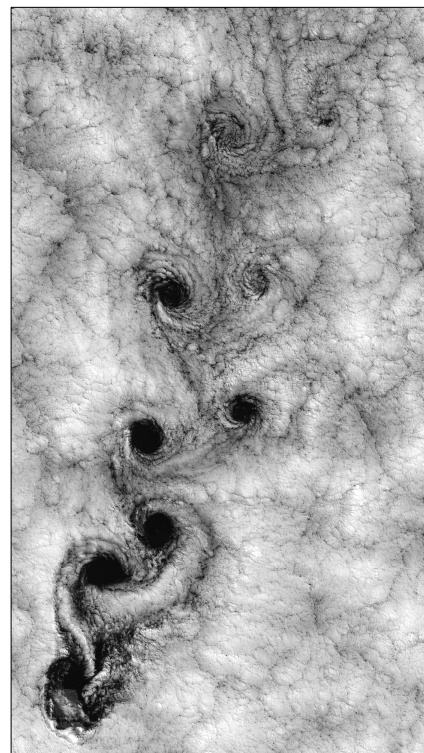
Wanneer een object zich als een obstakel in een stromend vloeibaar of gasvormig medium bevindt, kan er aan de achterzijde een zeer herkenbaar repetitief patroon van om-en-om in tegengestelde richting draaiende vortexen optreden, een zogeheten wervelstraat van Von Karman, zie figuur 2. Bij gegeven vorm 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 tuinen, 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



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



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

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 aanstroombroefiel (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 uitgegaan 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

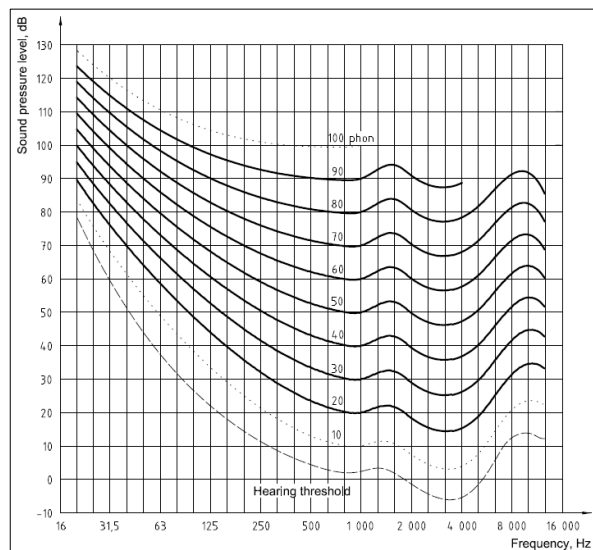
Of een bepaald geluid hinder is of zo wordt ervaren is een kwestie van een subjectieve beoordeling. Fysisch is er immers geen verschil tussen wat voor de één een aangenaam muziekje is, maar voor de ander pure herrie en overlast. Daarnaast wordt niet alle geluid wordt als (even) hinderlijk ervaren, zelfs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

Niet alleen de voor de hand liggende factor geluidsterkte 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 geluidsdrukkniveau. Om hiervoor te compenseren wordt veelal gebruik gemaakt van een gewogen geluidsdrukkniveau, uitgedrukt in dB(A).

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 (waarschuwing-)signalen en de meeste muziek.



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".

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 industrie-geluiden. 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 geluiddrukkniveau, 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 geluidsniveau 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:

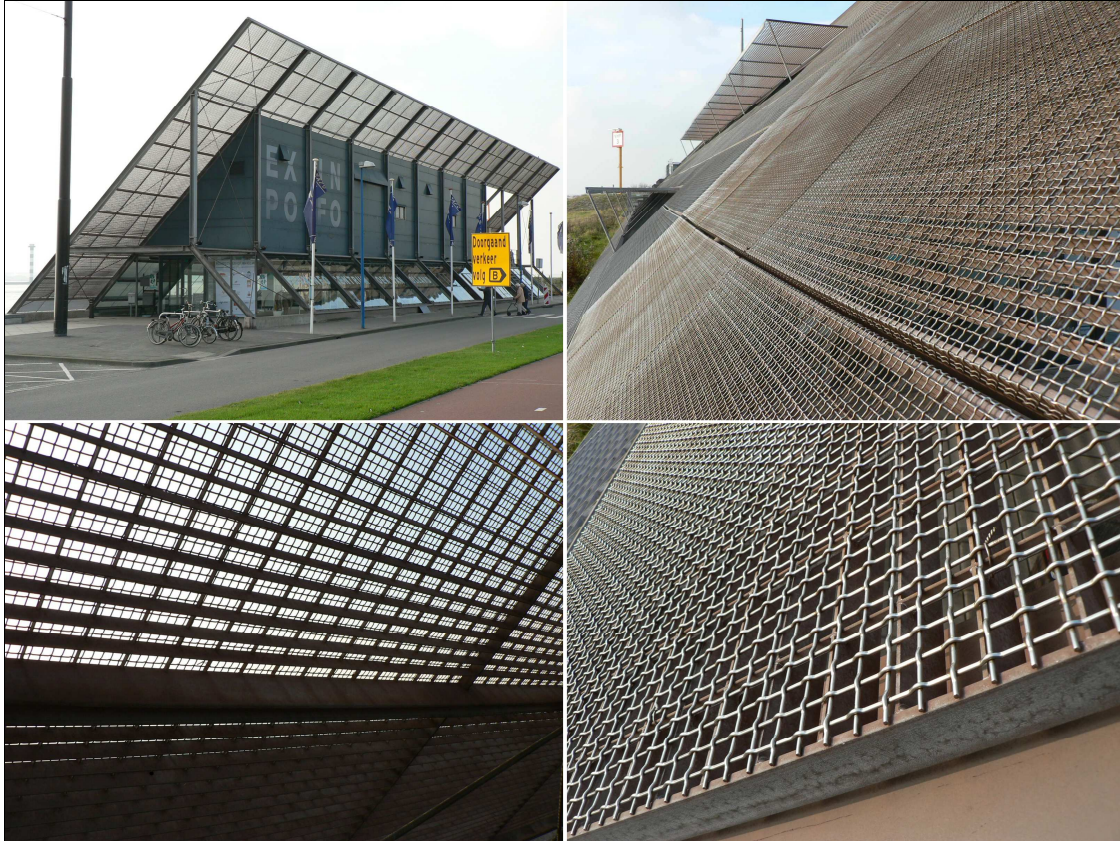
Specific environment	Critical health effect(s)	L _{Aeq} [dB]	Time base [hours]	L _{Amax, fast} [dB]
Outdoor living area	Serious annoyance, daytime and evening Moderate annoyance, daytime and evening	55 50	16 16	- -
Dwelling, indoors	Speech intelligibility and moderate annoyance, daytime and evening	35	16	
Inside bedrooms	Sleep disturbance, night-time	30	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 L_{Amax, 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 L_{Aeq} geeft toelaatbare equivalente geluidniveaus voor de in de kolom "Time base" genoemde periode; L_{Amax} 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 geluidsdrukkniveau 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



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

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 7 Beetham tower

heeft geleid [7]. Details over dit project zijn lastig te vinden, waarschijnlijk vanwege commerciële belangen.

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 geluidsoverlast 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

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.

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 8 Koepel van het Cityspire Center



figuur 9 Brugleuning Kruithuisweg

2.6.6 Brugleuning Kruithuisweg (Delft)

Fietsers en wandelaren in Delft zijn bekend met het feit dat de leuning 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:

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

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 stevast gedomineerd door windruis en verkeerslawaai.

2.7 Praktische oplossingen

Veelal worden bovengenoemde problemen pas ontdekt tijdens de bouwphase 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.

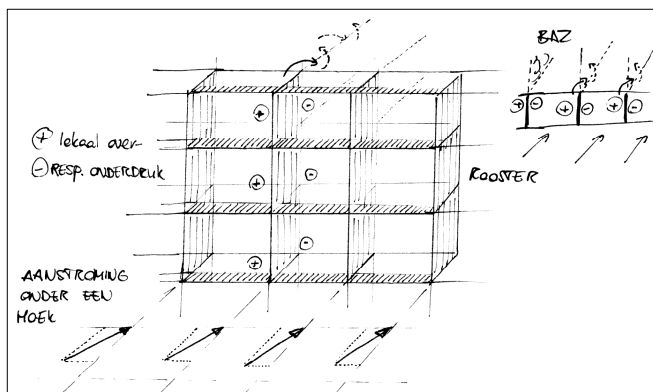
2.8.3 LBP

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 trechtersvorm 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-octafband, waardoor de precieze kenmerken en piek van de geluidsterkte niet optimaal duidelijk worden.

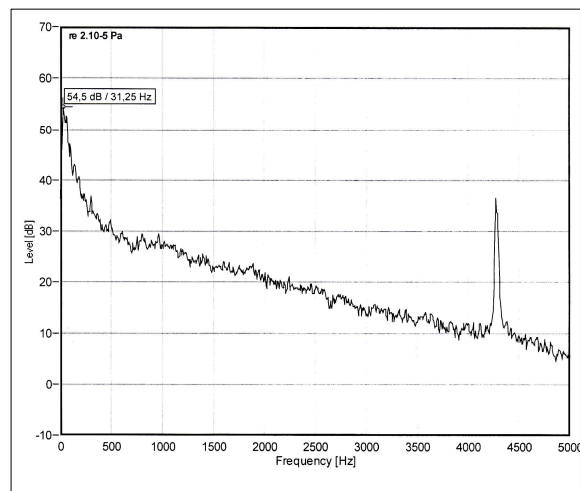
Verder zijn er nog een aantal publicaties besproken, waaronder een recentere publicatie van Parker (1997).

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 makkelijk 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

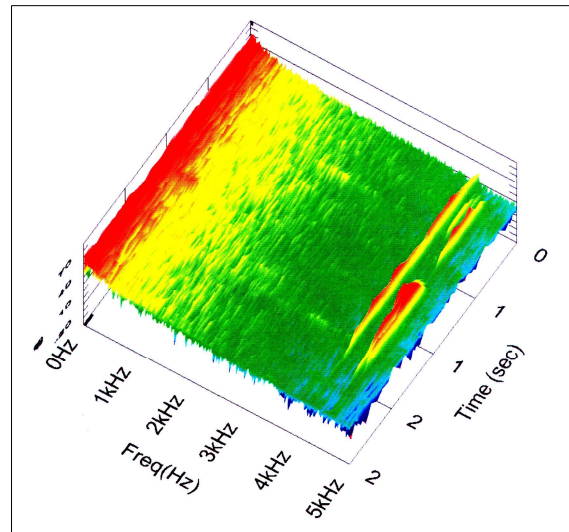
Nadat de roosters in de kroon als noodmaatregel geheel afgedekt waren met plaatmateriaal, werd begonnen met het zoeken naar oplossingen. Bij wijze van test werd een gedeelte van de platen weggehaald, en al snel bleek het probleem niet te bestaan bij de roosters in het gedeelte van de kroon dat zich op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

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.



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

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 ($\leq 10\%$) 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 voorzien 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 gevelementen.

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.

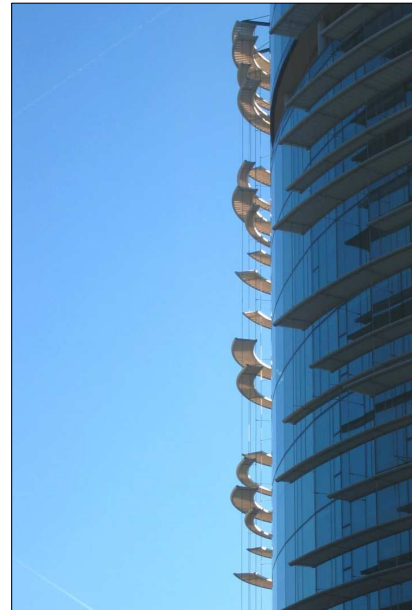
CFD

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 (belastingdienst, 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 gezien 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 ineensklappen 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.

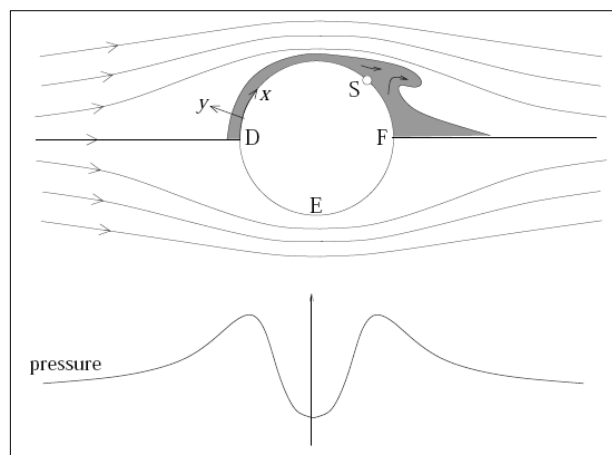
Daarmee resteert de turbulentie als oorzaak voor windgeluid.

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.

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



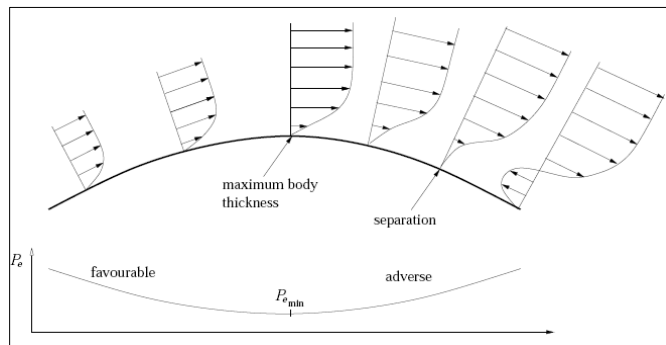
figuur 16 Ontwikkeling van druk bij stroming rond een cilinder

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:

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

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 plaatse 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 cilinder in een visceus medium

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

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:

$$St = \frac{f \cdot l}{U} \quad (8)$$

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.

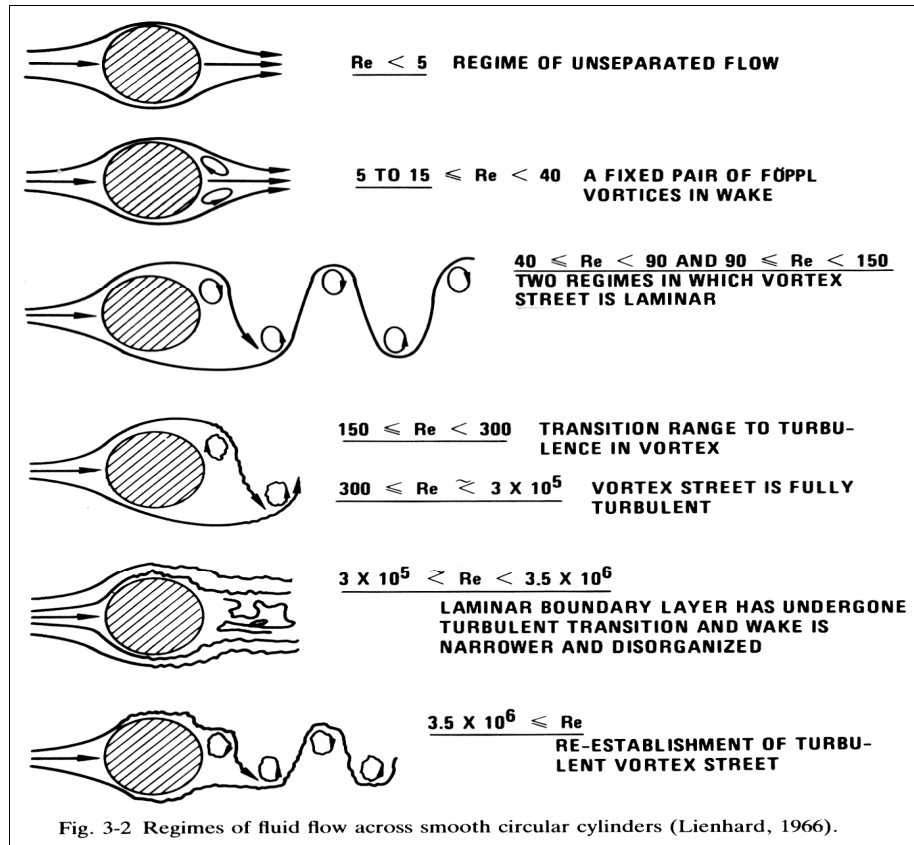
Concluderend: om te kunnen voorspellen of er (tonaal) geluid ontstaat als gevolg van dit fenomeen, zal moeten worden bepaald of er (regelmatige) drukverschillen ontstaan als gevolg van wervelafschudding. Van invloed op wervelafschudding zijn:

- 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 dat 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:



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

Bij $5 < Re < 40$ 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 ($40 < Re < \text{circa } 300 \cdot 10^3$) 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 $300 \cdot 10^3 < Re < 3.5 \cdot 10^6$ een gebied met een redelijk chaotisch stromingsbeeld zonder duidelijke, regelmatige vortexen, om uiteindelijk voor waarde van $Re > 3.5 \cdot 10^6$ 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 geluidsdrukken, 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,

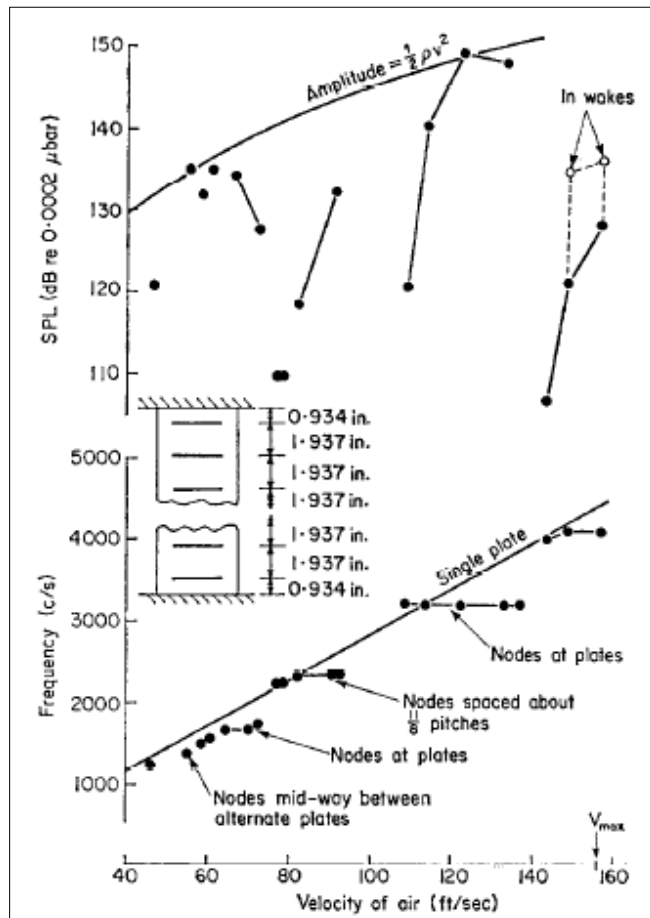
In geval van platen met een rechthoekige vorm aan de voorzijde, treden dan een aantal stromingspatronen op, afhankelijk van:

- Voor "korte" platen ($c/t < 3.2$ voor laminaire stroming, $< \sim 2$ 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 vorticeit 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.

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.



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 geluidsniveaus te zien. Zie ook figuur 20.

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 $\leq 70^\circ$; 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 m².
- 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 regelmatig 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.

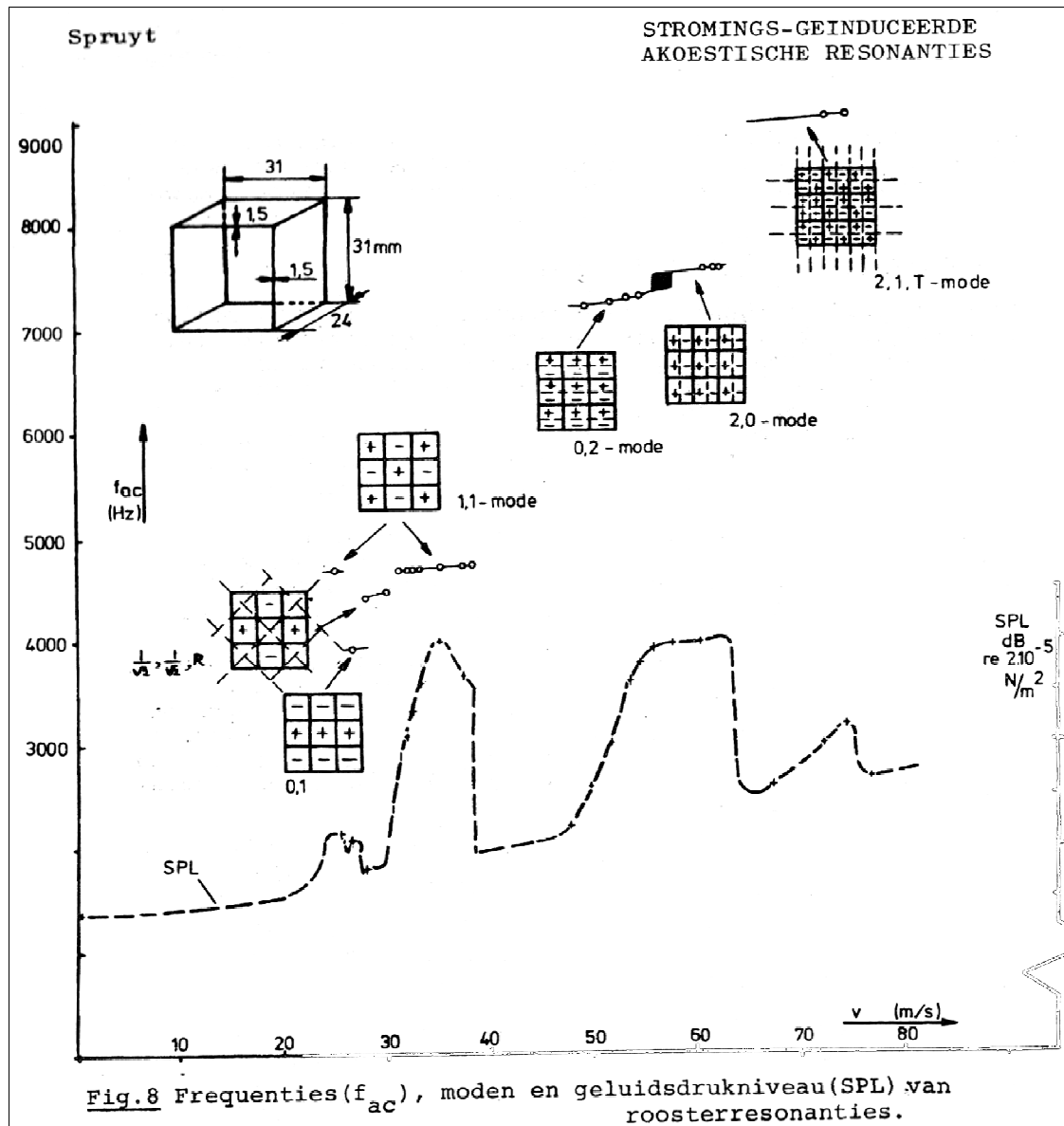
3.4.1 Spruyt

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 ($n \cdot (\lambda/2)$). 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 burens, 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 systeem; 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 reken capaciteit. Wel gaat dit ten koste van details, lokale verschijnselen kunnen door de toegepaste middeling niet inzichtelijk zijn in de verkregen resultaten.

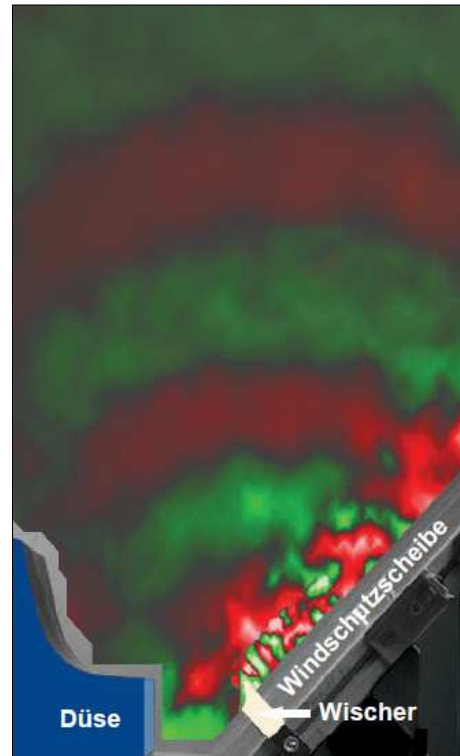
In geval van LES, dat voorkomt uit pogingen weersvoorspellingen te berekenen, wordt er onderscheid gemaakt tussen de schaal van wervels in de stroming. Grote wervels worden gezien als bepaald door “het grote geheel van de stroming”, kleinere (d.w.z. schaal kleiner dan de gekozen mesh) daarentegen als 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.

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

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

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 stevast op het (z.s.m.) beëindigen aan de overlast van dat specifieke geval, niet op het zoeken naar een overkoepelende oplossing.

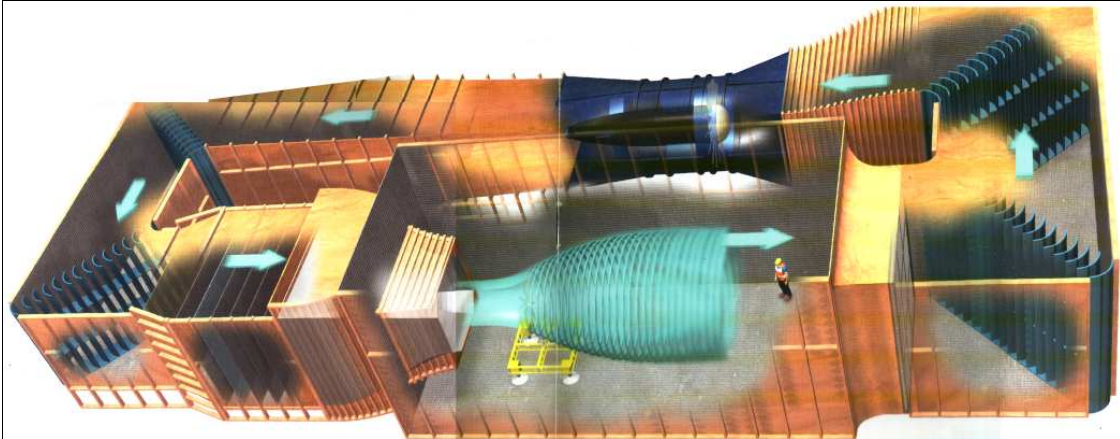
Zoals gezegd ligt de problematiek hier op het vlak van de akoestiek. Dat geldt dus ook voor de gewenste resultaten van dit windtunnelonderzoek:

- 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.

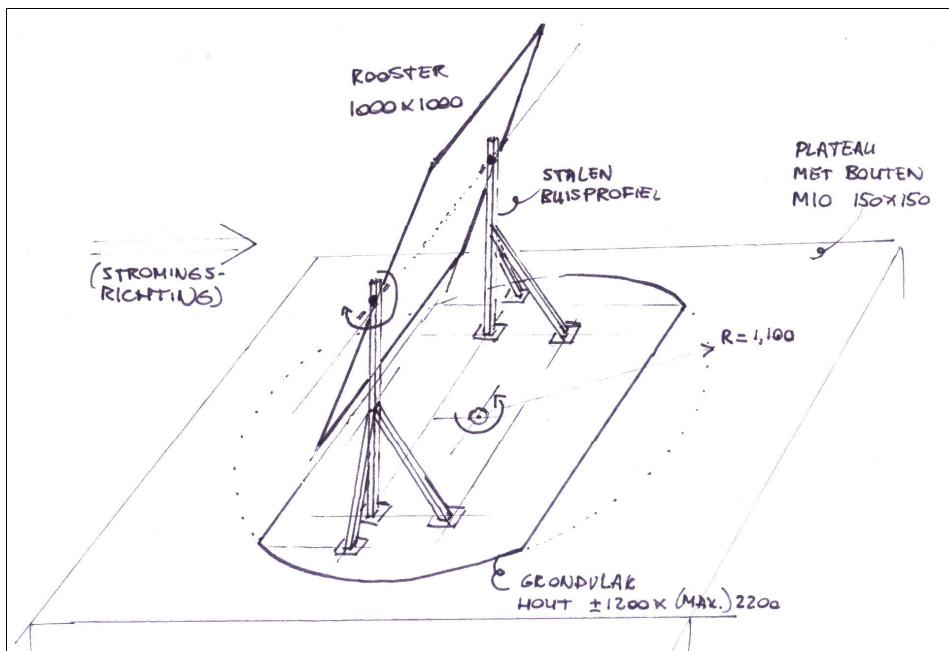
Proefstukken worden geplaatst op een platform (max 3t.) dat zich in de testruimte bevindt en hydraulisch omhoog en omlaag kan worden gebracht. De uitstroomopening bevindt zich circa 1.5 m boven de vloer van de ruimte, die in totaal circa 8 meter hoog is.

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).

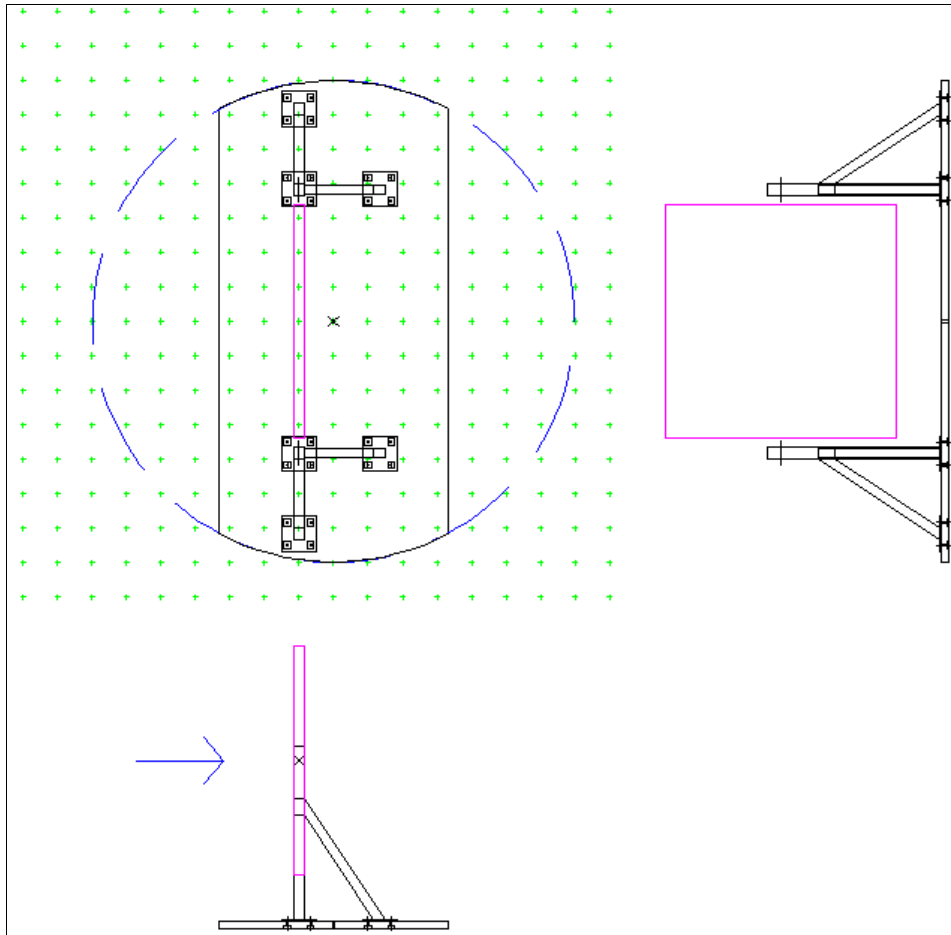
Aangezien het onderzoek in beginsel niet gericht is op het verhinderen van het ontstaan van het geluid maar op het onderzoeken van de oorzaak ervan zijn in de bovenstaande lijst geen maatregelen opgenomen gericht op het voorkomen van tonaal geluid, zoals het bovenstrooms verstoren van de luchtstroming, 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 zij aanzicht

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.

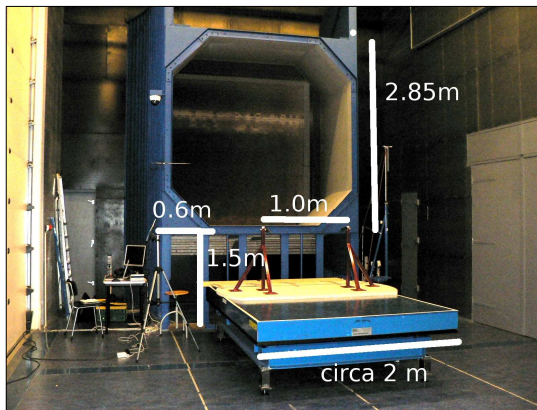
- Herhaal bovenstaande om eventuele andere hoeken te vinden waarbij een fluittoon optreedt.
- Herhaal voor overige proefstukken.

4.5 Apparatuur

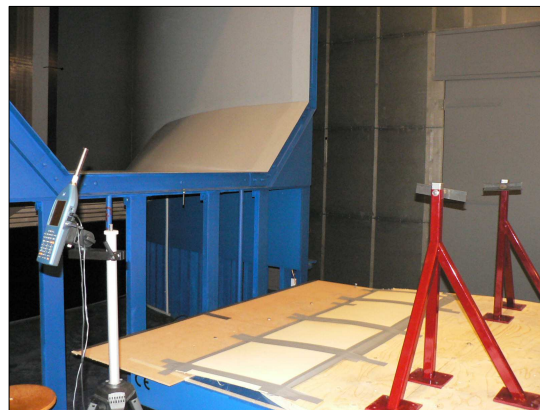
- Microfoon/geluidmeter Norsonic NOR-140: in staat om op het display octaafbanden of tertsen weer te geven, en tevens geluidopnames in wav-formaat op te slaan (volledig signaal). Dit kan op een in de geluidmeter zelf aanwezige opslagkaart; bediening kan ook op afstand met behulp van door de fabrikant 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 uitstroombuiging van de tunnel, ofwel 1,8 meter boven de vloer van de testruimte.



figuur 26 Overzicht opstelling.



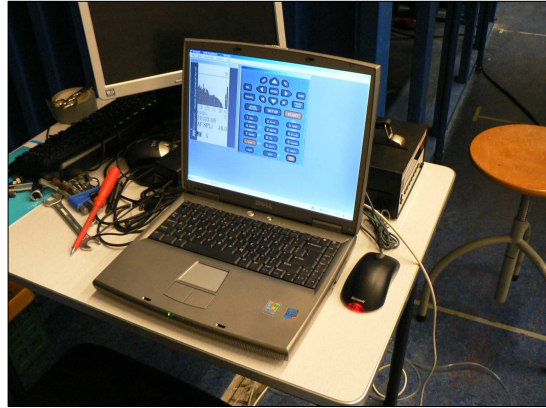
figuur 25 Afwerking aan de voorzijde.

Aan de voorzijde van het platform is getracht met behulp van een plaat en kanton 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.

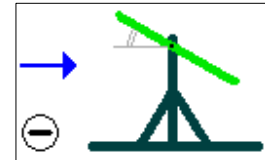
5 Resultaten windtunnel

5.1 Uitvoering onderzoek

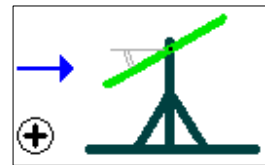
De geteste roosters zijn opgebouwd uit twee verschillende strips, de zogeheten draag- en vulstaven. De draagstaven nemen de bulk van de constructieve sterkte van het rooster voor hun rekening; de (kleinere) vulstaven zorgen ervoor dat de individuele draagstaven niet bezwijken maar als een geheel samenwerken.

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 gezien de (kleinere) vulstaven verdiept liggen, zoals in figuur 31.



figuur 29 Definitie negatieve hoek

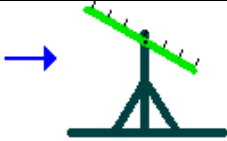
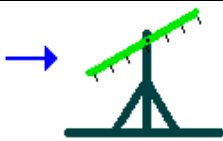
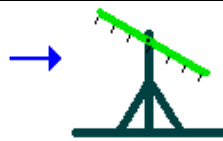
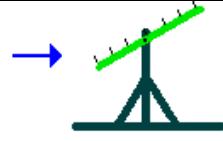


figuur 30 Definitie positieve hoek

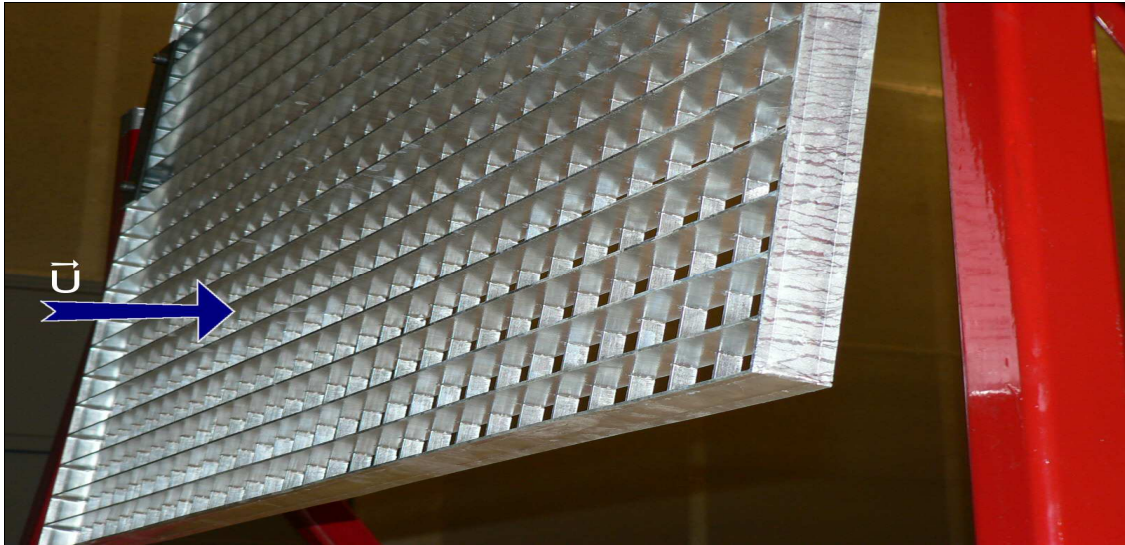
Definitie hoekverdraaiing

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 stromingsrichting, 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	$-90-0^\circ$ voorzijde	$0-90^\circ$ voorzijde	$-90-0^\circ$ achterzijde	$0-90^\circ$ achterzijde

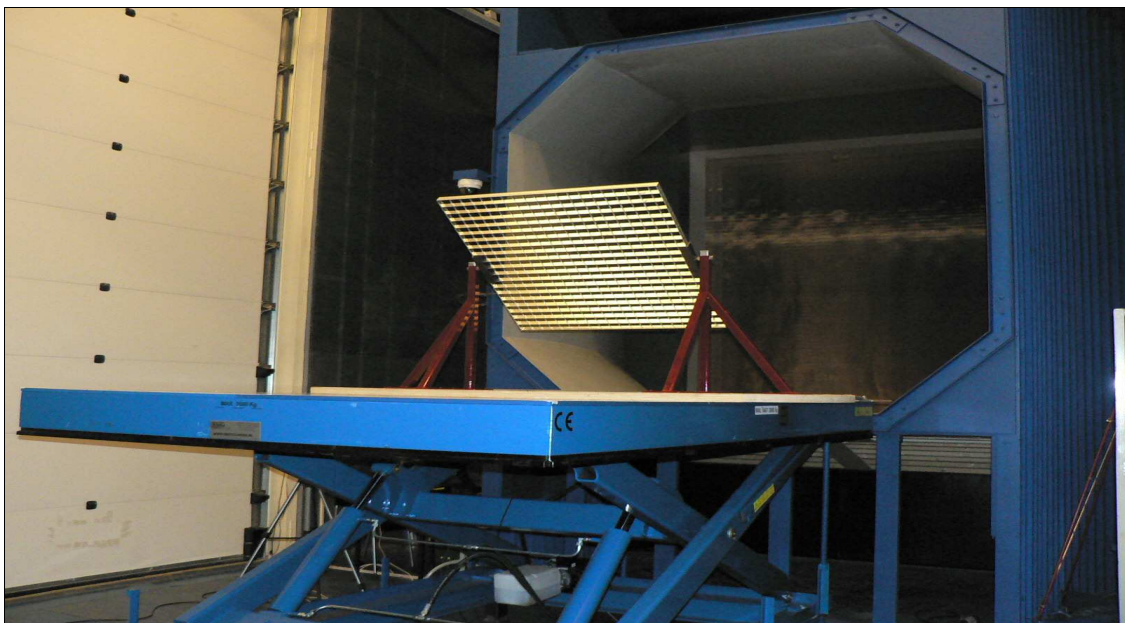
tabel 3 Overzicht van de gebruikte hoeknotaties.



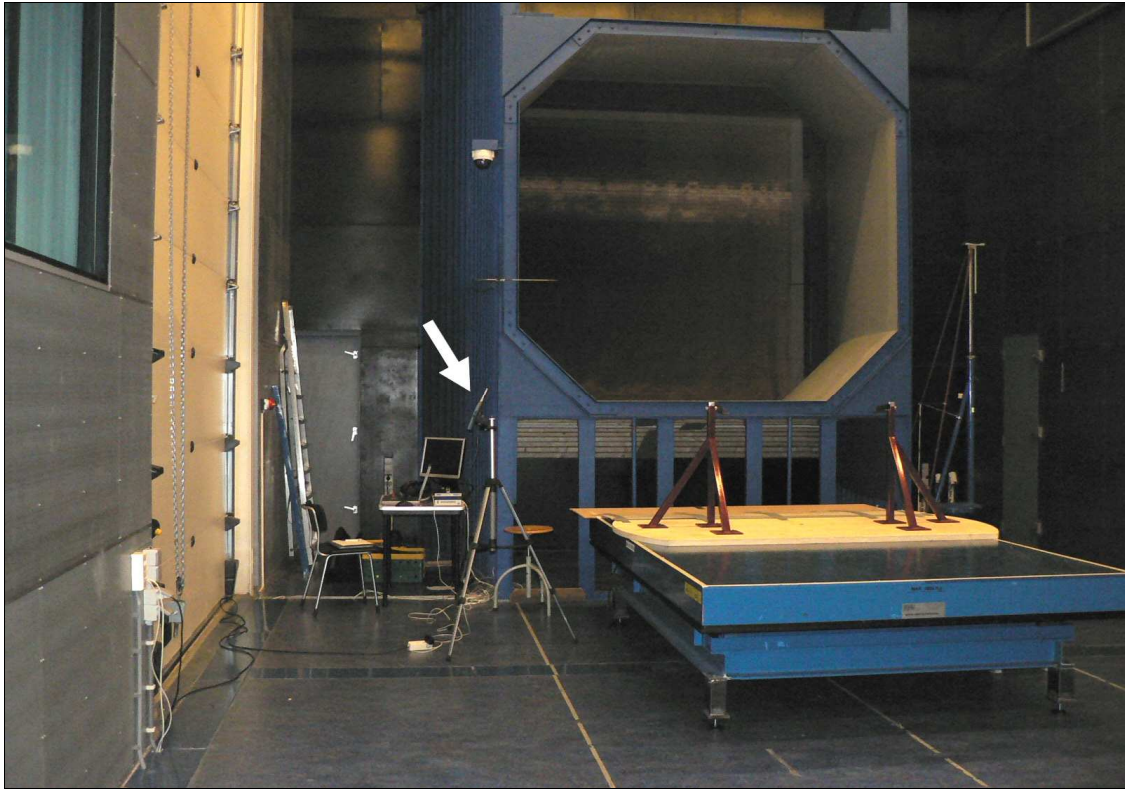
figuur 31 Aanstroming vanaf de achterzijde van een rooster. Let op het verschil tussen de draagstaven (horizontaal in deze afbeelding) en de kleinere vulstaven (verticaal).

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

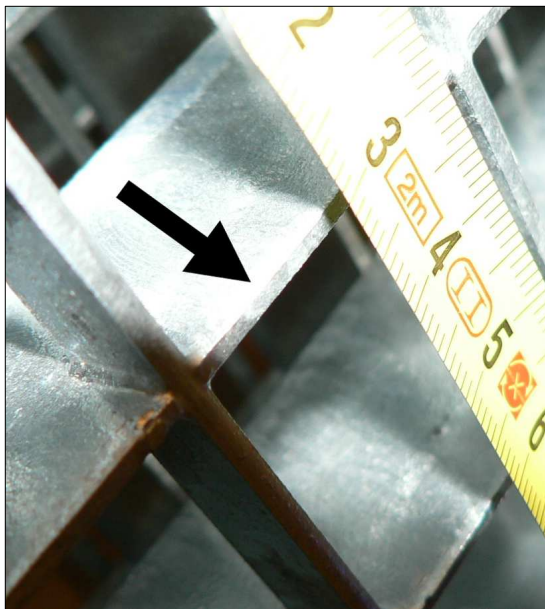
5.1.2 Verschillen in afwerking tussen roosters 1 t/m 6 en 7 t/m 12

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.

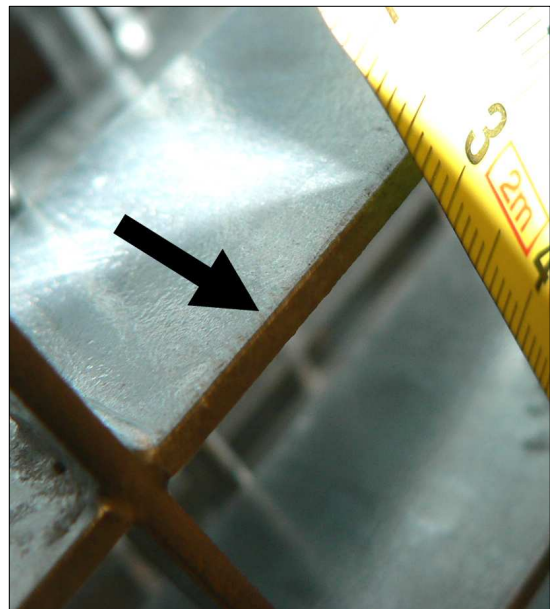


figuur 34 Slitten van plaatmateriaal; in het onderste deel zijn beide "messen" zichtbaar waar het plaatmateriaal tussendoor gehaald wordt.

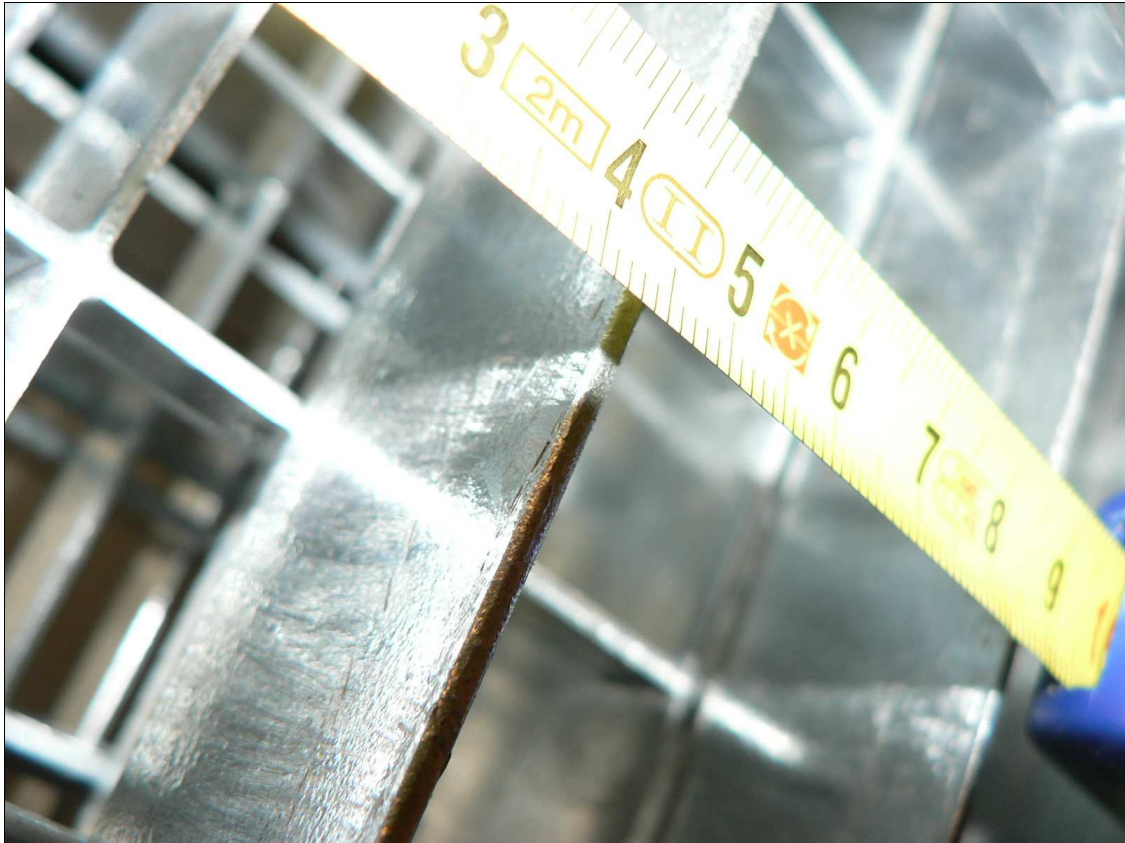
Daarnaast is er door Dejo naderhand nog een extra set roosters geleverd, waarvan de draagstaven een duidelijk grotere afrondingsstraal hebben en met het blote oog daaraan ook goed herkenbaar zijn. Zie onderstaande figuren, en figuur 37 voor het nieuwere, nog niet beproefde type:



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 waarden.

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 $200 \cdot 6000$ waarden genomen (ofwel precies 25 seconden bij 48 kHz) waarmee verder wordt gewerkt.

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

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

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

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.

$$\text{Nyquistfrequentie} = 0.5 \cdot \text{sample rate} = 24\text{kHz} \quad (11)$$

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.

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

Nu worden automatisch pieken in de meetwaarden gedetecteerd en van bijbehorende waarden 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.

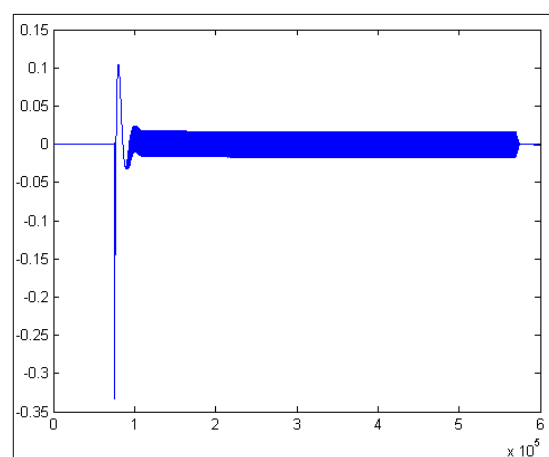
Daarnaast kunnen brede pieken worden gevonden op basis van het lopende gemiddelde, hoewel dat voor het onderzochte sterk tonaal geluid doorgaans minder van belang is.

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.



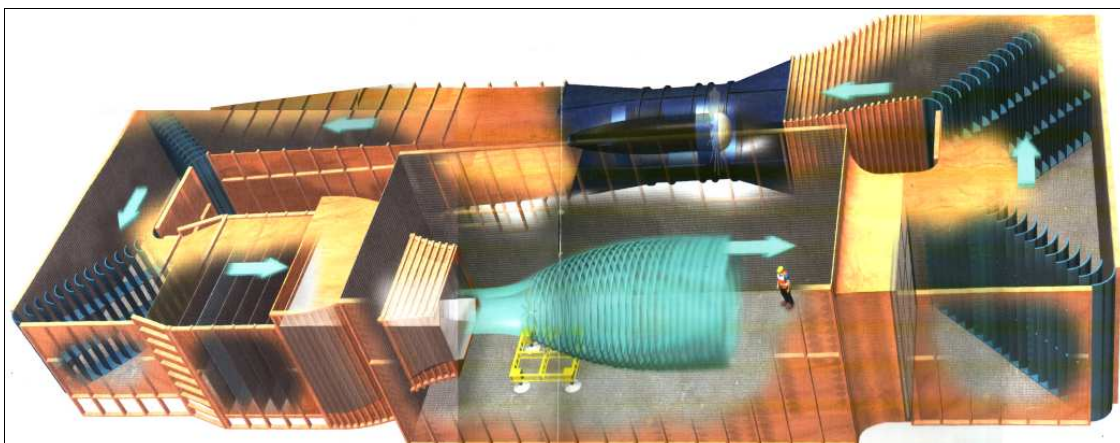
figuur 38 IJkfluit NOR-140; duidelijk zichtbaar is de zeer grote amplitude aan het begin van het signaal. Vanaf circa $1.25 \cdot 10^5$ begint pas de correcte (sinusvormige) ijktoon

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

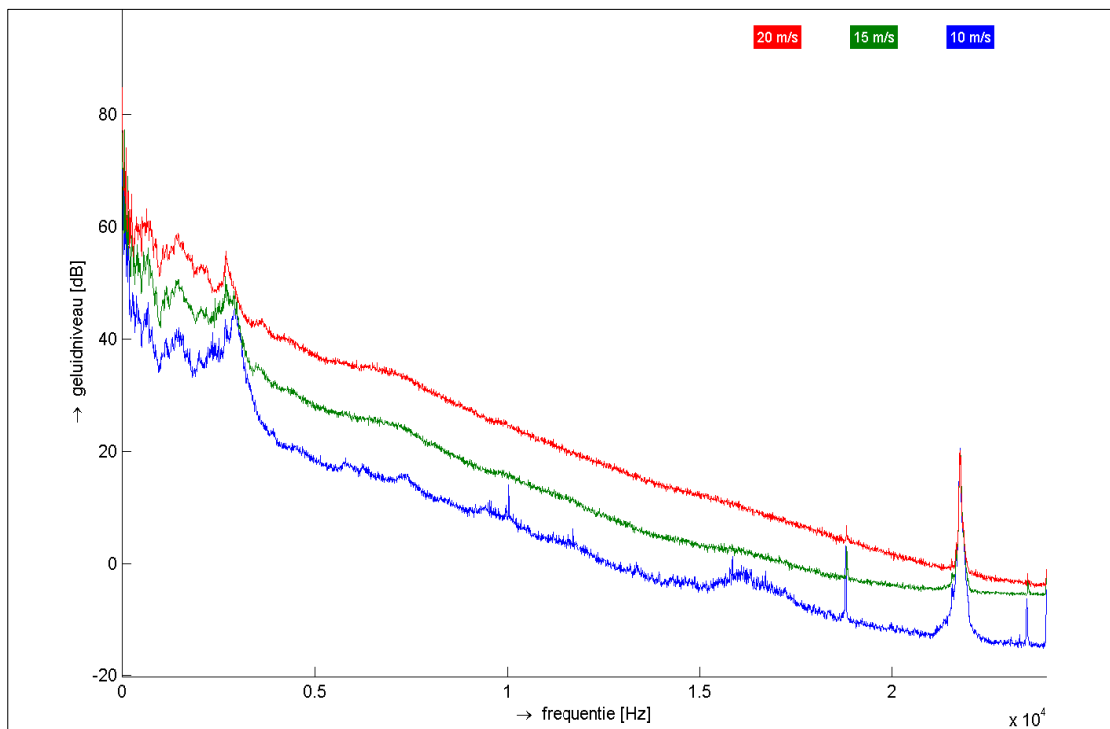
De voor dit onderzoek gebruikte tunnel is niet specifiek ontworpen voor akoestisch onderzoek. Zo is er geen sprake van geluiddempend materiaal in de testruimte, sluit de tussenwand met het deel van het gebouw waar de motoren en ventilatoren staan niet volledig aan op het plafond, en lekt er via de luchtaanvoer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

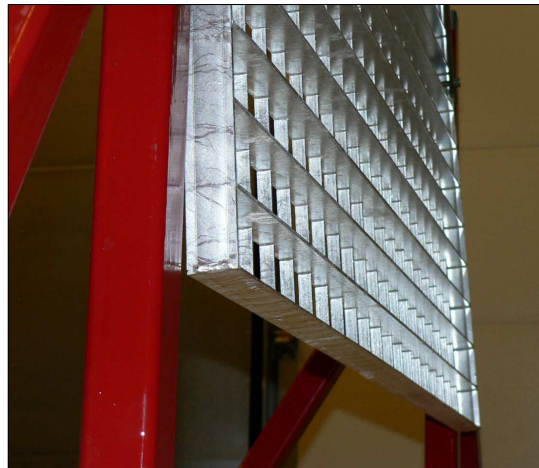
Gezien het feit dat er specifiek gezocht wordt naar tonaal geluid is de aanwezigheid van ruis op zich geen bezwaar, zolang de niveaus maar dusdanig zijn dat de toon voldoende duidelijk te onderscheiden is ten opzichte van de aanwezige ruis. Eenzelfde overweging geldt voor omgevingsgeluiden, de tunnel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

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 dicht 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.

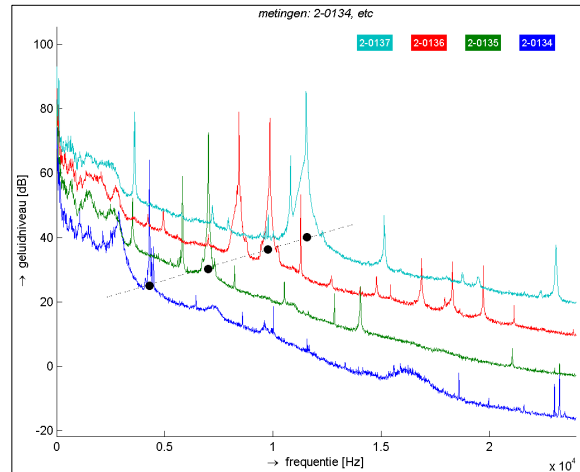
5.5 Relatie stroomsnelheid

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.

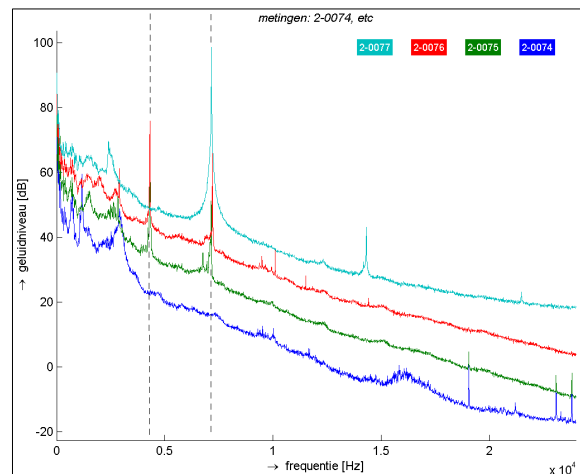
Slechts in een beperkt aantal gevallen was er bij snelheden van 10 m/s al sprake van een luide toon; de laagste snelheid waar er sprake was van duidelijk tonaal geluid bedroeg slechts 8 m/s (meting 1-0032) of 9 m/s (meting 2-0062), goed voor respectievelijk 75.1 dB met 3862 Hz en 86.8 dB met 2897 Hz. 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

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



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.



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.

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).

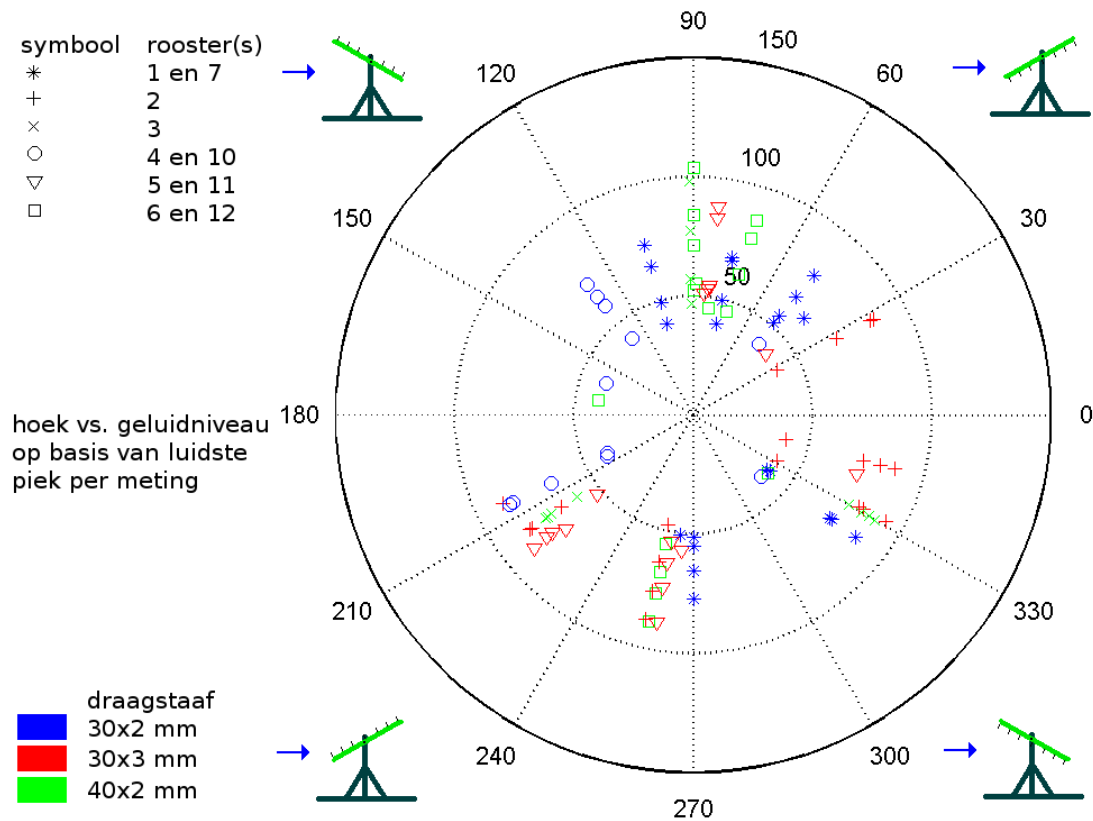
In een aantal figuren in deze paragraaf wordt gebruikt gemaakt van een 360° notatie in plaats van de elders in dit onderzoek gebruikte -90 tot +90° aan voor- en achterzijde. Dit vertaalt zich als volgt:

<i>notatie elders</i>	<i>komt bij 360° overeen met</i>
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:

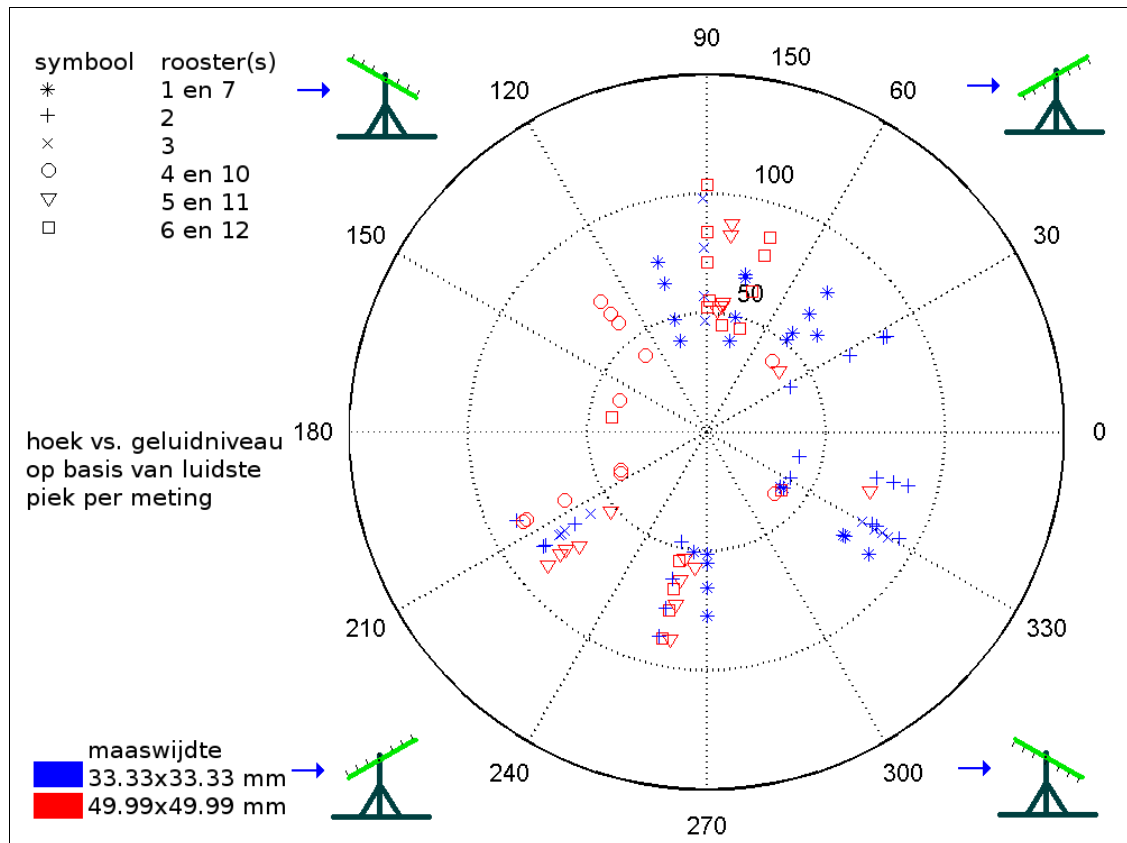


figuur 44 Aanstroomhoeken waarbij tonaal geluid optreedt zijn niet willekeurig verdeeld; Rondom 0° en 180°, en circa 60° verwijderd daarvan (60, 120, 240 en 300°) treedt er minder of geen tonaal geluid op. Zie tabel 6 voor een legenda van de gebruikte hoeknotatie.

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 “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 mogelijk geluid op dat luider is dan elders.

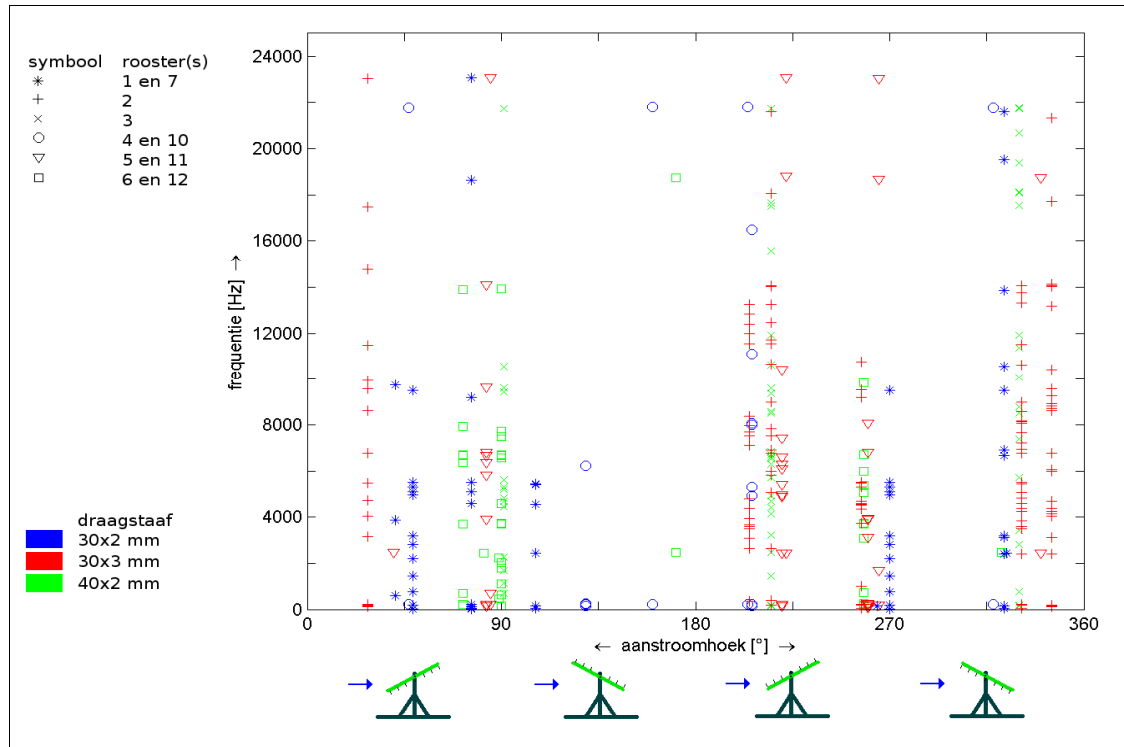


figuur 45 Dezelfde data als in figuur 44, ditmaal gekleurd op basis van de maaswijdte.

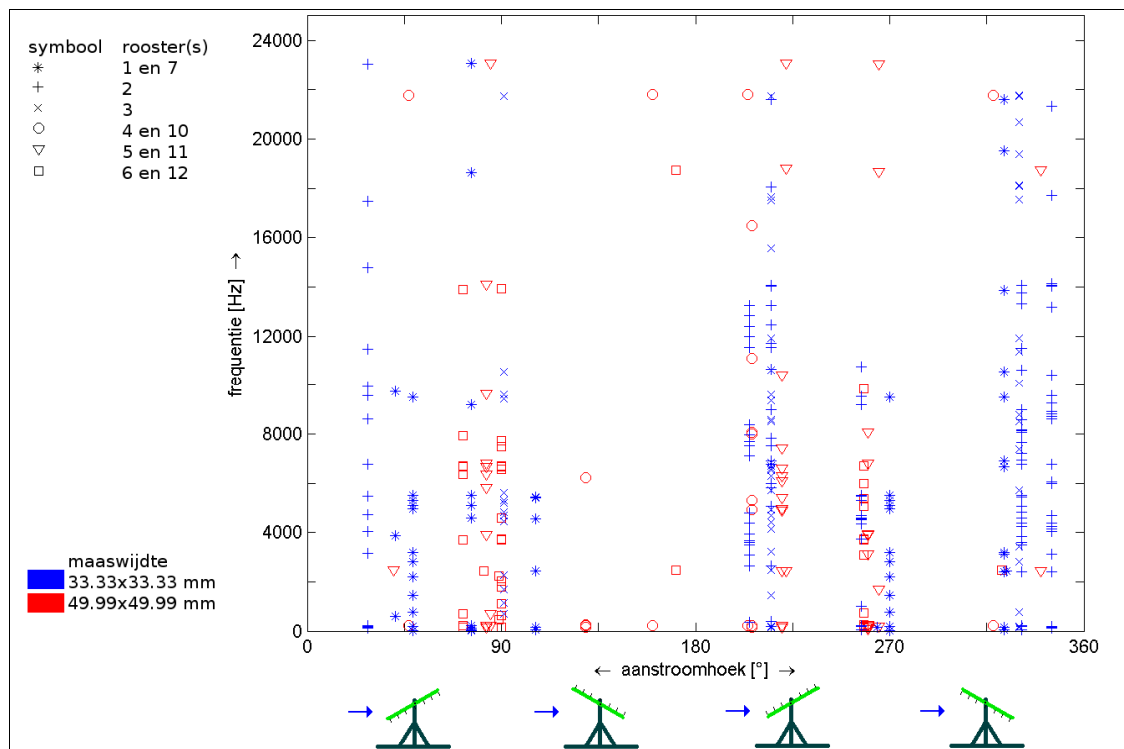
In figuur 45 zijn dezelfde resultaten nogmaals weergegeven, ditmaal echter gekleurd op basis van het onderscheid in maaswijdte terwijl de kleuren in de vorige figuur nog betrekking hadden op de draagstaven. Helaas kan noch op basis van maaswijdte, noch op basis van de draagstaaf een bepaalde hoek volledig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

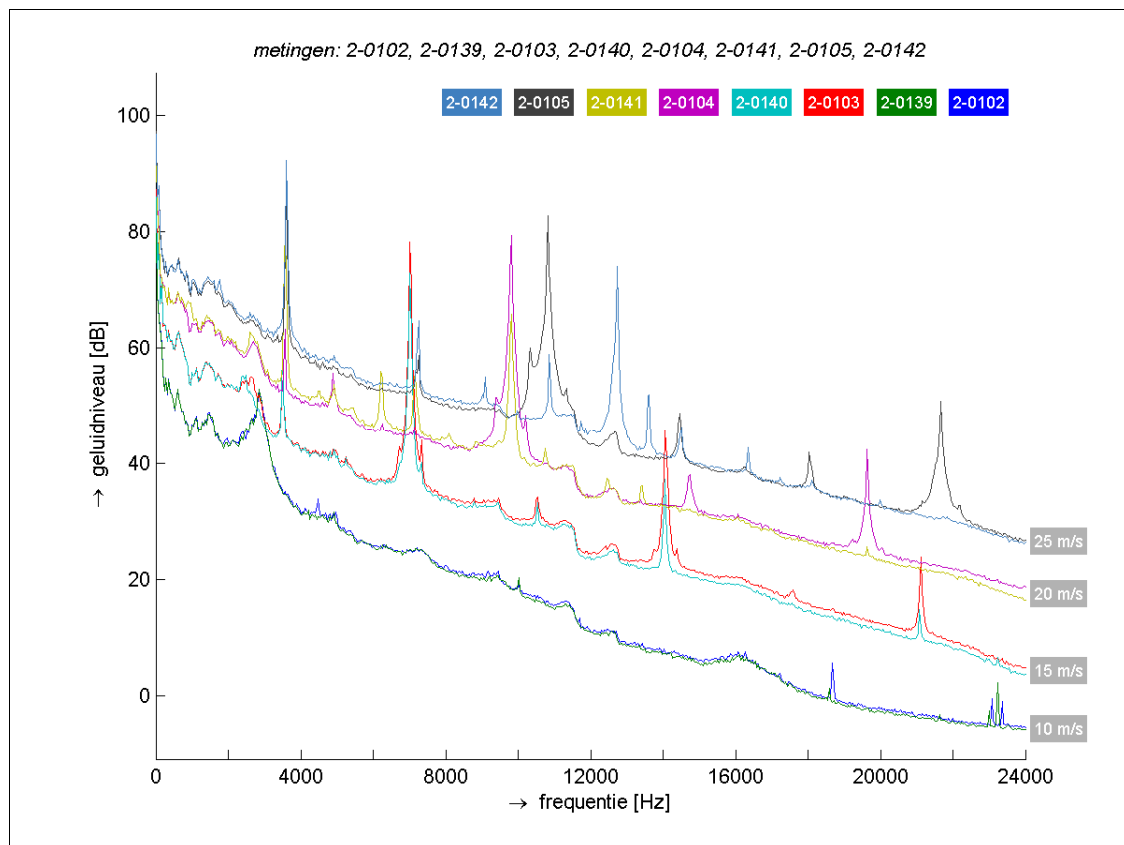
Deze twee roosters bestaan vertonen sterke overeenkomsten voor wat betreft de hoeken waaronder tonaal geluid voorkomt. Alle hoeken waarbij de afgeronde variant (rooster 7) resultaat oplevert komen (binnen een marge van +/- 5°) overeen met een hoek waarbij ook (scherpkantig) rooster 1 een fluittoon liet 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.

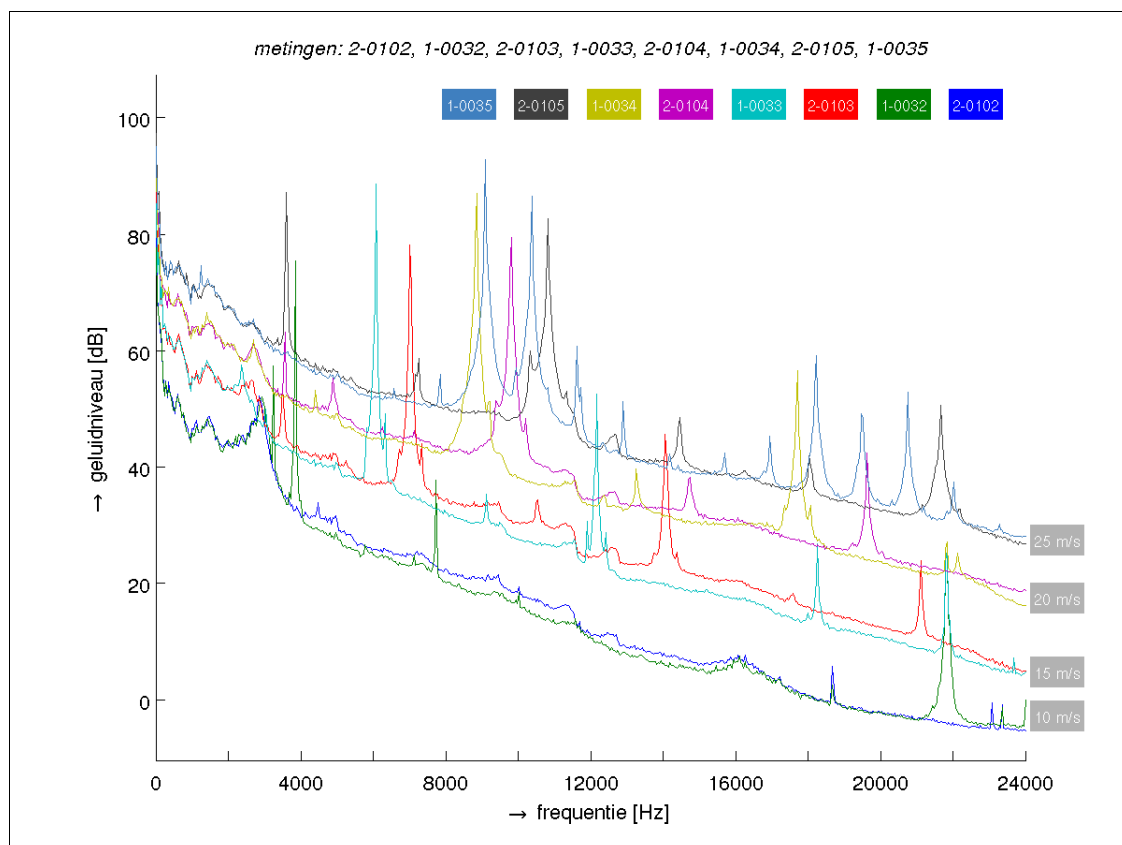
Roosters 1 en 3

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.

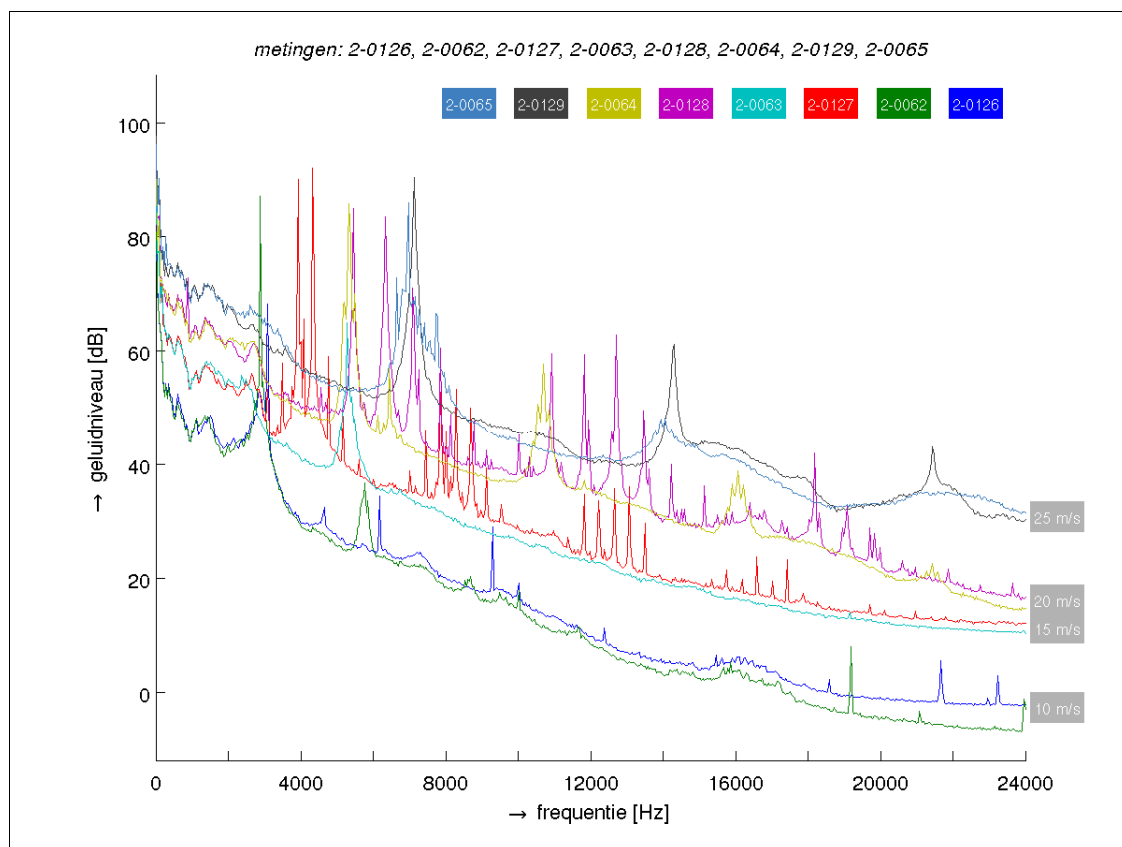
5.7.3 Maaswijdte

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 $70 \leq |\text{hoek}| \leq 90$. 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:

<i>n°</i>	<i>Meting</i>	<i>hoek [°]</i>	<i>golflengte [mm]</i>	<i>maasgrootte [mm]</i>
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	
8, 9	-			33.33 x 33.33
10	(geen)			
11	2-0074 etc.	85 v.	48, 80	49.99 x 49.99
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

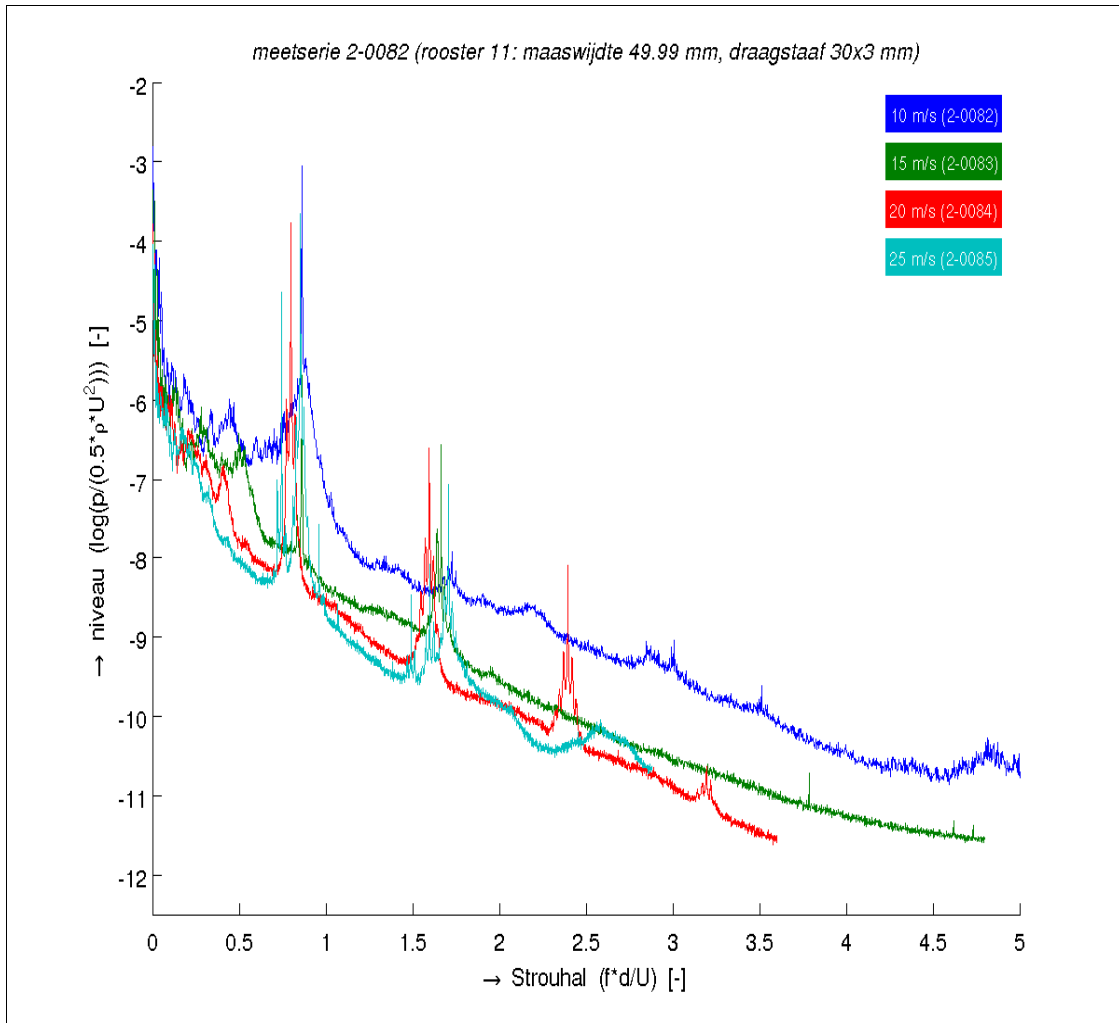
Om beter te kunnen vergelijken op excitatiemechanismen zonder dat zaken als windsnelheid daarbij in de weg zitten is het mogelijk de resultaten met behulp van het dimensieloos Strouhalgetal weer te geven:

$$St = \frac{f \cdot l}{U} \quad [-] \quad (13)$$

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.

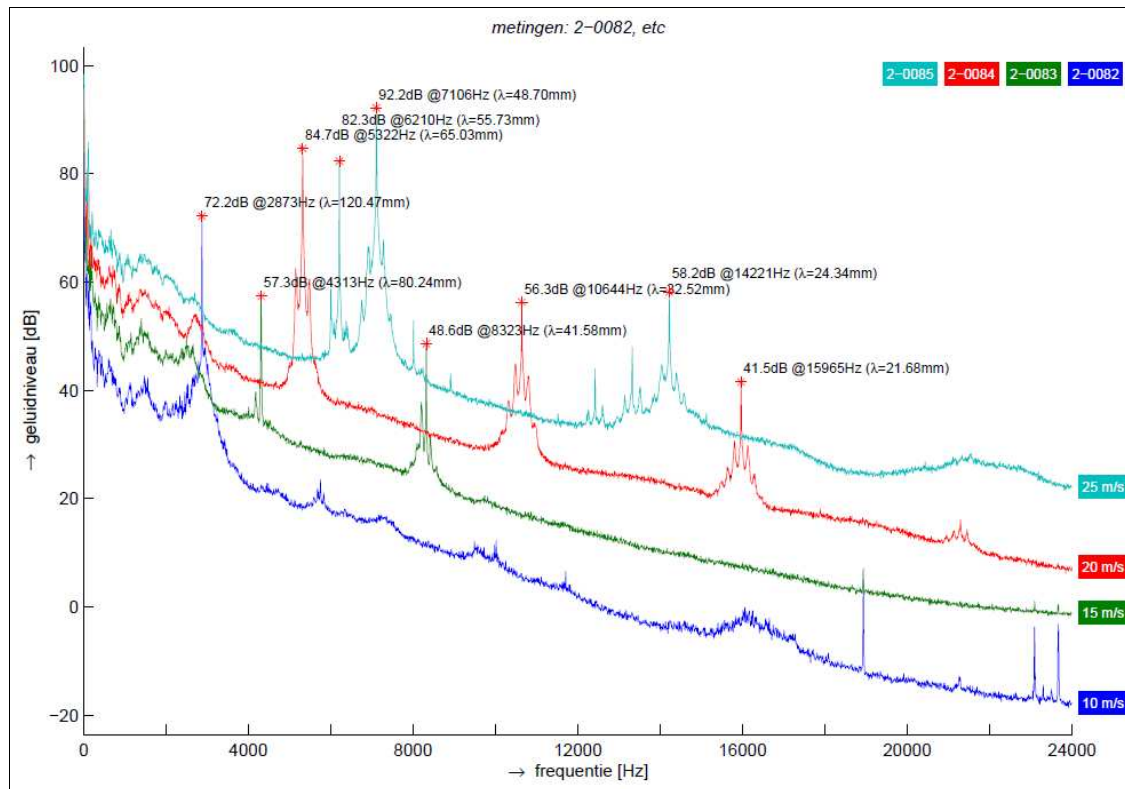
$$y = \frac{p_{\text{gemeten}}}{p_{\text{dynamisch}}} = \frac{p_{\text{gemeten}}}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad [-] \quad (14)$$

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 veelvoud 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 ($St = 0.8, 1.6, \text{ en } 2.4$). 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:



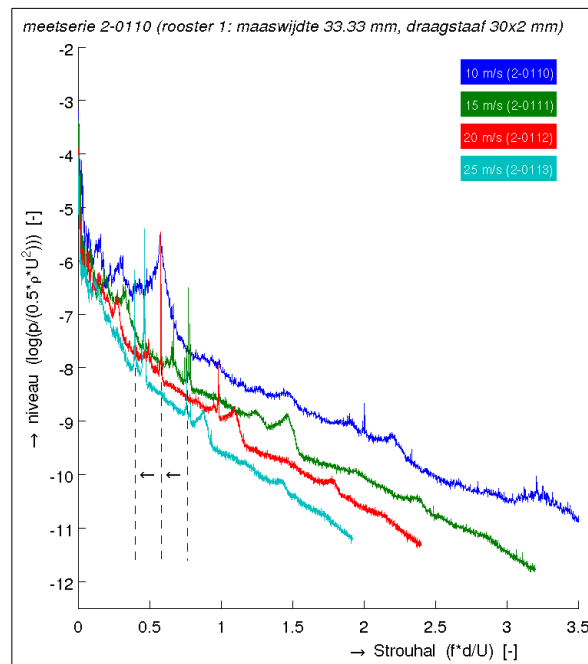
figuur 52 Ter vergelijking dezelfde meetseries als in figuur 51, ditmaal in de gebruikelijke weergave waarbij de frequentie is uitgezet tegen het geluidsniveau. De voordelen van het uitdrukken van de resultaten in het dimensieloze Strouhalgetal voor het vergelijken van metingen bij verschillende snelheden 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 op 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 waarden 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 waarden 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 waarden 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 ($0.2 \leq St \leq 0.4$) 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

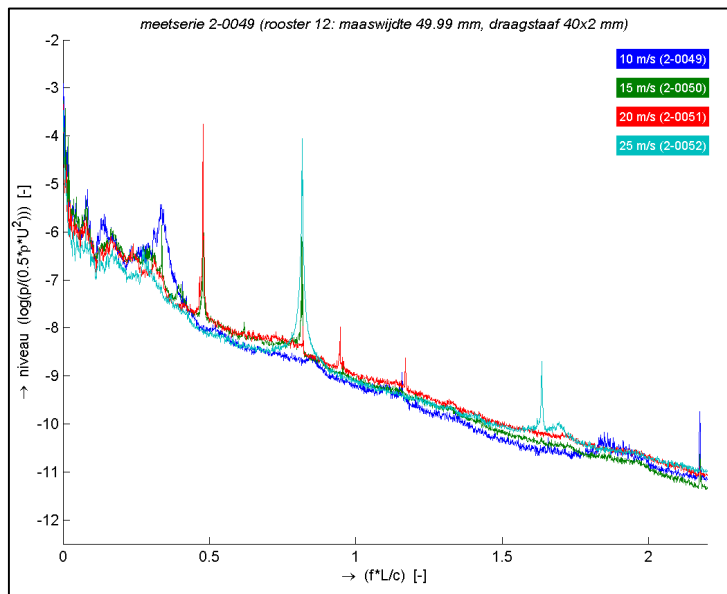
Een andere mogelijkheid om de resultaten dimensieloos te maken is door middel van:

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

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:

<i>roosters met maaswijdte 33.33</i>	<i>roosters met maaswijdte 49.99</i>
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 1m² 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, Berlin, 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 cylinders 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

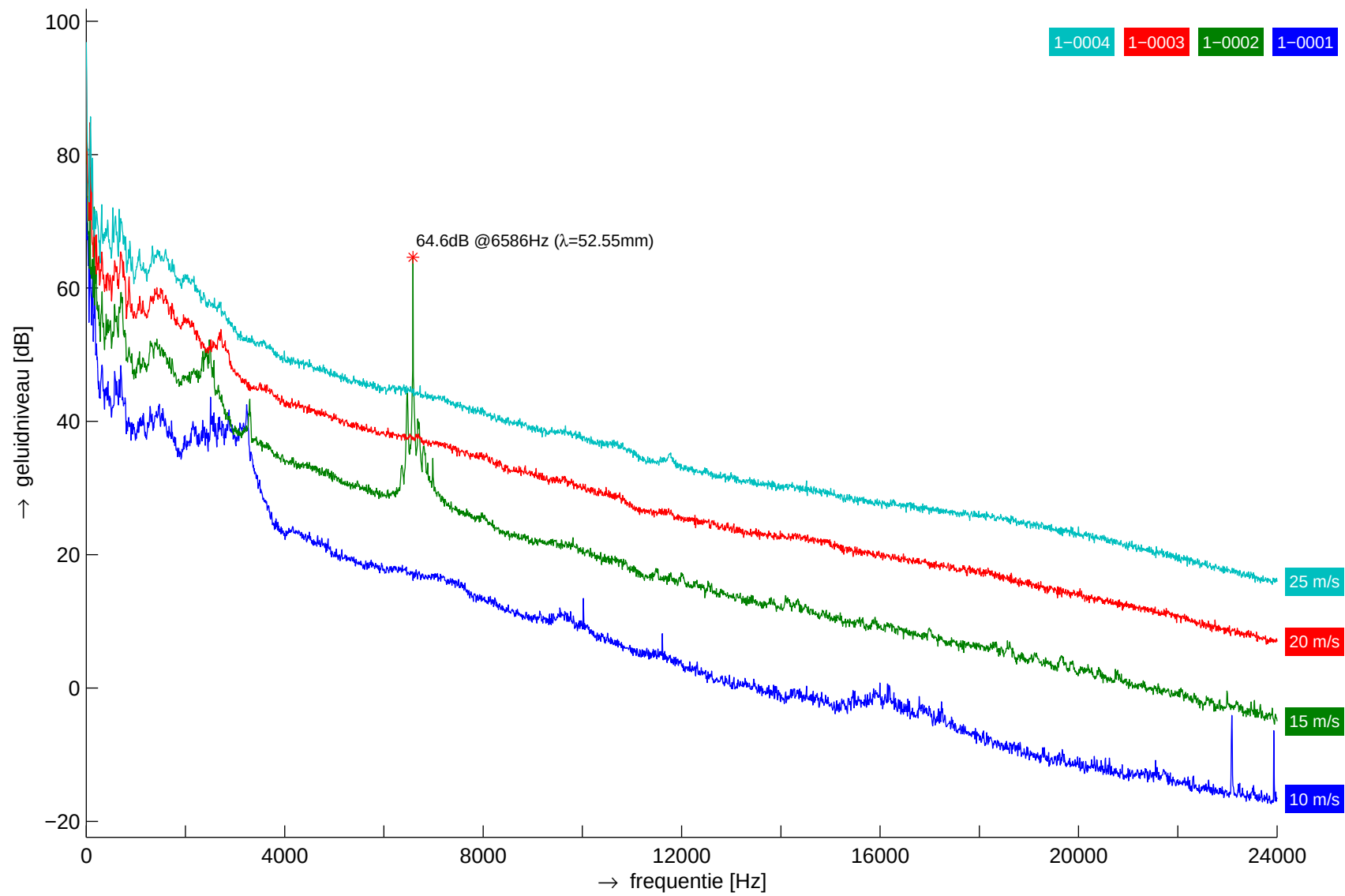
In deze bijlage is voor iedere serie metingen onder een vaste hoek maar bij vier verschillende windsnelheden een grafiek opgenomen waarin de frequentie tegen het geluidniveau is uitgezet. In de grafieken wordt de frequentie en de absolute hoogte van de pieken aangegeven.

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

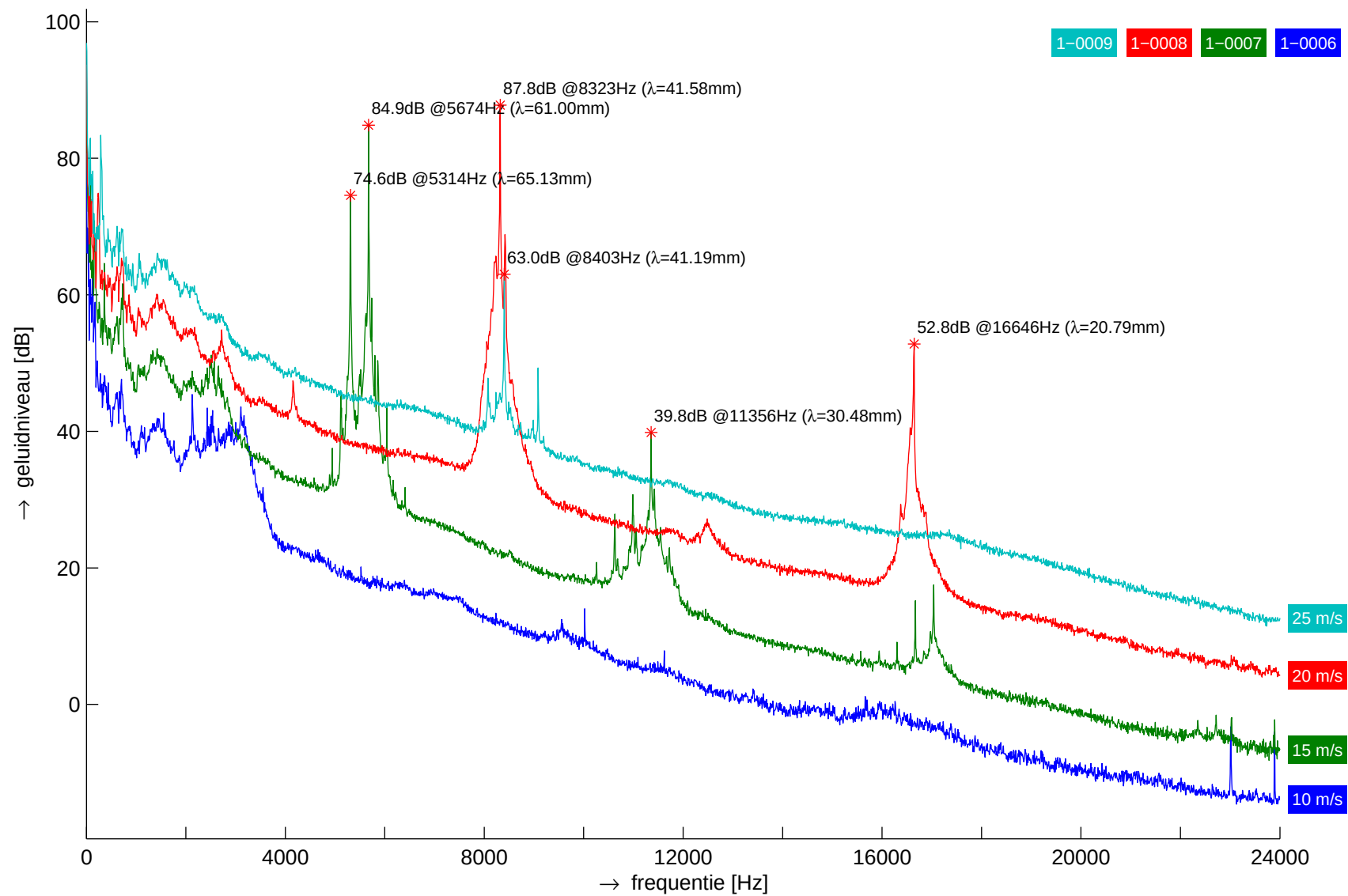
Roosterkenmerken

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		

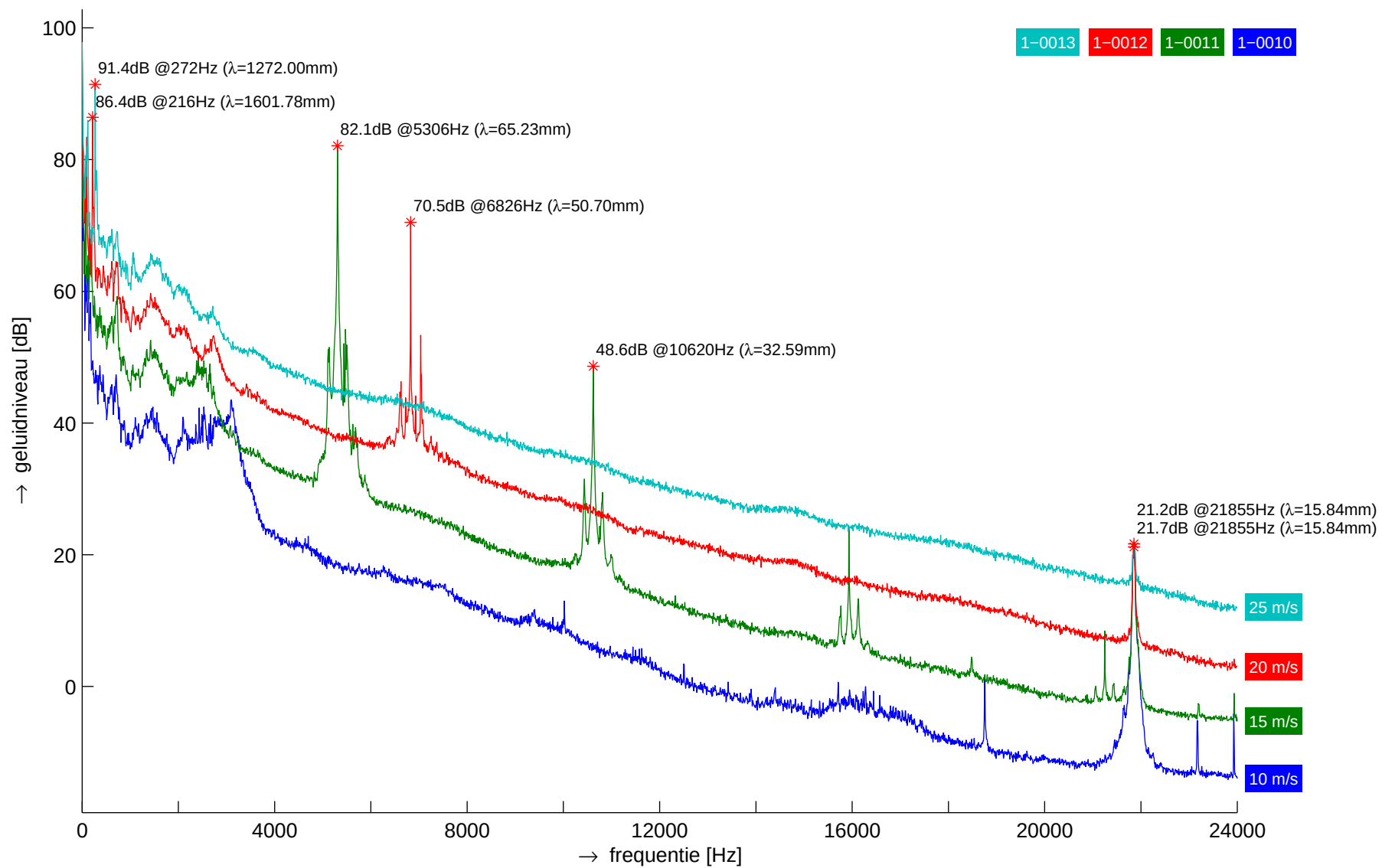
metingen: 1-0001, etc



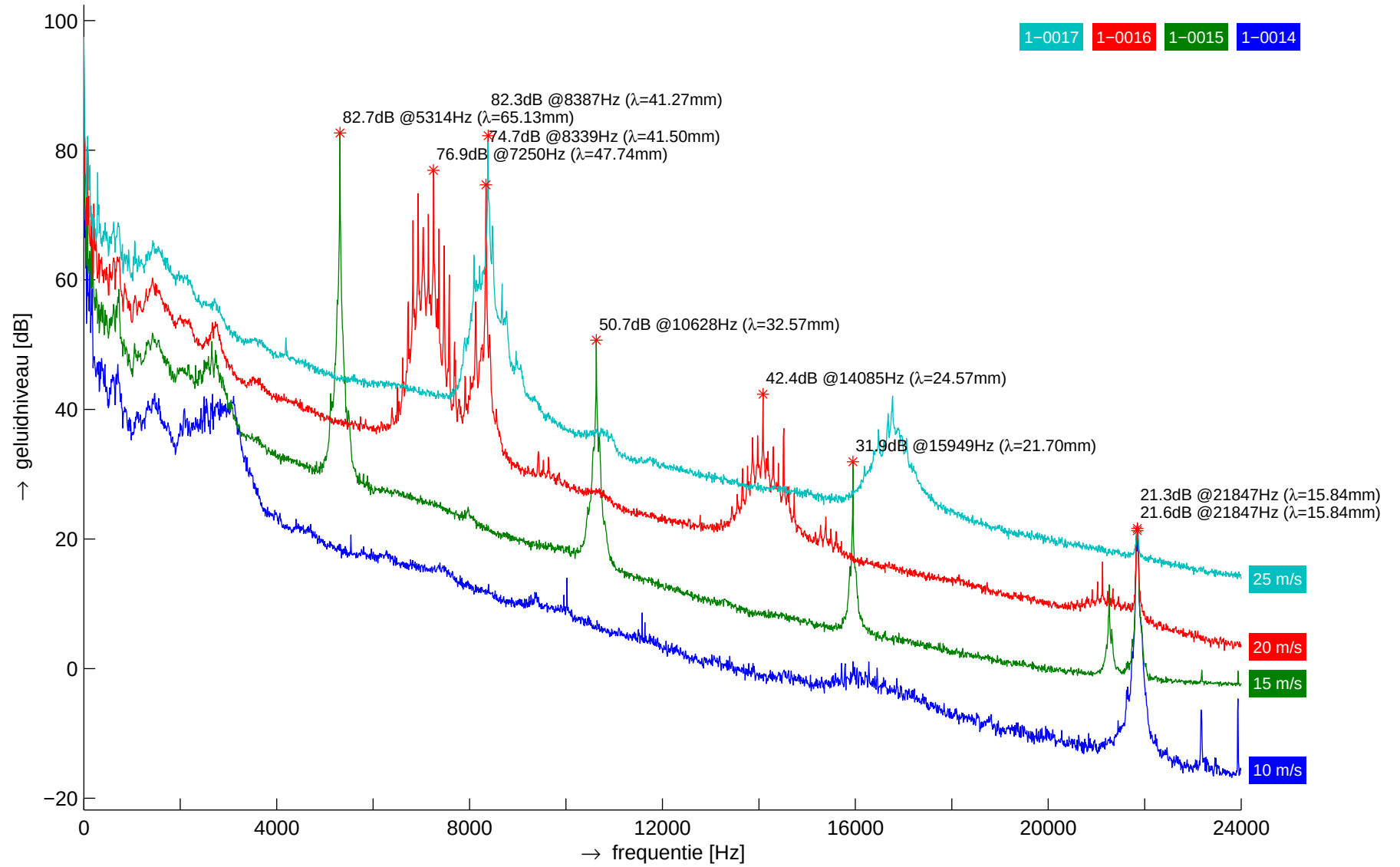
metingen: 1-0006, etc



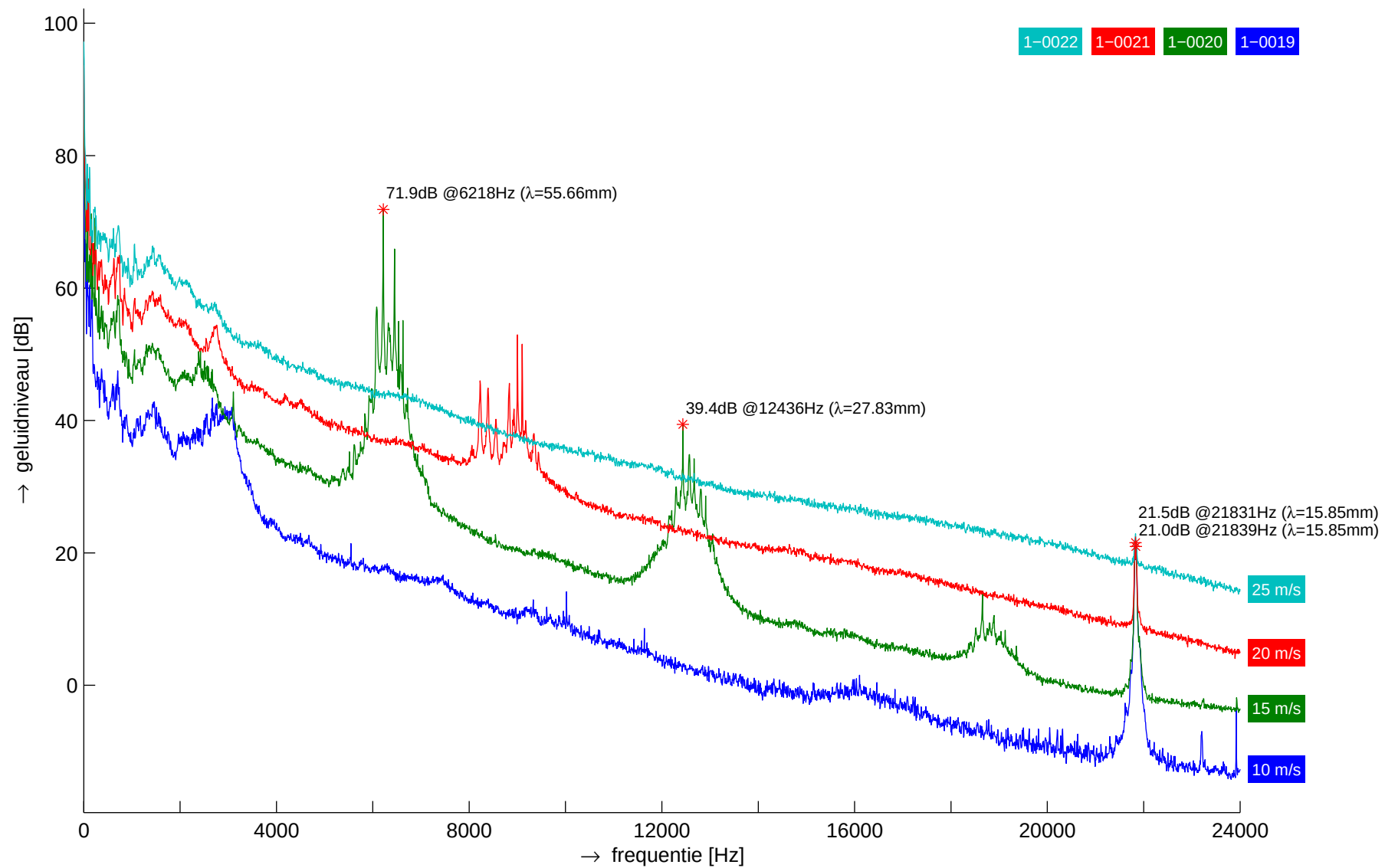
metingen: 1-0010, etc



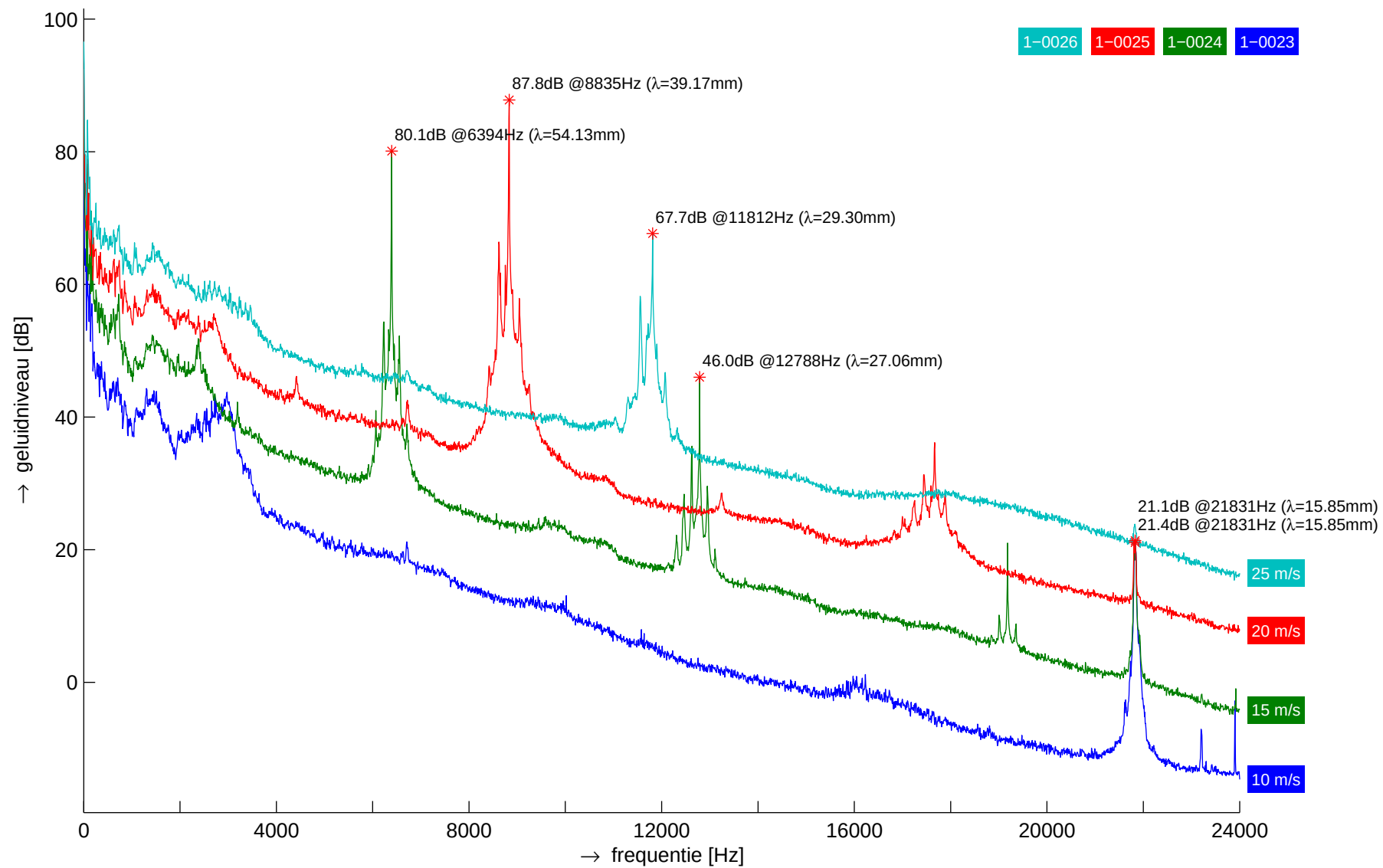
metingen: 1-0014, etc



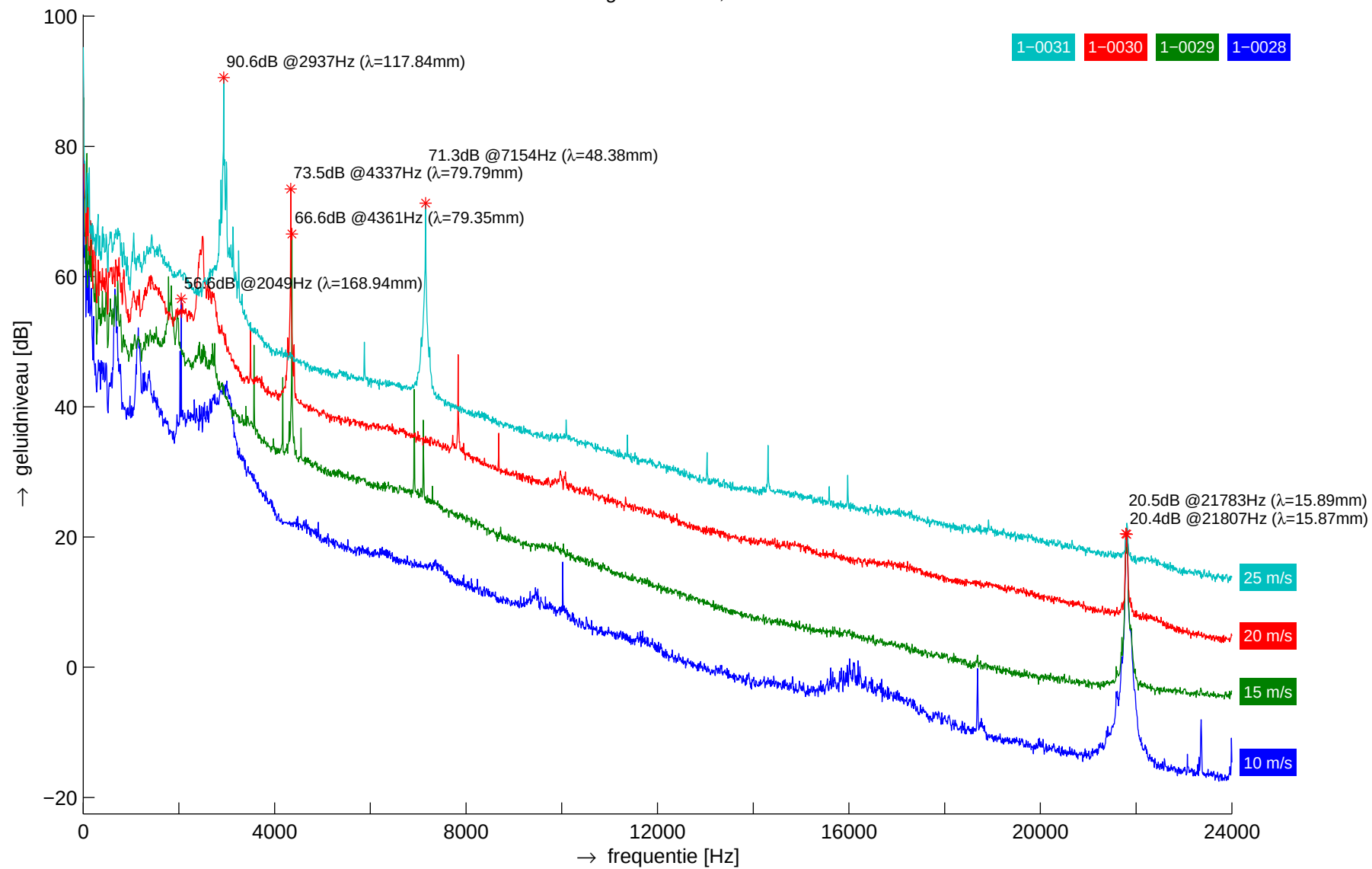
metingen: 1-0019, etc



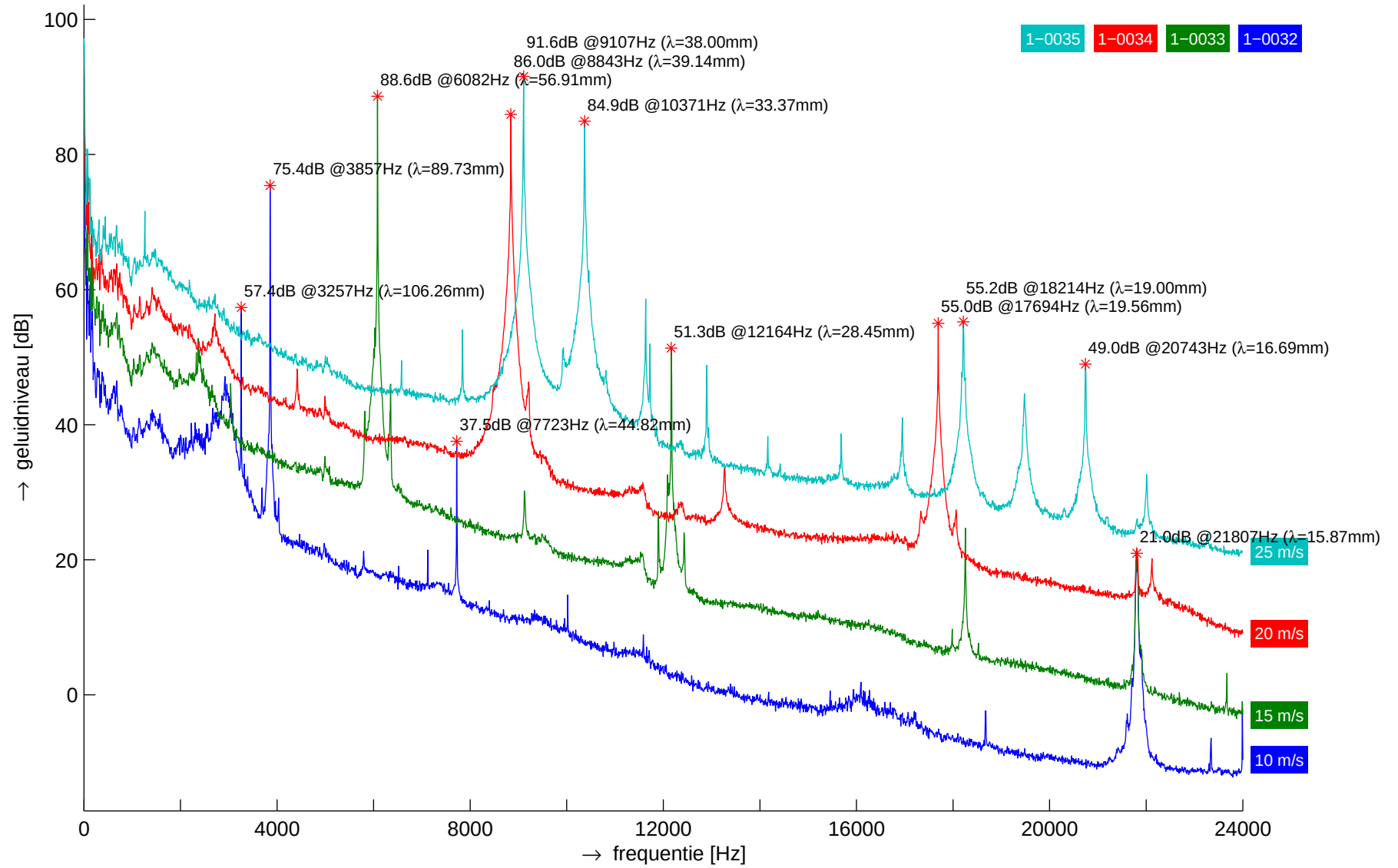
metingen: 1-0023, etc



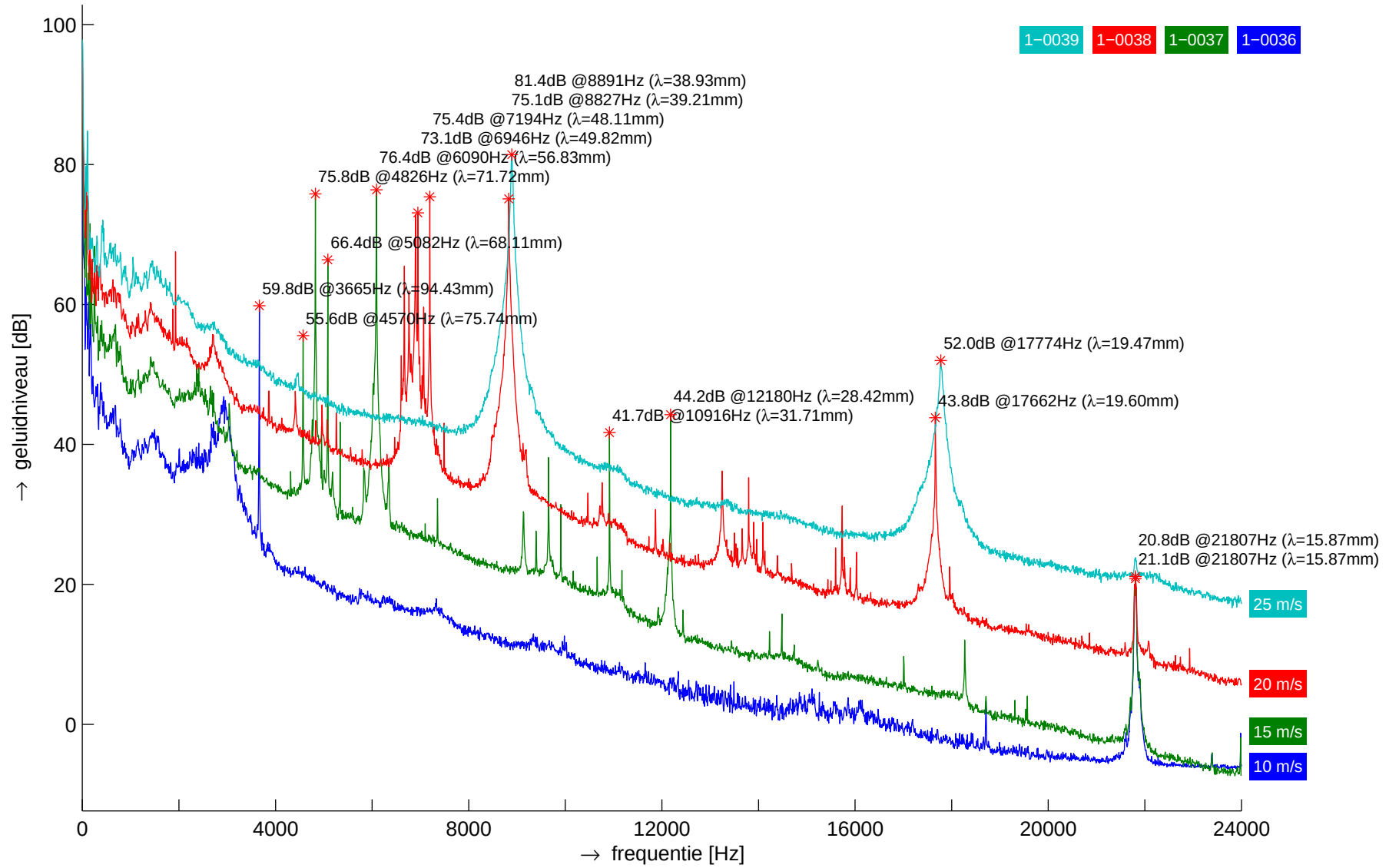
metingen: 1-0028, etc



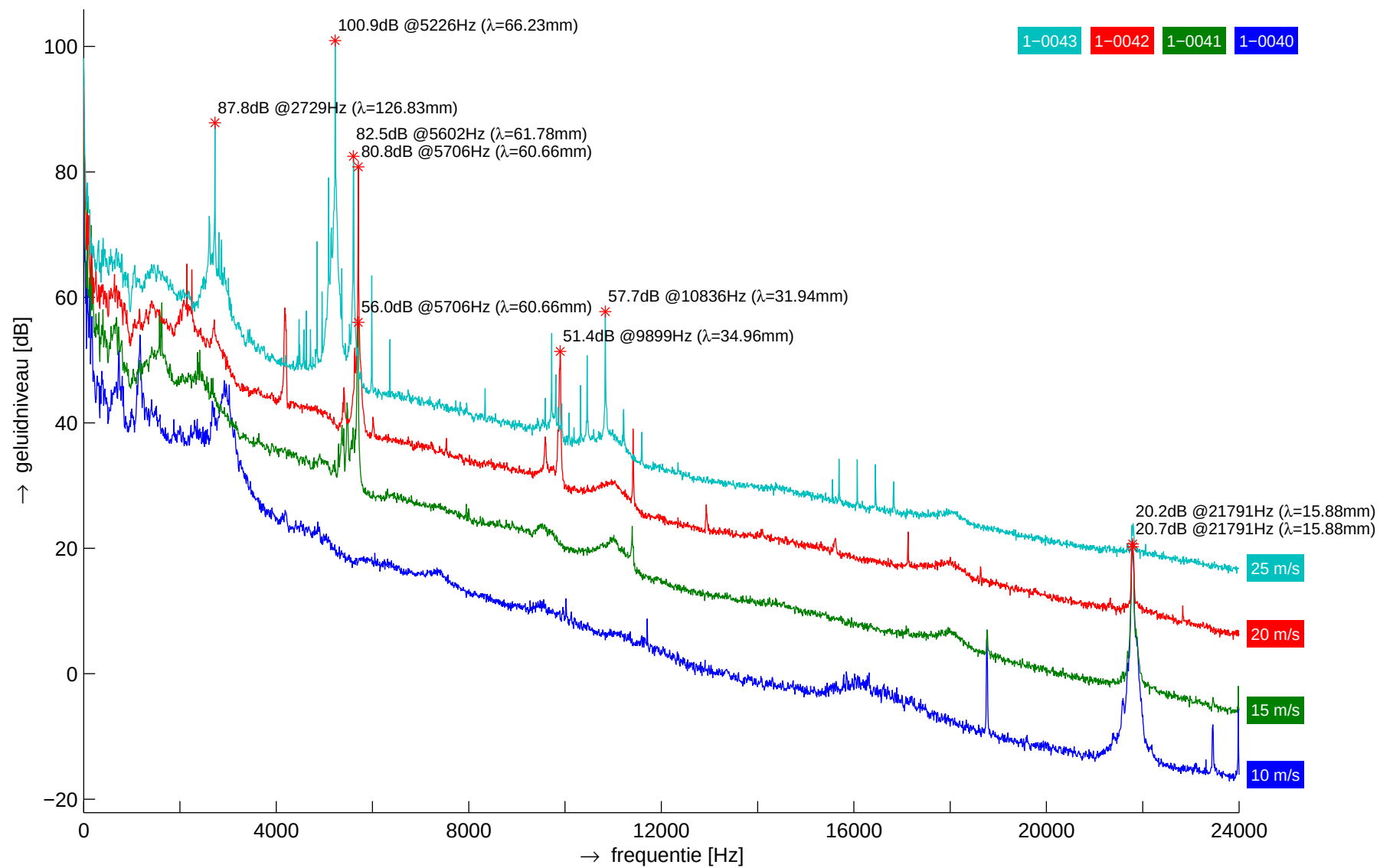
metingen: 1-0032, etc



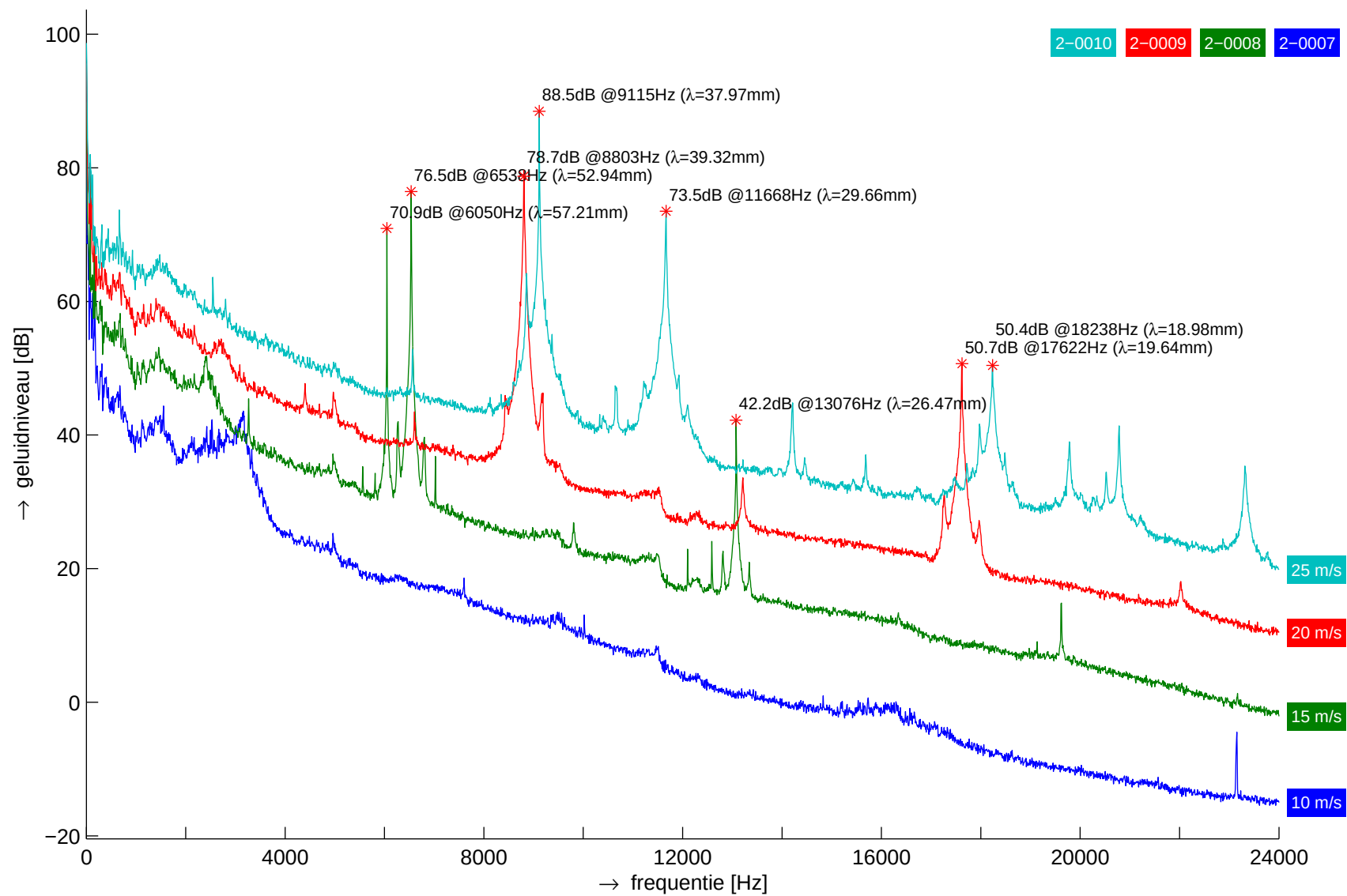
metingen: 1-0036, etc



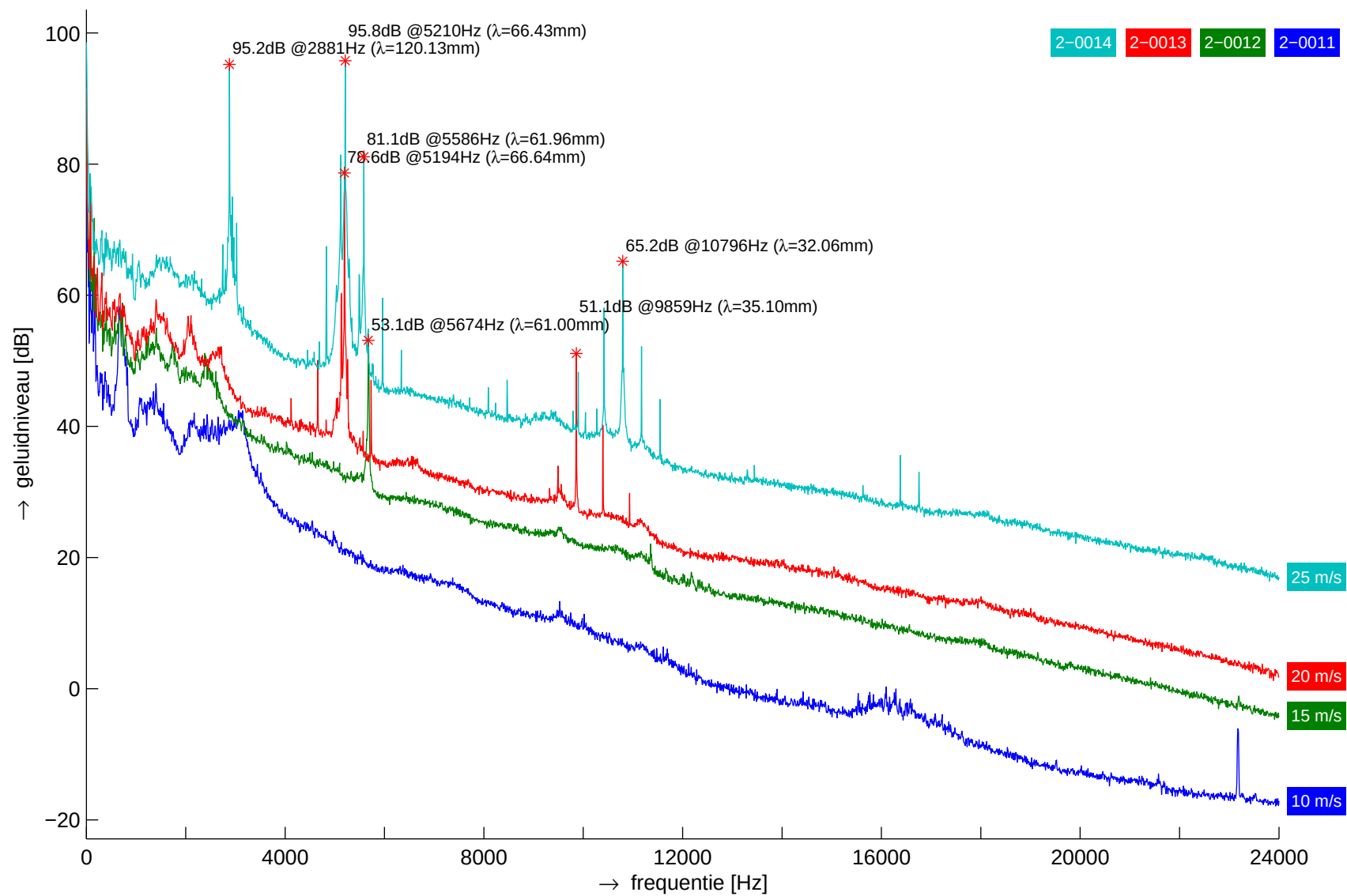
metingen: 1-0040, etc



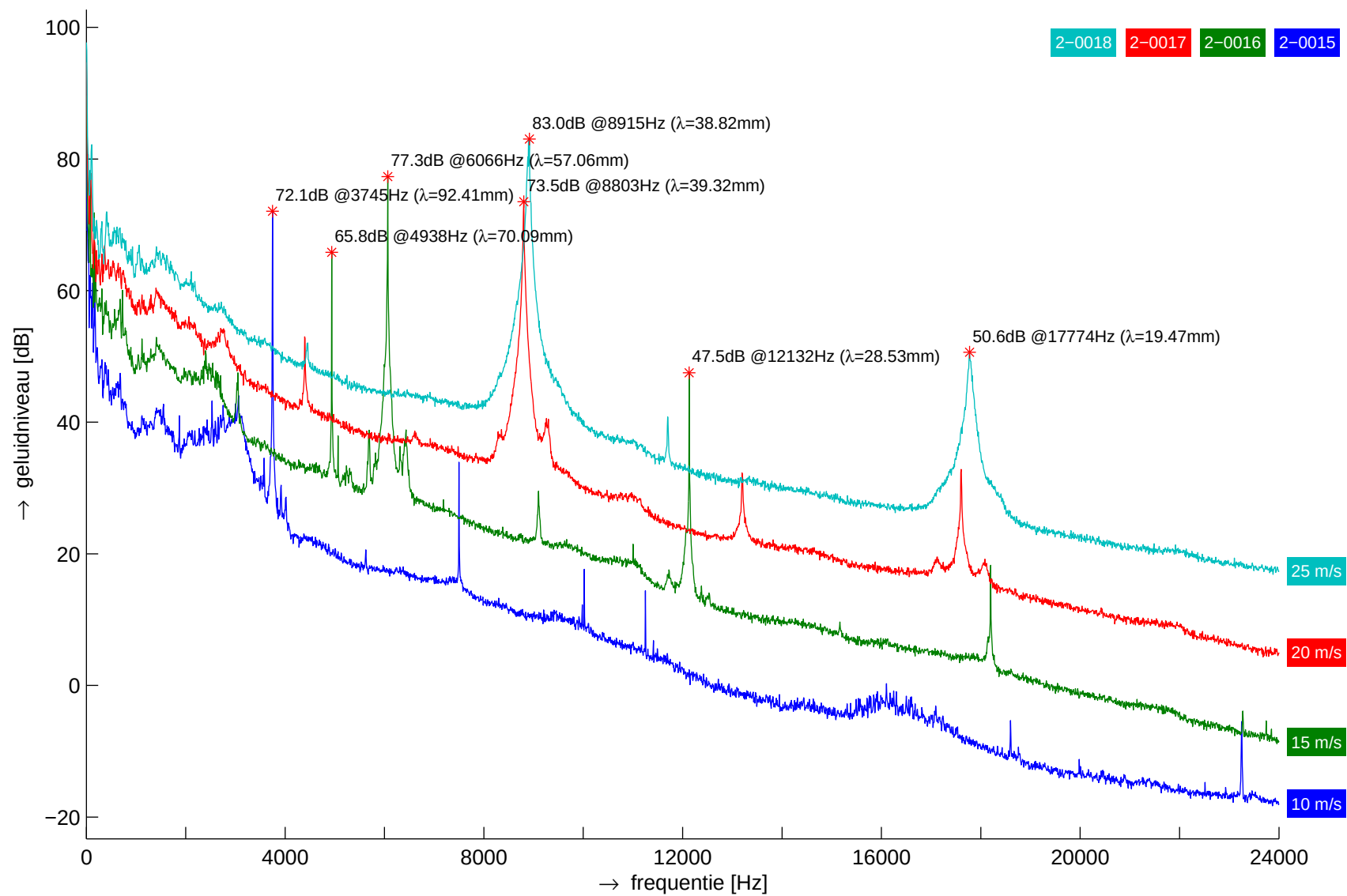
metingen: 2-0007, etc



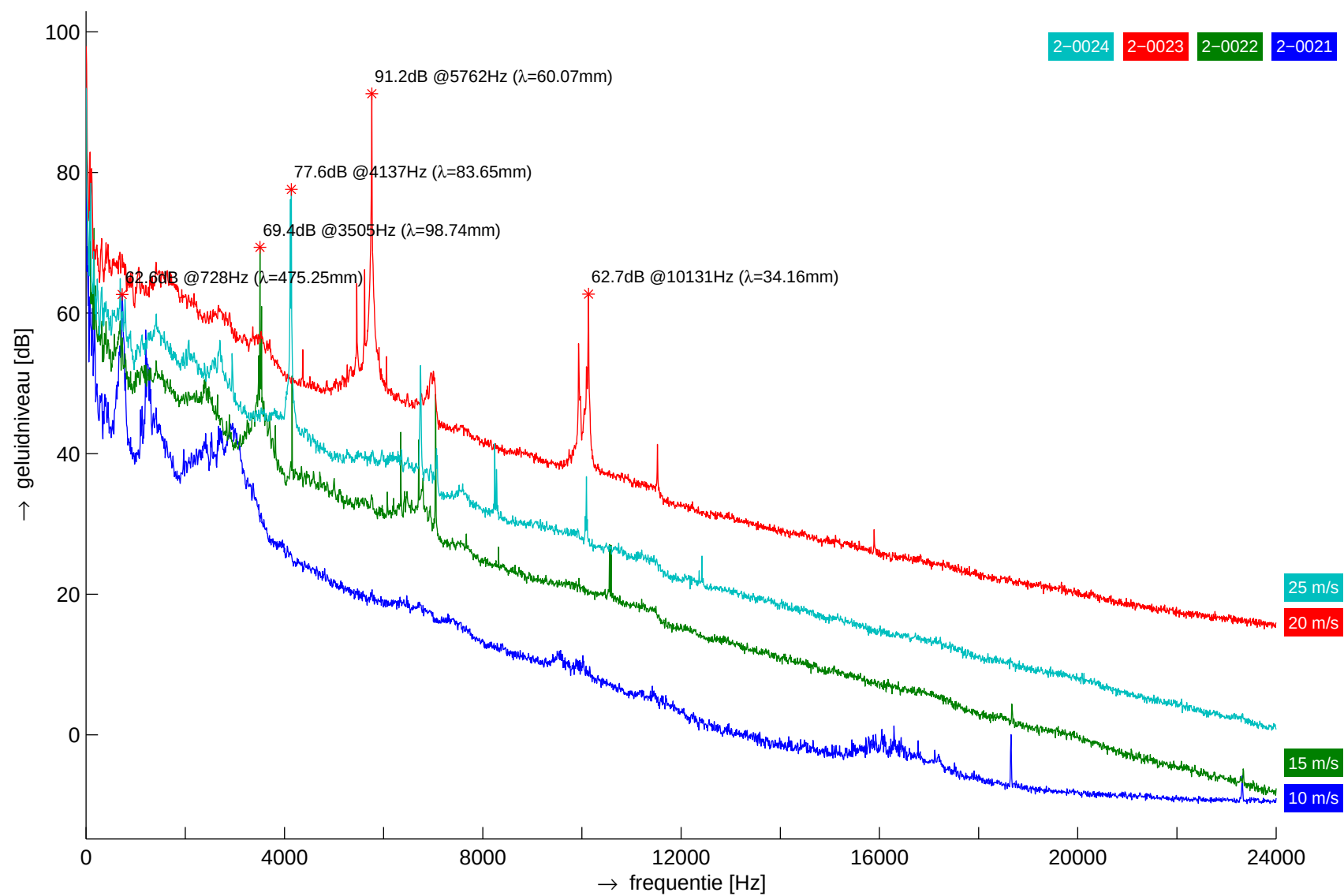
metingen: 2-0011, etc



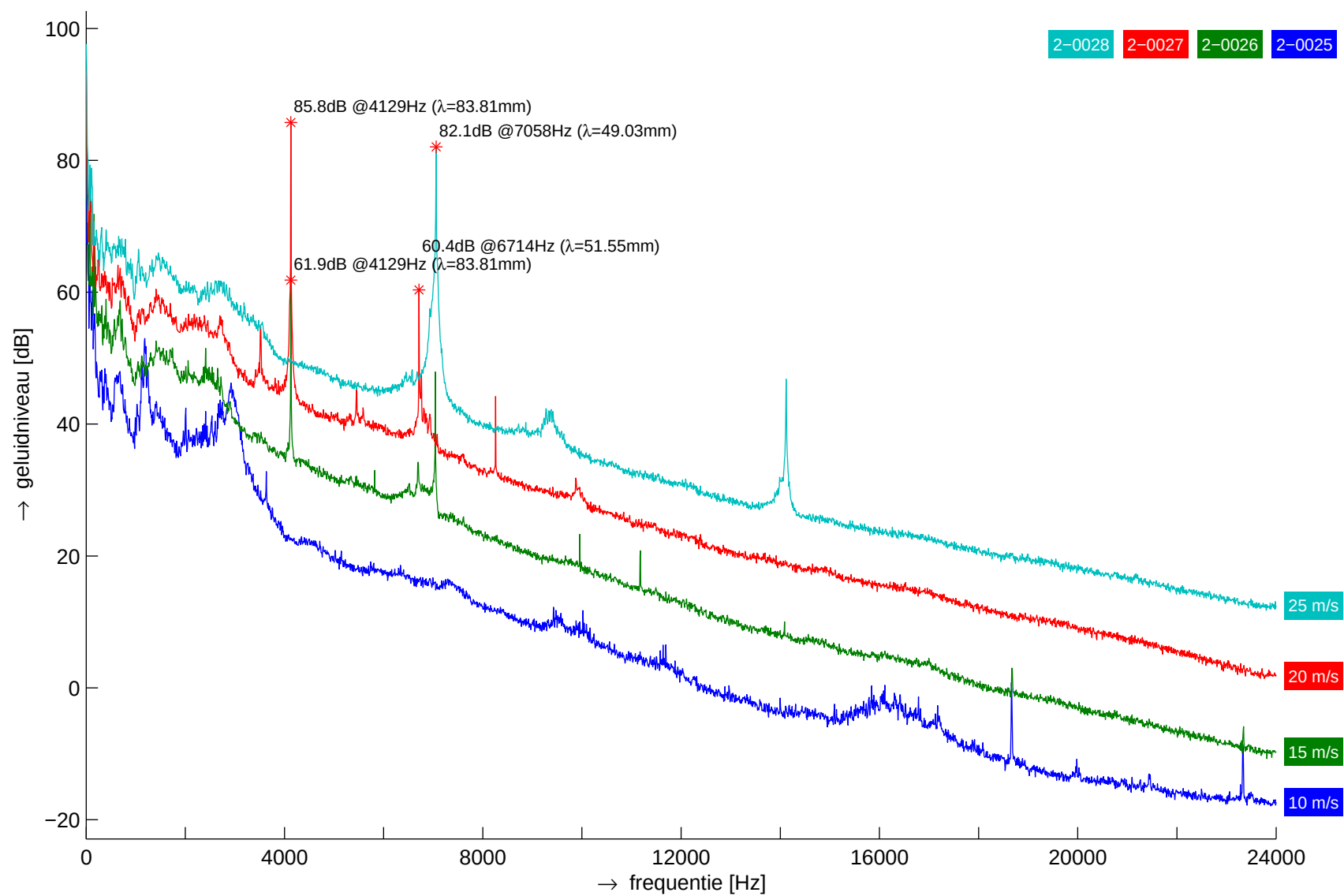
metingen: 2-0015, etc



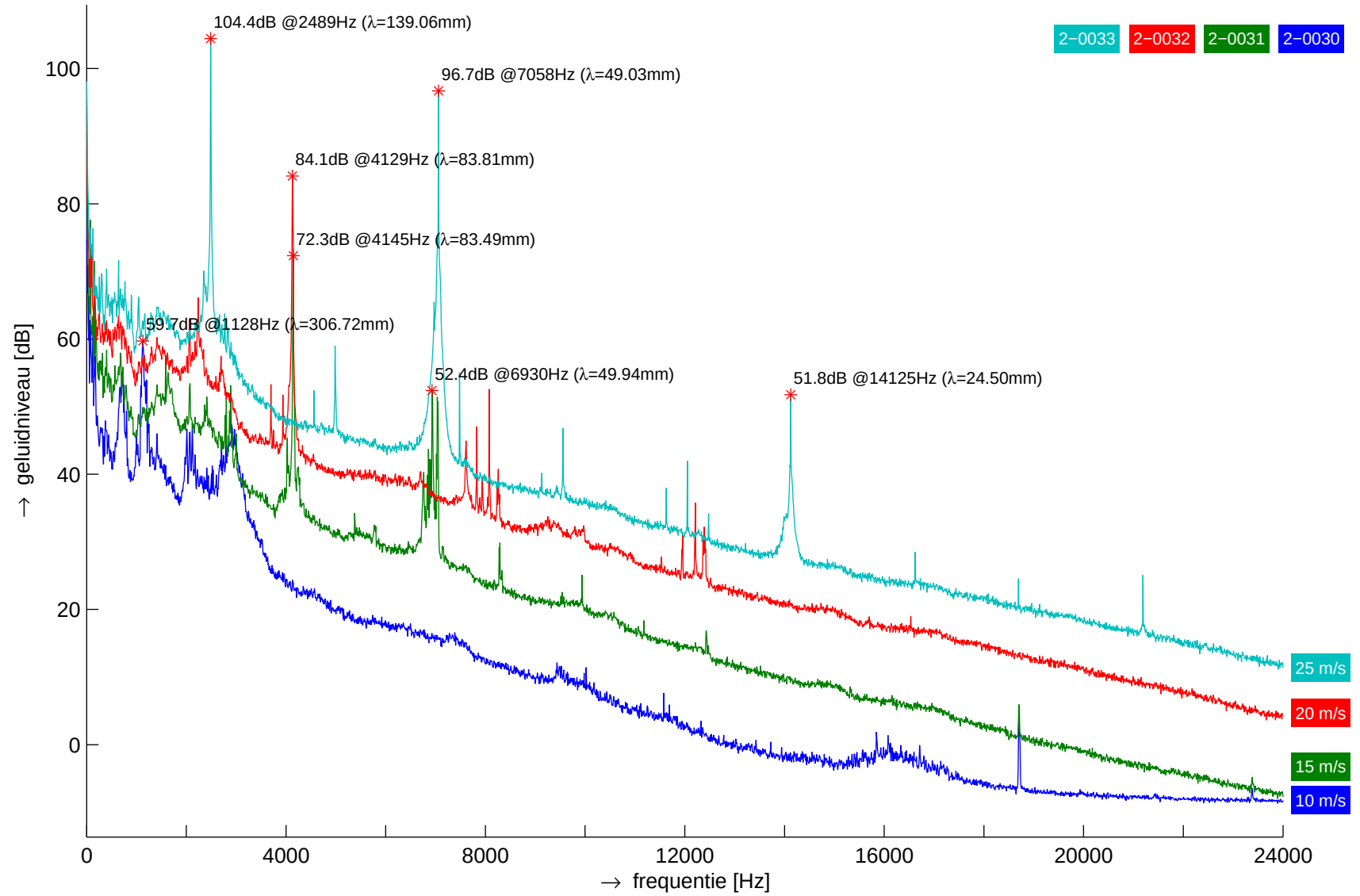
metingen: 2-0021, etc



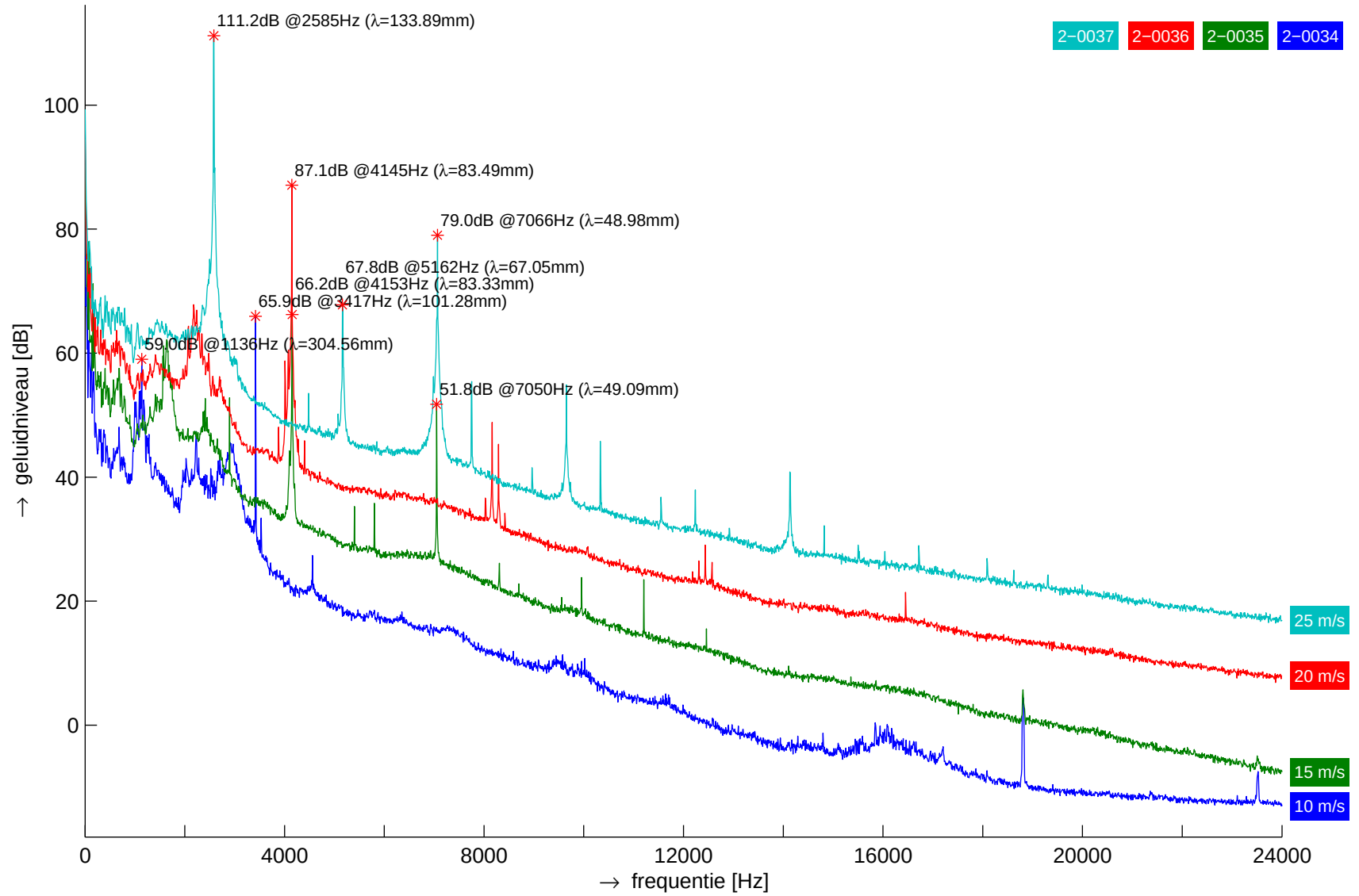
metingen: 2-0025, etc



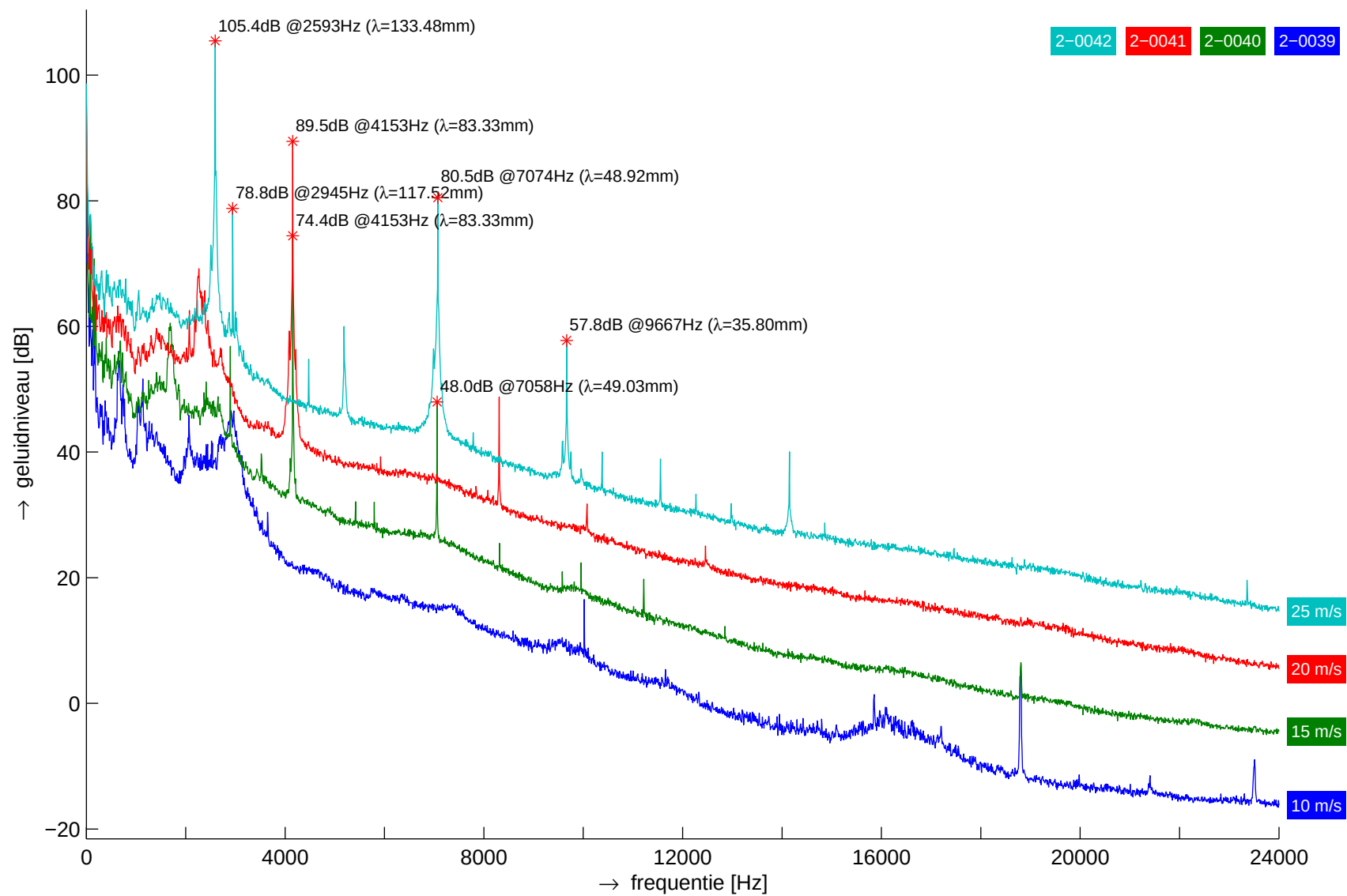
metingen: 2-0030, etc



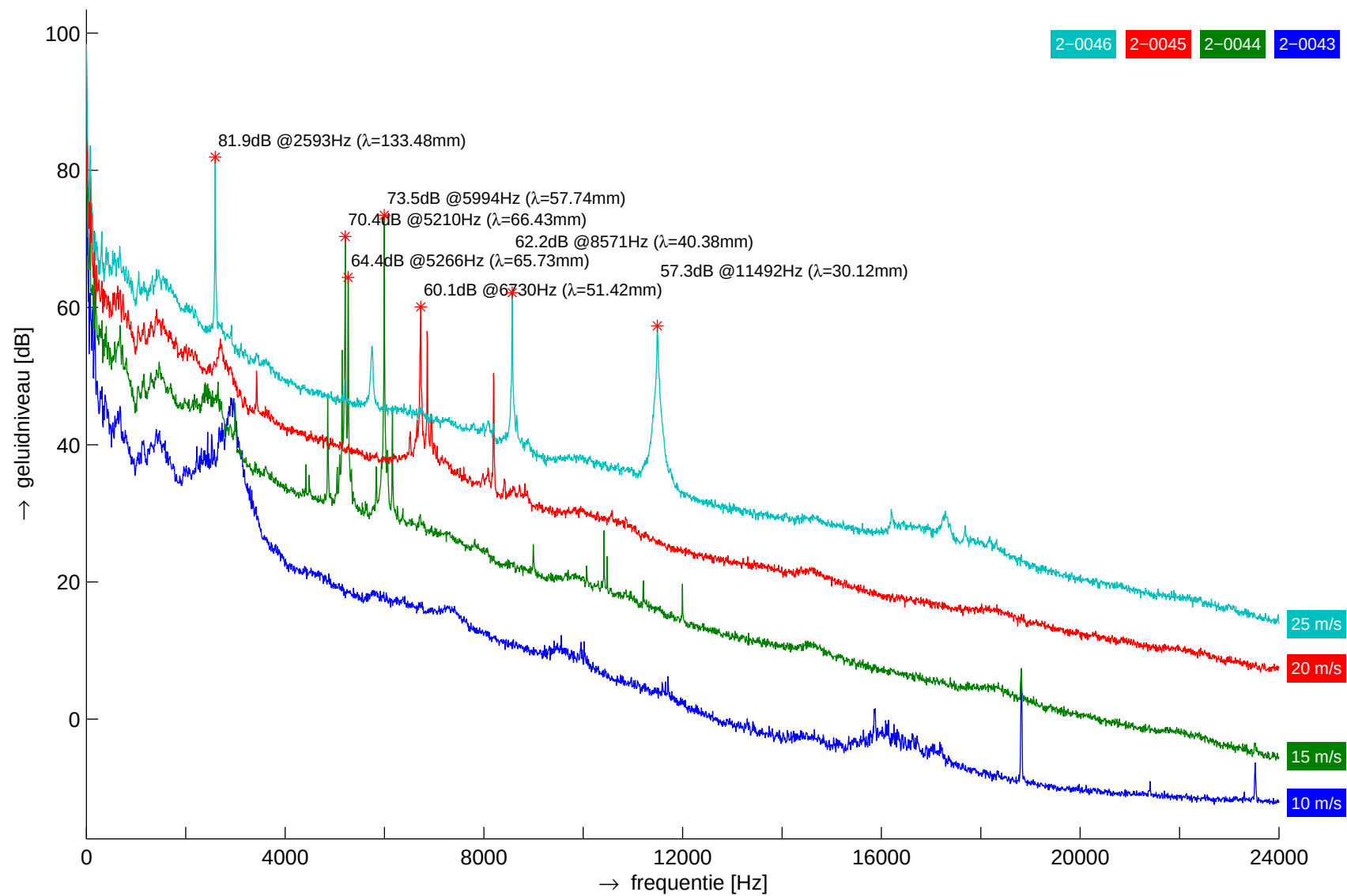
metingen: 2-0034, etc



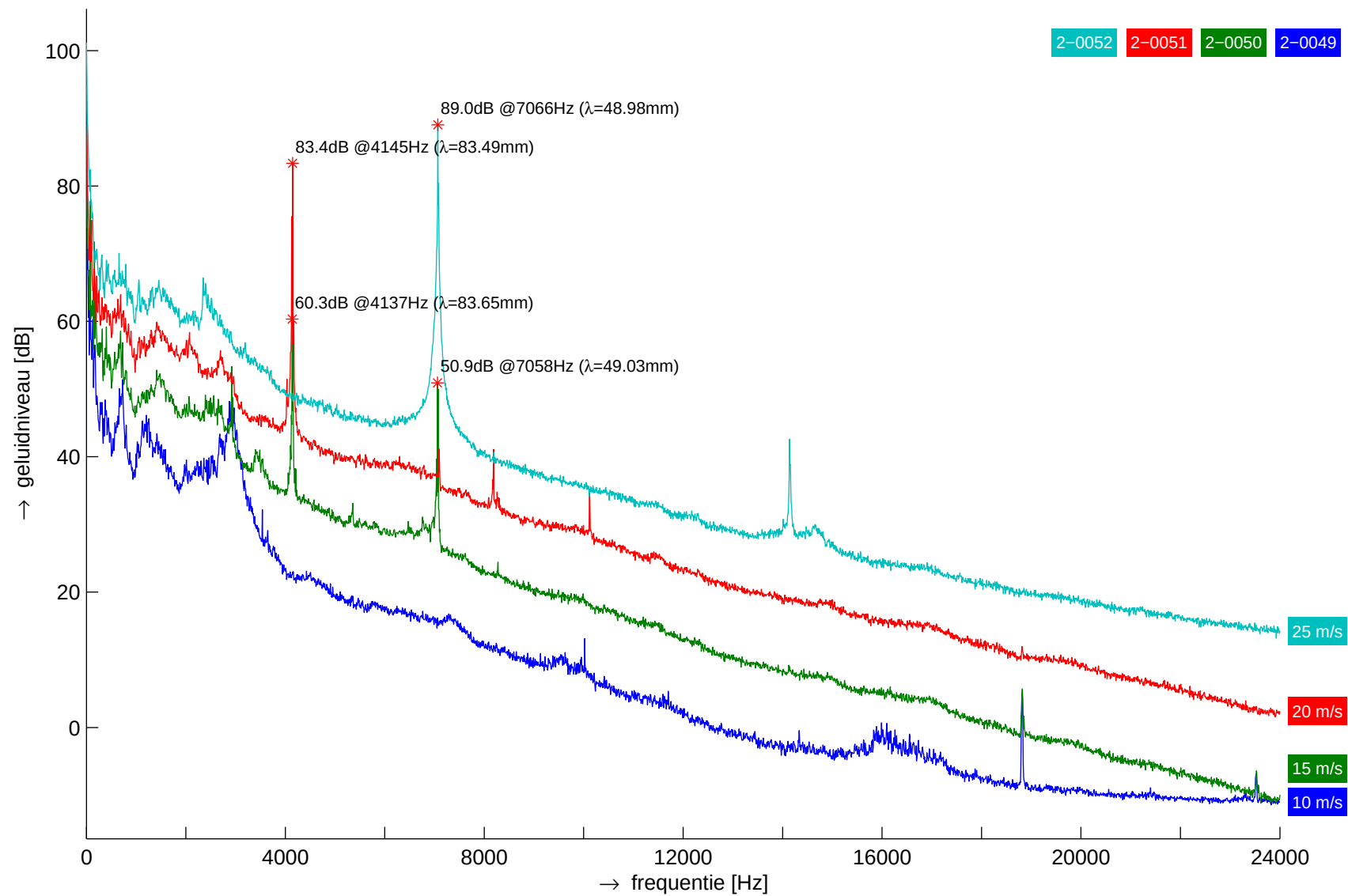
metingen: 2-0039, etc



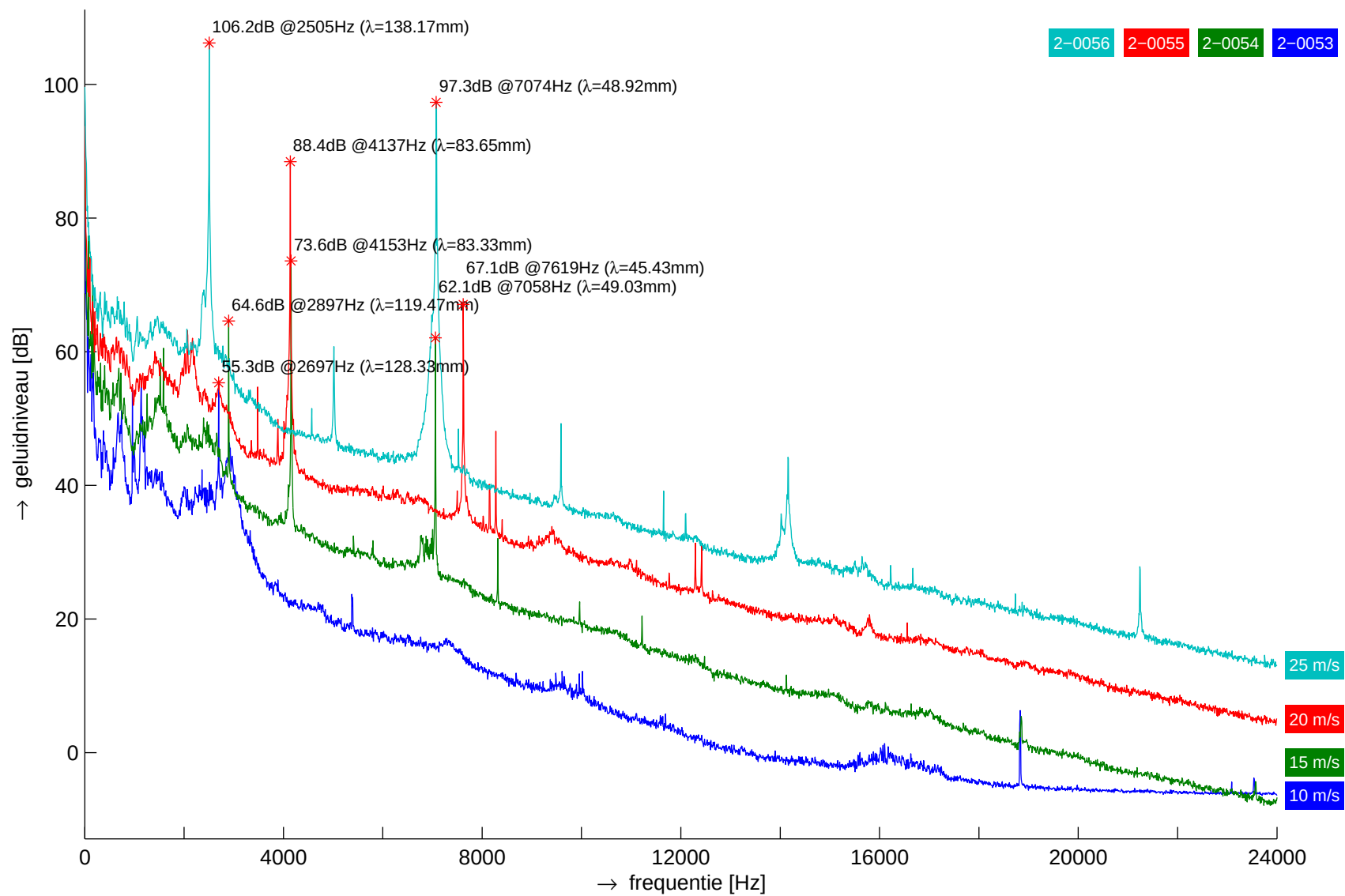
metingen: 2-0043, etc



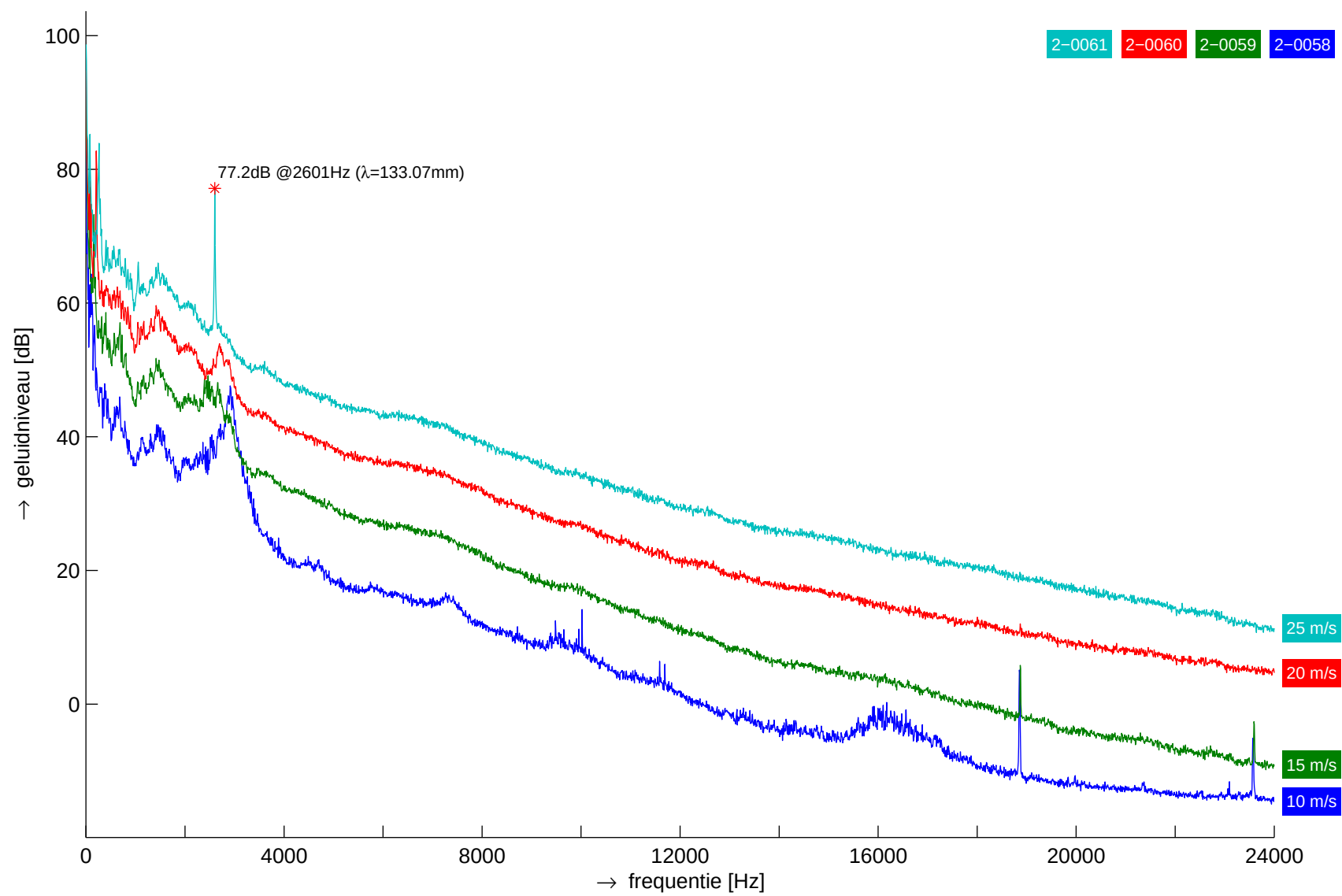
metingen: 2-0049, etc



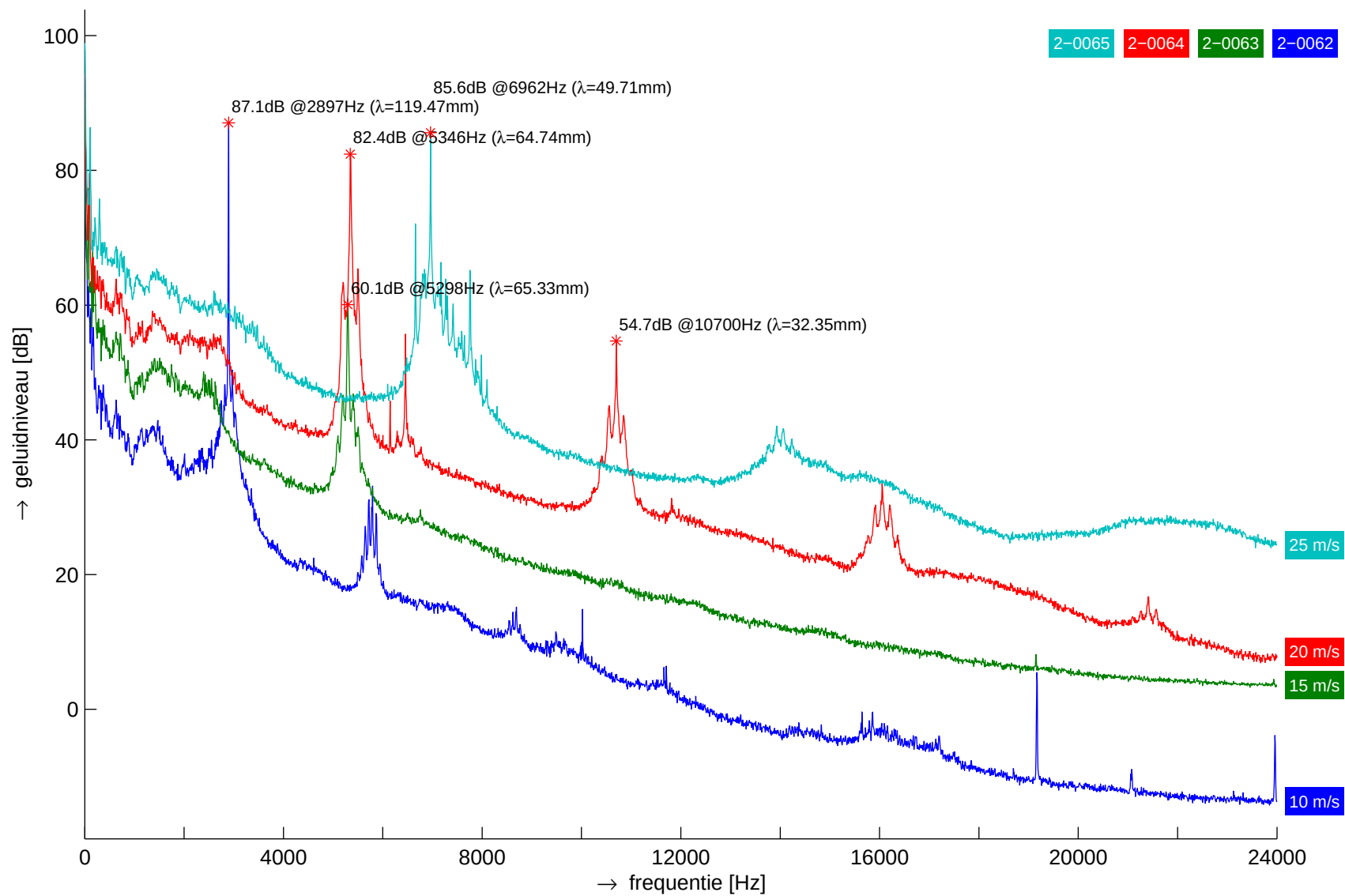
metingen: 2-0053, etc



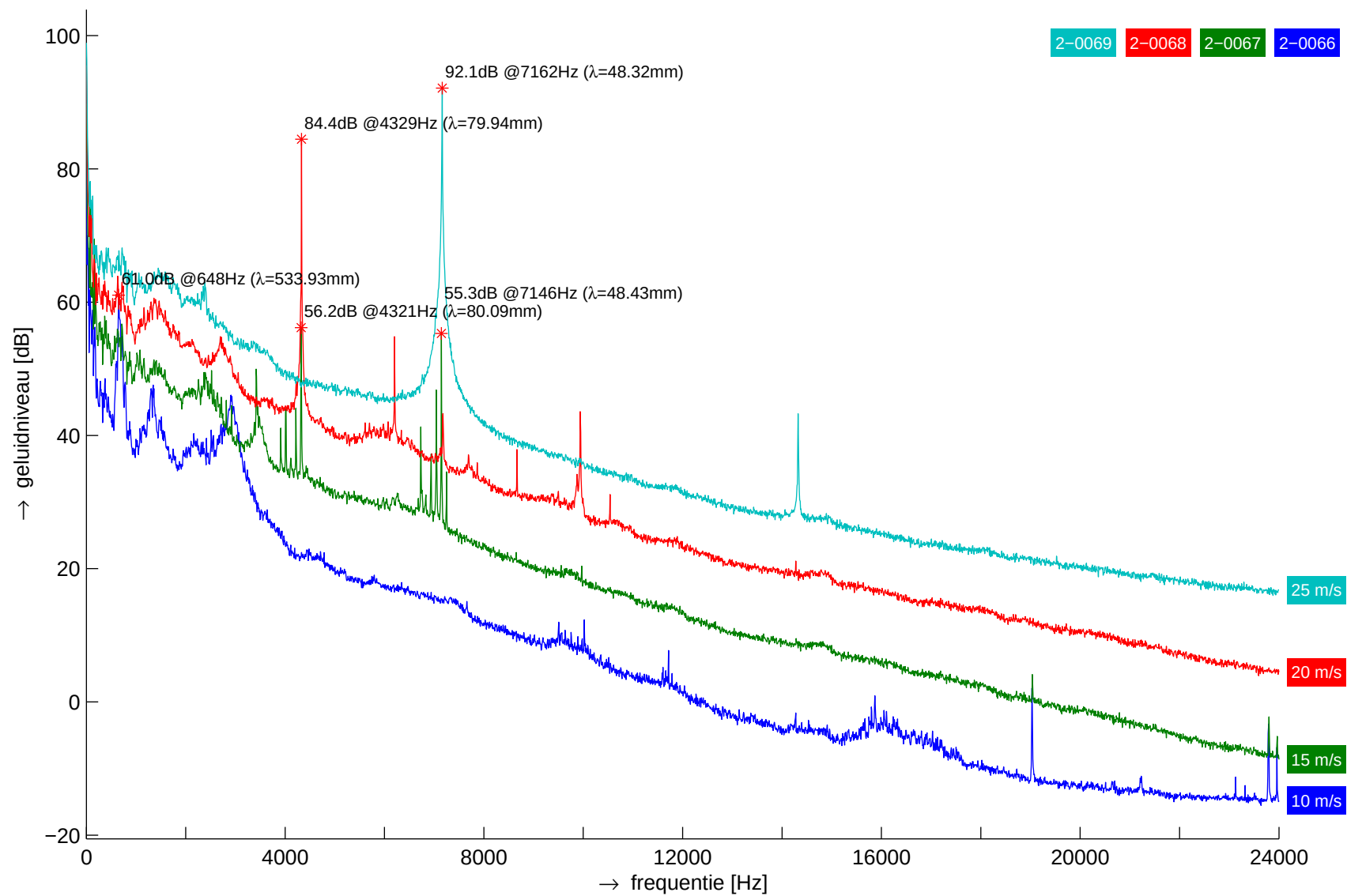
metingen: 2-0058, etc



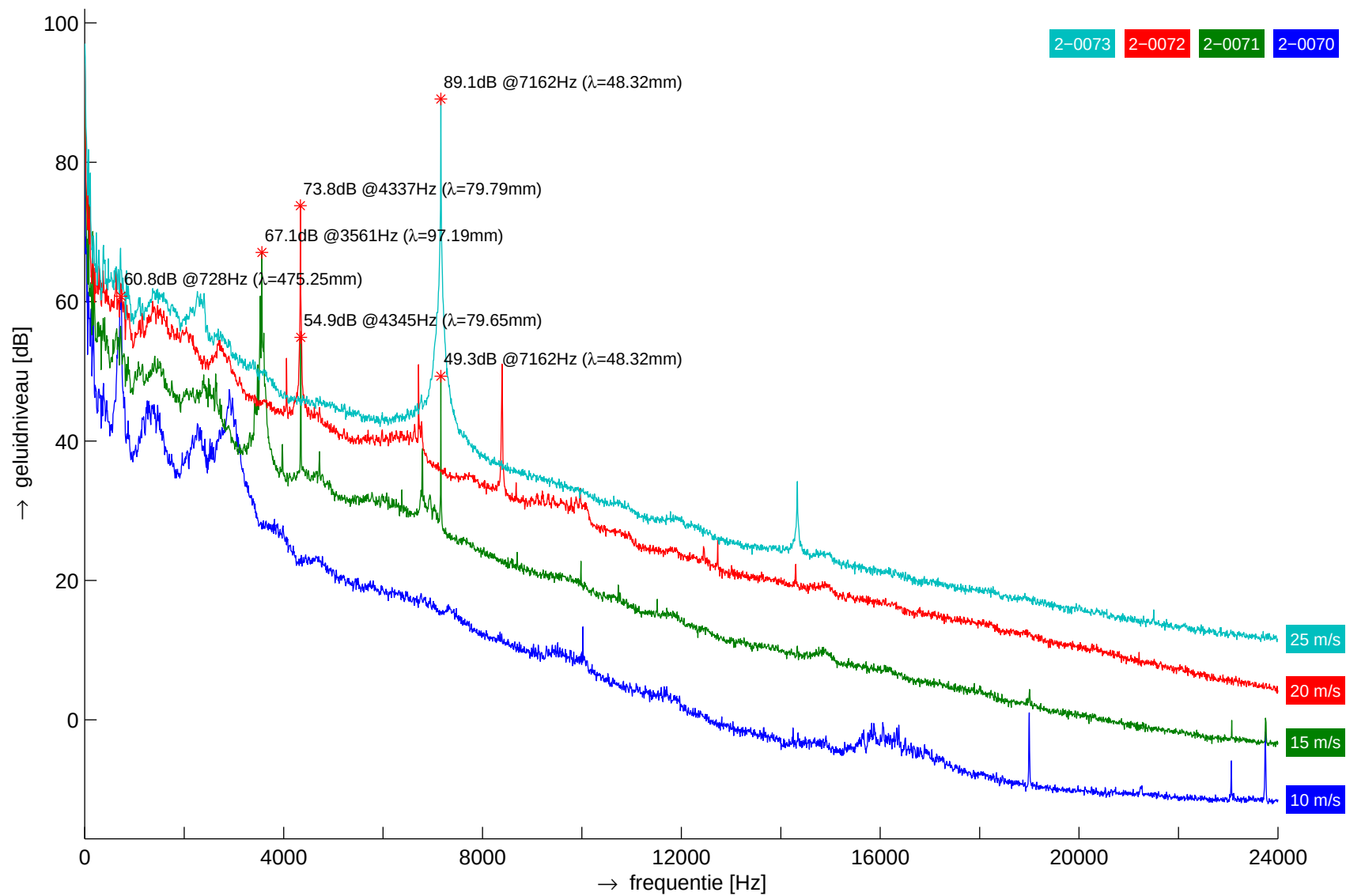
metingen: 2-0062, etc



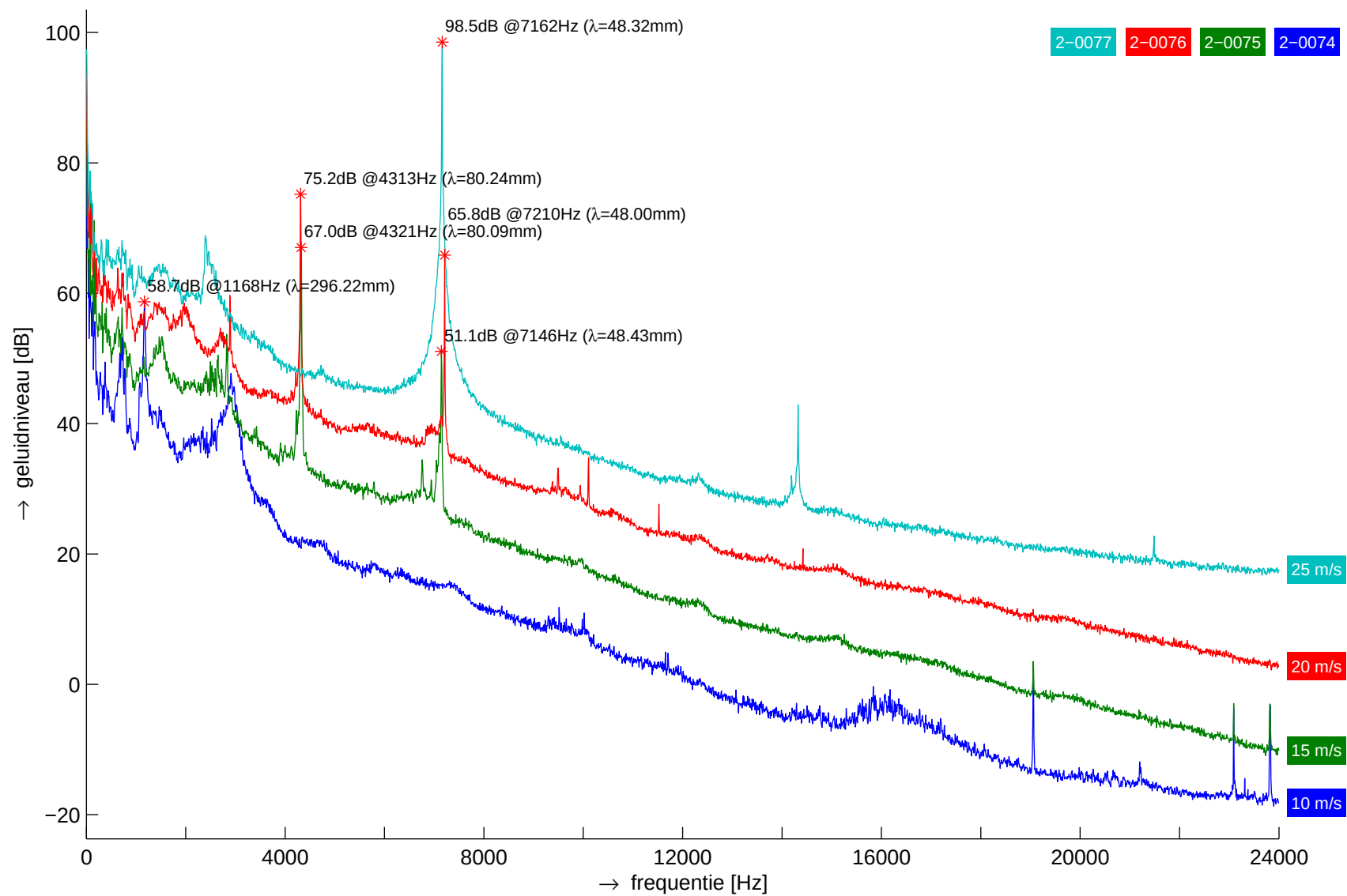
metingen: 2-0066, etc



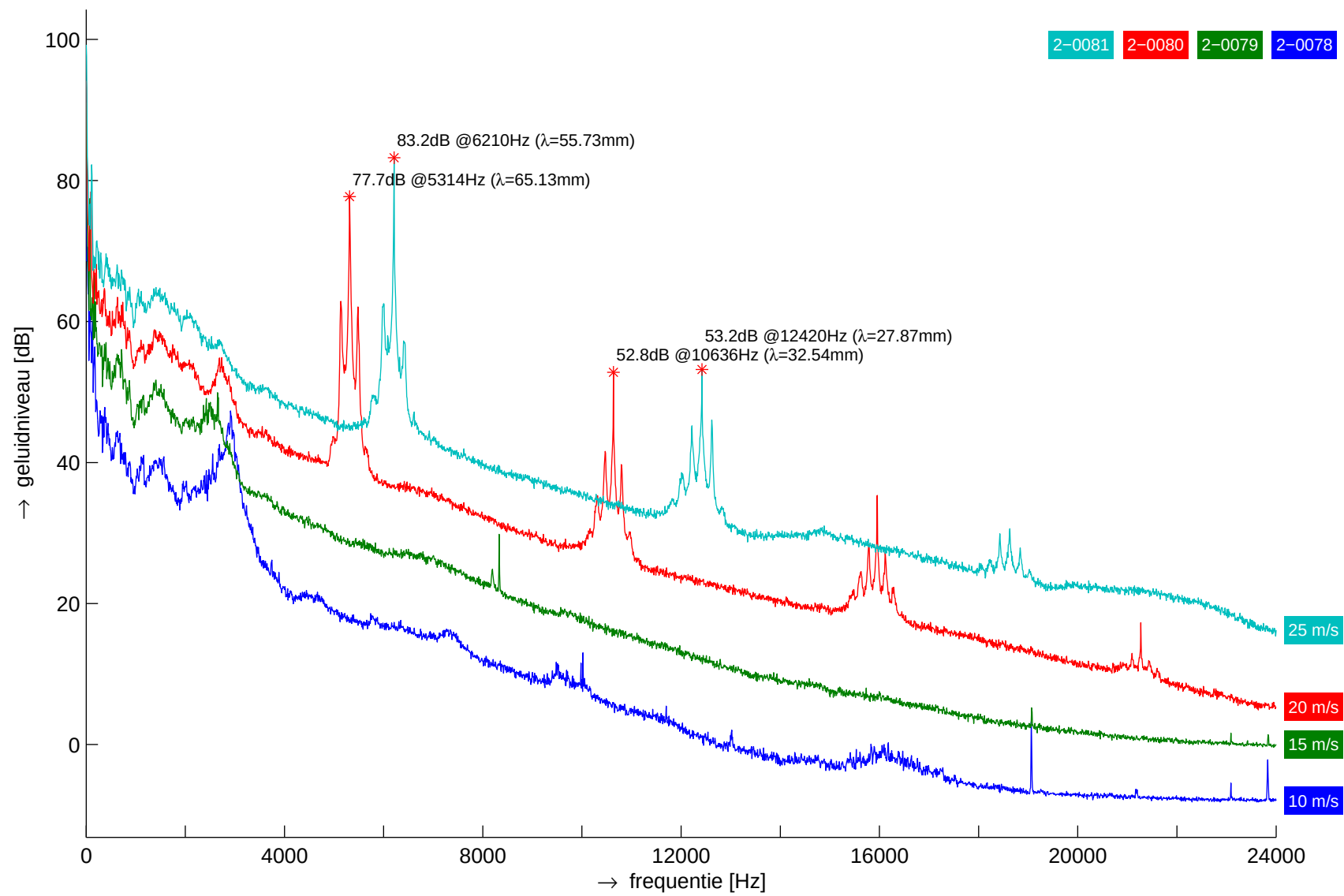
metingen: 2-0070, etc



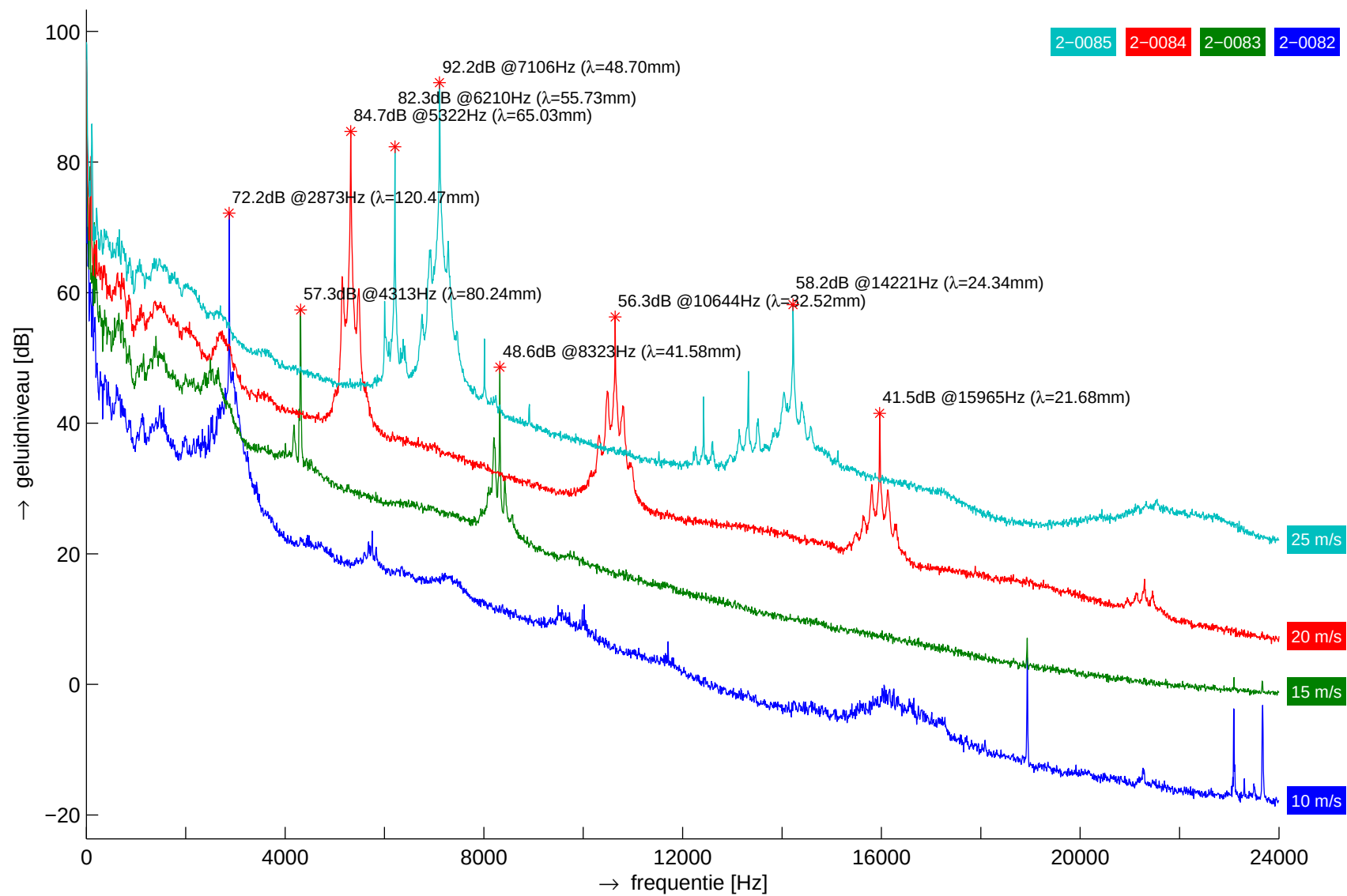
metingen: 2-0074, etc



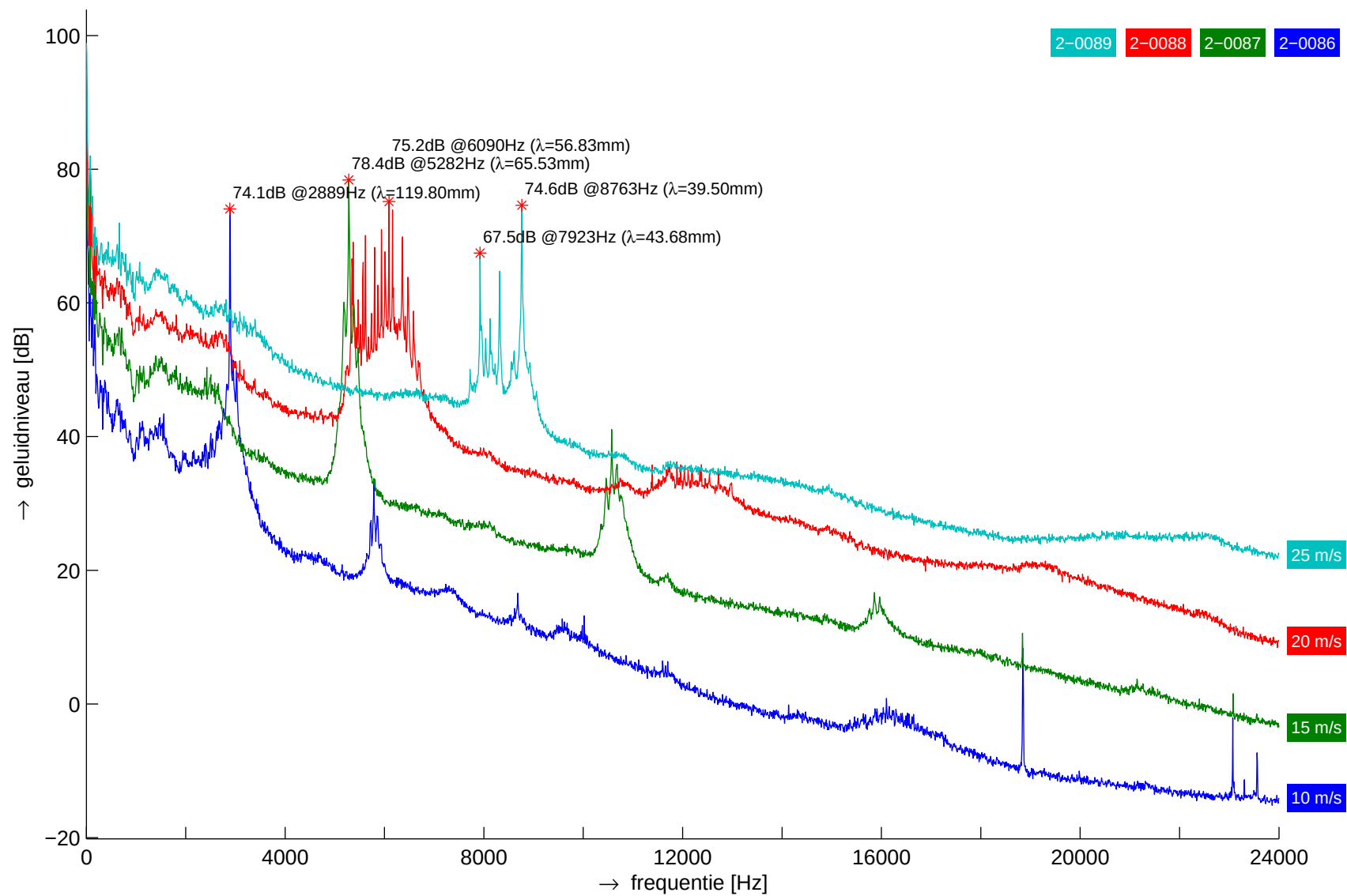
metingen: 2-0078, etc



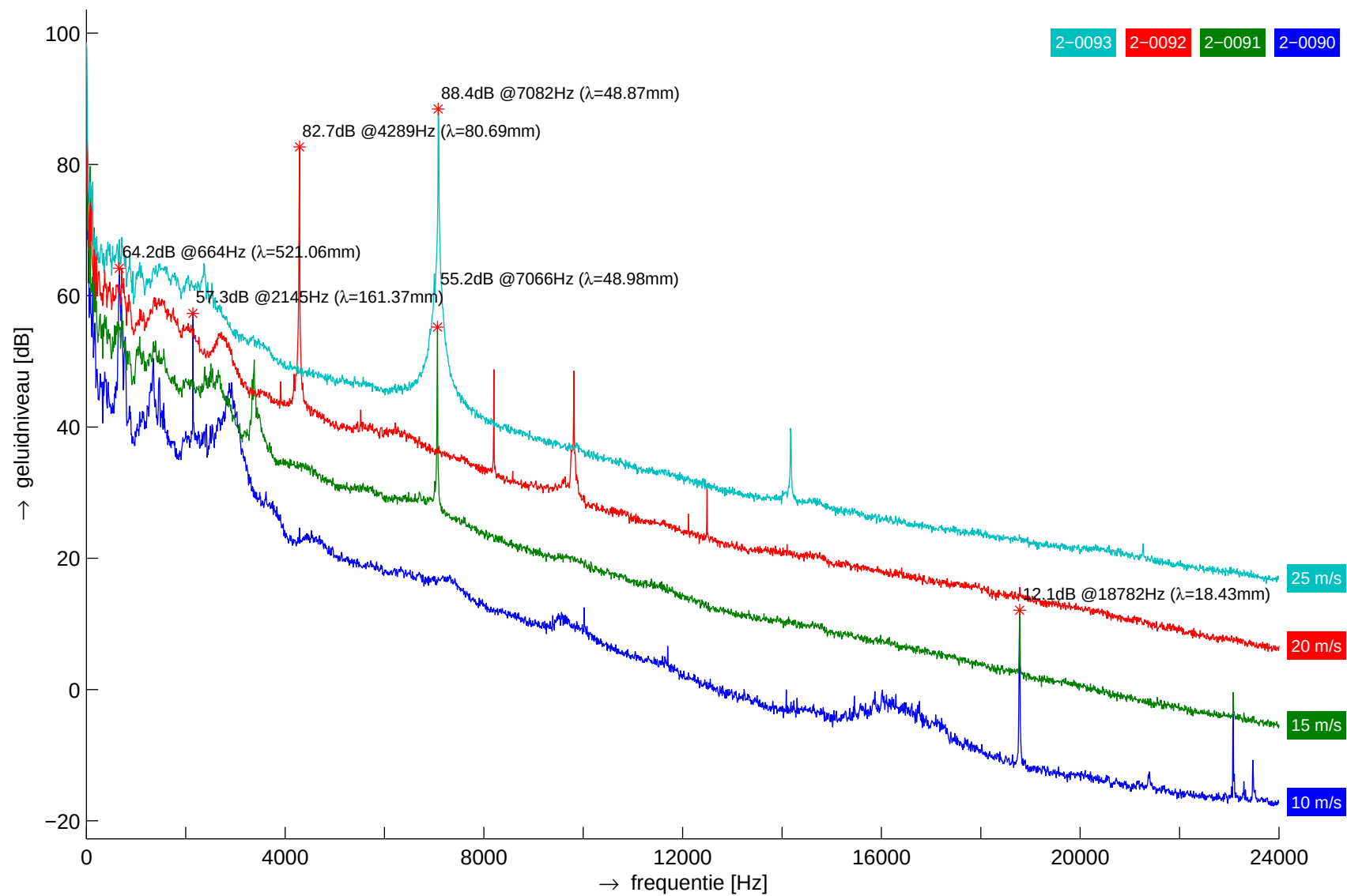
metingen: 2-0082, etc



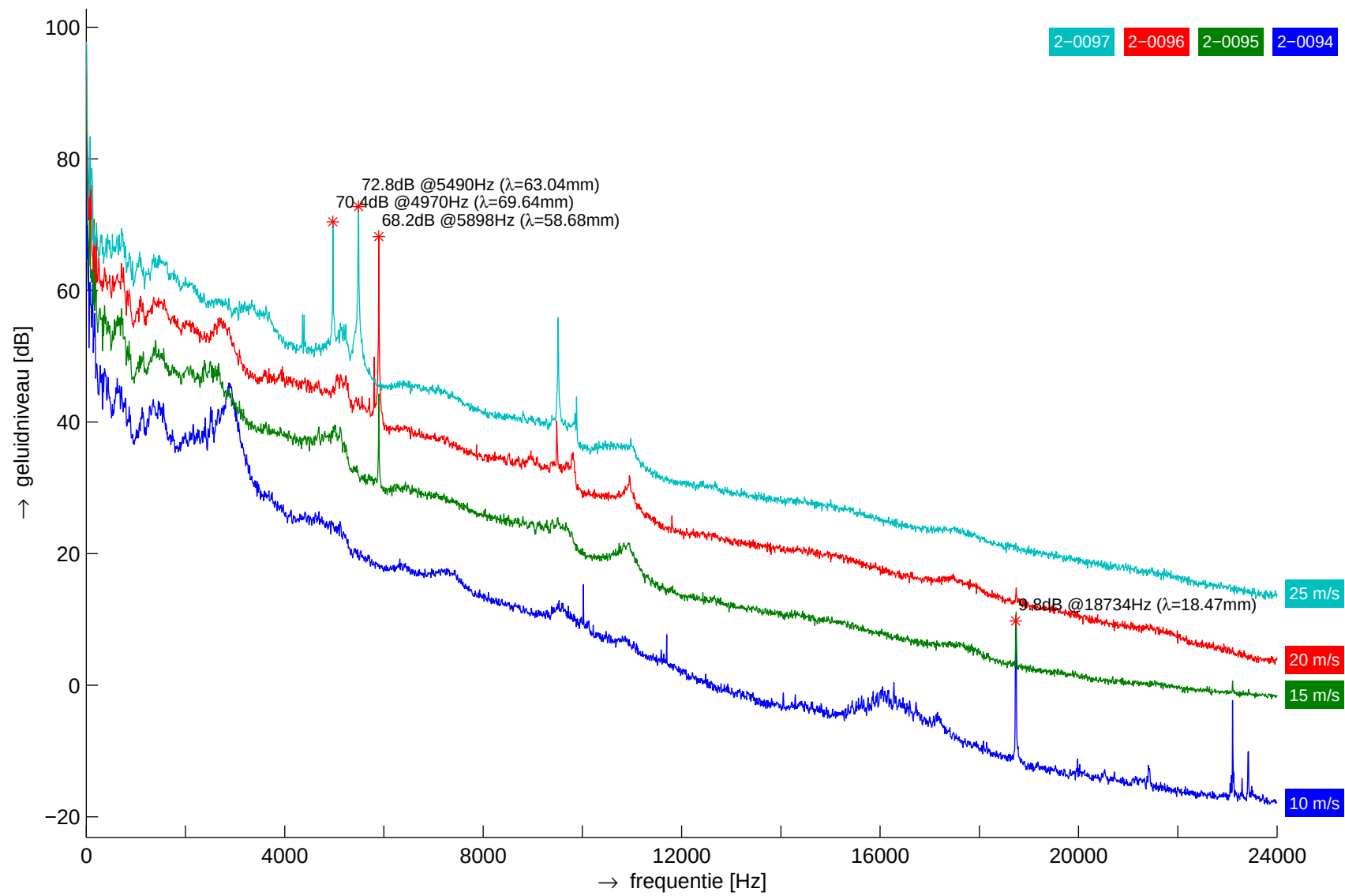
metingen: 2-0086, etc



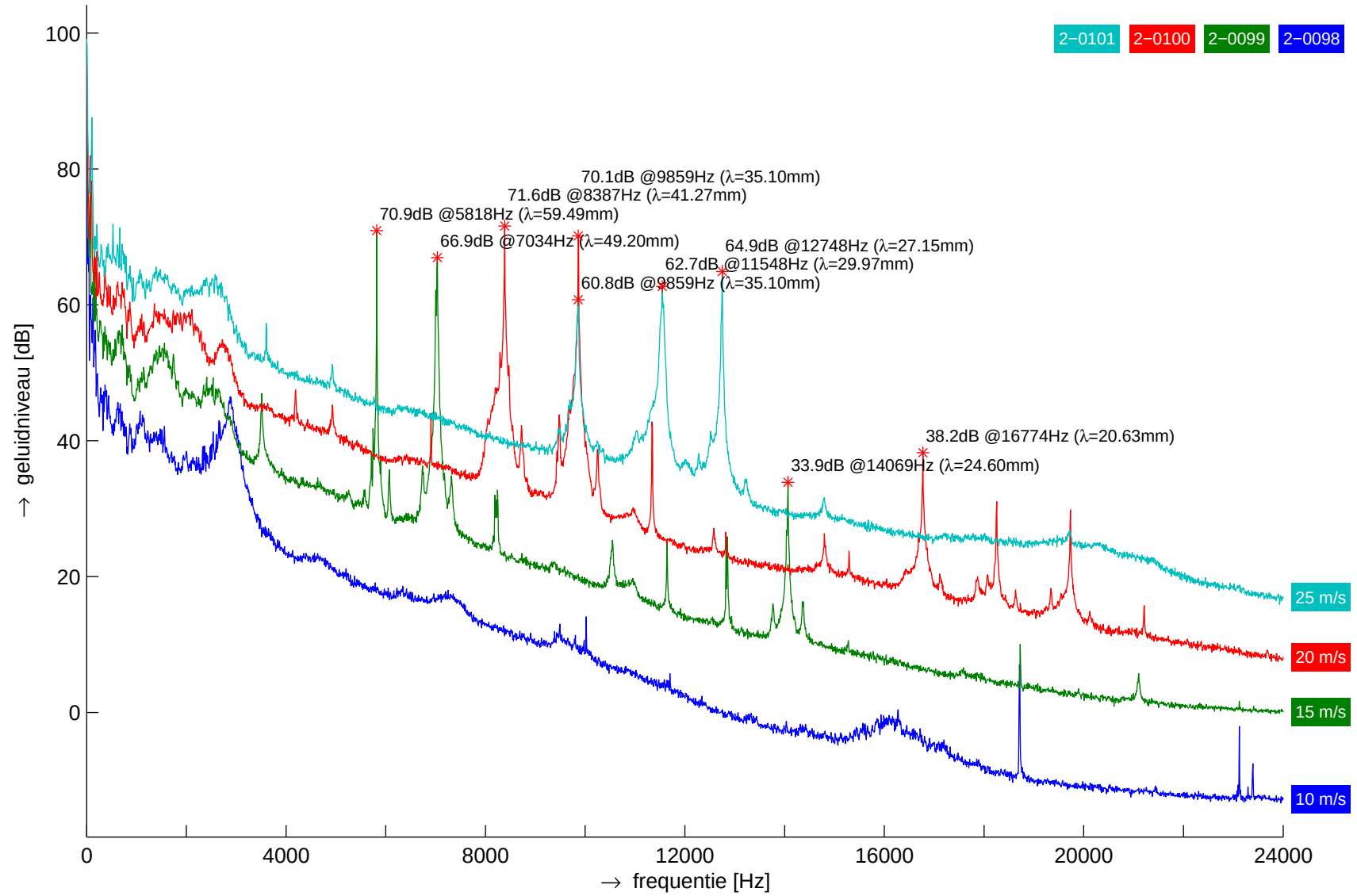
metingen: 2-0090, etc



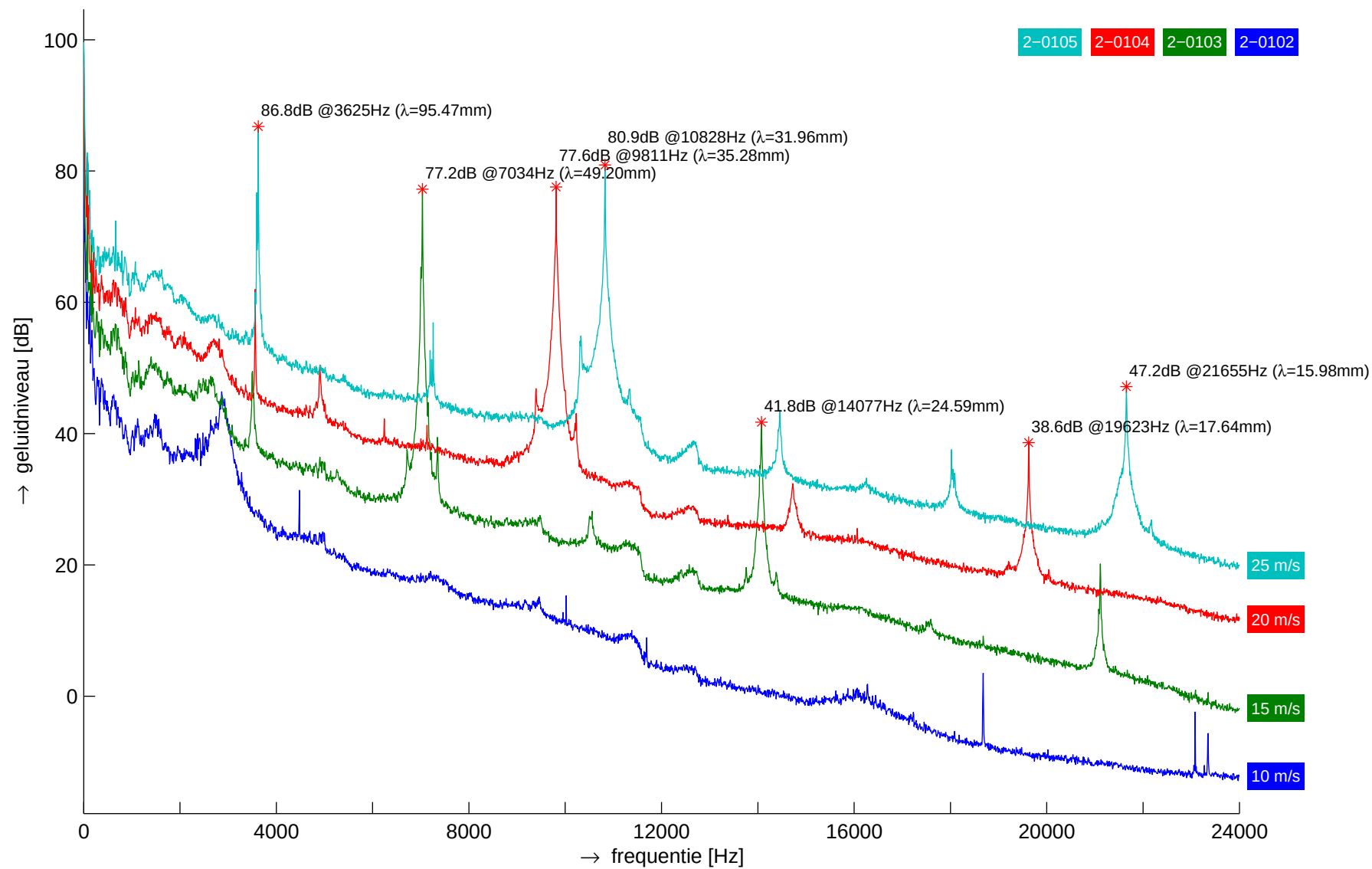
metingen: 2-0094, etc



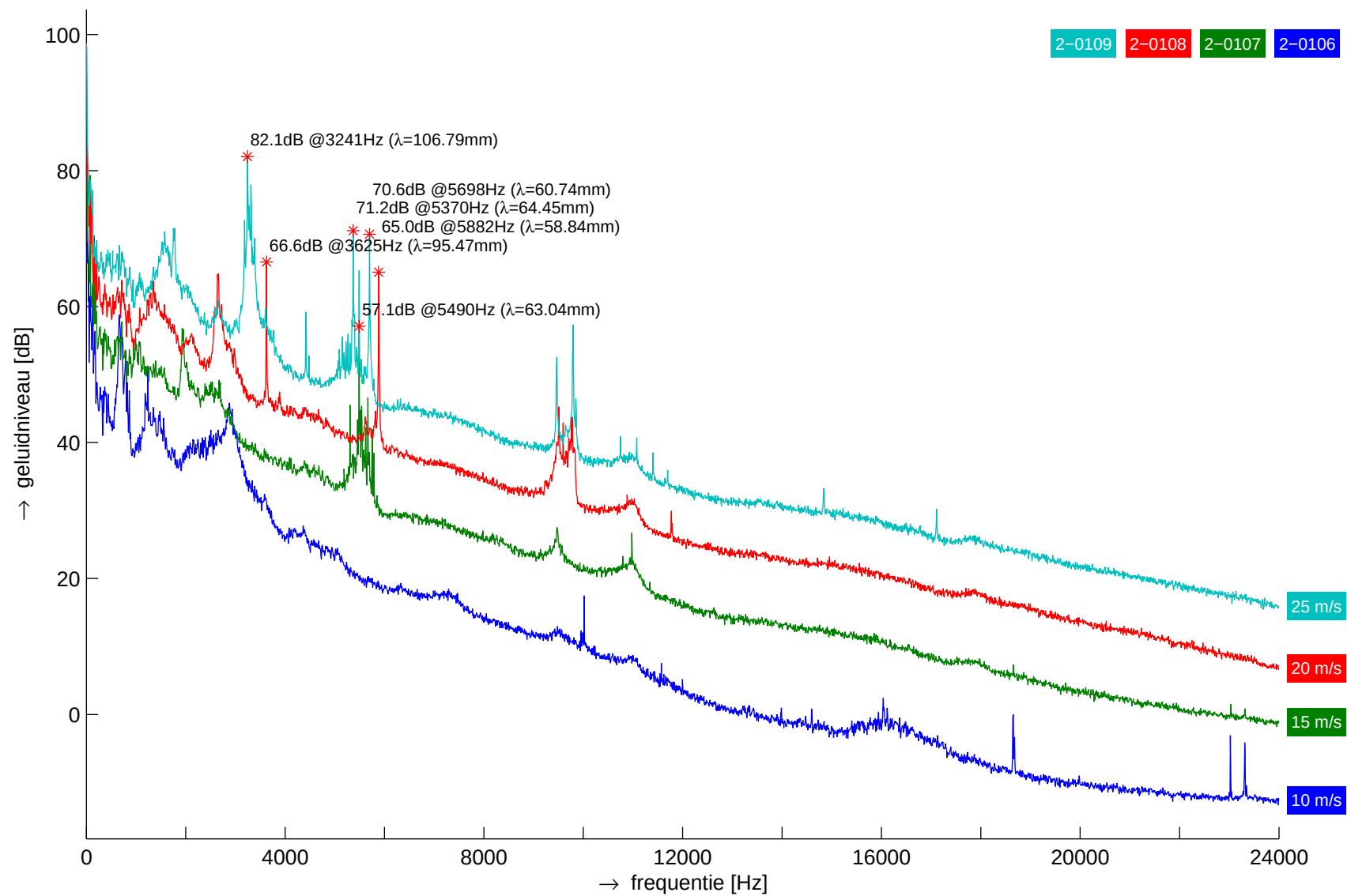
metingen: 2-0098, etc



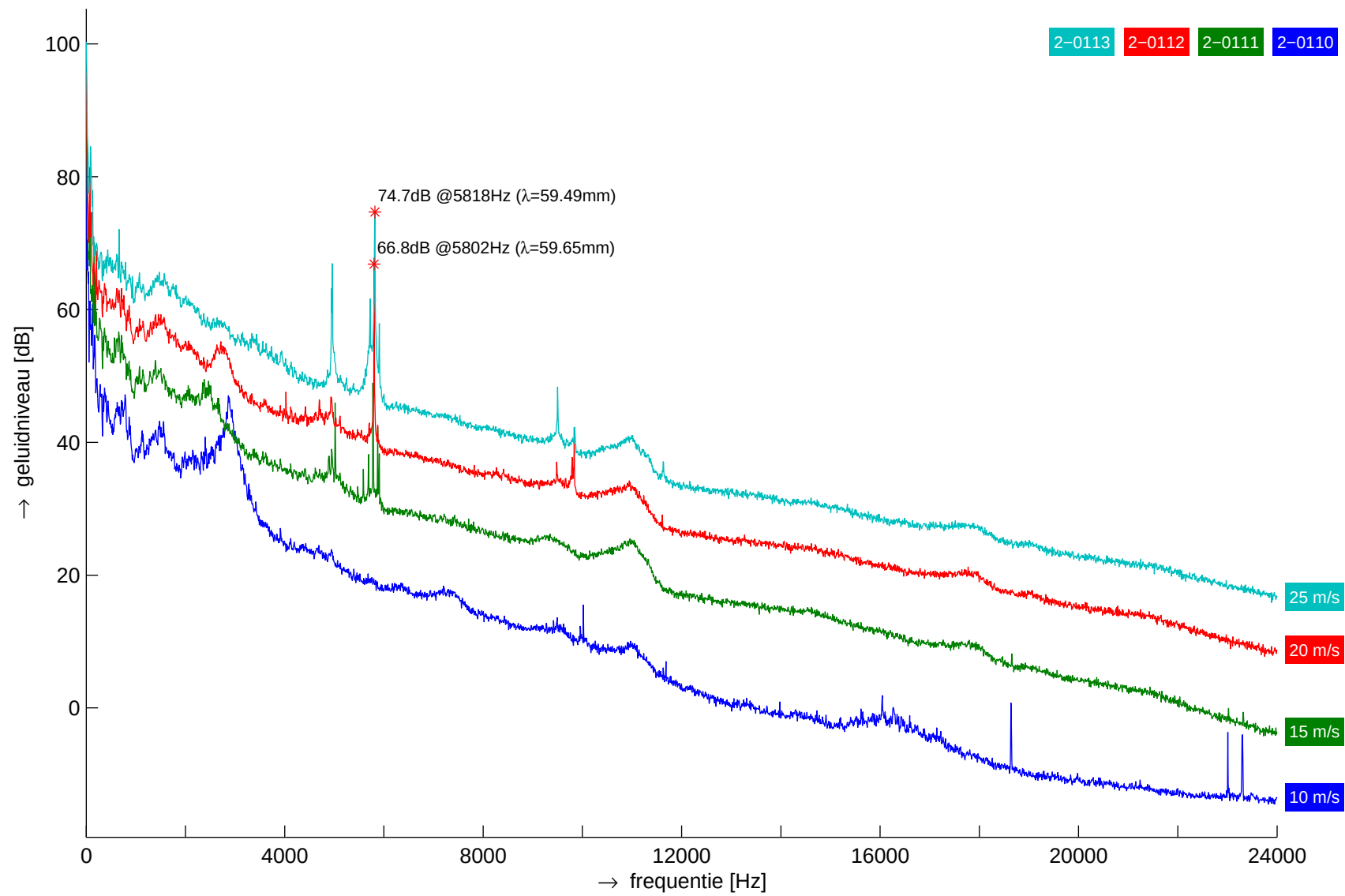
metingen: 2-0102, etc



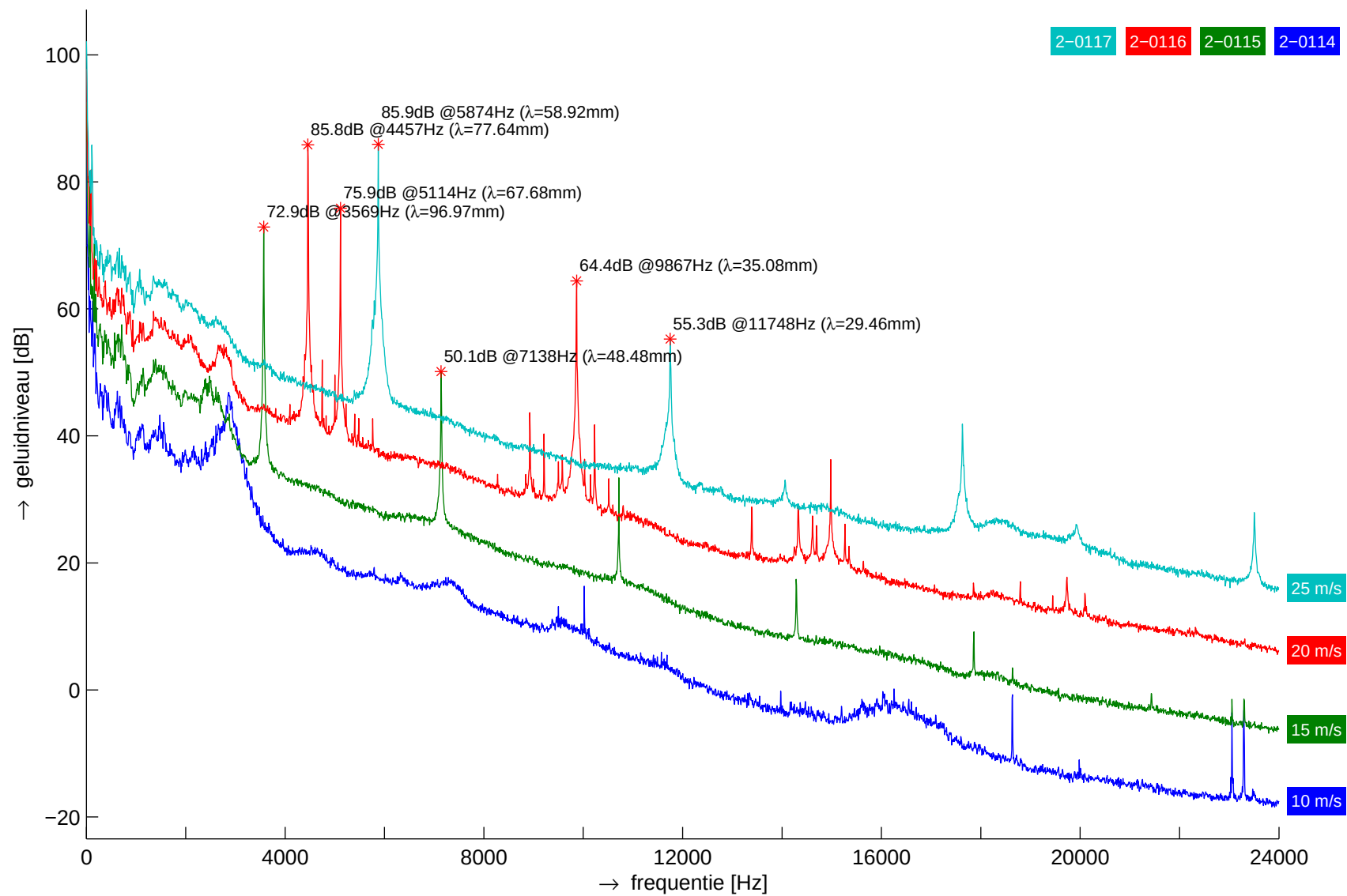
metingen: 2-0106, etc



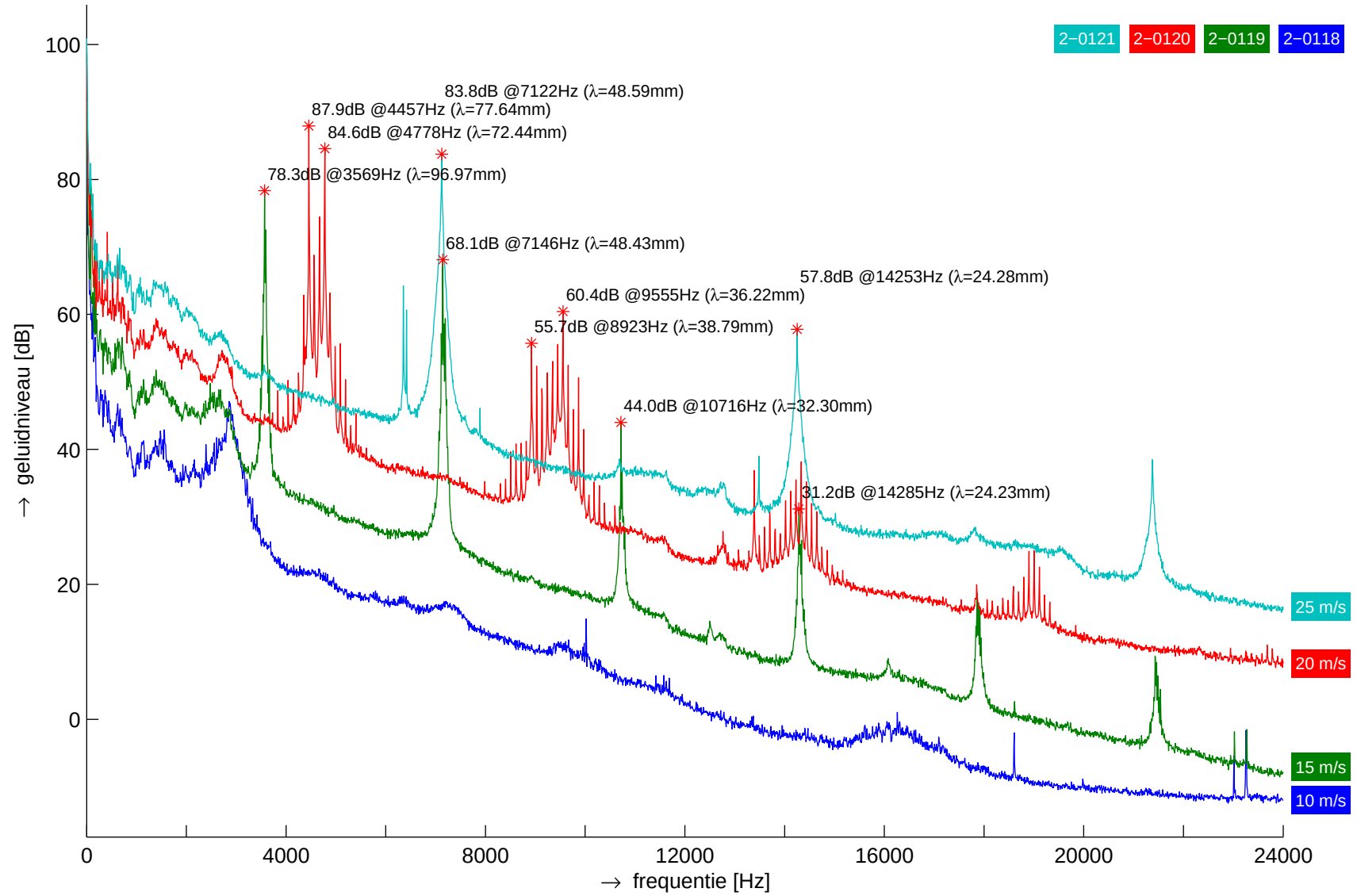
metingen: 2-0110, etc



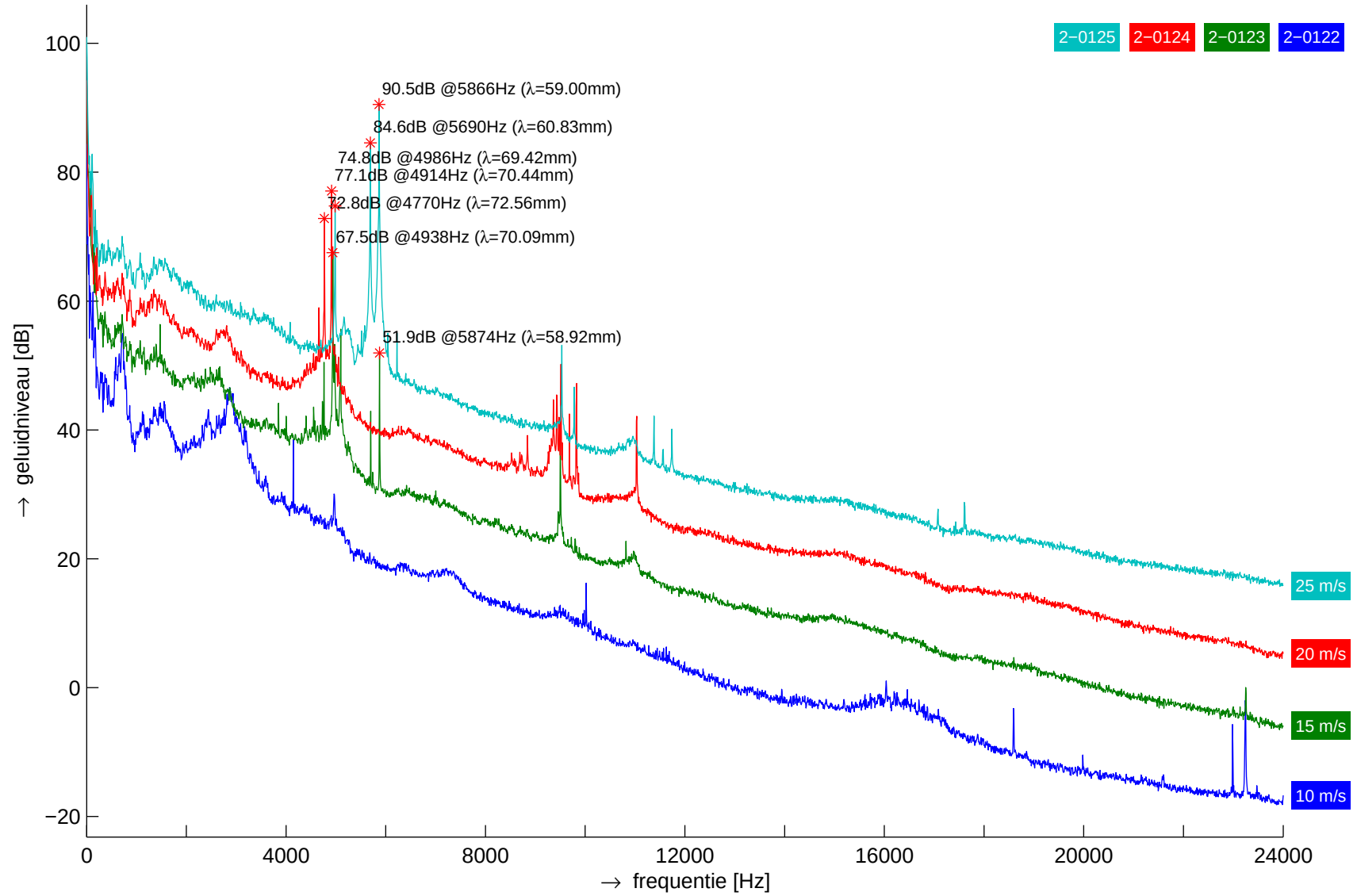
metingen: 2-0114, etc



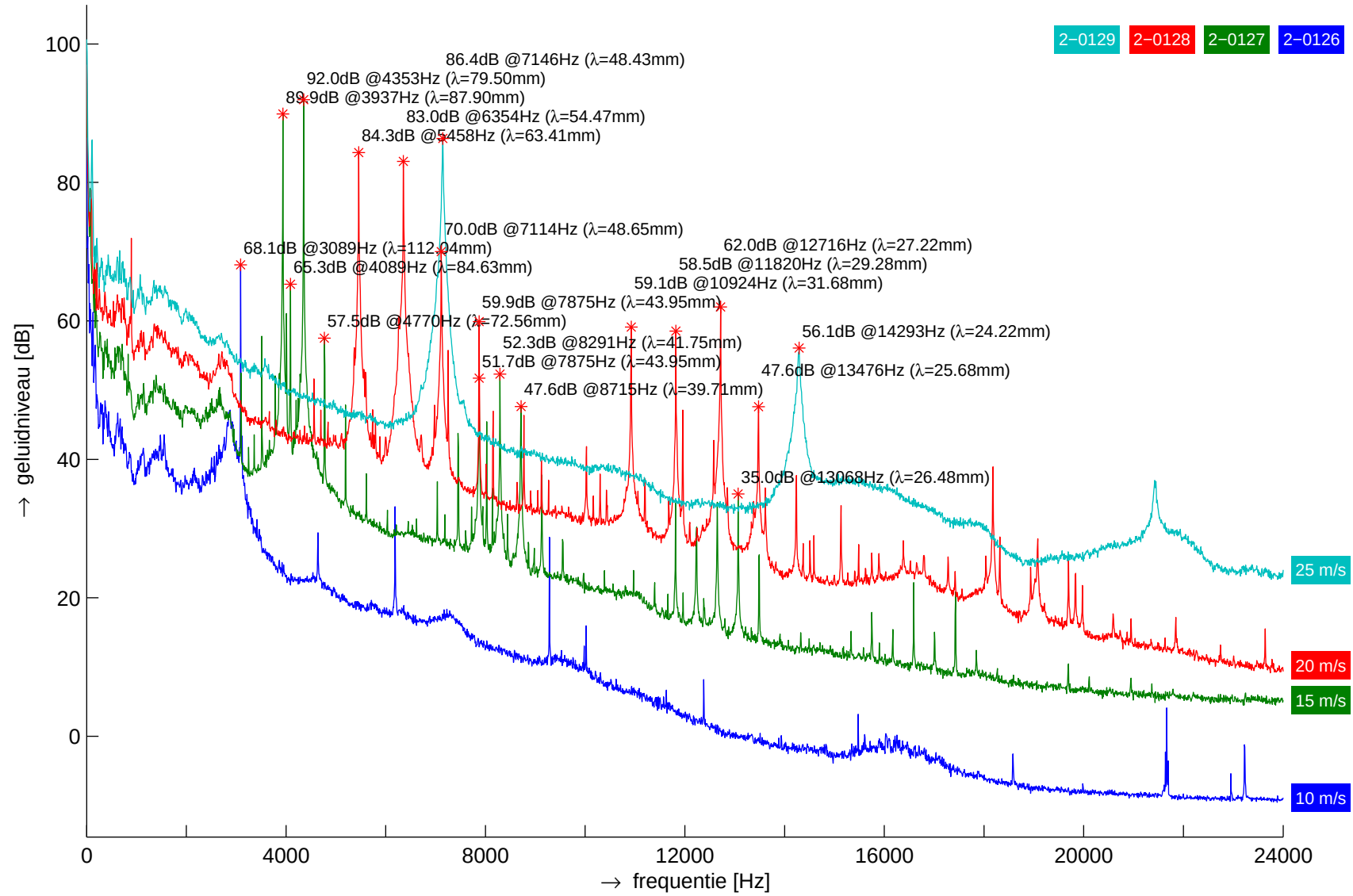
metingen: 2-0118, etc



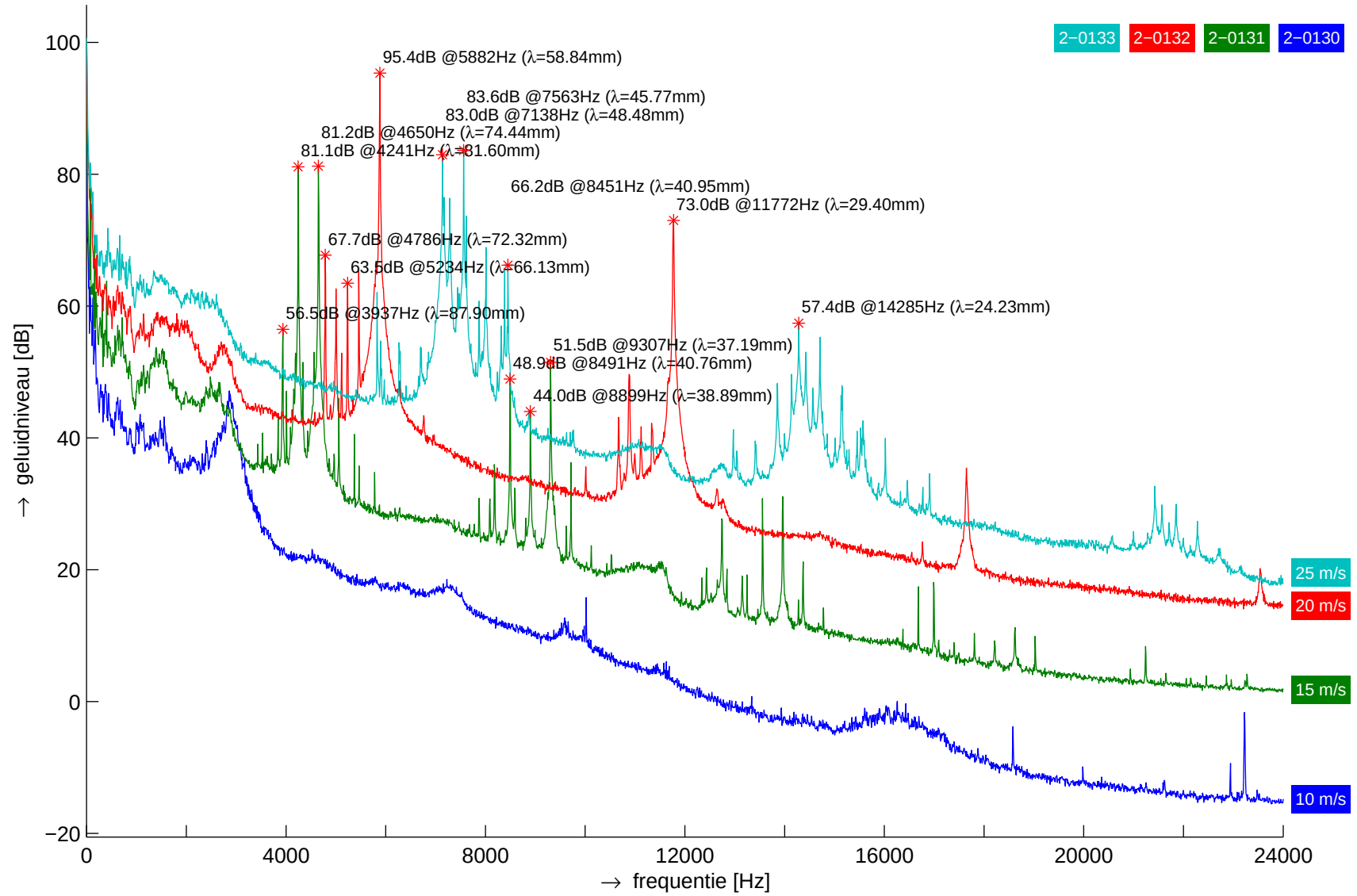
metingen: 2-0122, etc



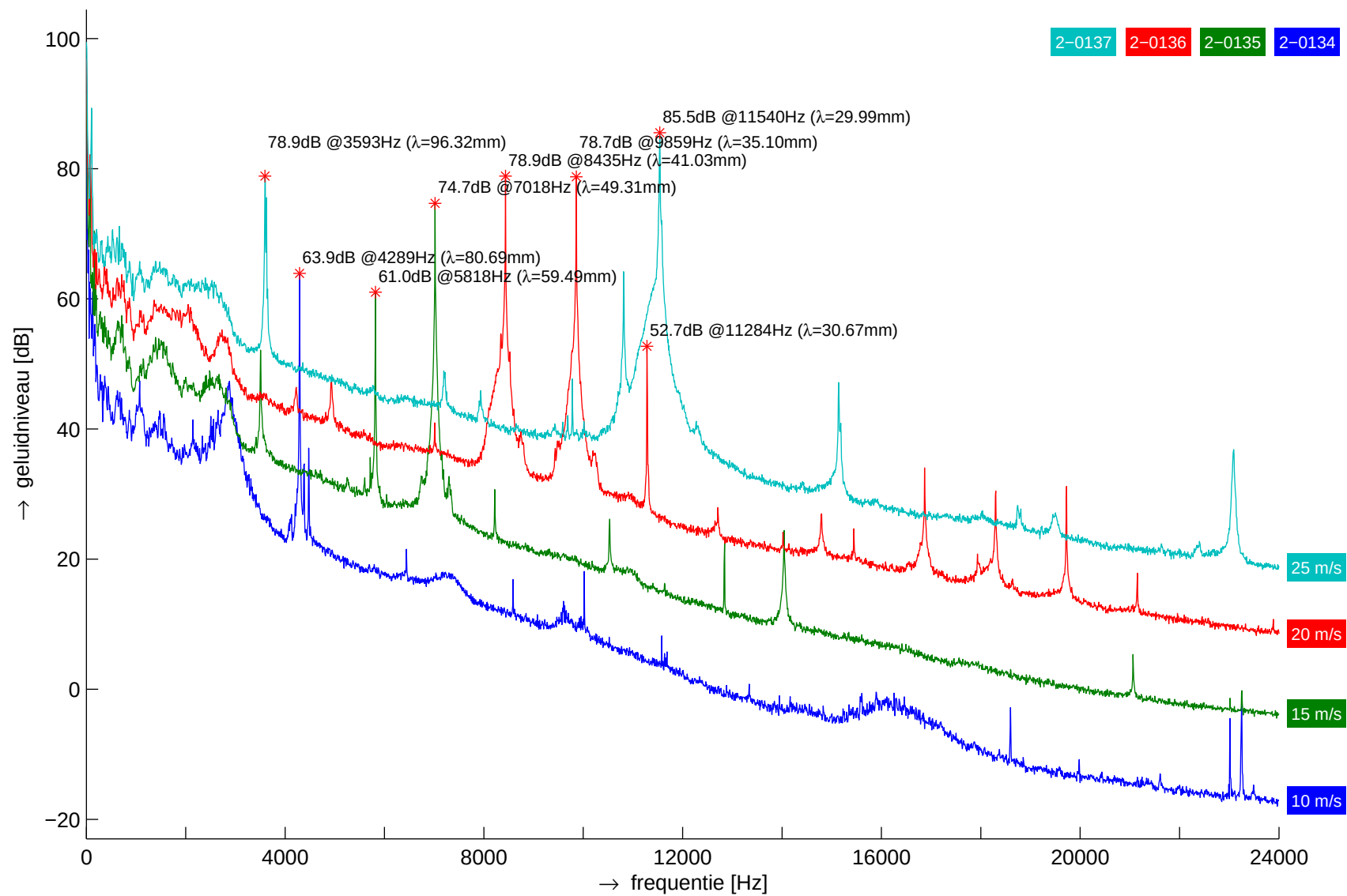
metingen: 2-0126, etc



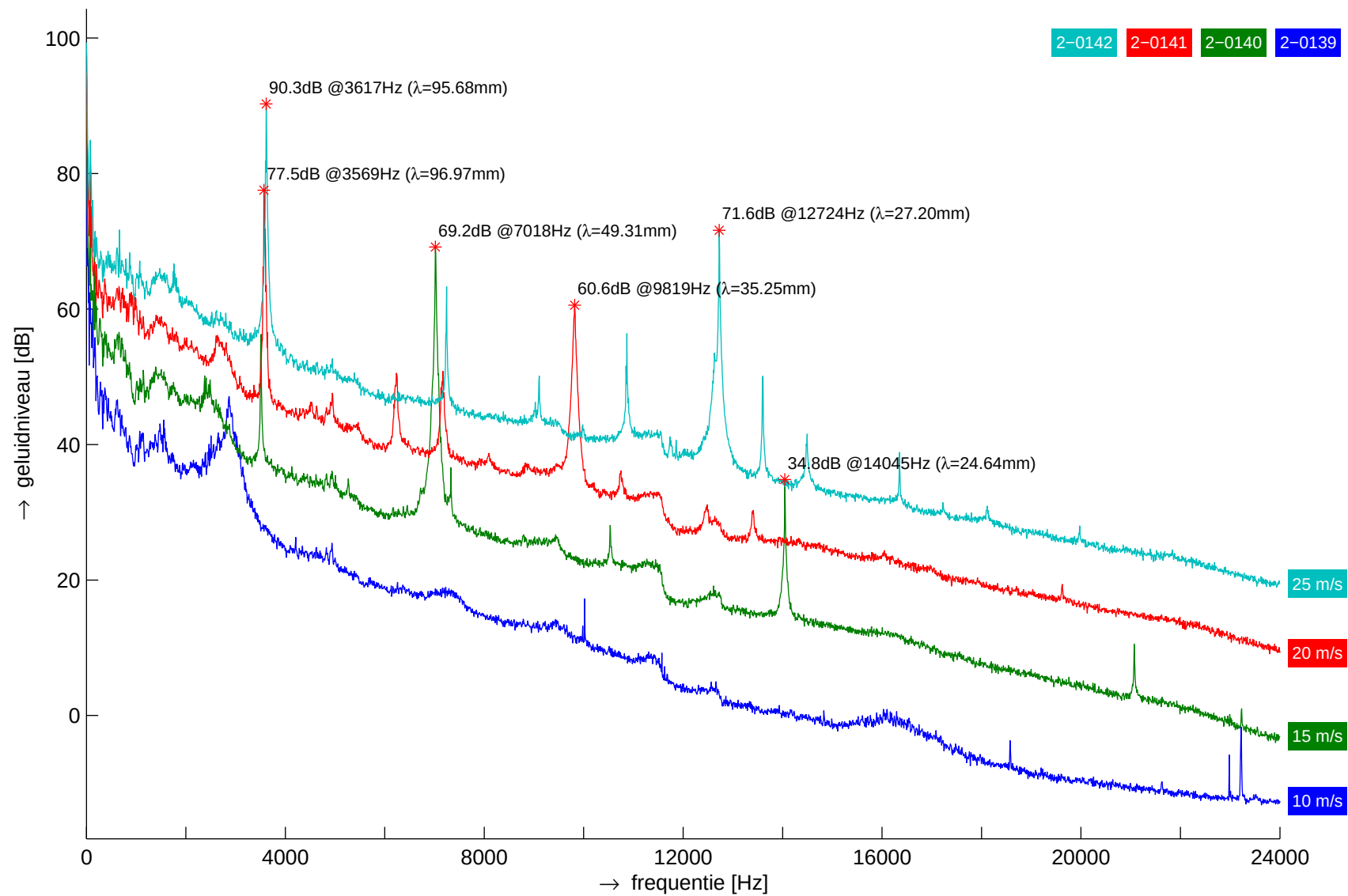
metingen: 2-0130, etc



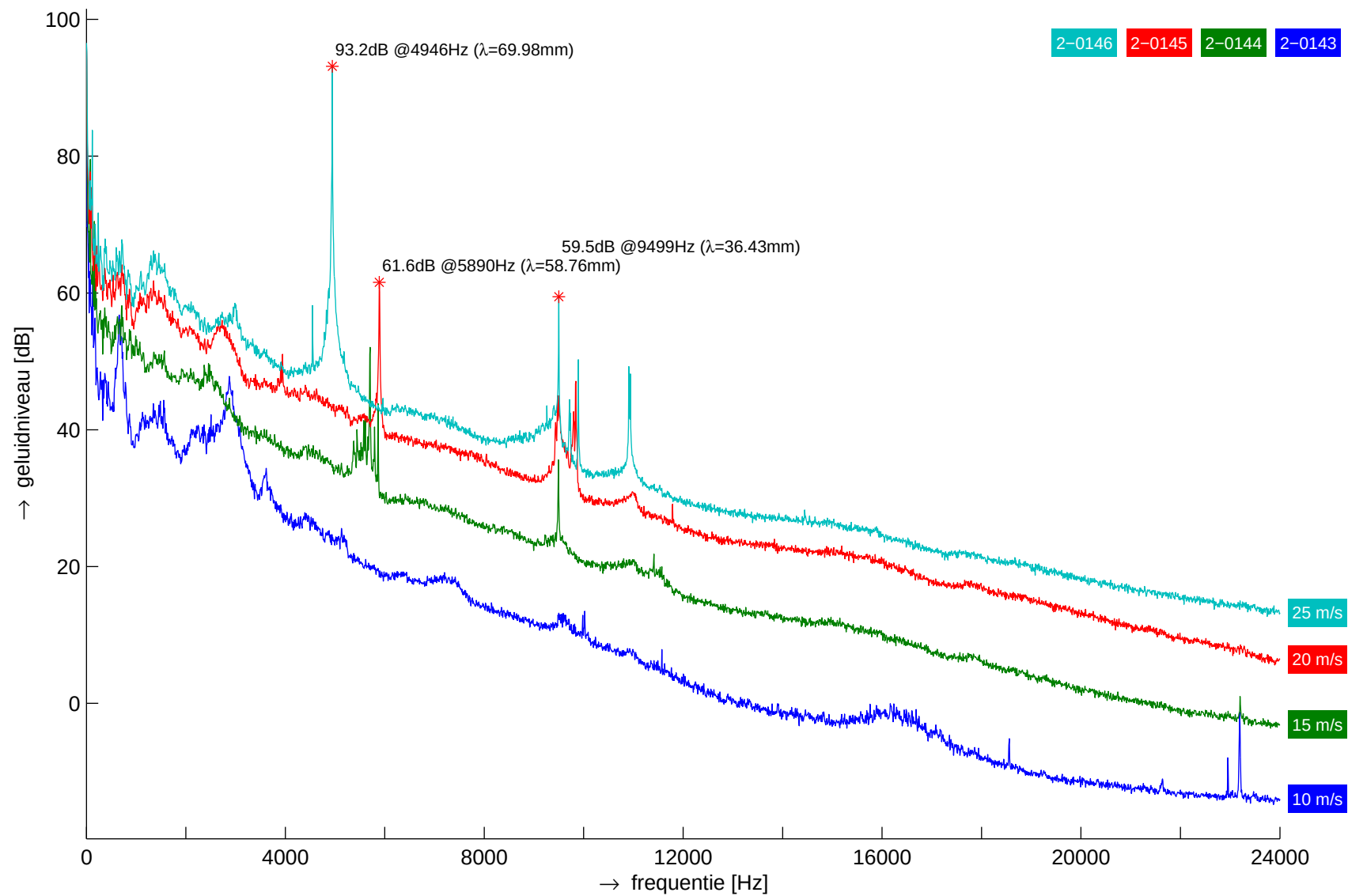
metingen: 2-0134, etc



metingen: 2-0139, etc



metingen: 2-0143, etc



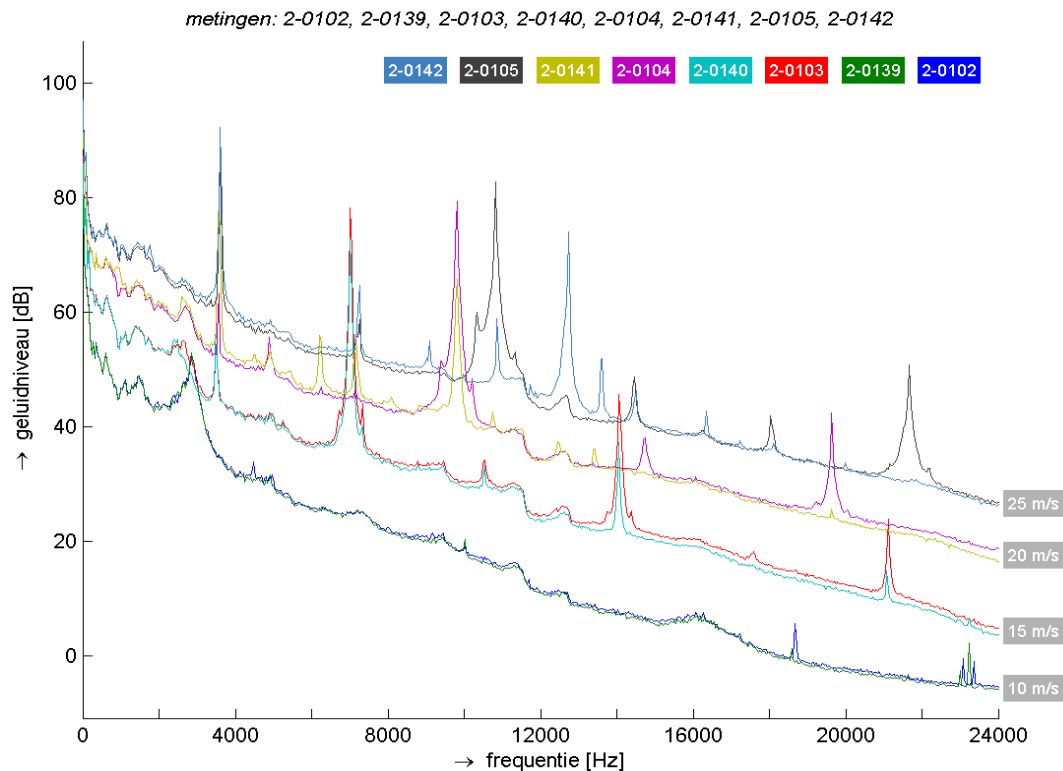
Bijlage 2 – Grafieken bij “RELATIES GEOMETRIE”

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.

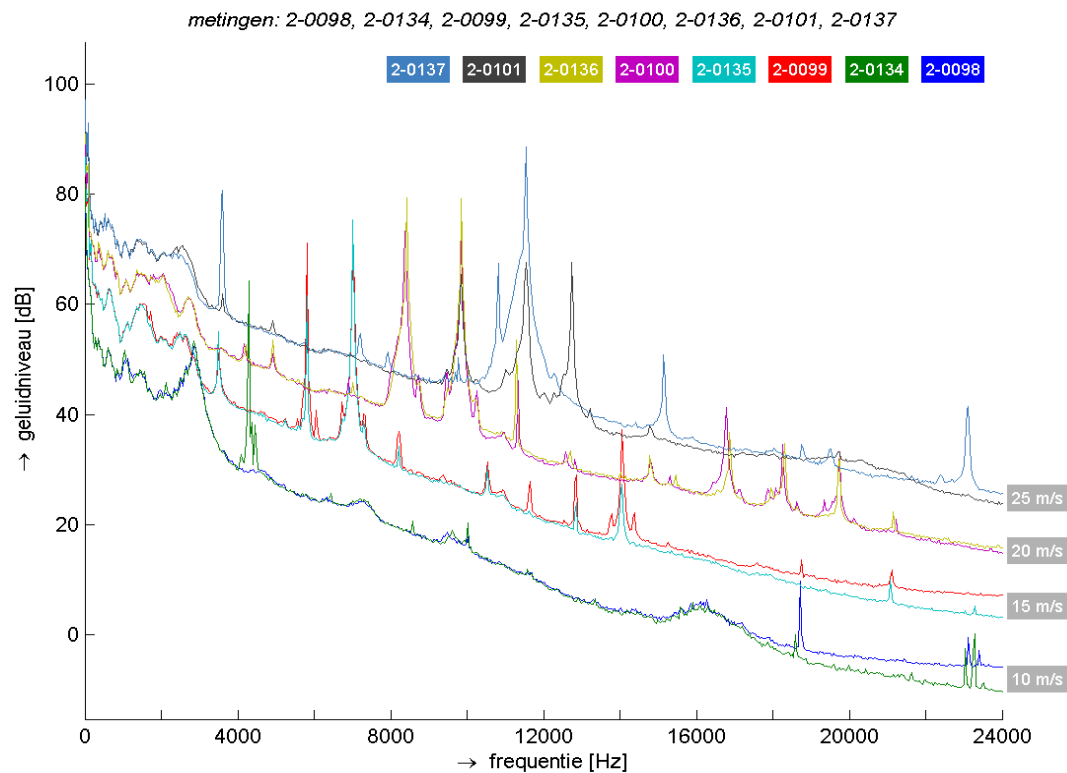
In het geval de twee sets van vier metingen in een grafiek elkaar precies overlappen dan zou de gevarieerde parameter in de geometrie van de roosters geen verschil voor het geproduceerde windgeluid; zijn er duidelijke verschillen tussen de twee series dan is dat juist wel het geval.

A) Afwerking van het bandstaal

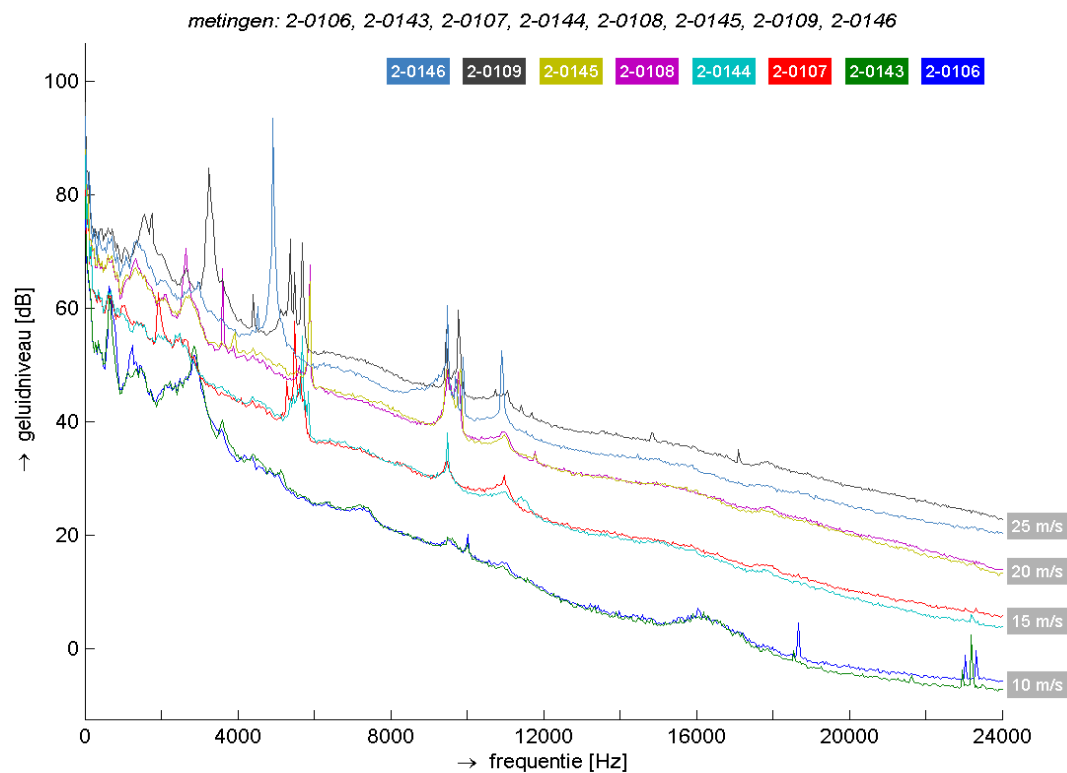
rooster 1 (scherpkantig, 2-0094 e.v.) vs. rooster 7 (afgerond, 2-0134 e.v.)



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

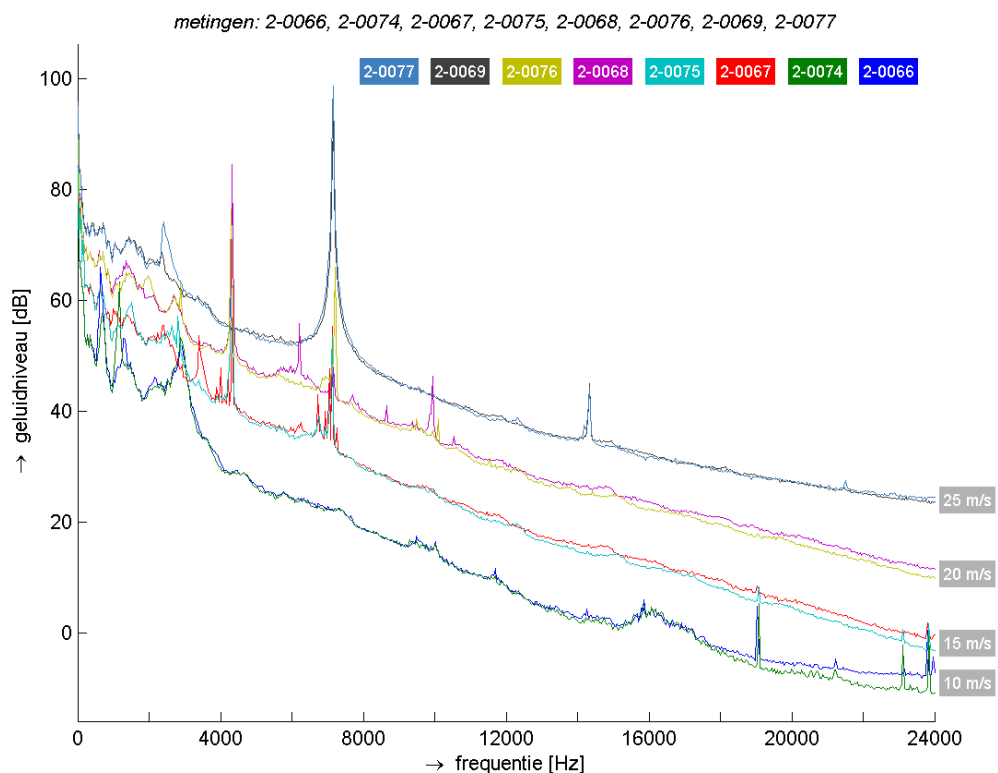


figuur 2 Rooster 1 en rooster 7 onder vergelijkbare hoeken (49 resp. 41 voor)

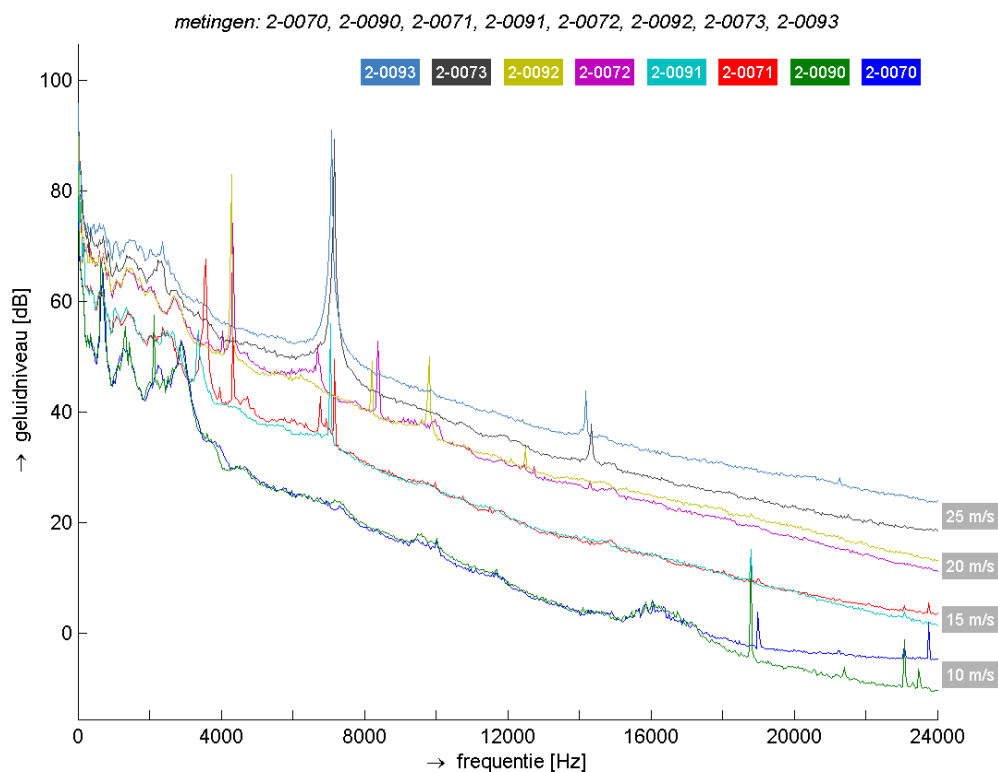


figuur 3 Rooster 1 en rooster 7 onder vergelijkbare hoeken (90 resp. 84 achter)

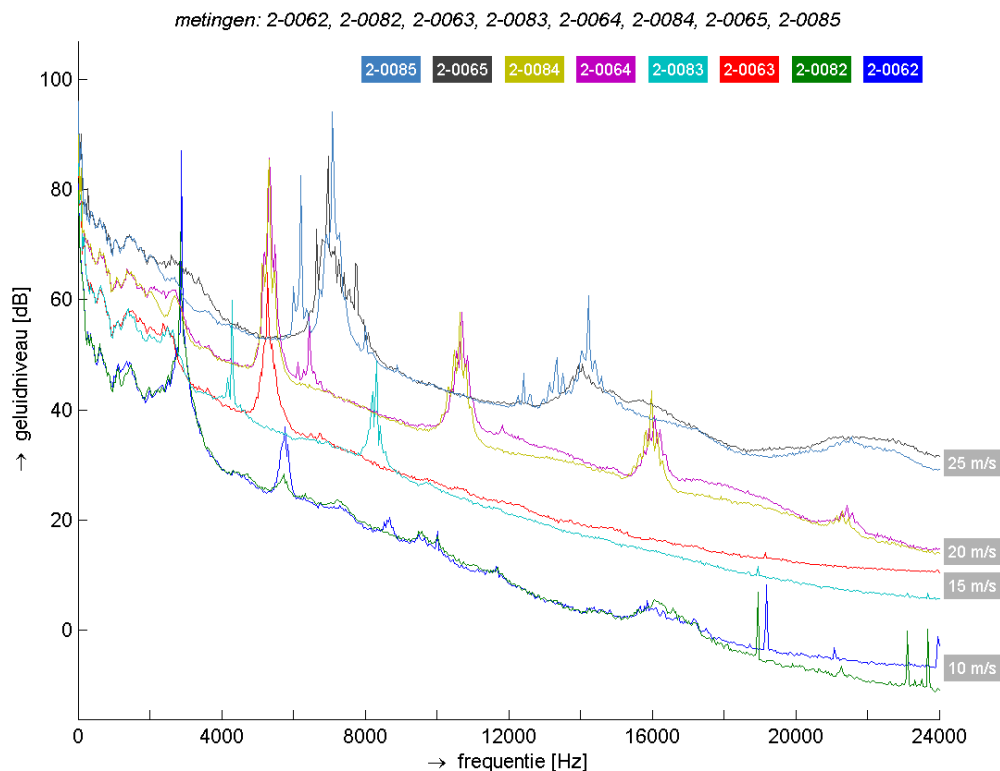
rooster 5 (scherpkantig, 2-0062 e.v.) vs. rooster 11 (afgerond, 2-0074 e.v.)



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

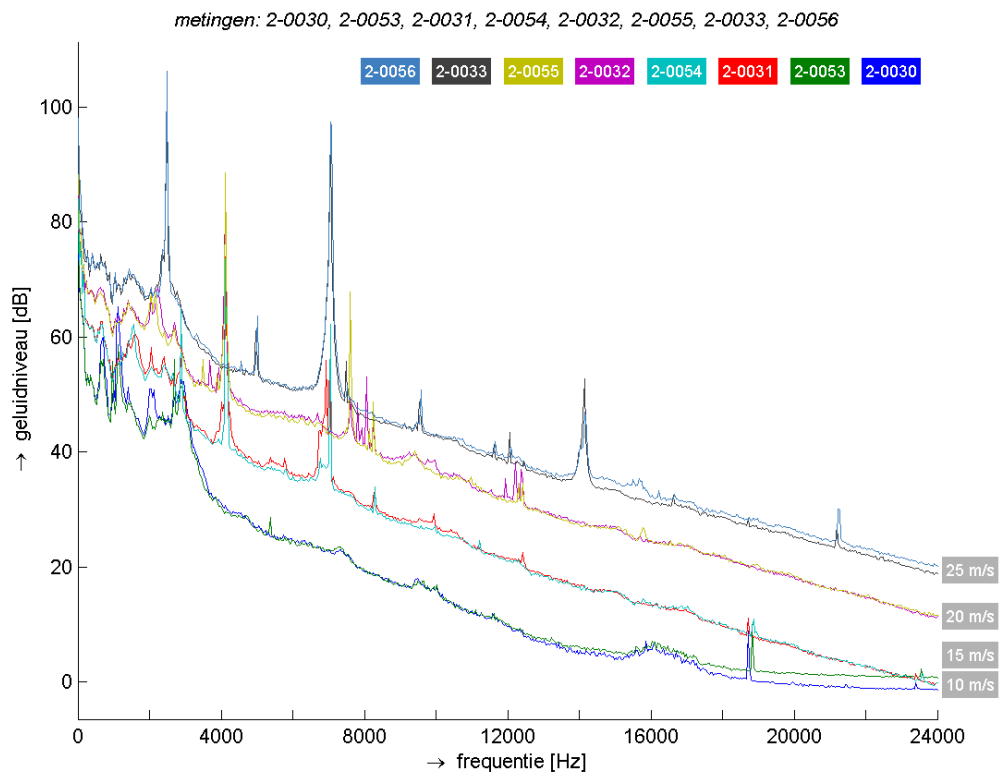


figuur 5 Rooster 5 en rooster 11 onder vergelijkbare hoeken (80 resp. 85 achter)

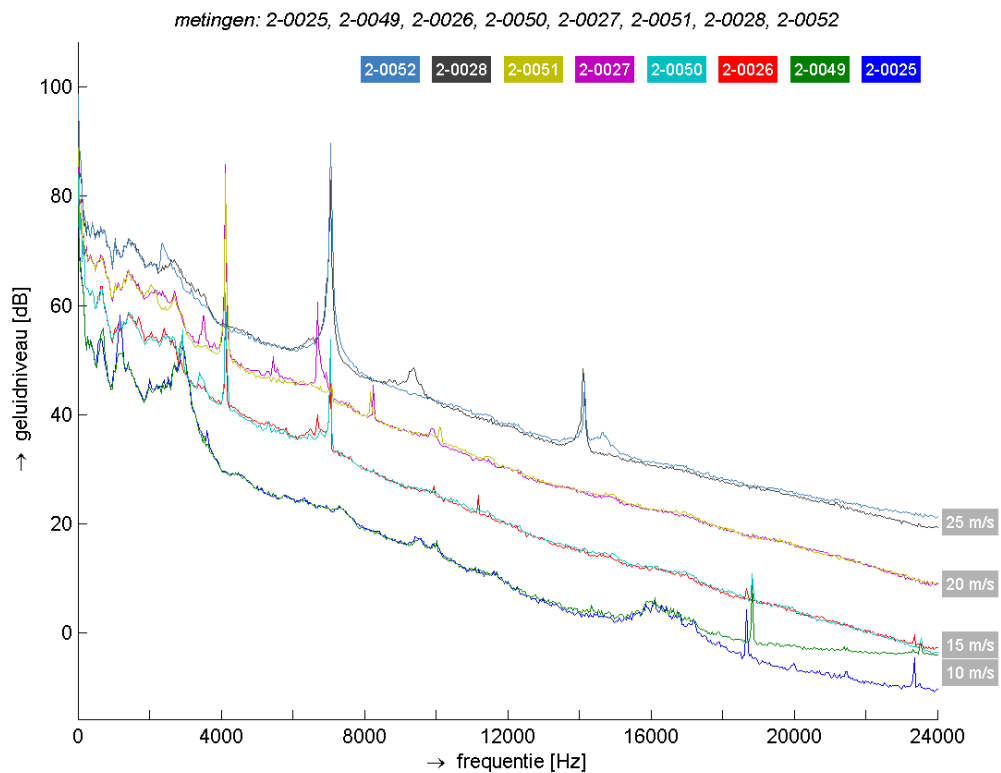


figuur 6 Rooster 5 en rooster 11 onder vergelijkbare hoeken (40 resp. 42 achter)

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)



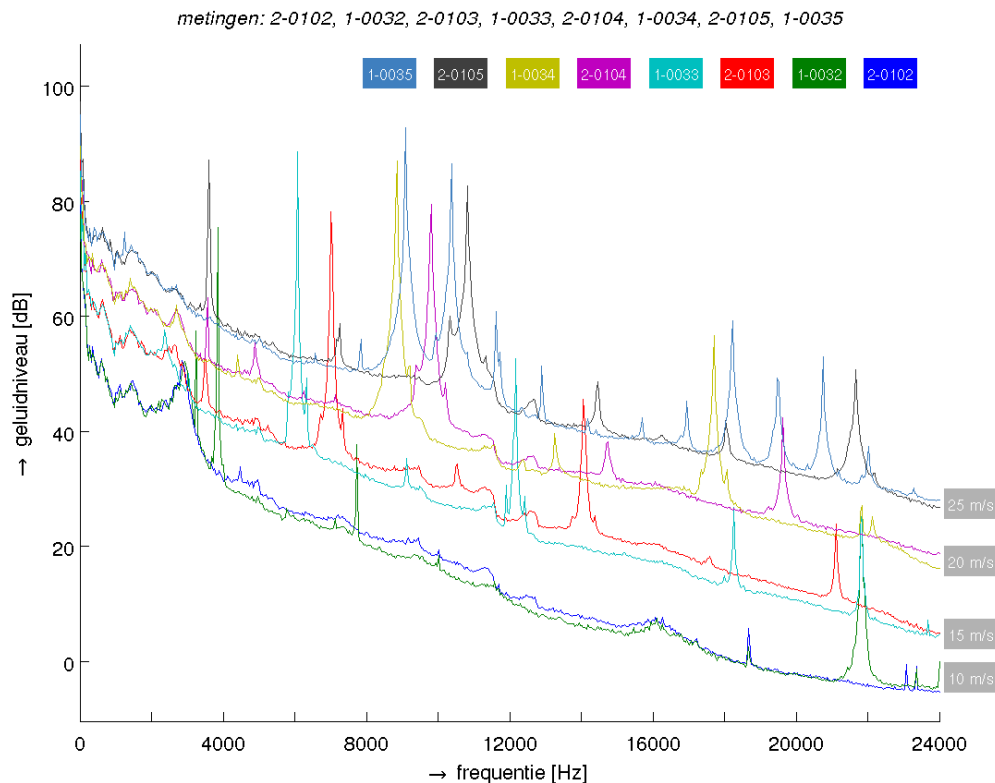
figuur 8 Rooster 6 en rooster 12 onder vergelijkbare hoeken (72 resp. 82 voor)

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.

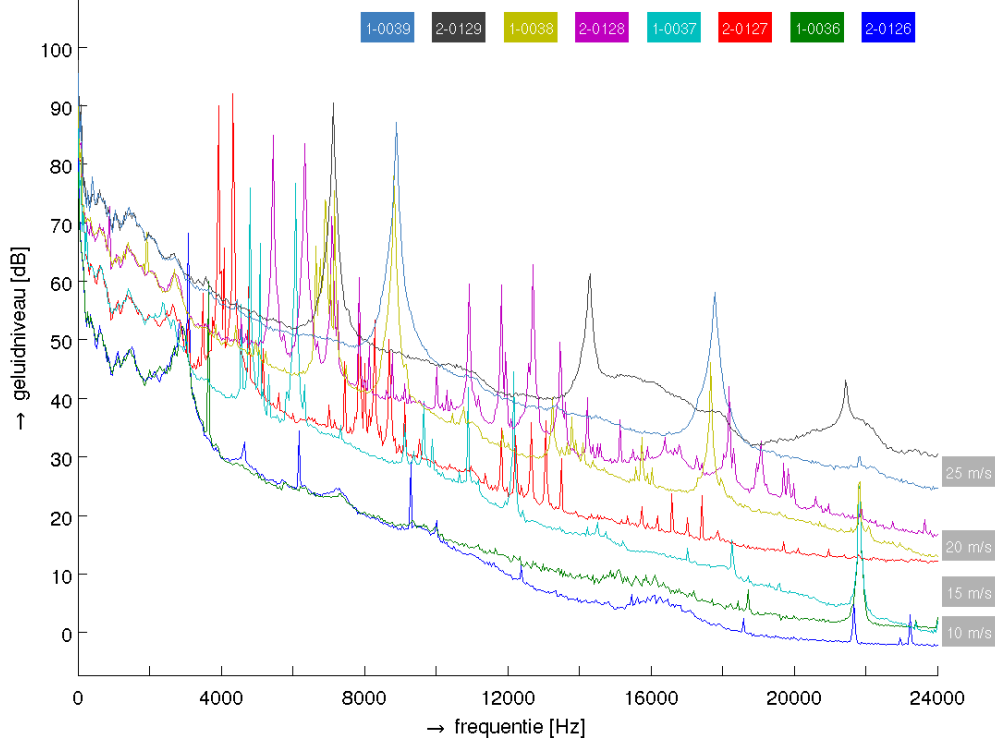
rooster 1 (draagstaaf 30x2, 2-0094 e.v.) vs. rooster 3 (draagstaaf 40x2, 1-0032 e.v.)



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

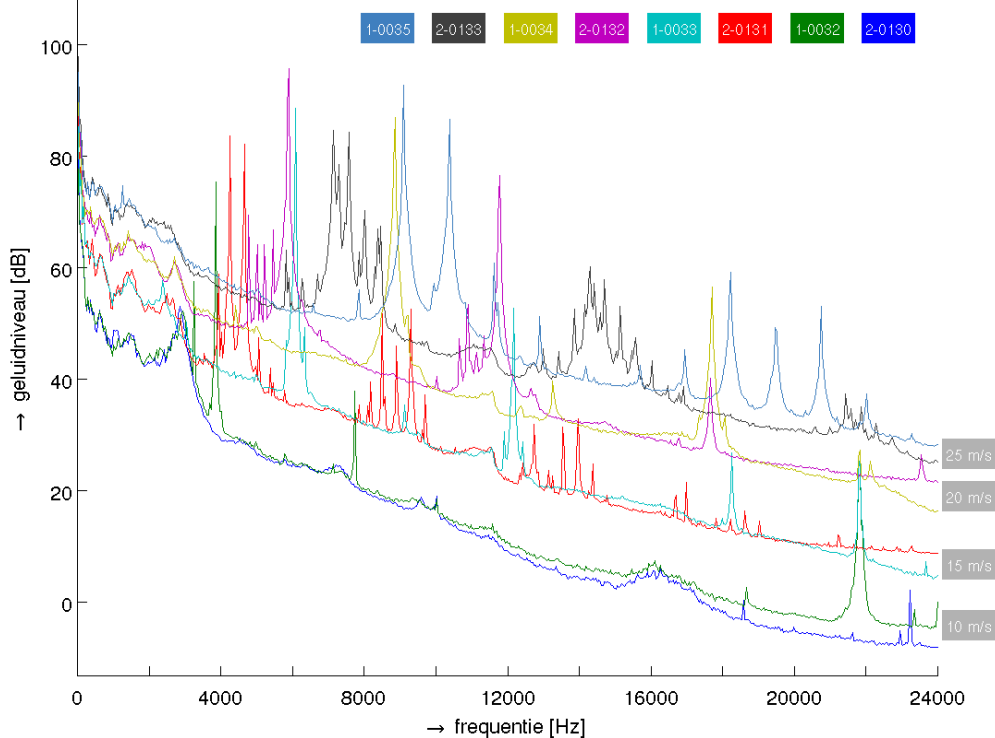
rooster 2 (draagstaaf 30x3, 2-0114 e.v.) vs. rooster 3 (draagstaaf 40x2, 1-0032 e.v.)

metingen: 2-0126, 1-0036, 2-0127, 1-0037, 2-0128, 1-0038, 2-0129, 1-0039



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

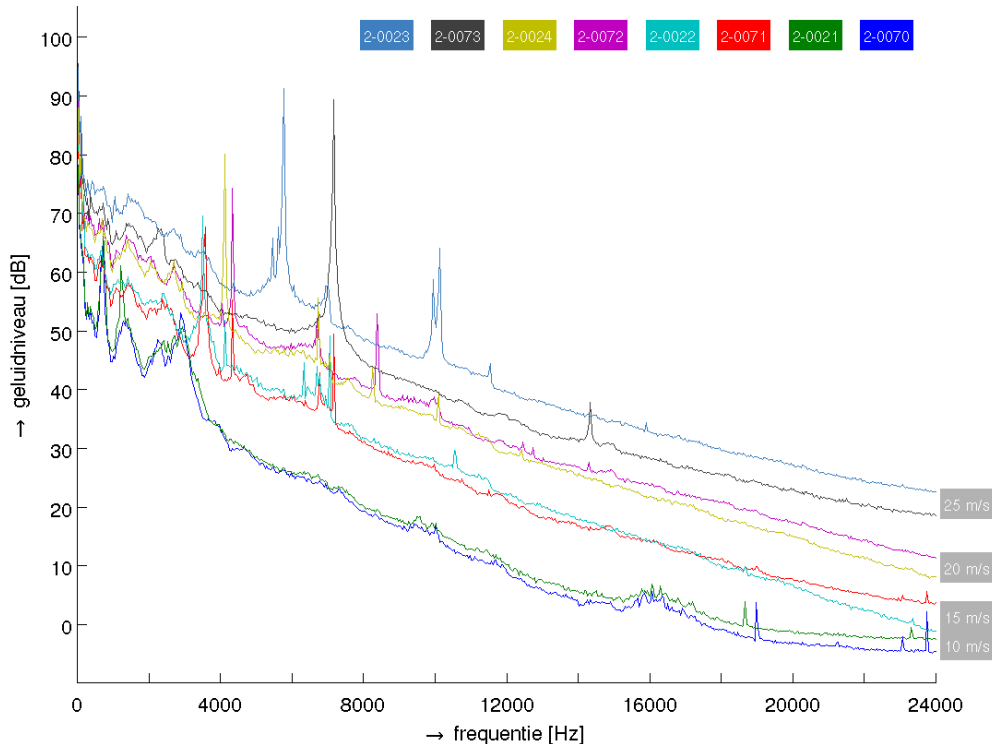
metingen: 2-0130, 1-0032, 2-0131, 1-0033, 2-0132, 1-0034, 2-0133, 1-0035



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.)

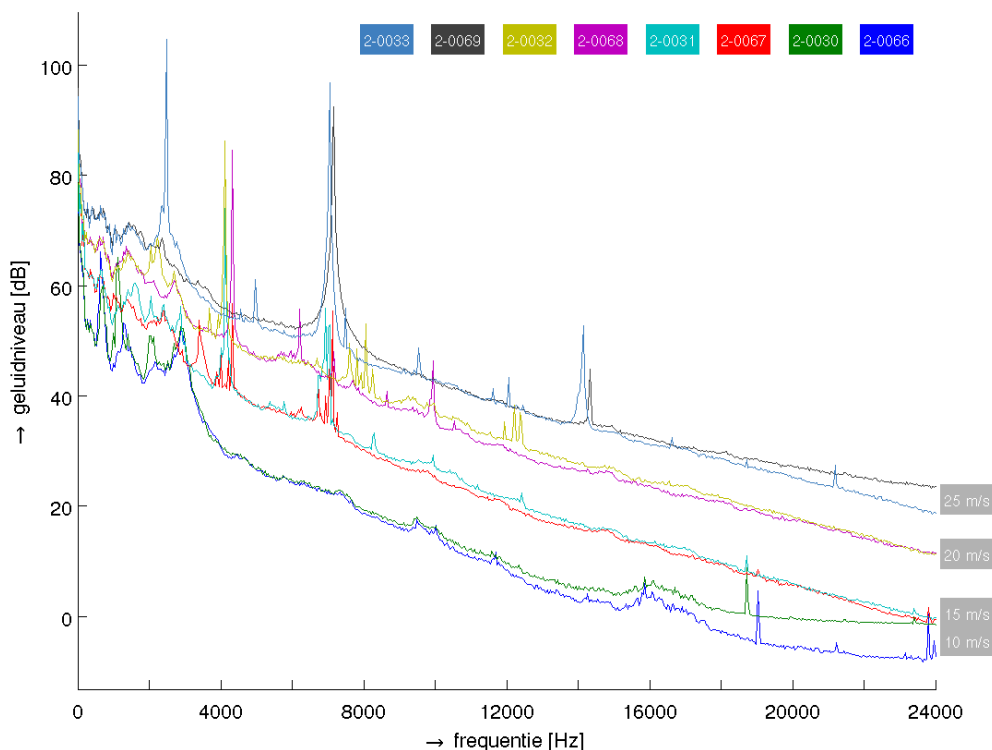
metingen: 2-0070, 2-0021, 2-0071, 2-0022, 2-0072, 2-0024, 2-0073, 2-0023



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.

metingen: 2-0066, 2-0030, 2-0067, 2-0031, 2-0068, 2-0032, 2-0069, 2-0033



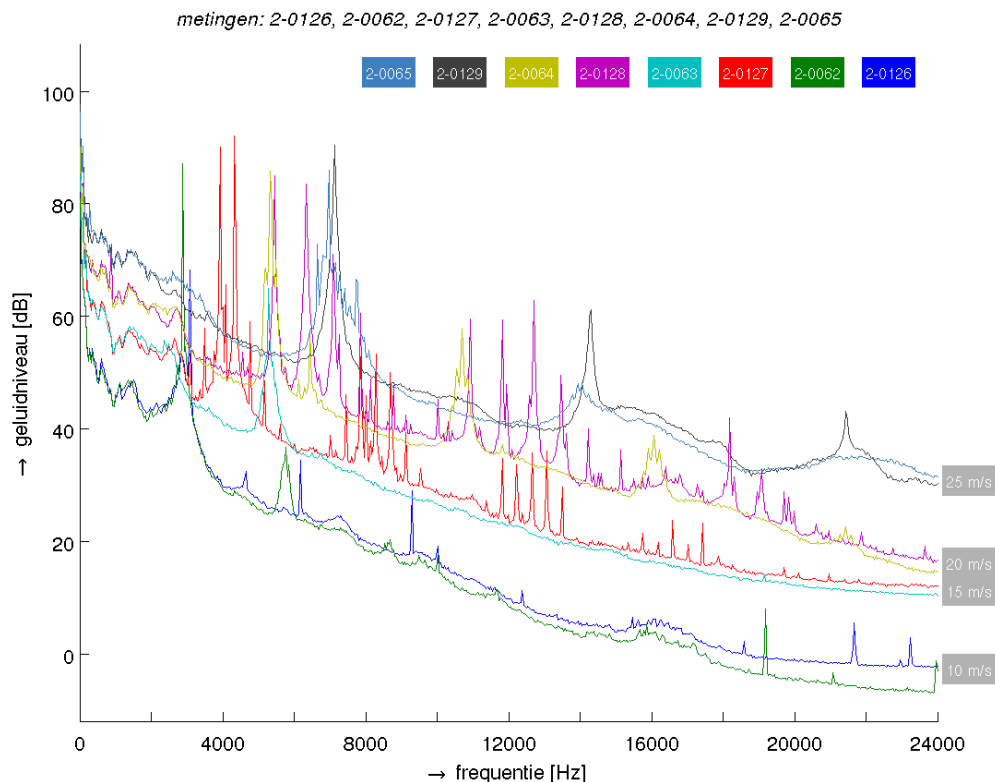
figuur 13 Rooster 5 en rooster 6 onder vergelijkbare hoeken (83 resp. 90 voor)

C) Maaswijdte

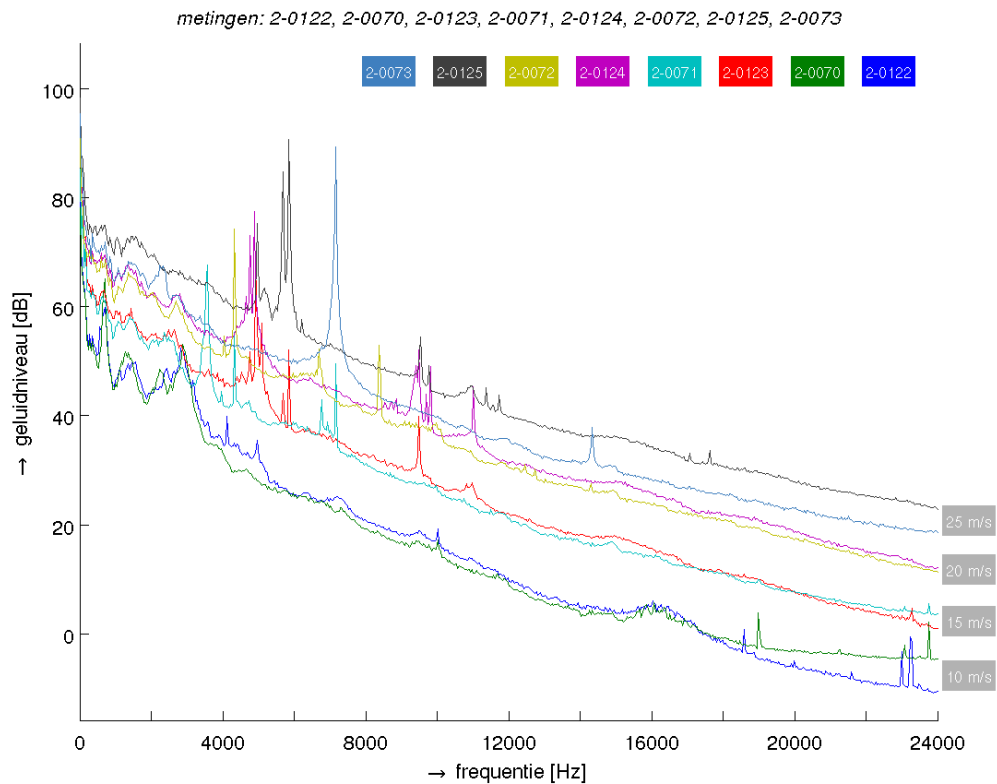
In de hiernavolgende grafieken zijn meetseries gecombineerd waarbij onder een vergelijkbare hoek tonaal geluid werd gevonden, bij roosters met verschillende maaswijdtes. De beproefde roosters kennen een tweetal verschillende maaswijdte, te weten 33.33x33.33 en 49.99x49.99 (mm).

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)

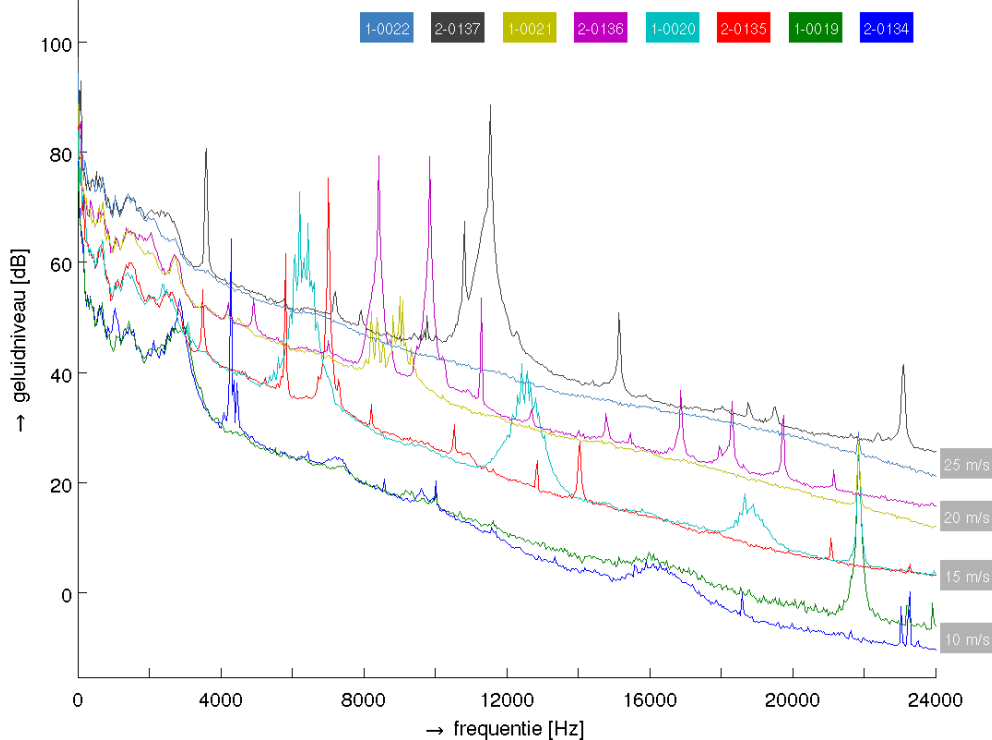


figuur 15 Rooster 2 en rooster 5 onder vergelijkbare hoeken (77 resp. 80 achter)

NB: 2-0073 betreft een meting bij 22.5 m/s; bij 25 resteerde hier slechts ruis

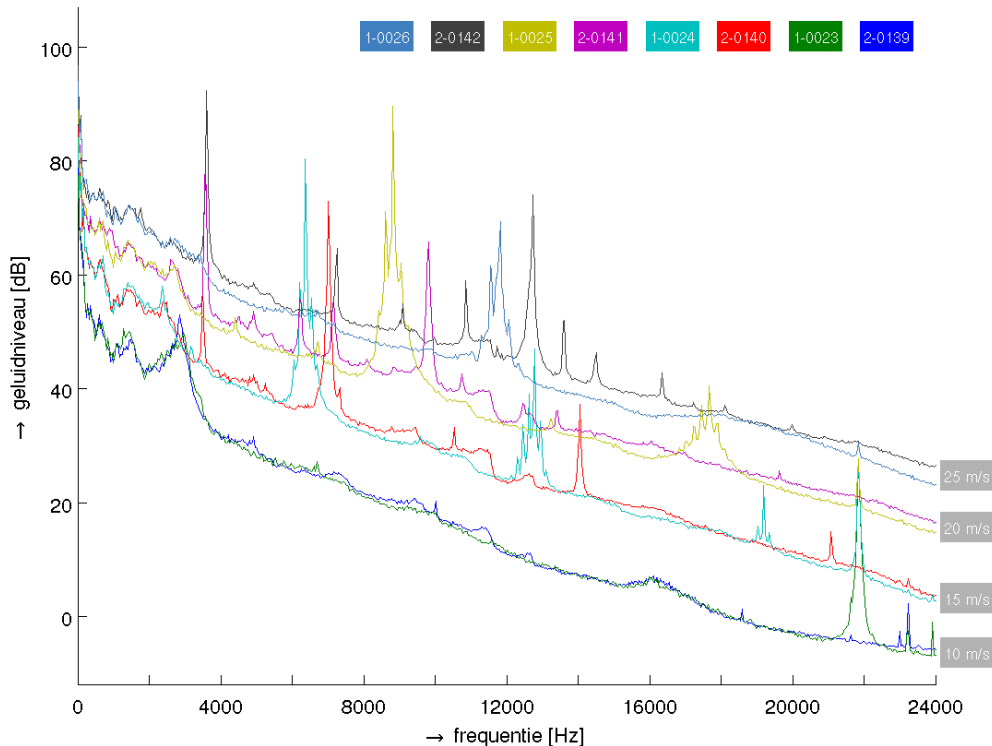
rooster 7 (maaswijdte 33.33, 2-0134 e.v.) vs. rooster 10 (maasw. 49.99, 1-0010 e.v.)

metingen: 2-0134, 1-0019, 2-0135, 1-0020, 2-0136, 1-0021, 2-0137, 1-0022



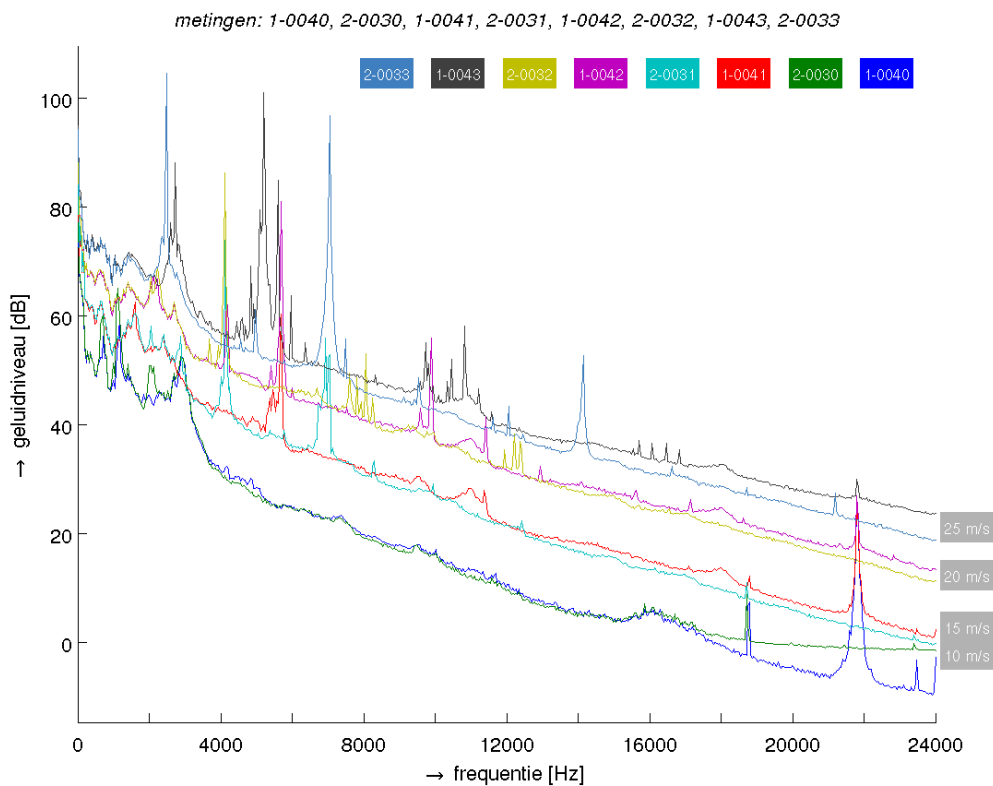
figuur 16 Rooster 7 en rooster 10 onder vergelijkbare hoeken (41 resp. 47 voor)

metingen: 2-0139, 1-0023, 2-0140, 1-0024, 2-0141, 1-0025, 2-0142, 1-0026



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

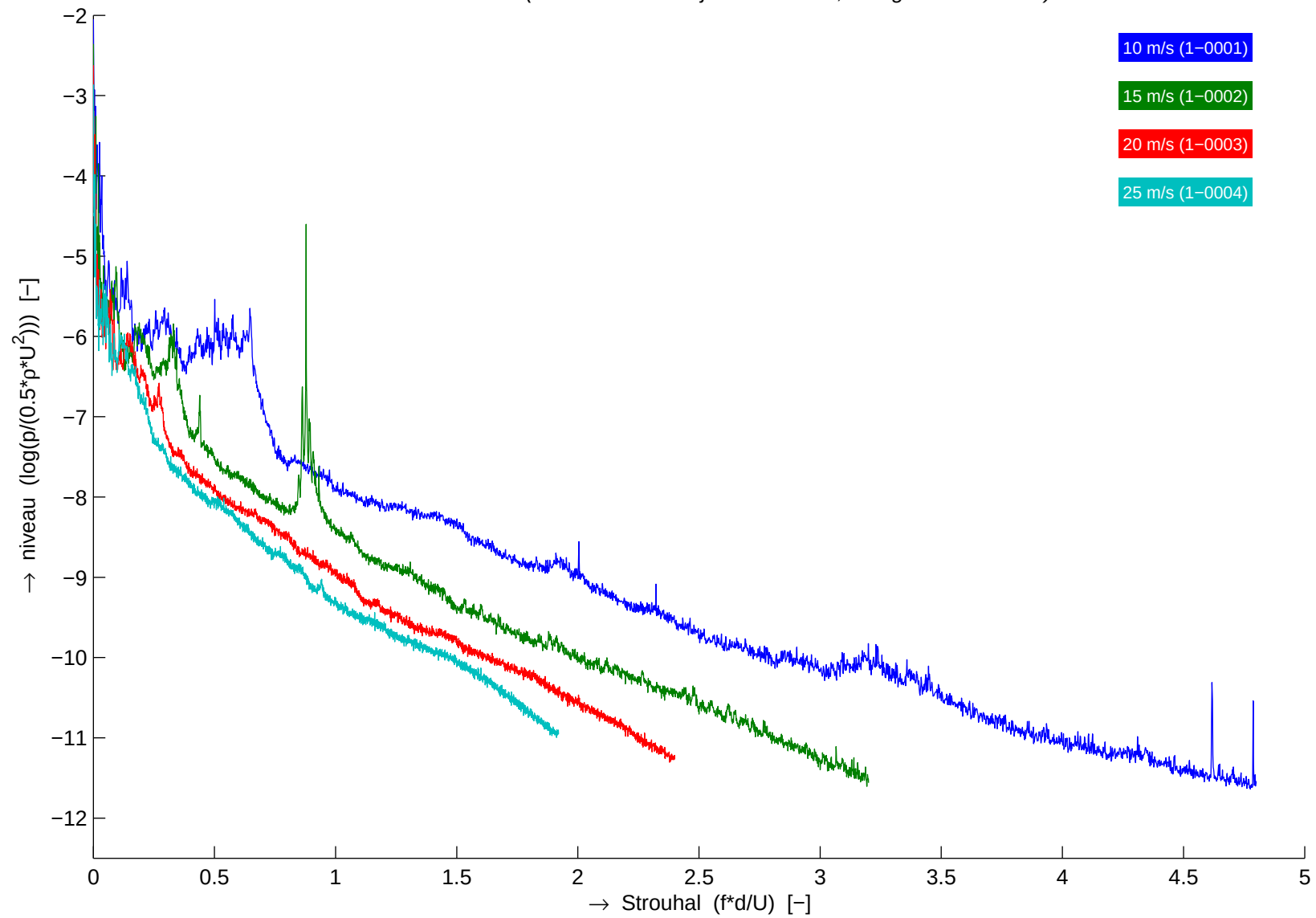
rooster 3 (maaswijdte 33.33, 1-0032 e.v.) vs. rooster 6 (maasw. 49.99, 2-0021 e.v.)



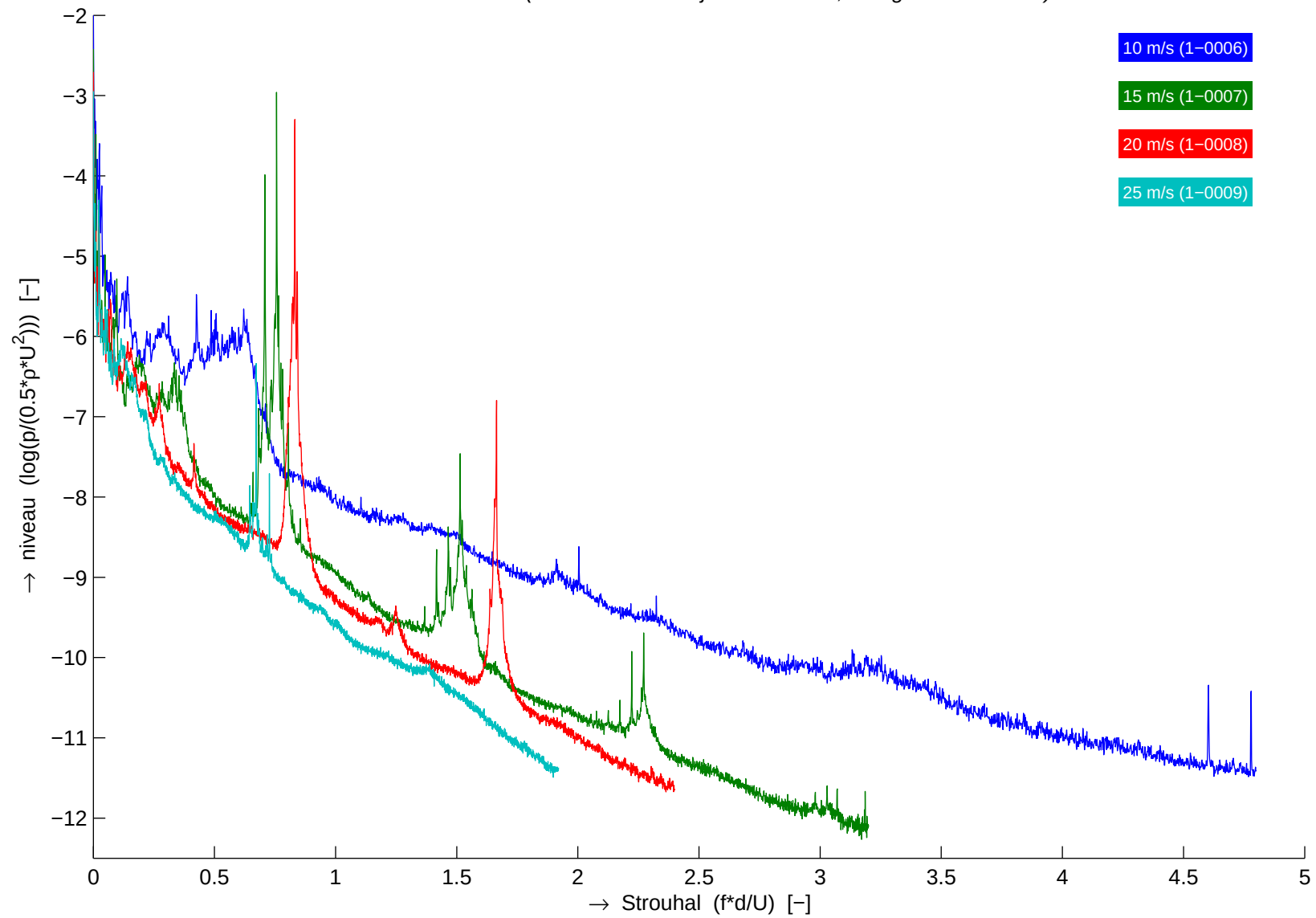
figuur 18 Rooster 3 en rooster 6 onder vergelijkbare hoeken (-89 resp. 90 voor)

Bijlage 3 - DIMENSIELOZE VERGELIJKING, PER MEETSERIE (Strouhal)

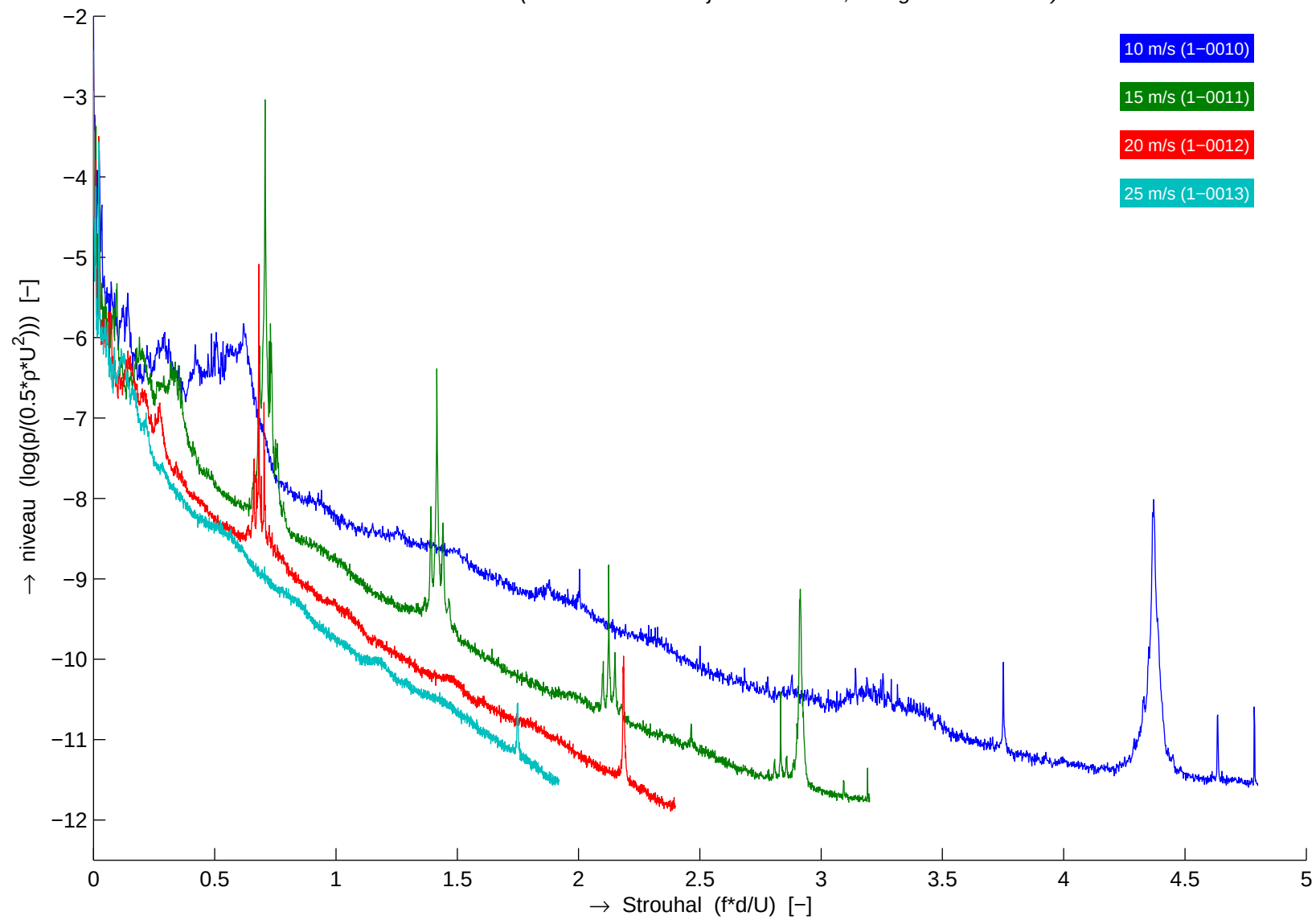
meetserie 1-0001 (rooster 4: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)



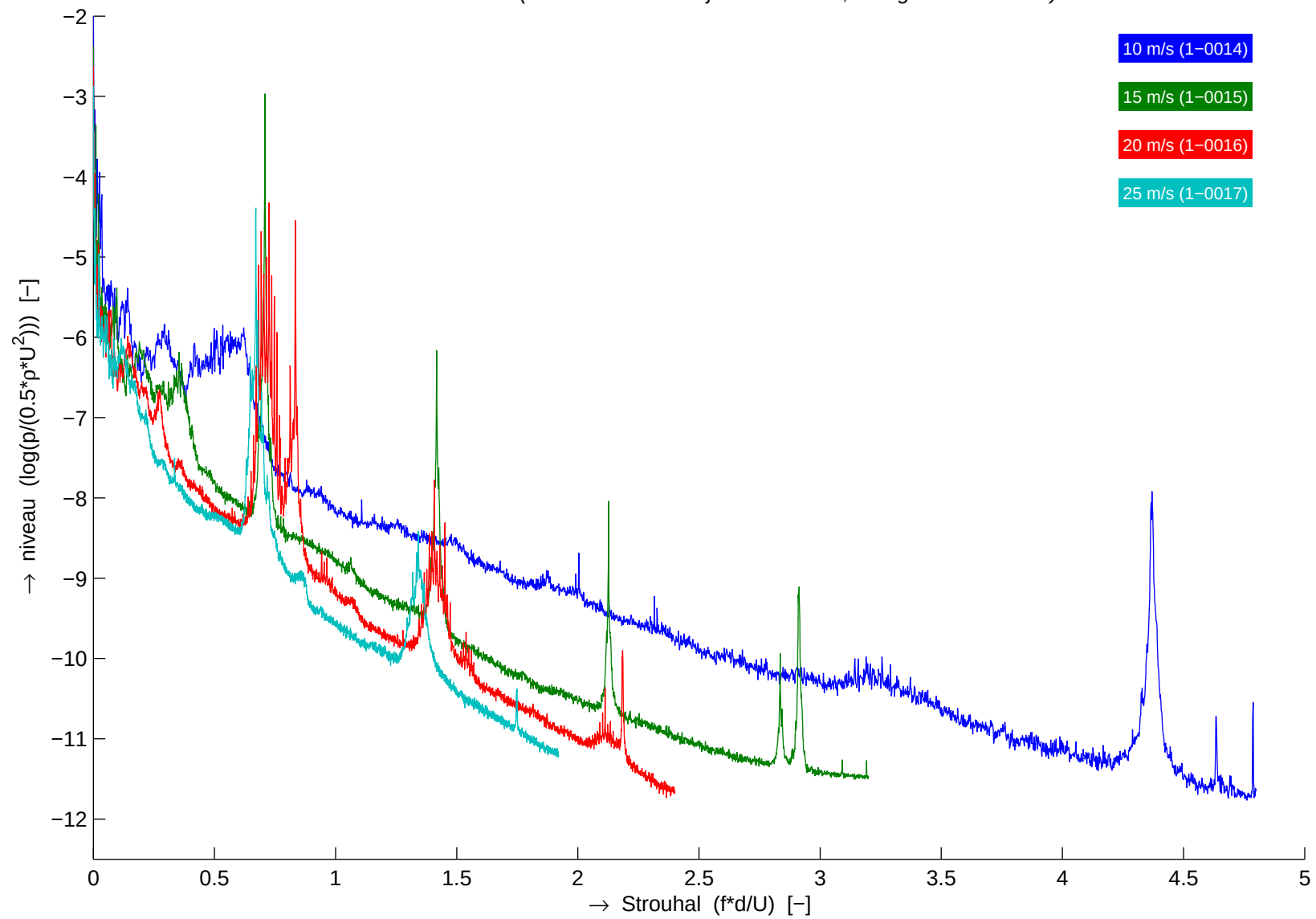
meetserie 1-0006 (rooster 4: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)



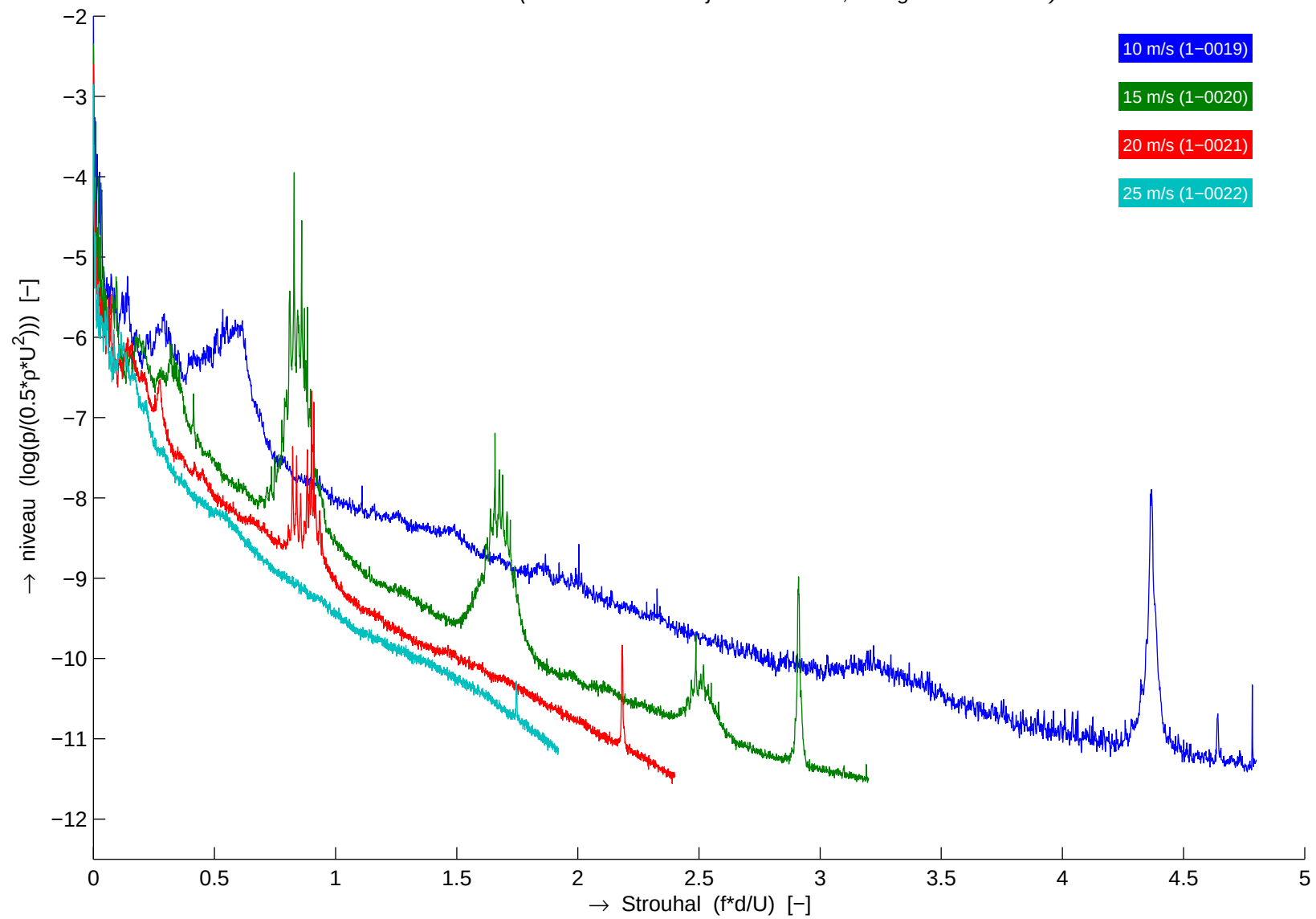
meetserie 1-0010 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)



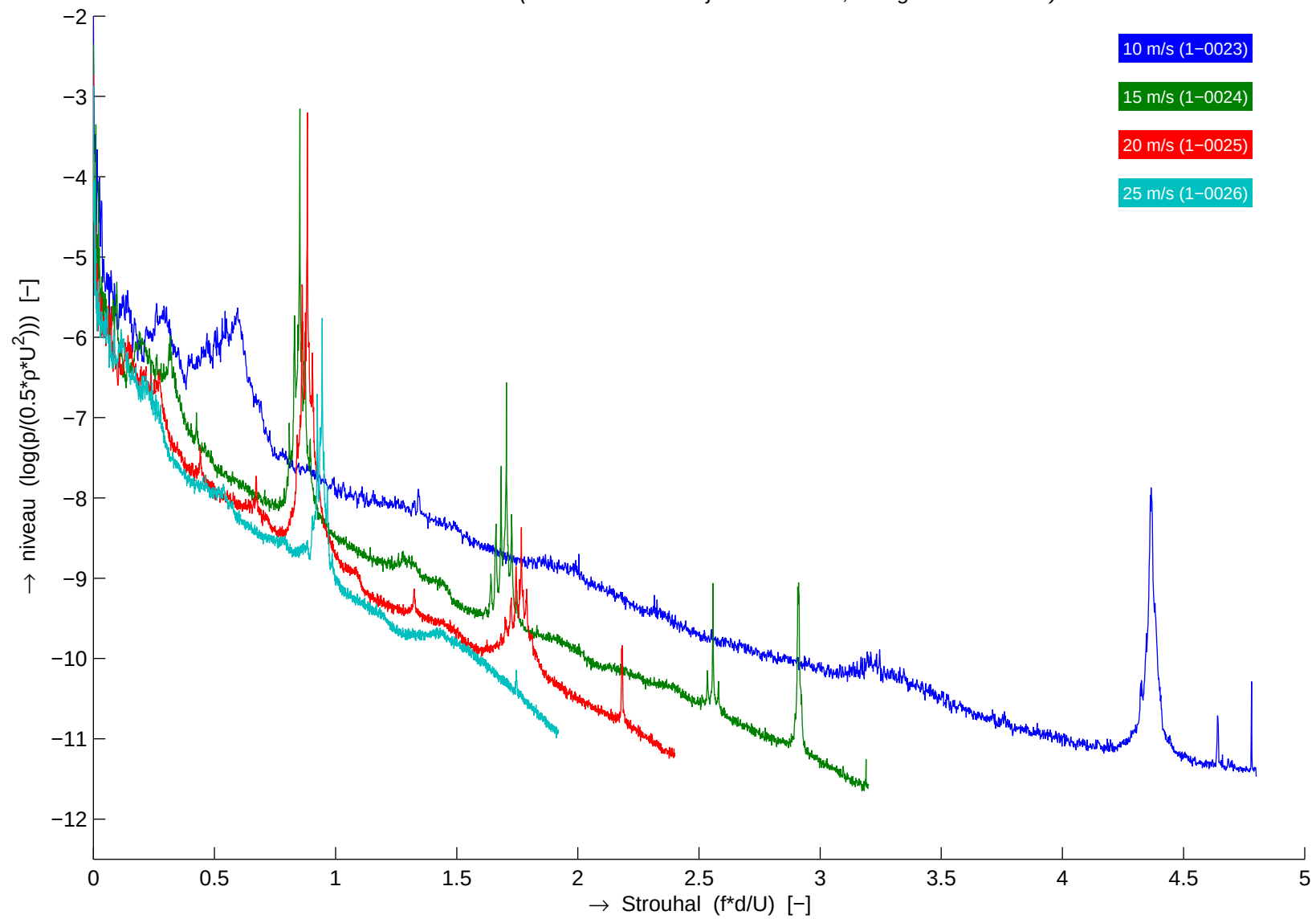
meetserie 1-0014 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)



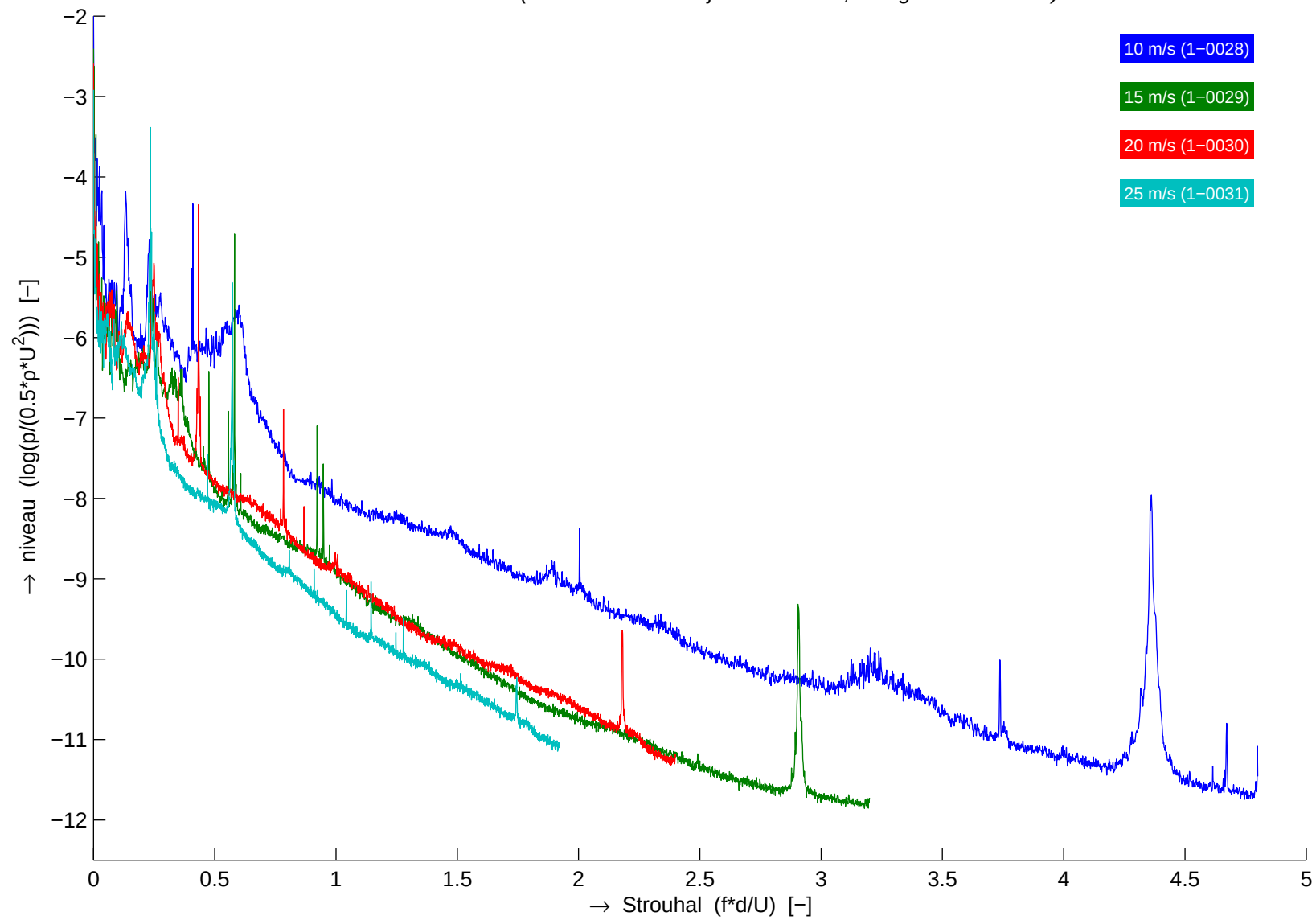
meetserie 1-0019 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)



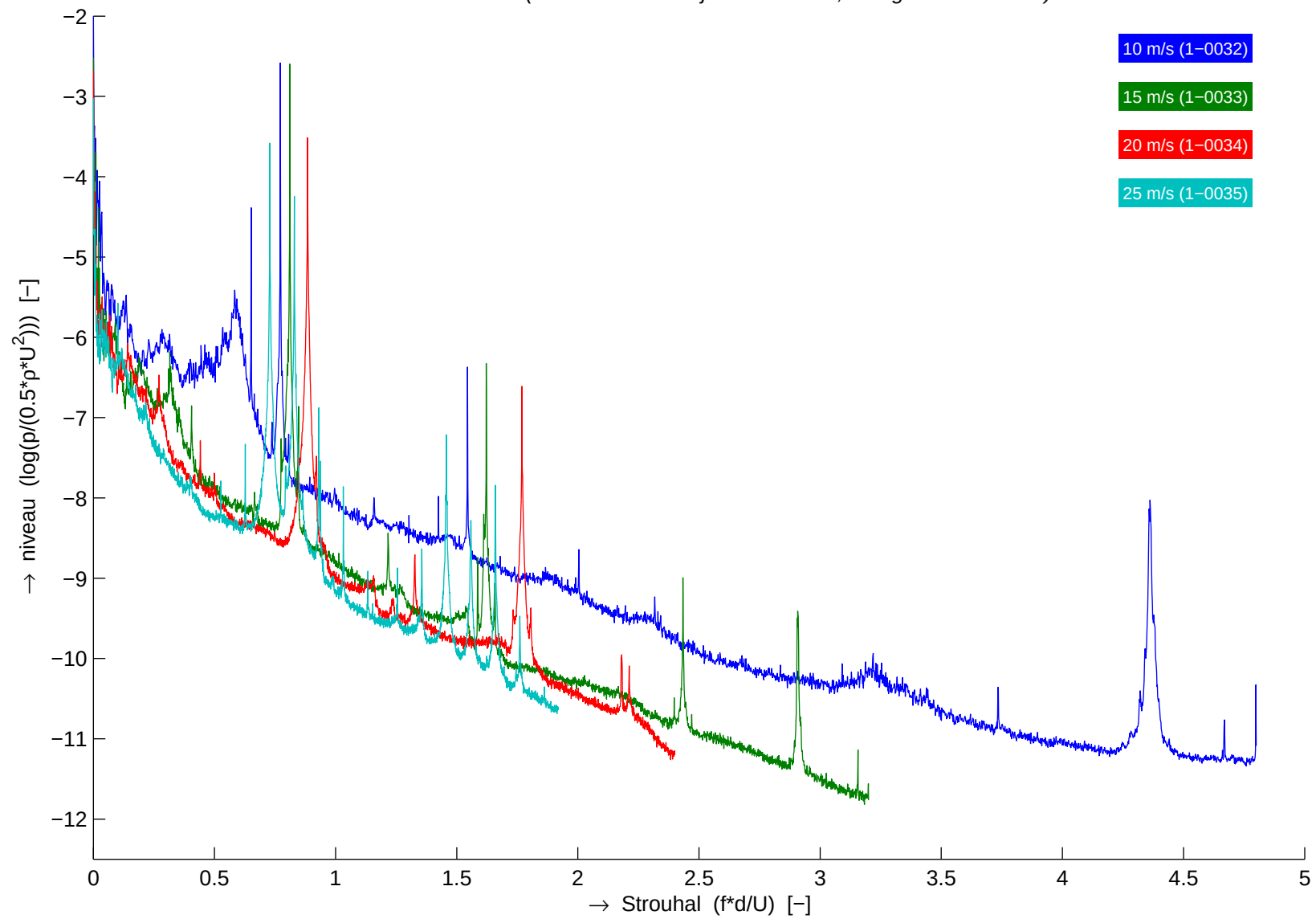
meetserie 1-0023 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)



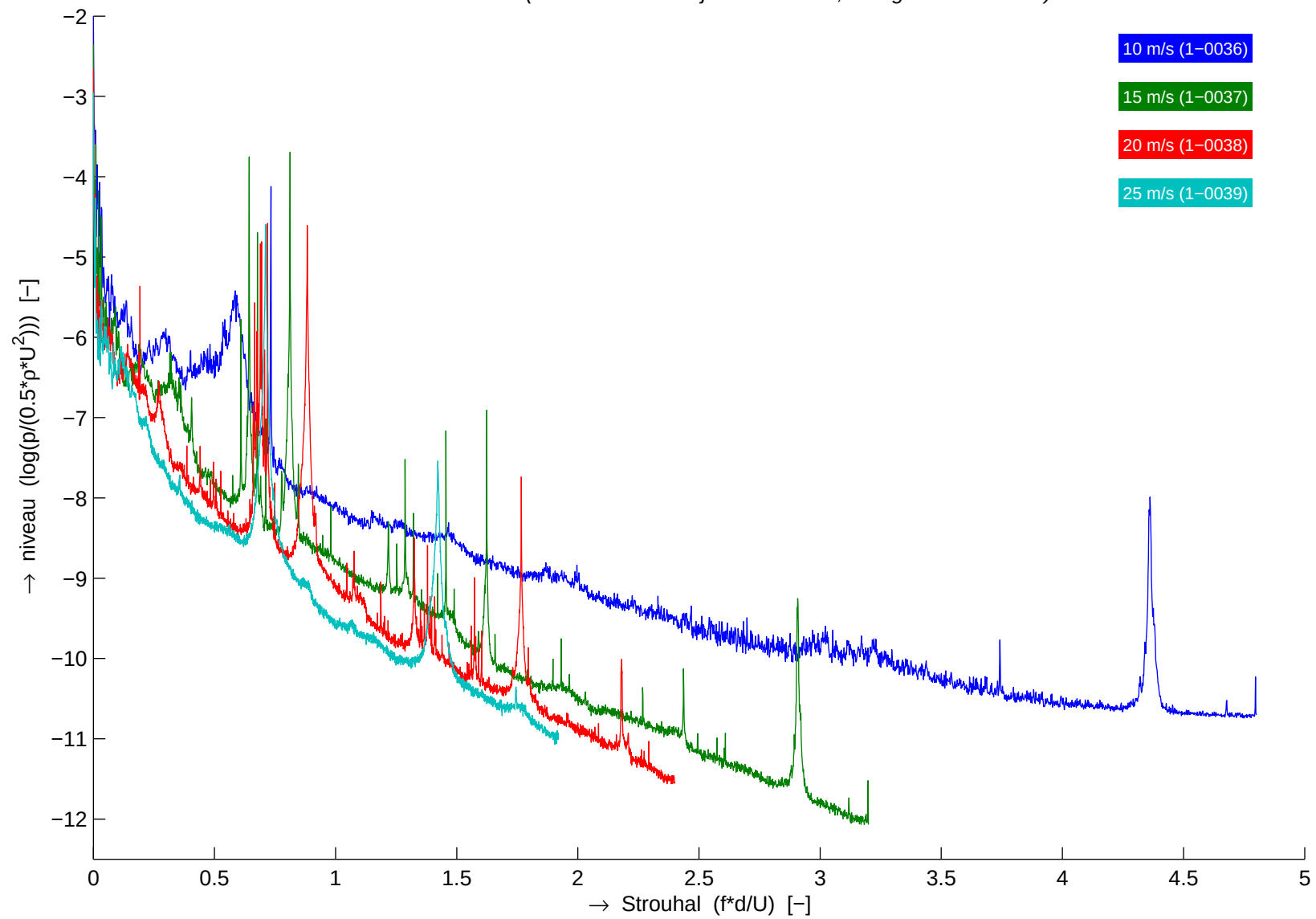
meetserie 1-0028 (rooster 10: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x2 mm)



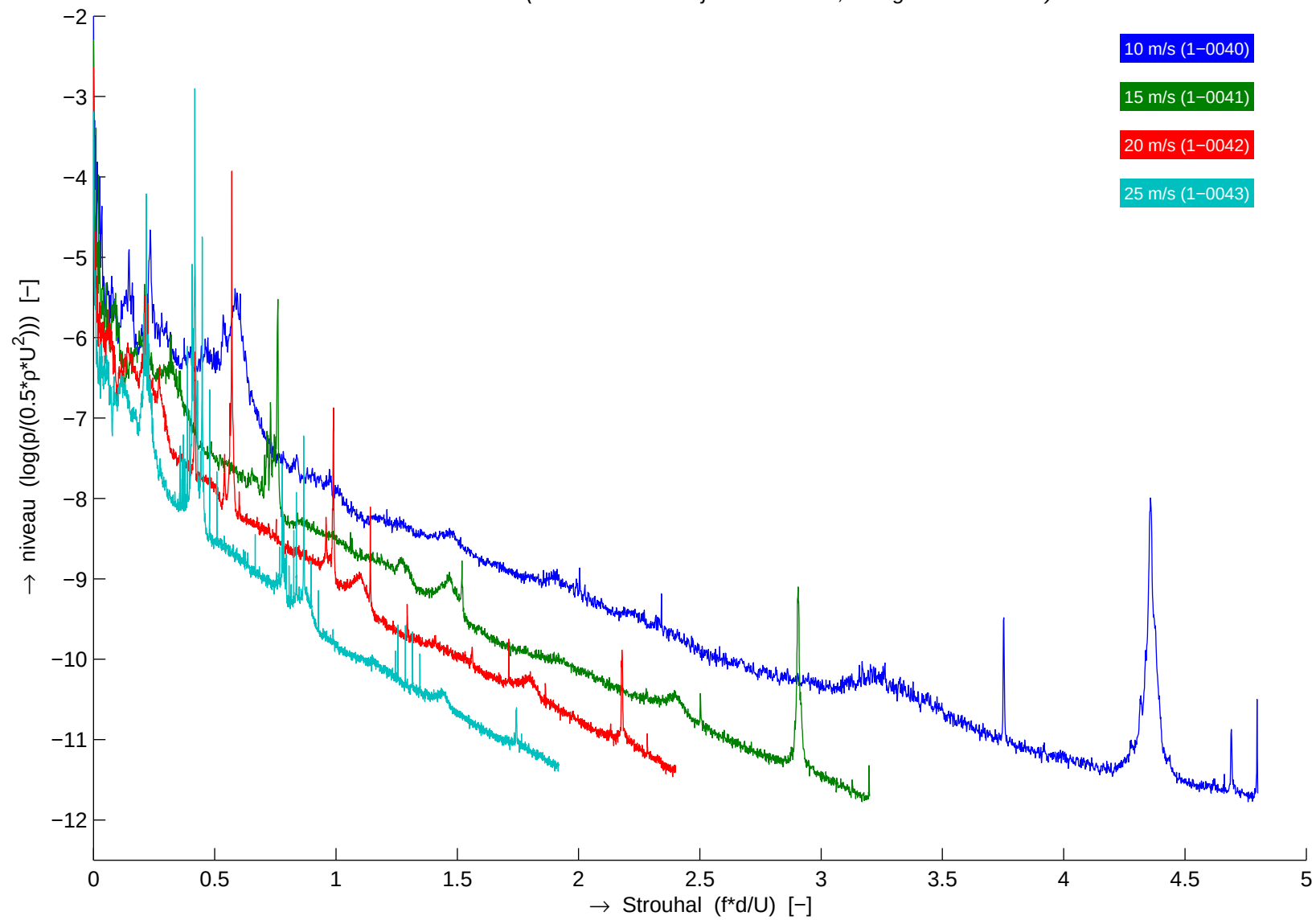
meetserie 1-0032 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)



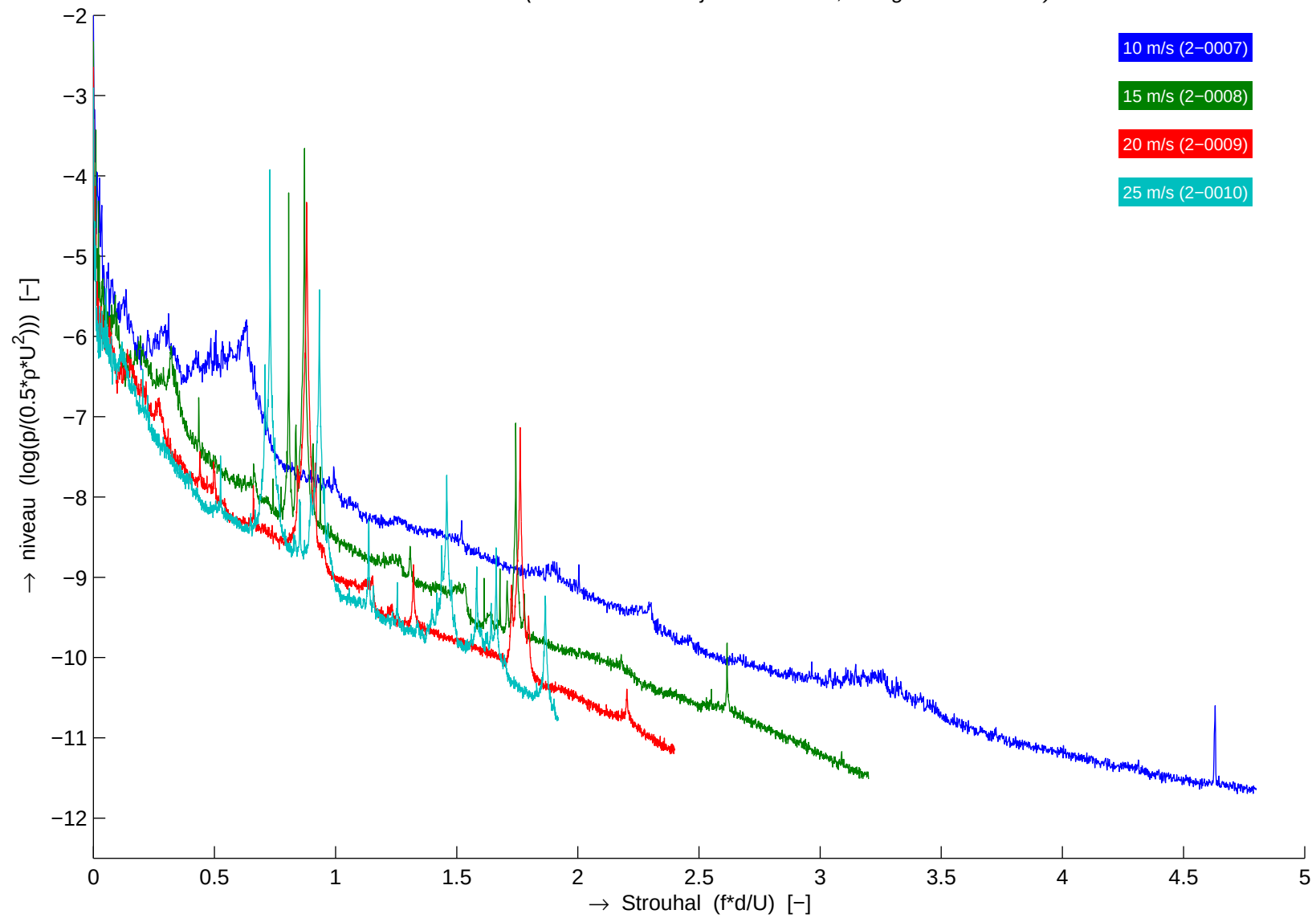
meetserie 1-0036 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)



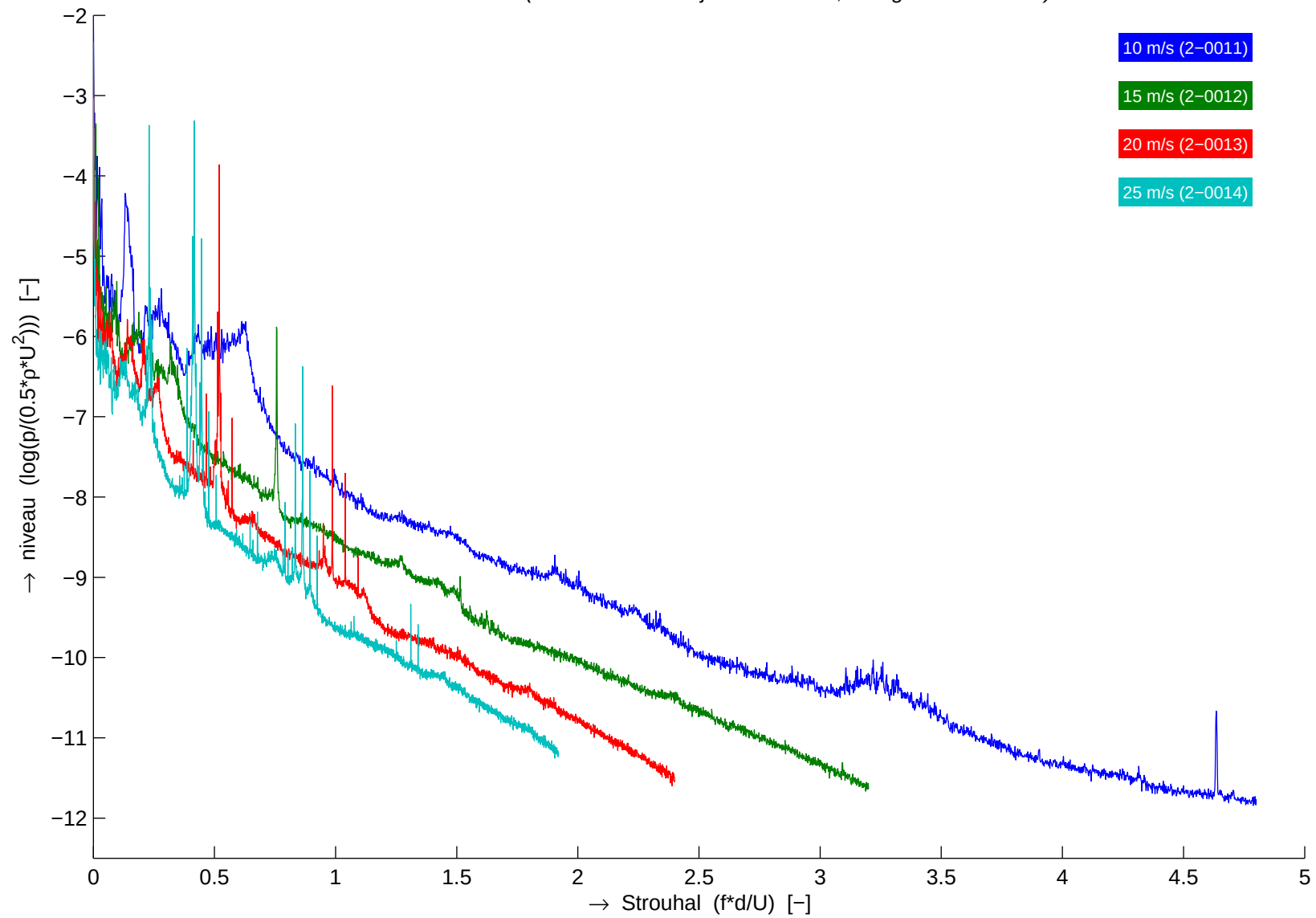
meetserie 1-0040 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)



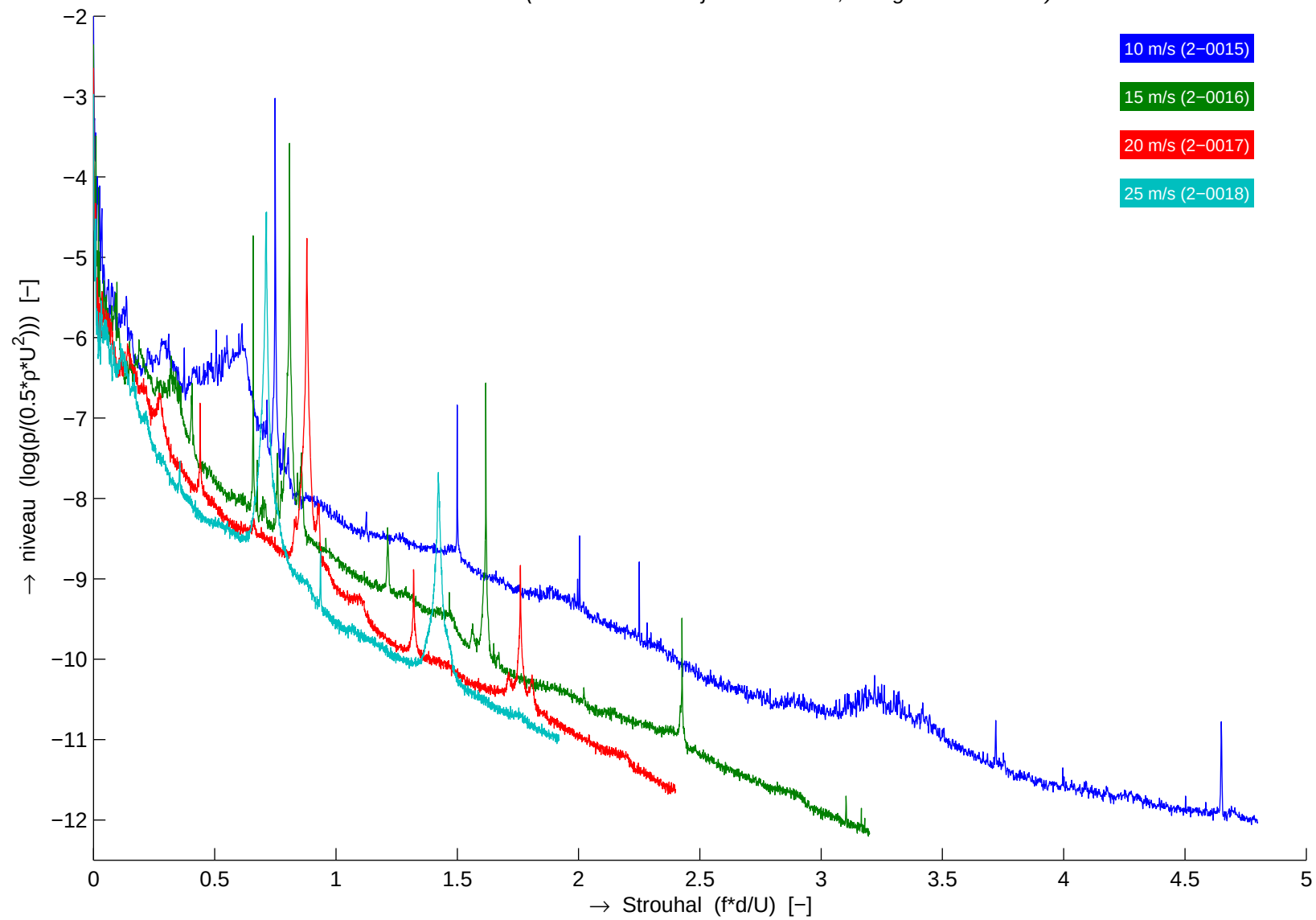
meetserie 2-0007 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)



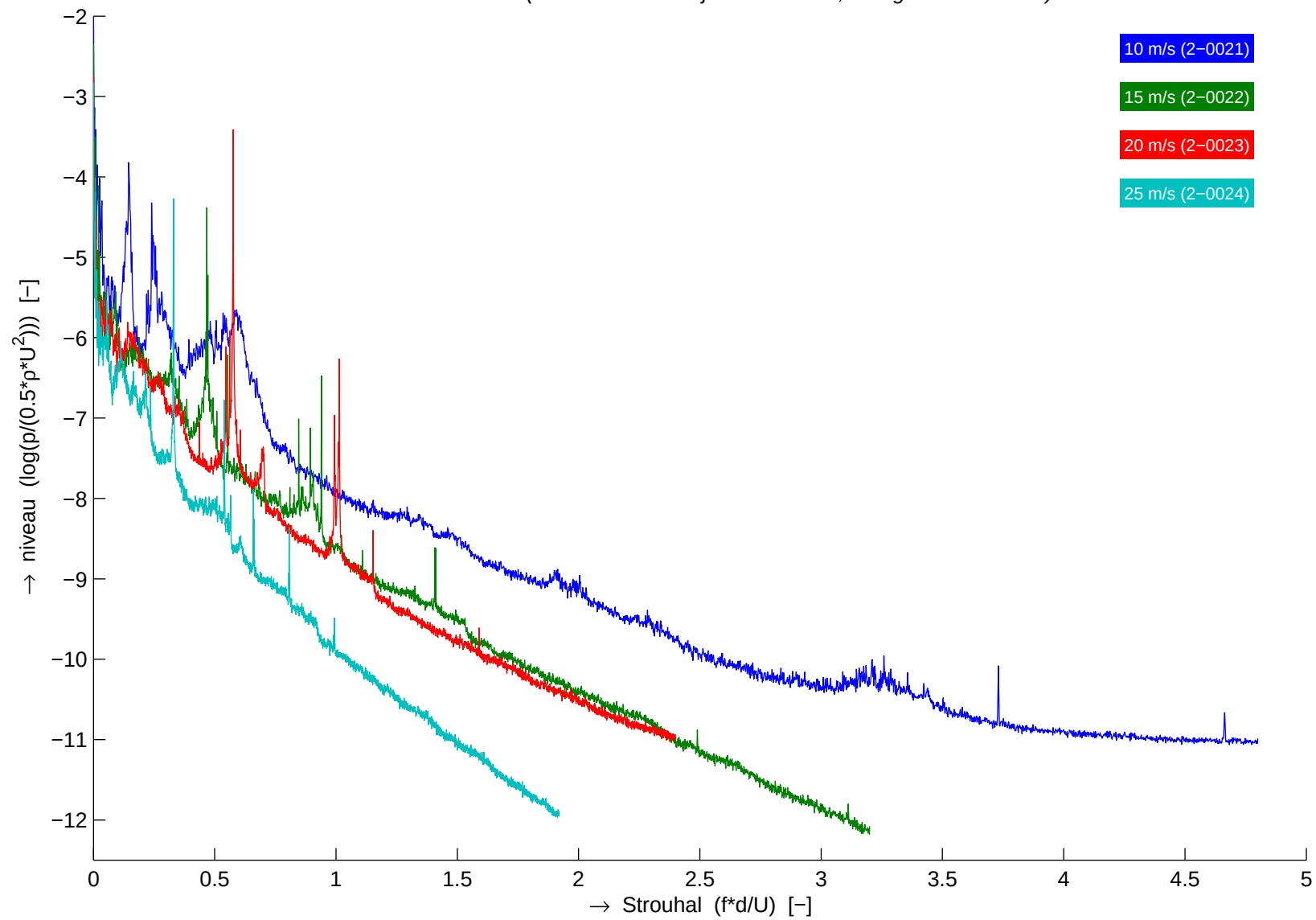
meetserie 2-0011 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)



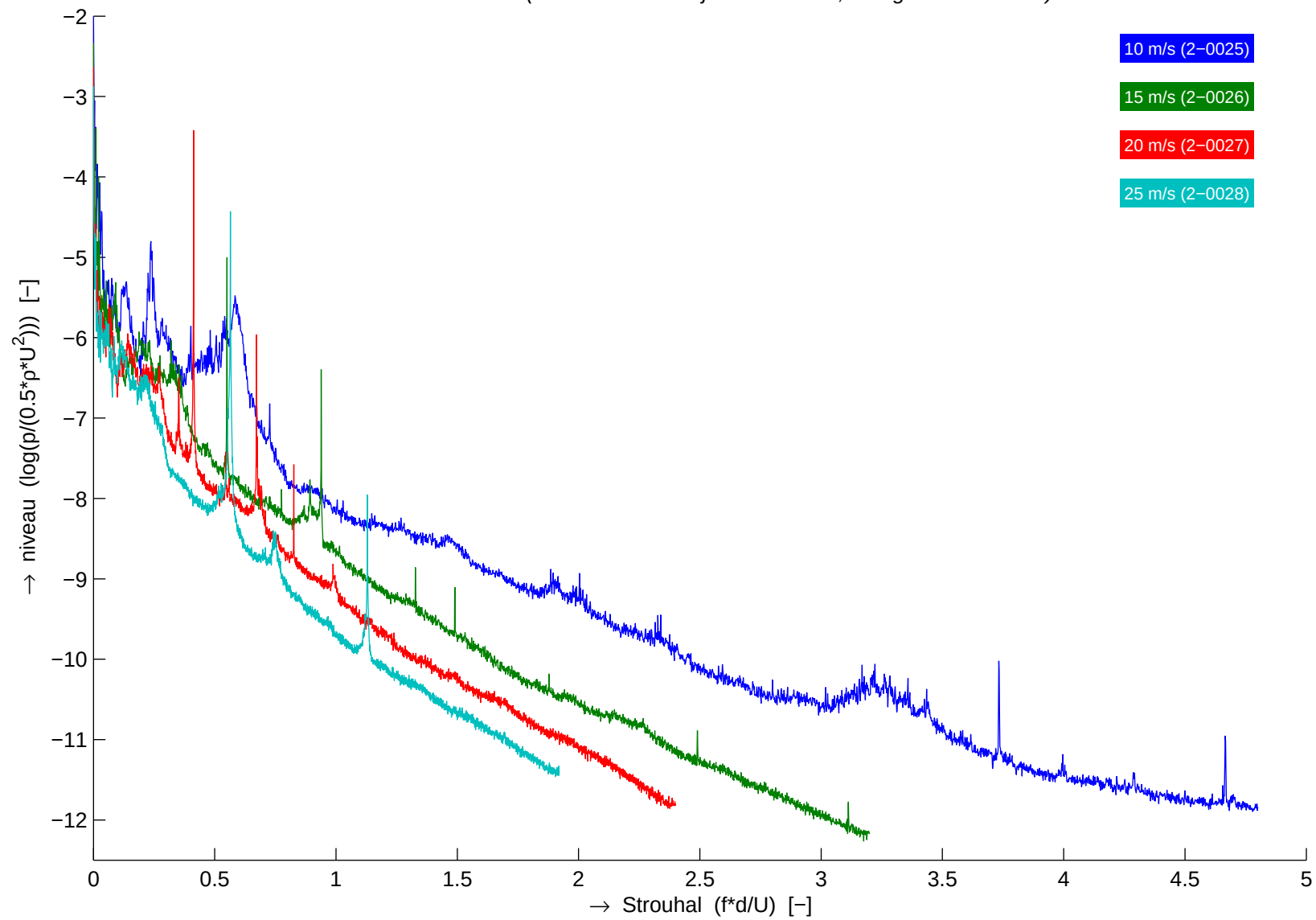
meetserie 2-0015 (rooster 3: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 40x2 mm)



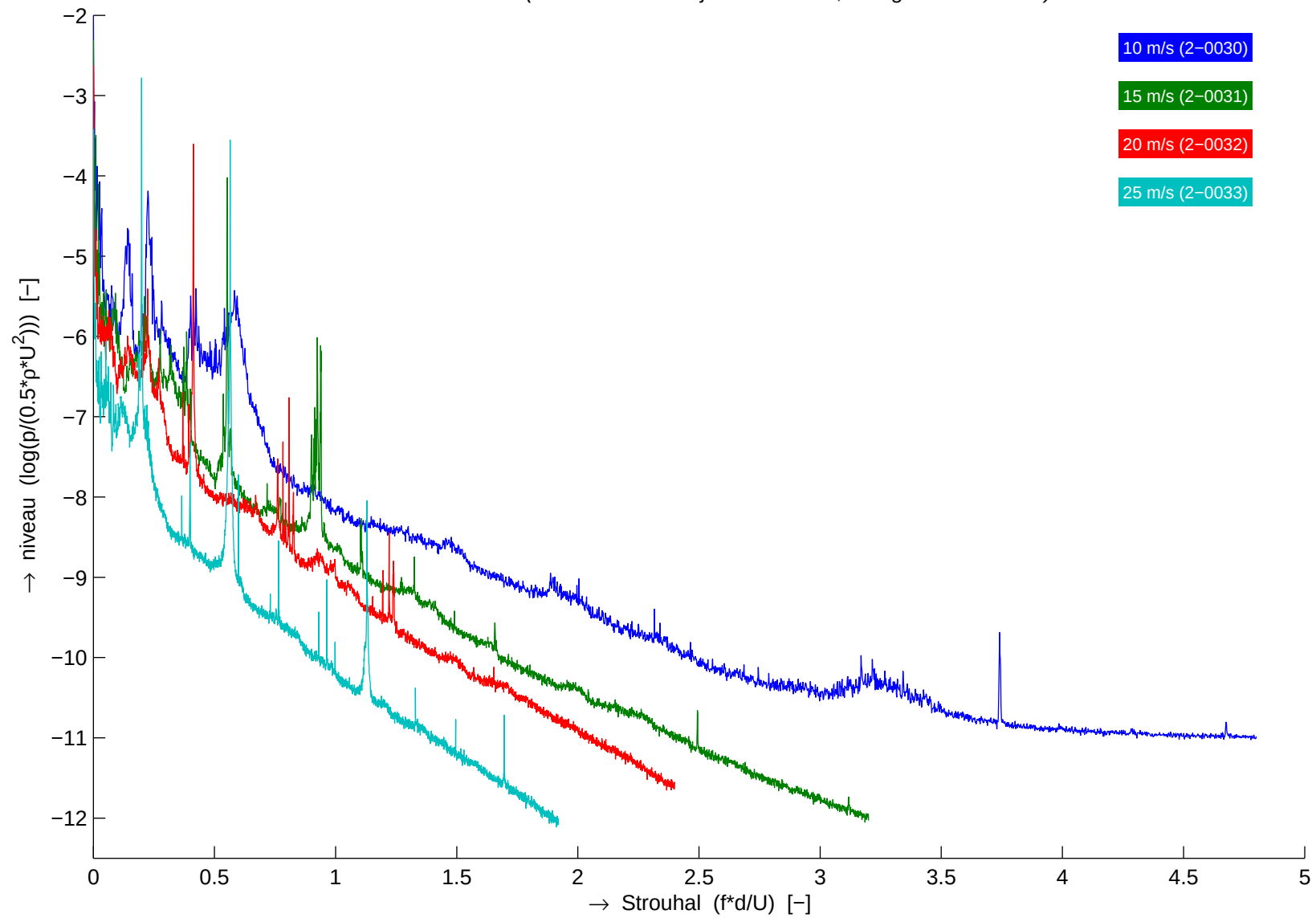
meetserie 2-0021 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)



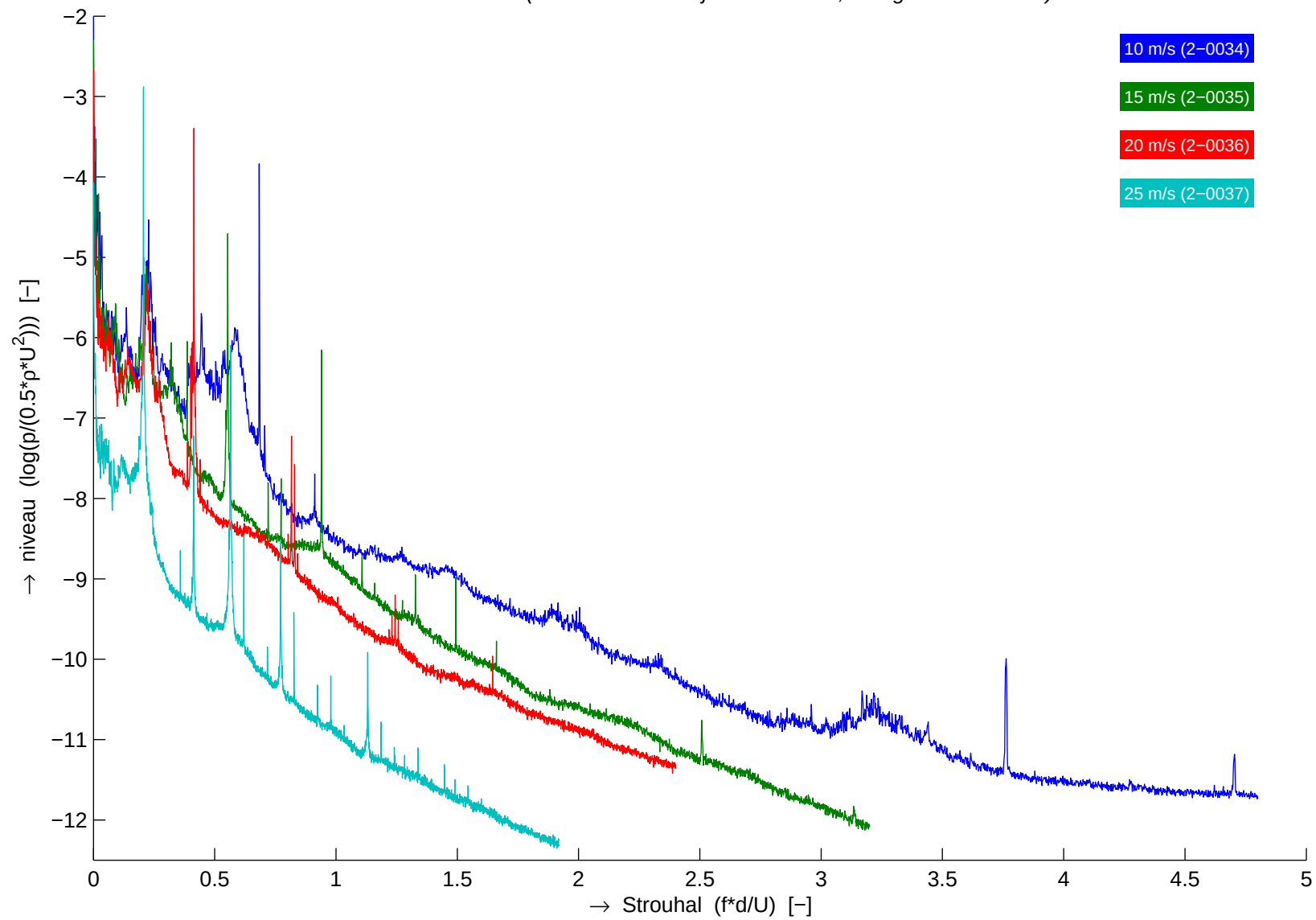
meetserie 2-0025 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)



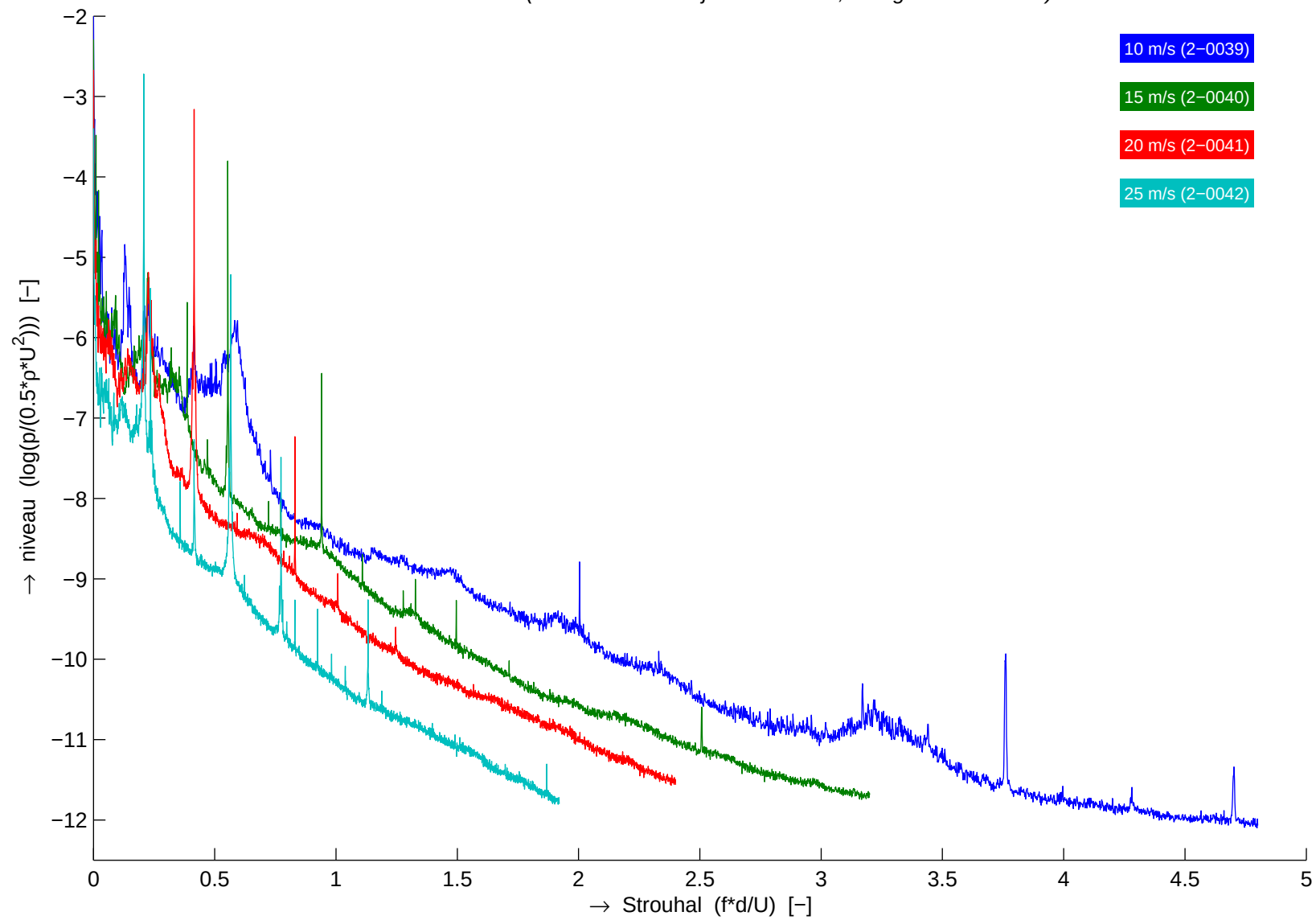
meetserie 2-0030 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)



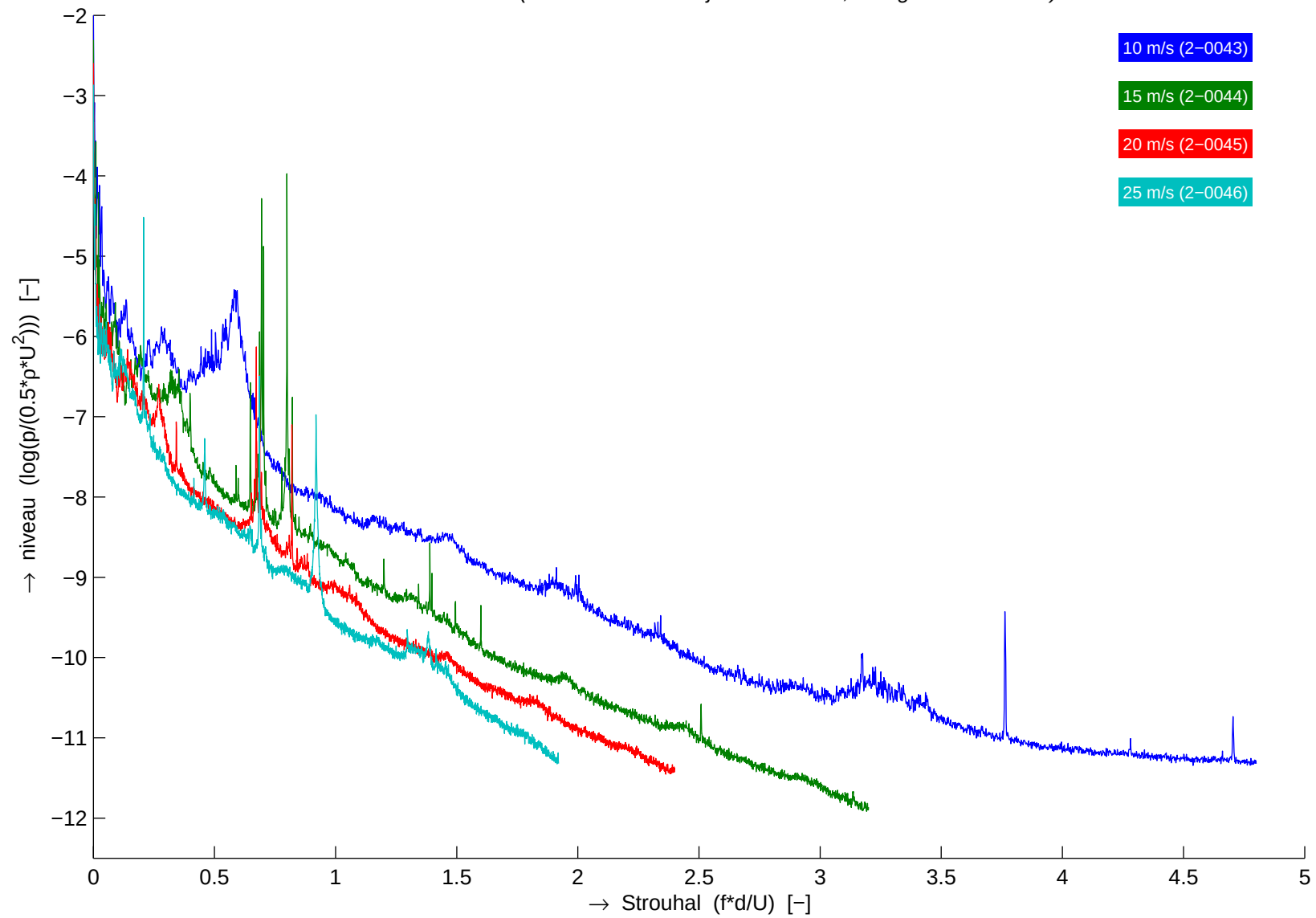
meetserie 2-0034 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)



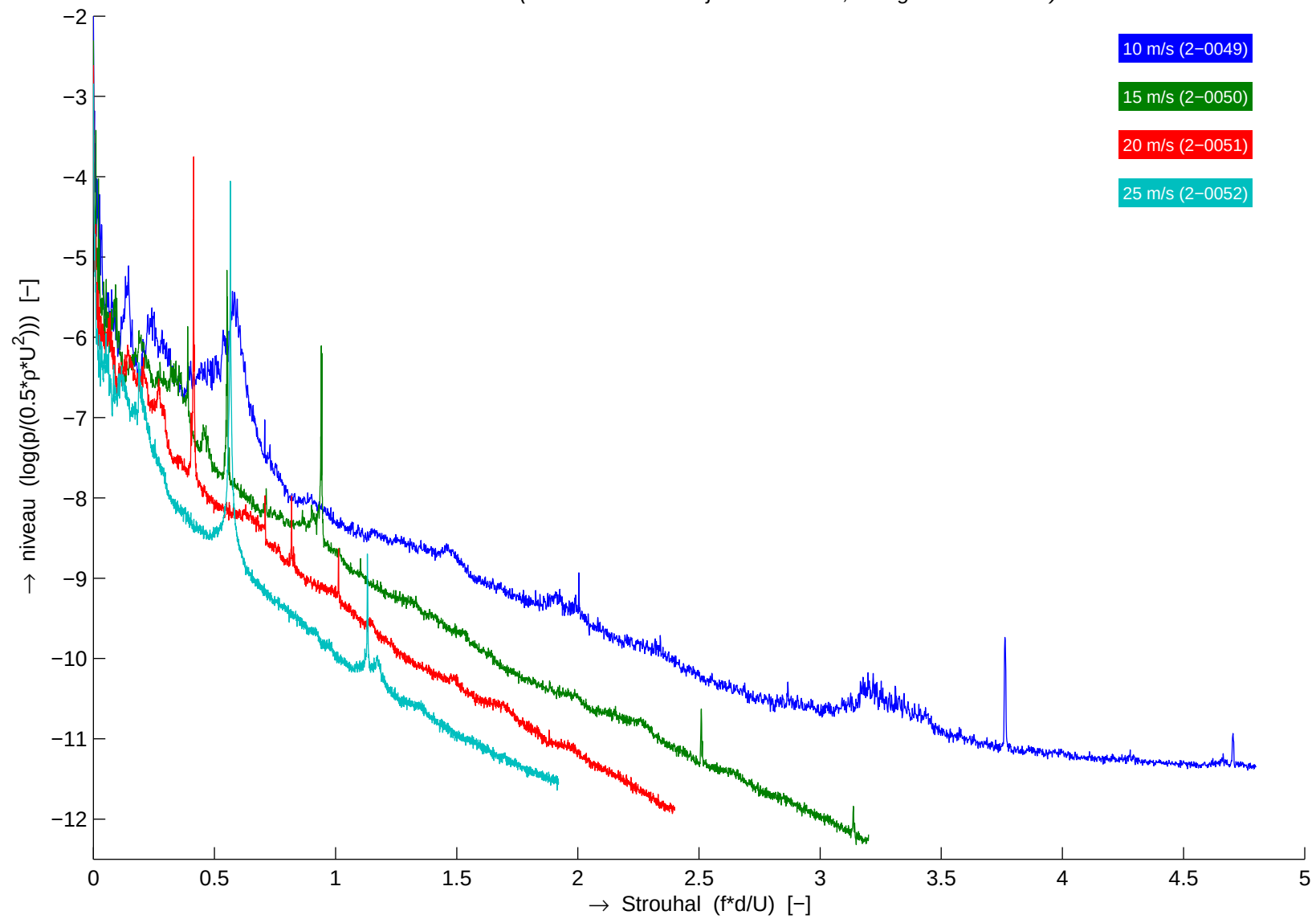
meetserie 2-0039 (rooster 6: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)



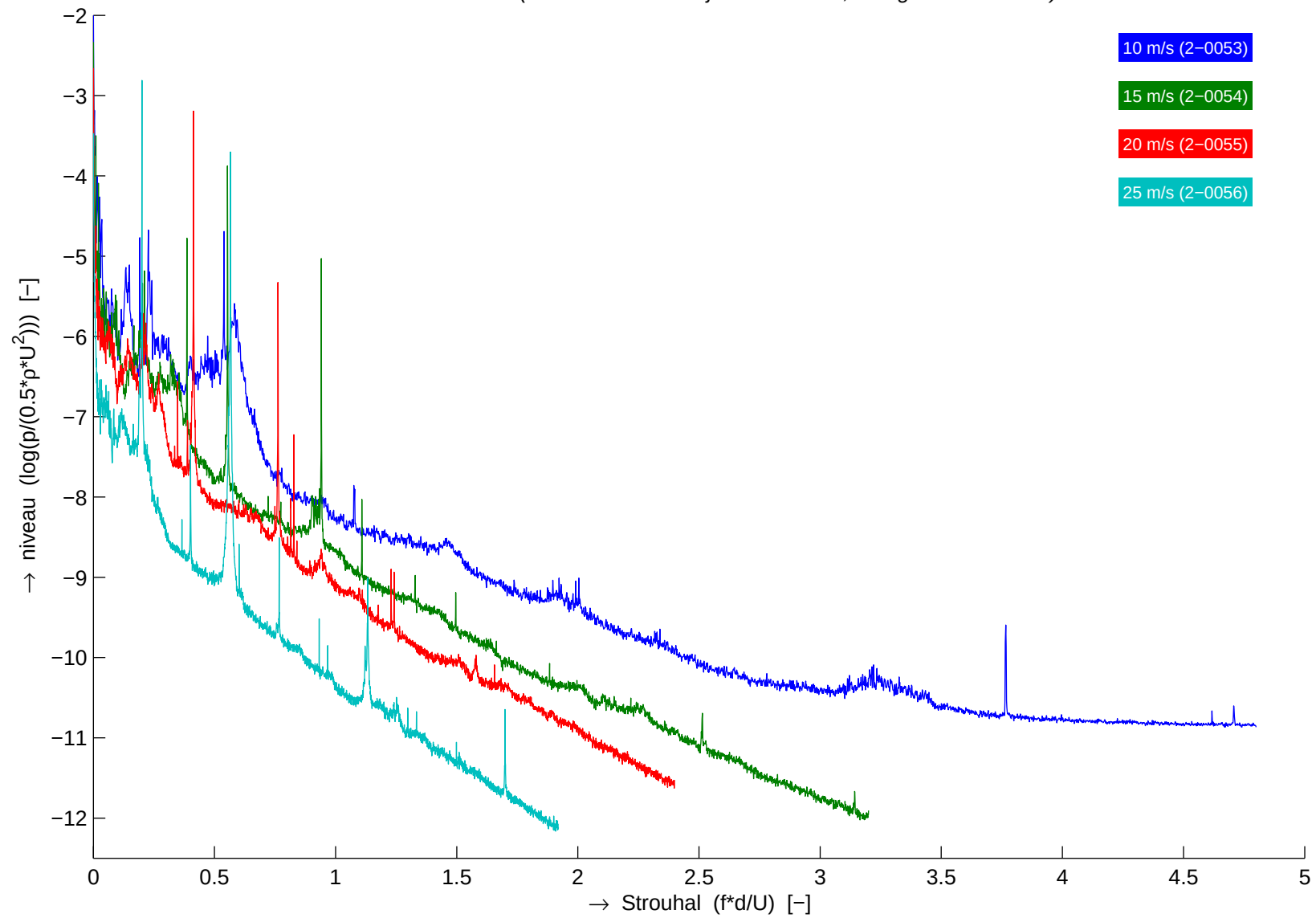
meetserie 2-0043 (rooster 12: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)



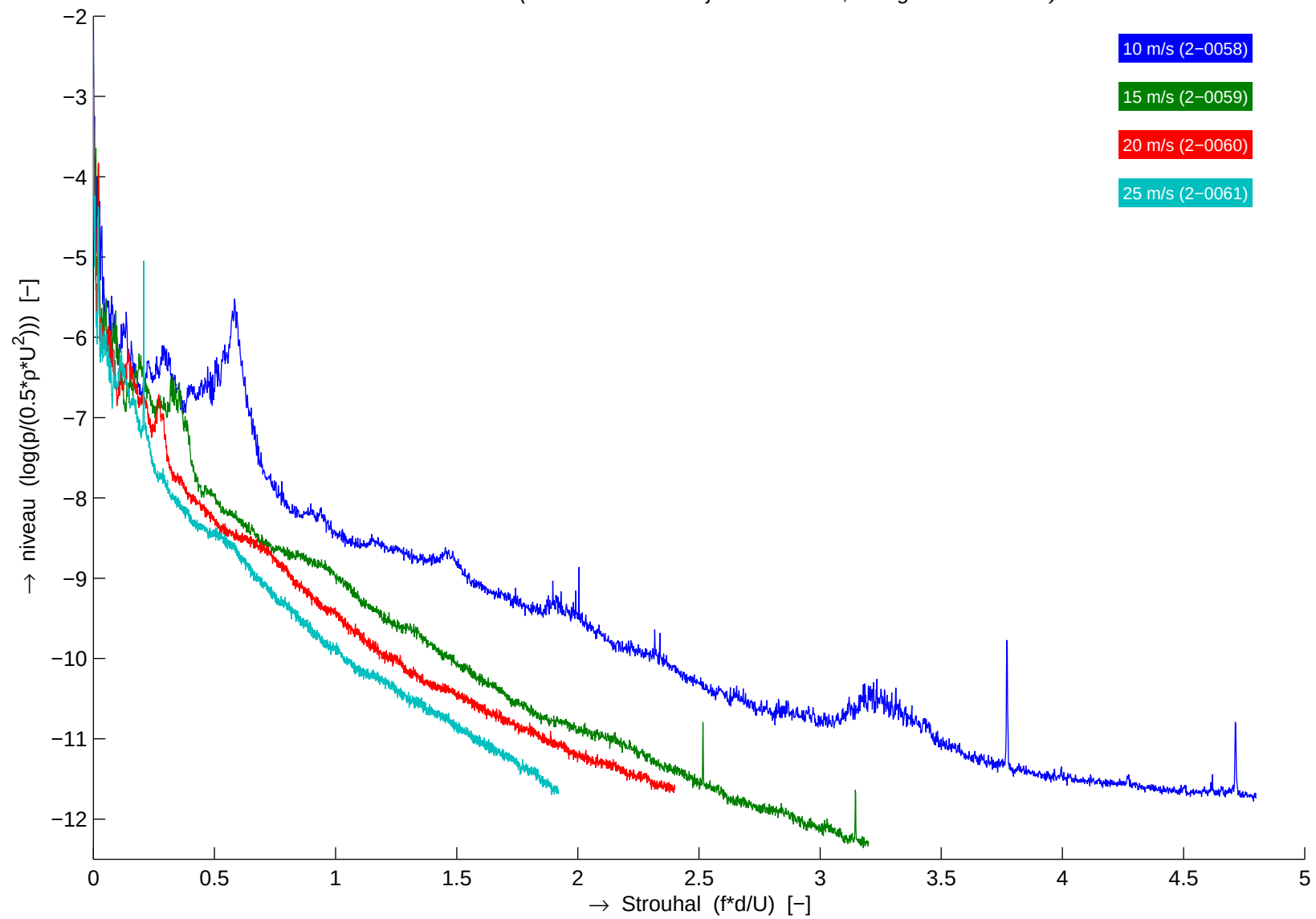
meetserie 2-0049 (rooster 12: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)



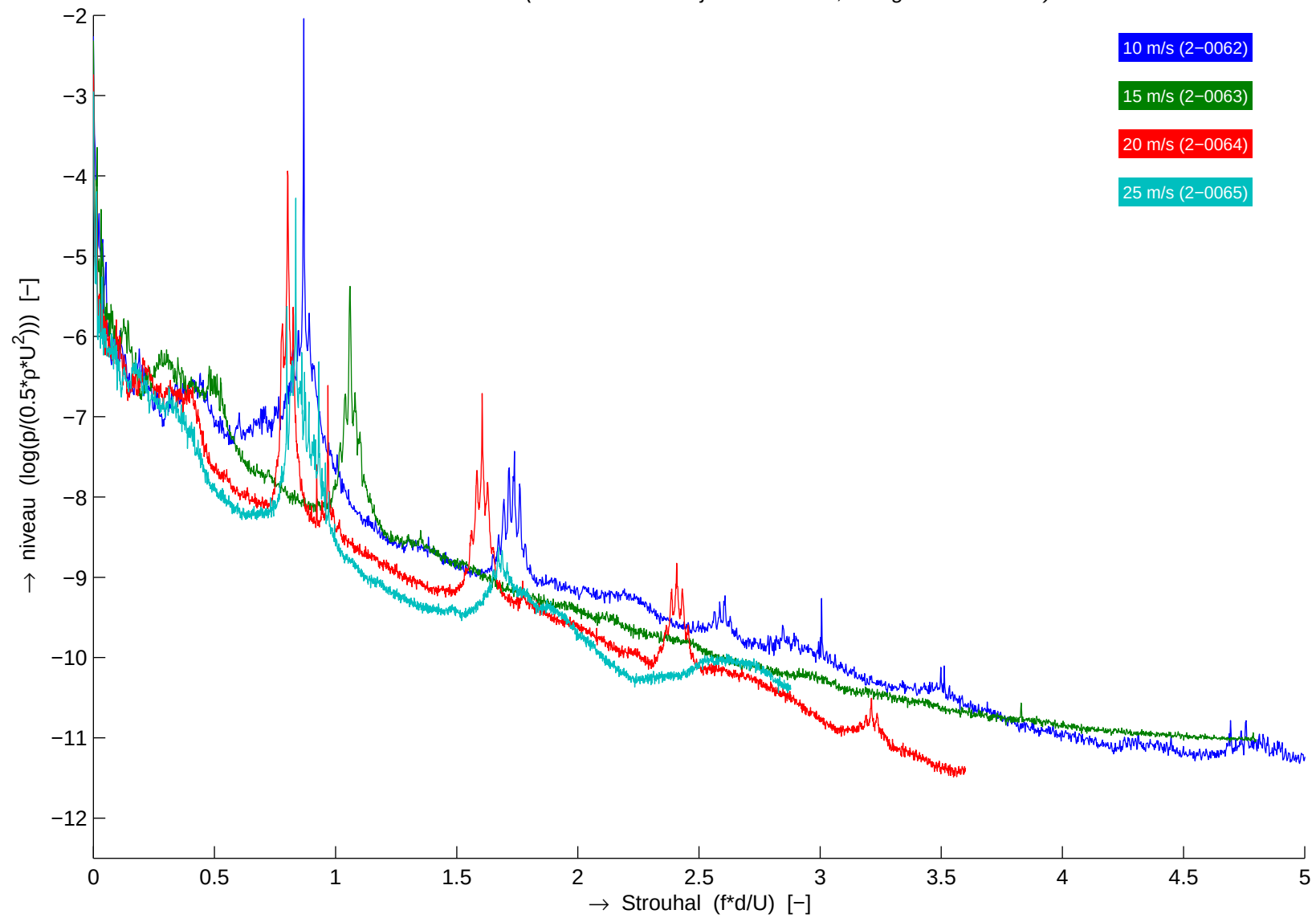
meetserie 2-0053 (rooster 12: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)



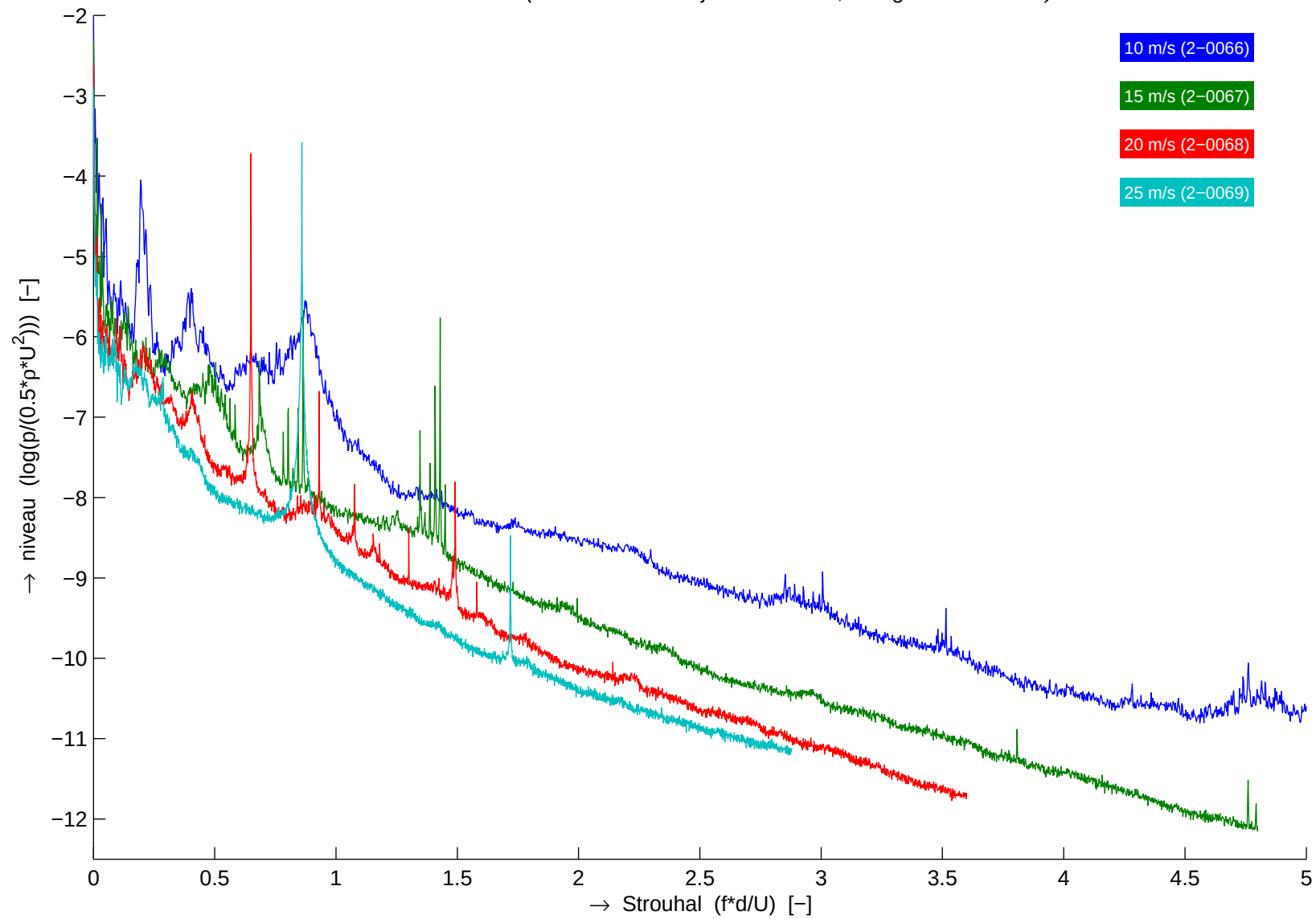
meetserie 2-0058 (rooster 12: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 40x2 mm)



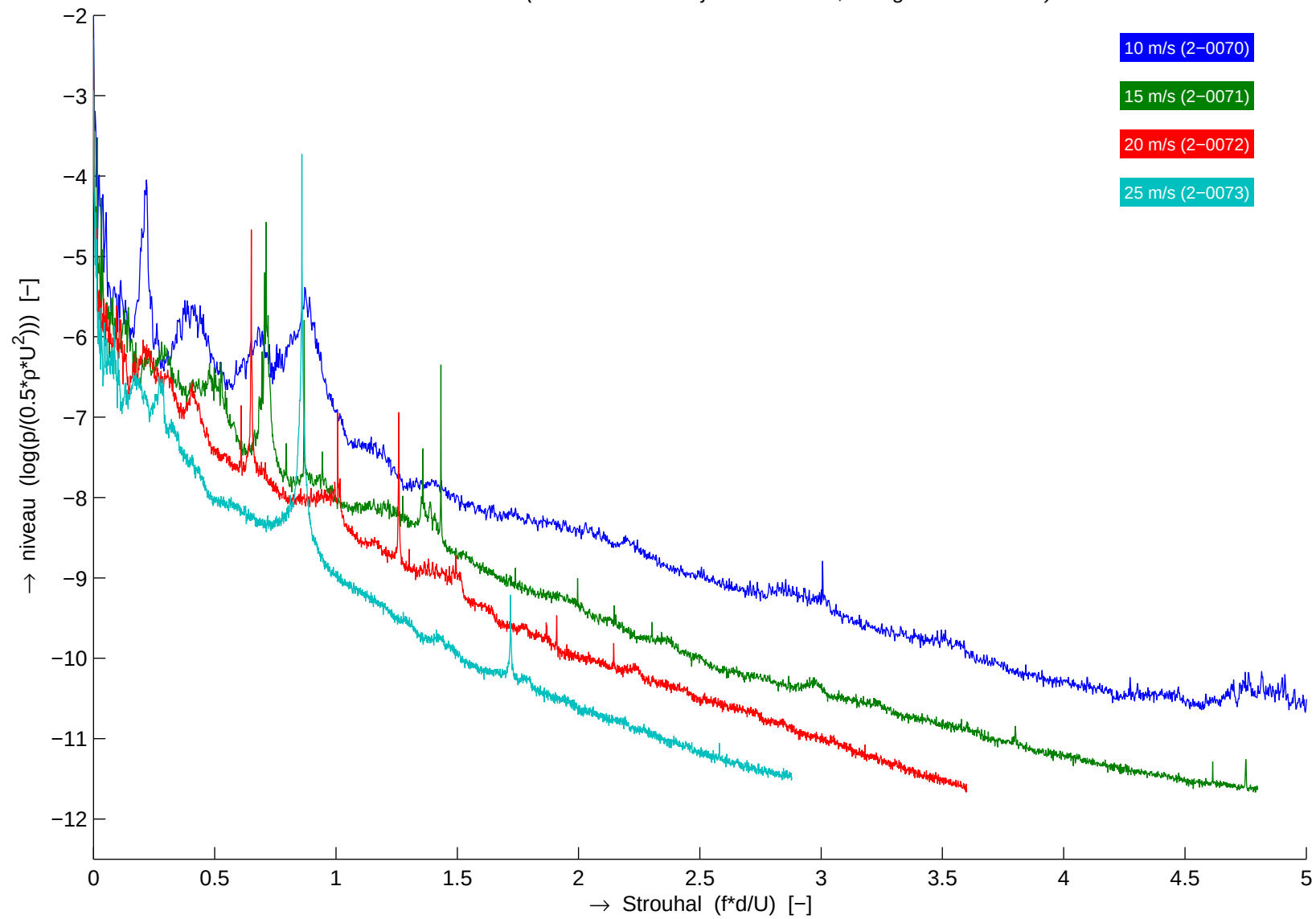
meetserie 2-0062 (rooster 5: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)



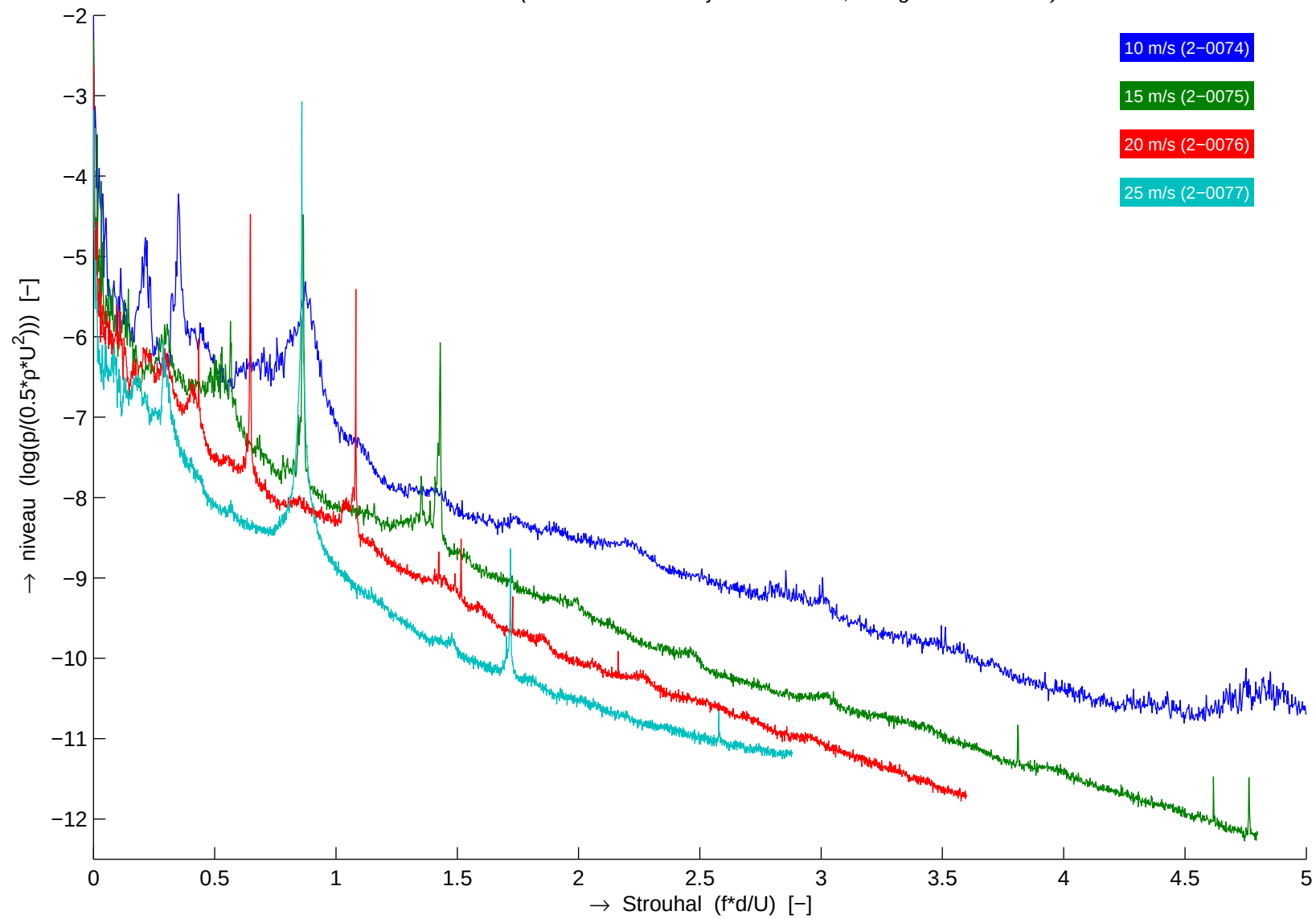
meetserie 2-0066 (rooster 5: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)



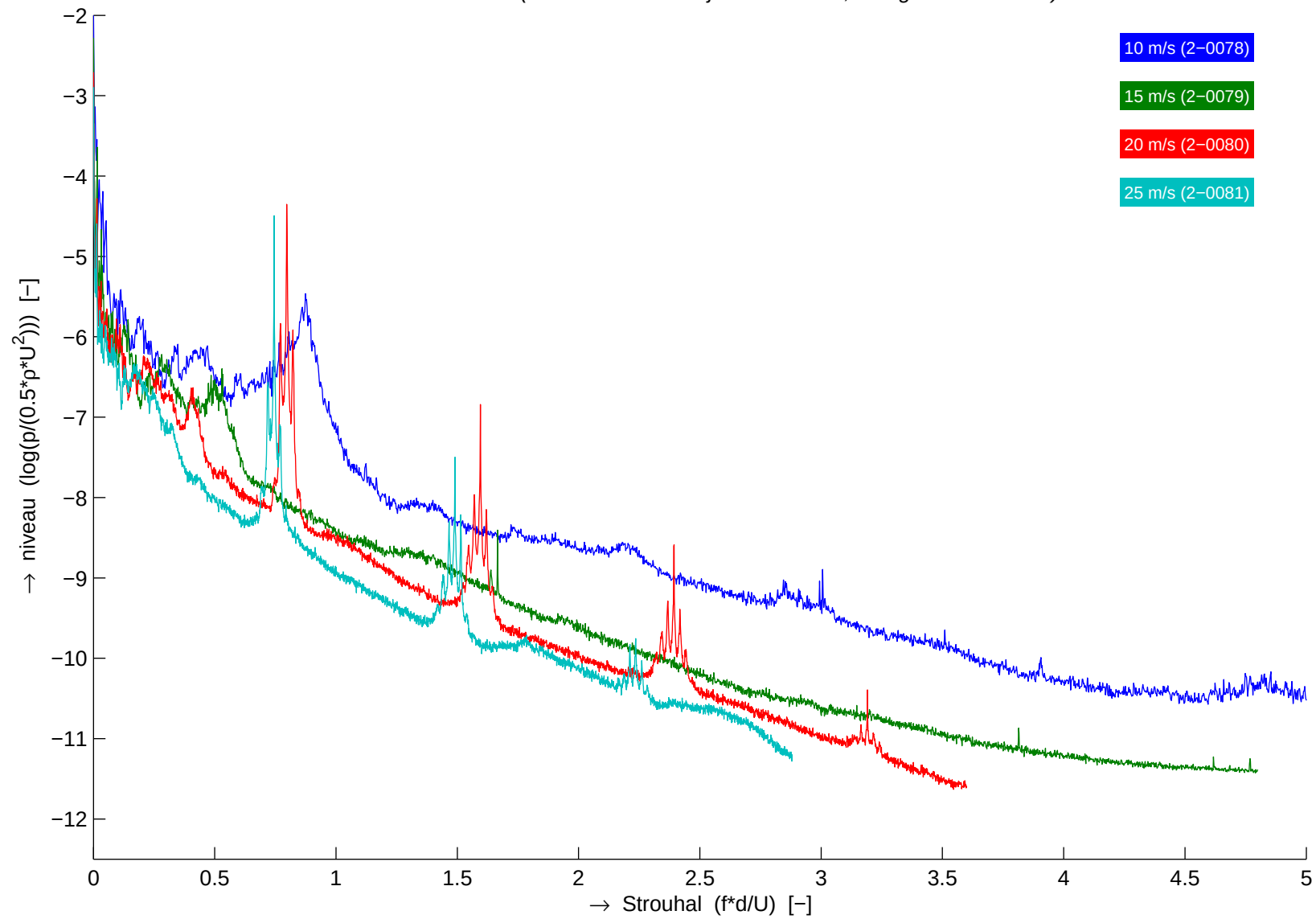
meetserie 2-0070 (rooster 5: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)



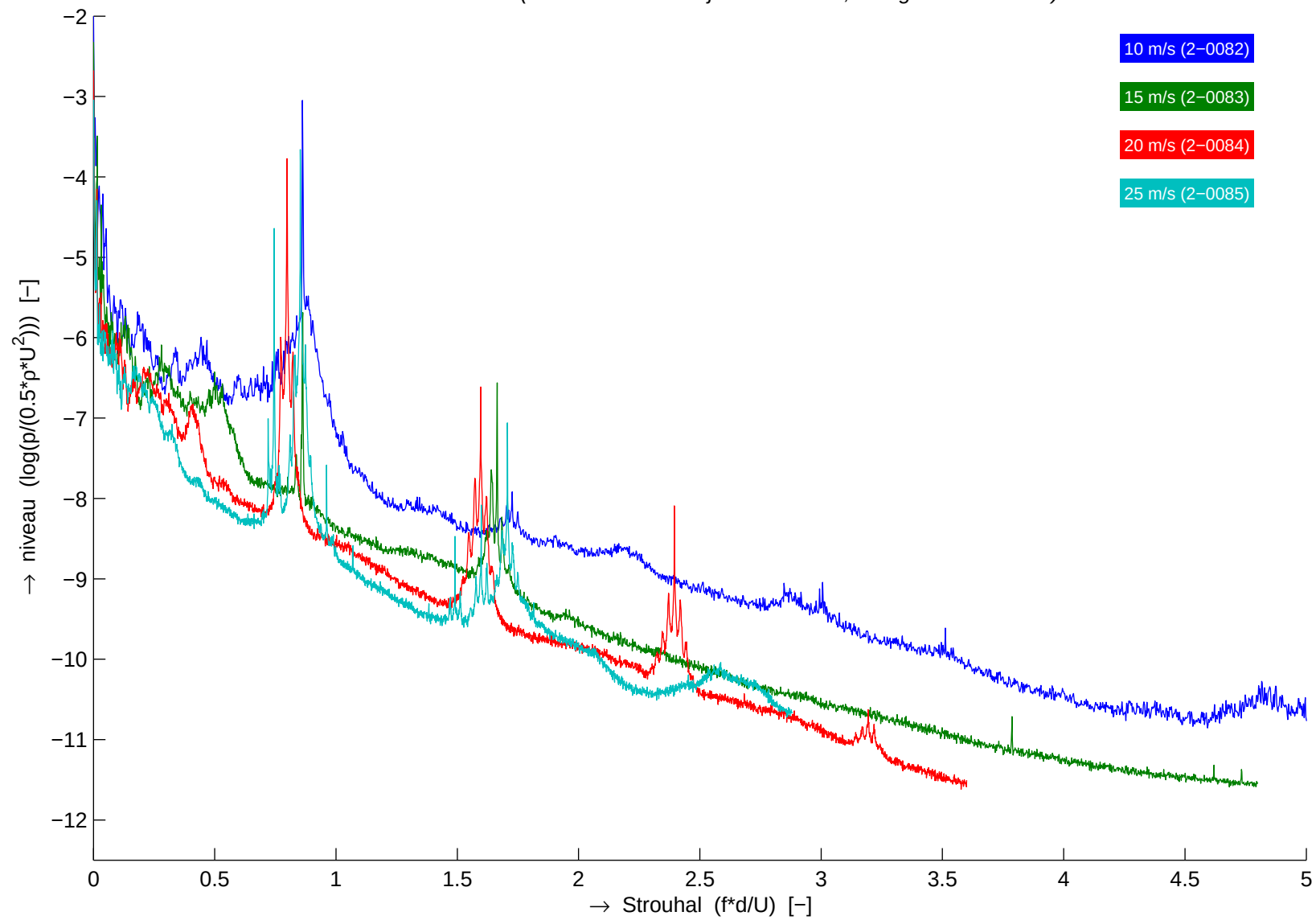
meetserie 2-0074 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)



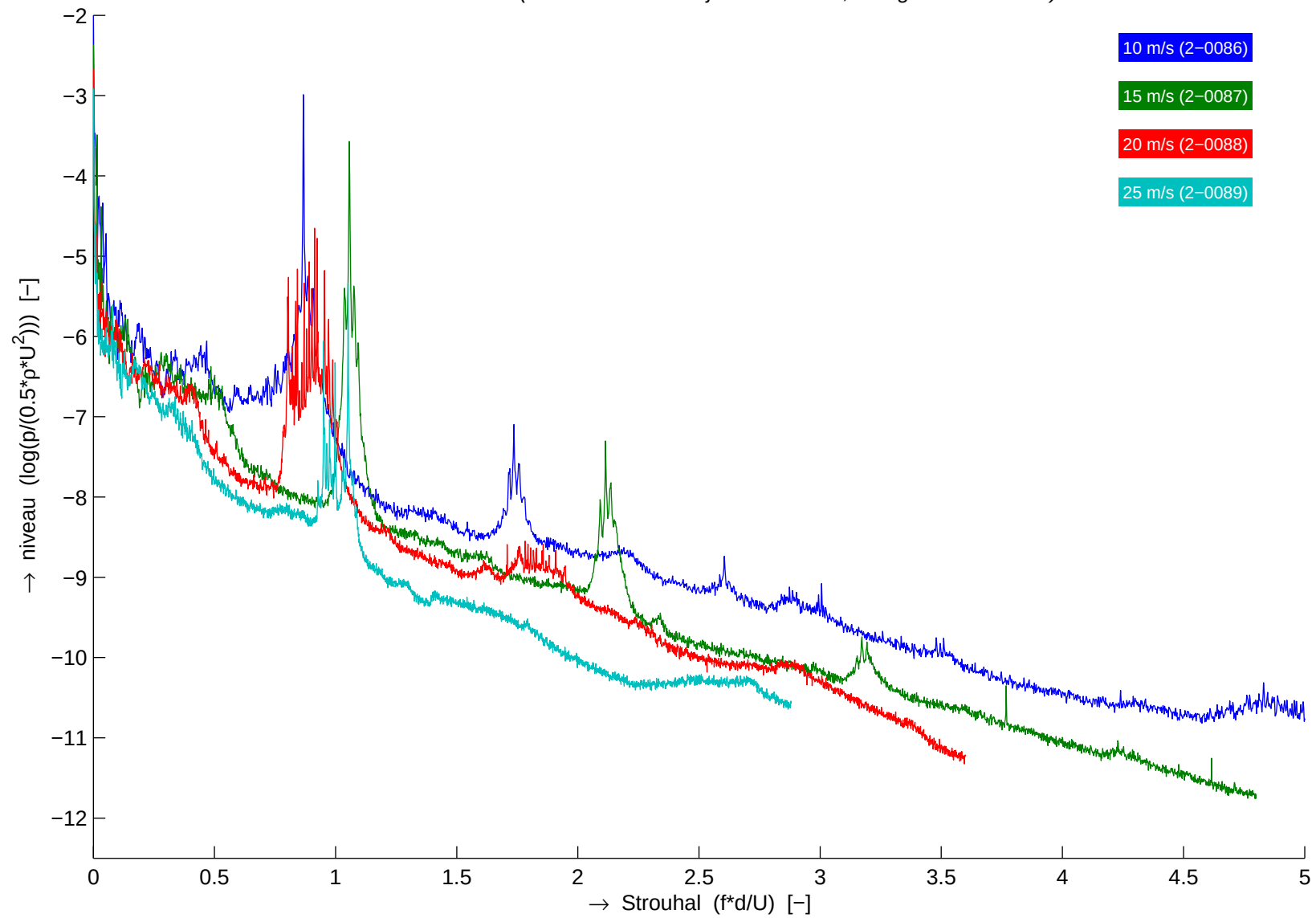
meetserie 2-0078 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)



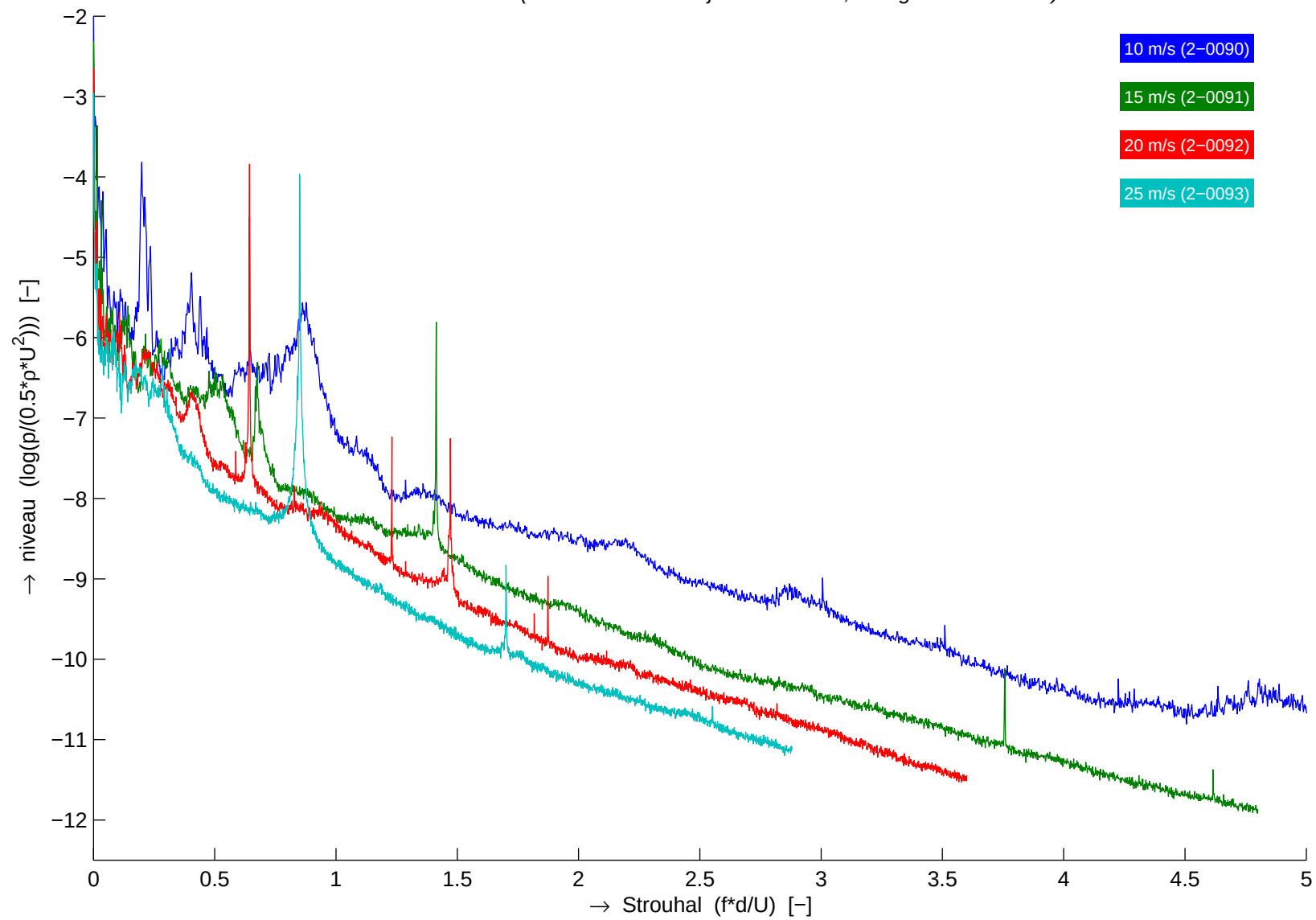
meetserie 2-0082 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)



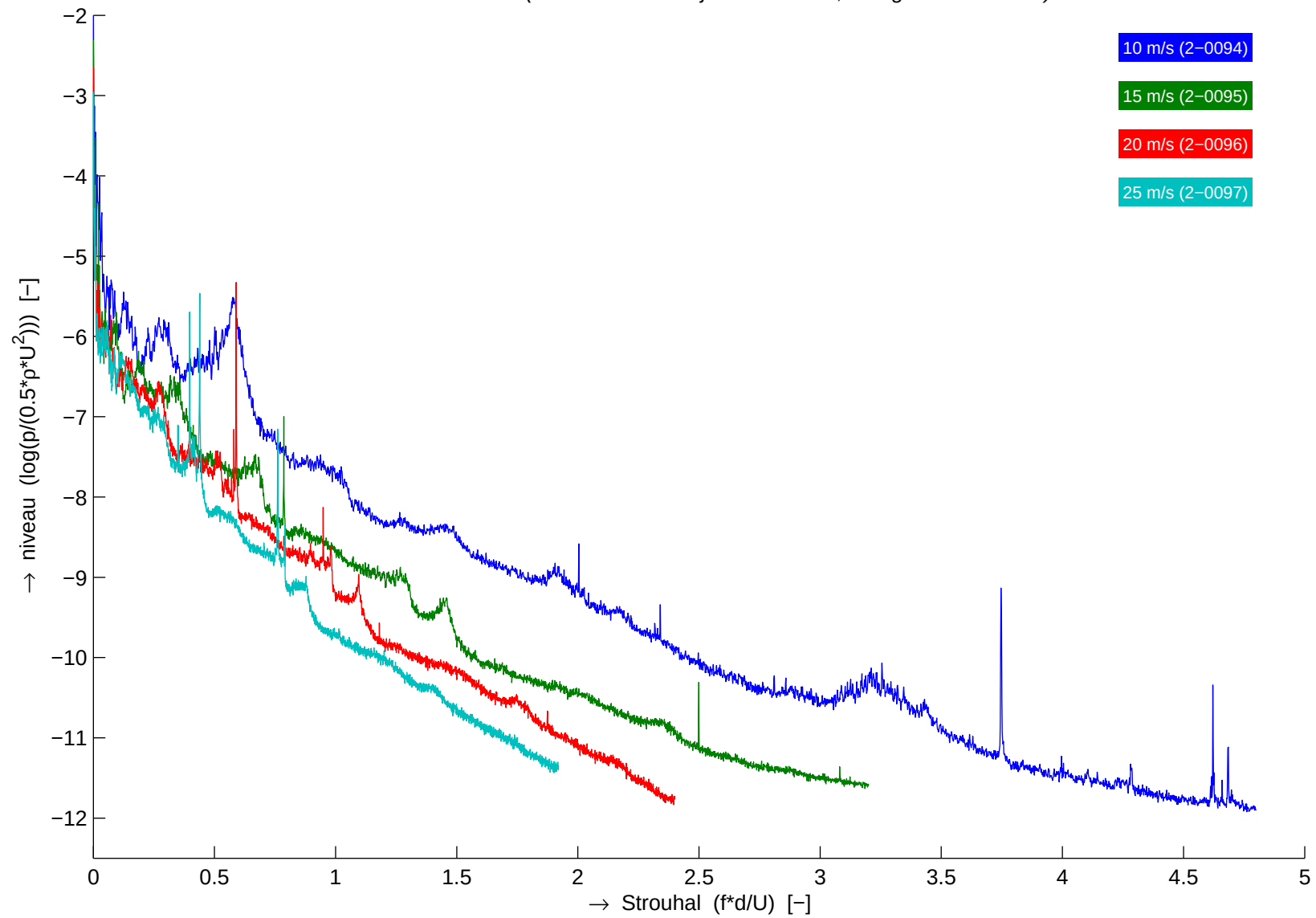
meetserie 2-0086 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)



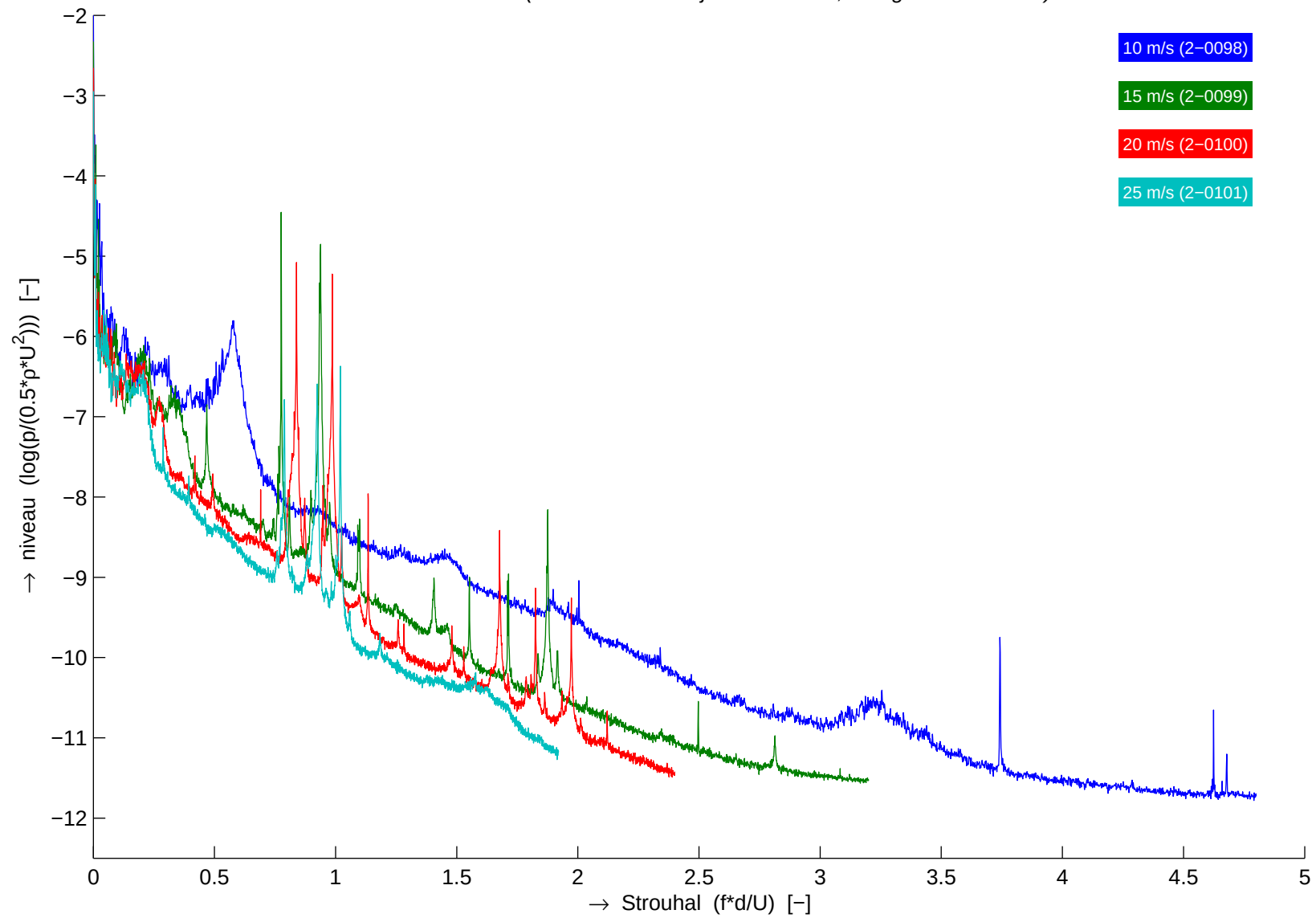
meetserie 2-0090 (rooster 11: maaswijdte 49.99 mm, draagstaaf 30x3 mm)



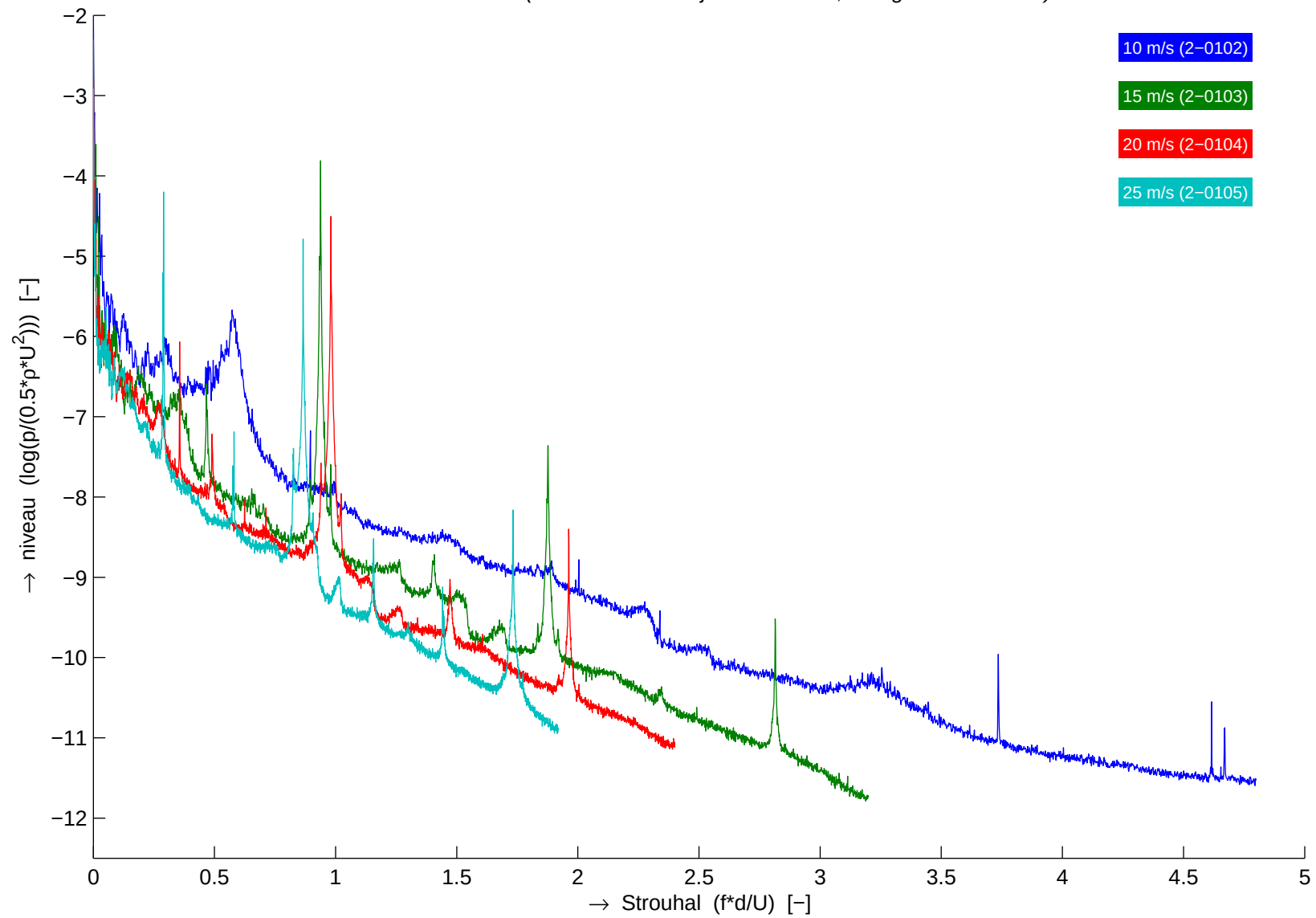
meetserie 2-0094 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)



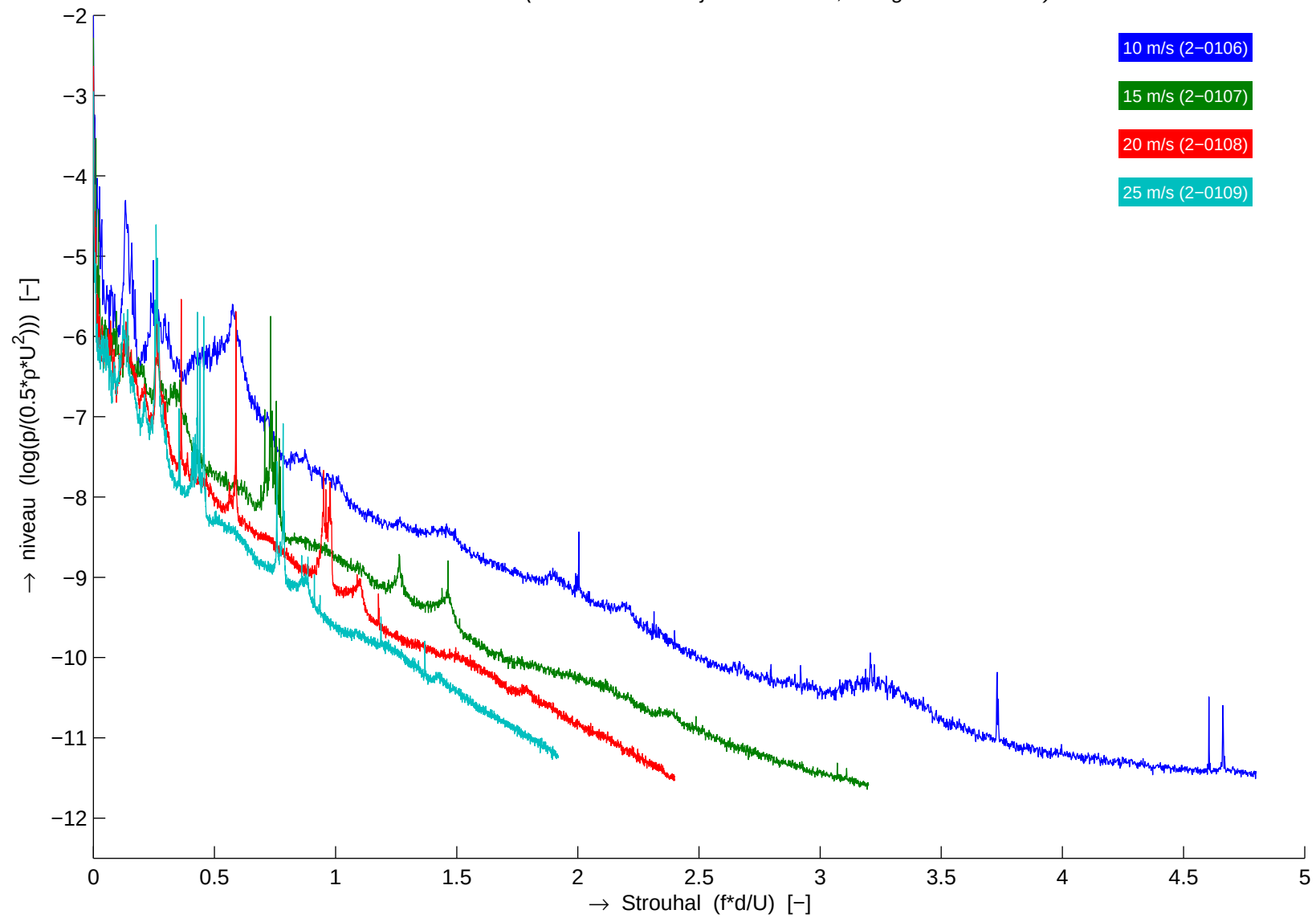
meetserie 2-0098 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)



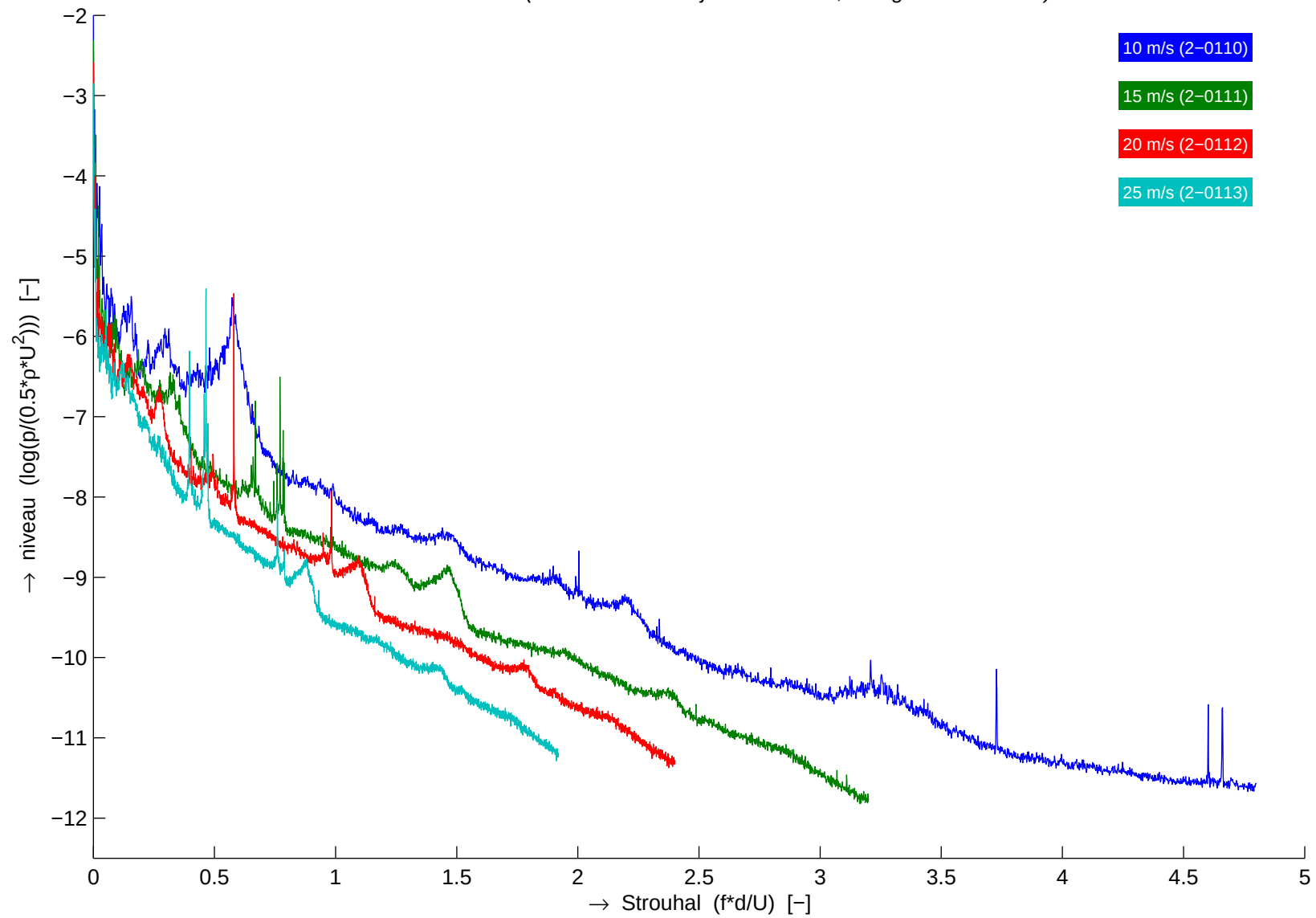
meetserie 2-0102 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)



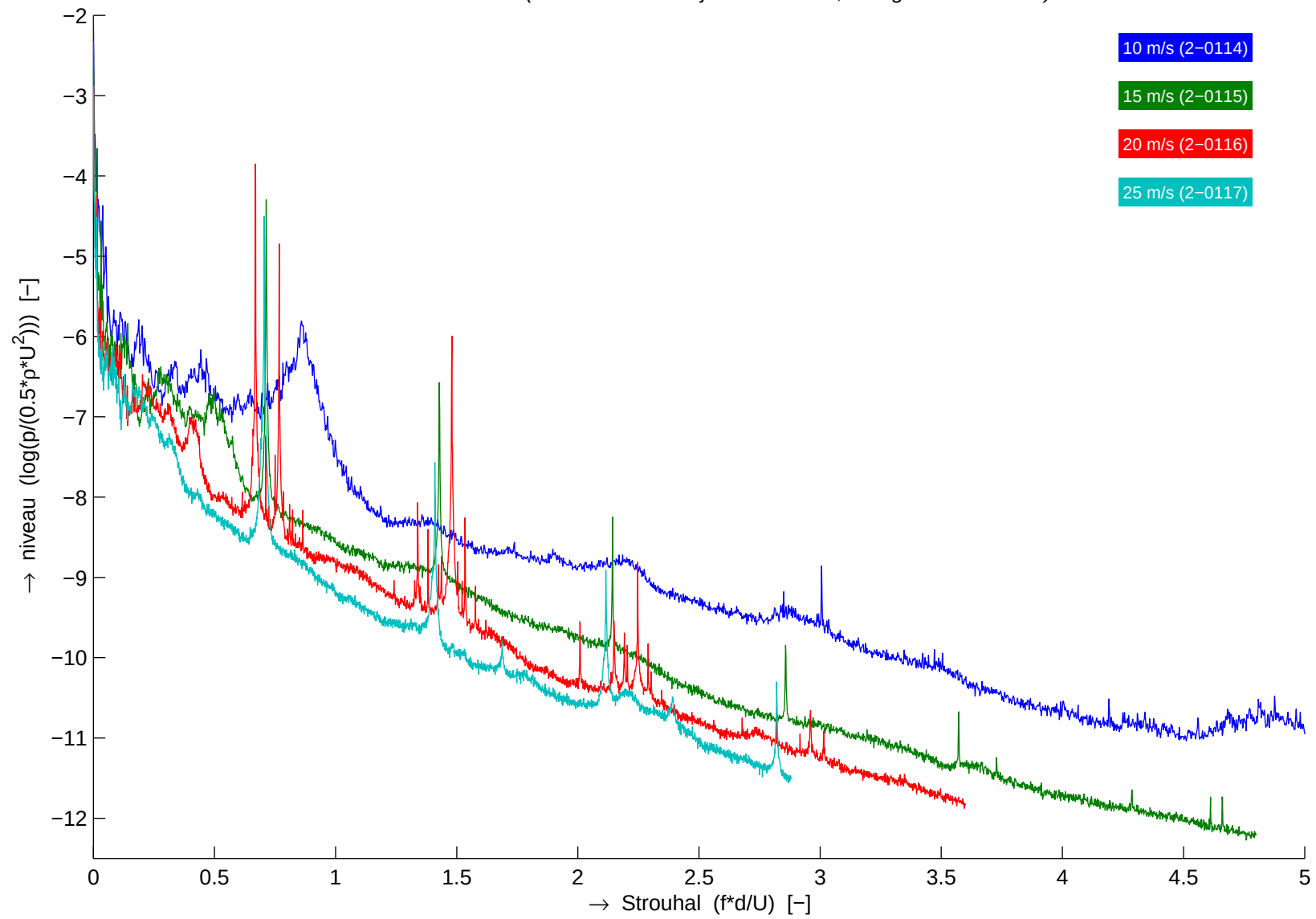
meetserie 2-0106 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)



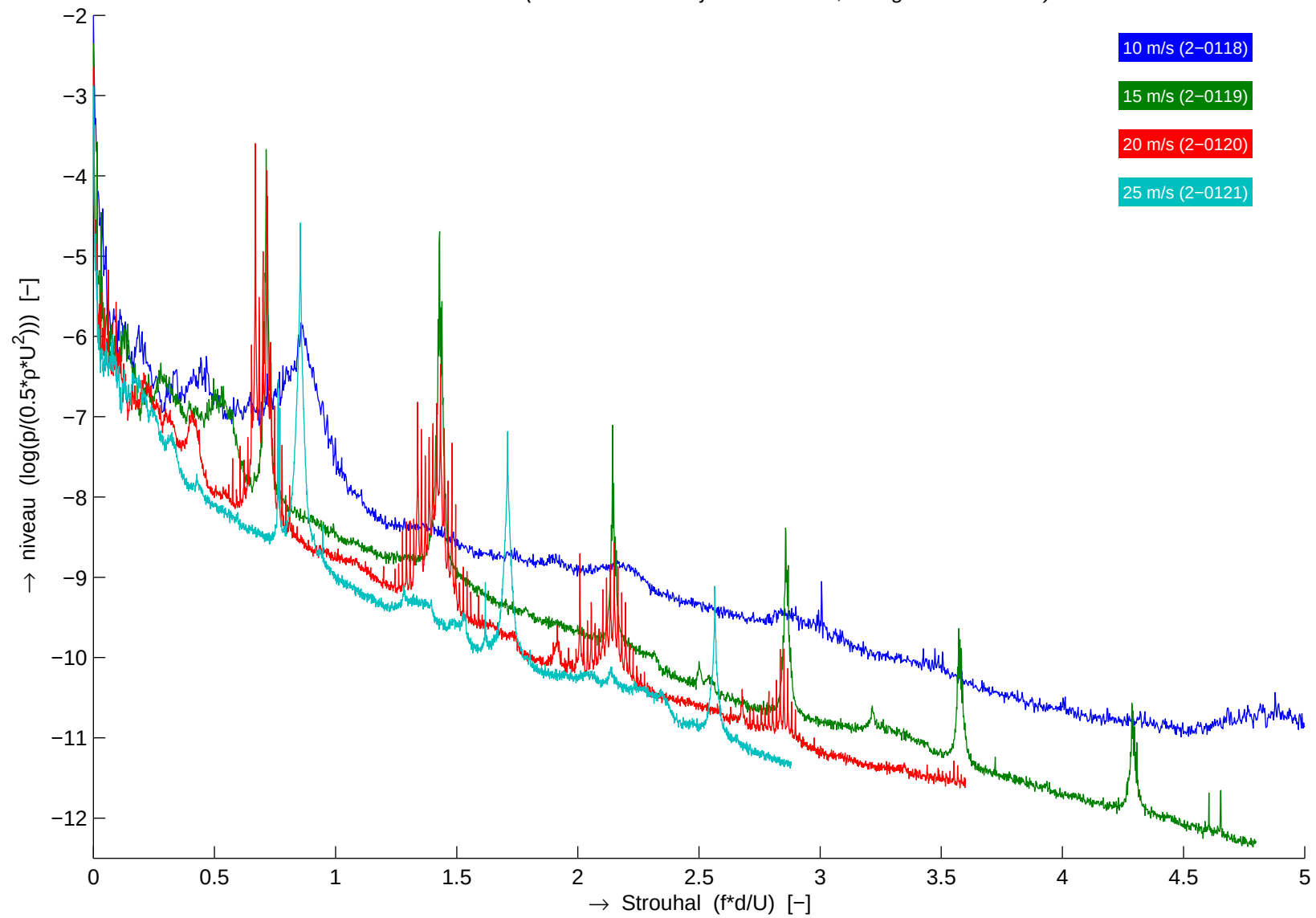
meetserie 2-0110 (rooster 1: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)



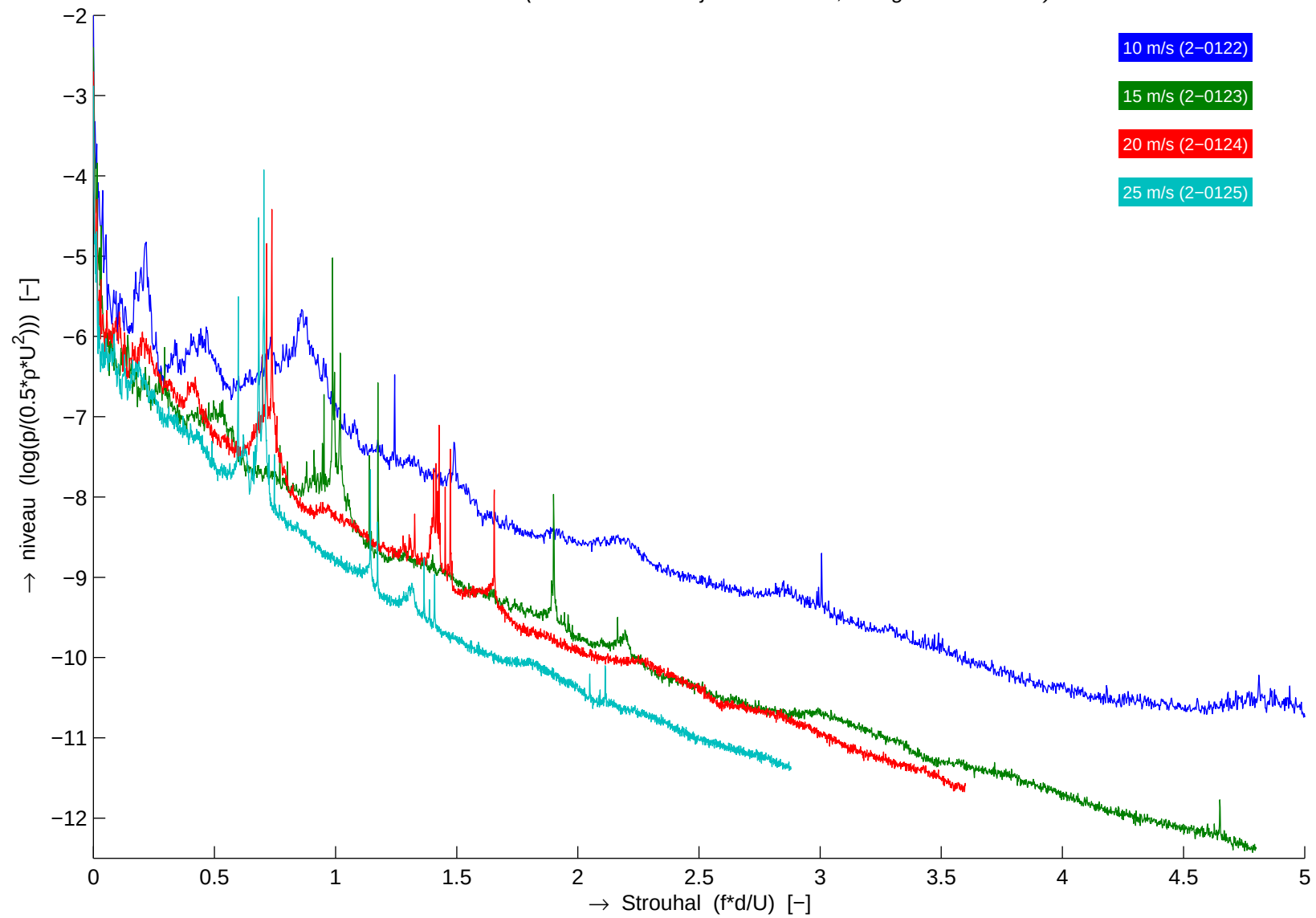
meetserie 2-0114 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)



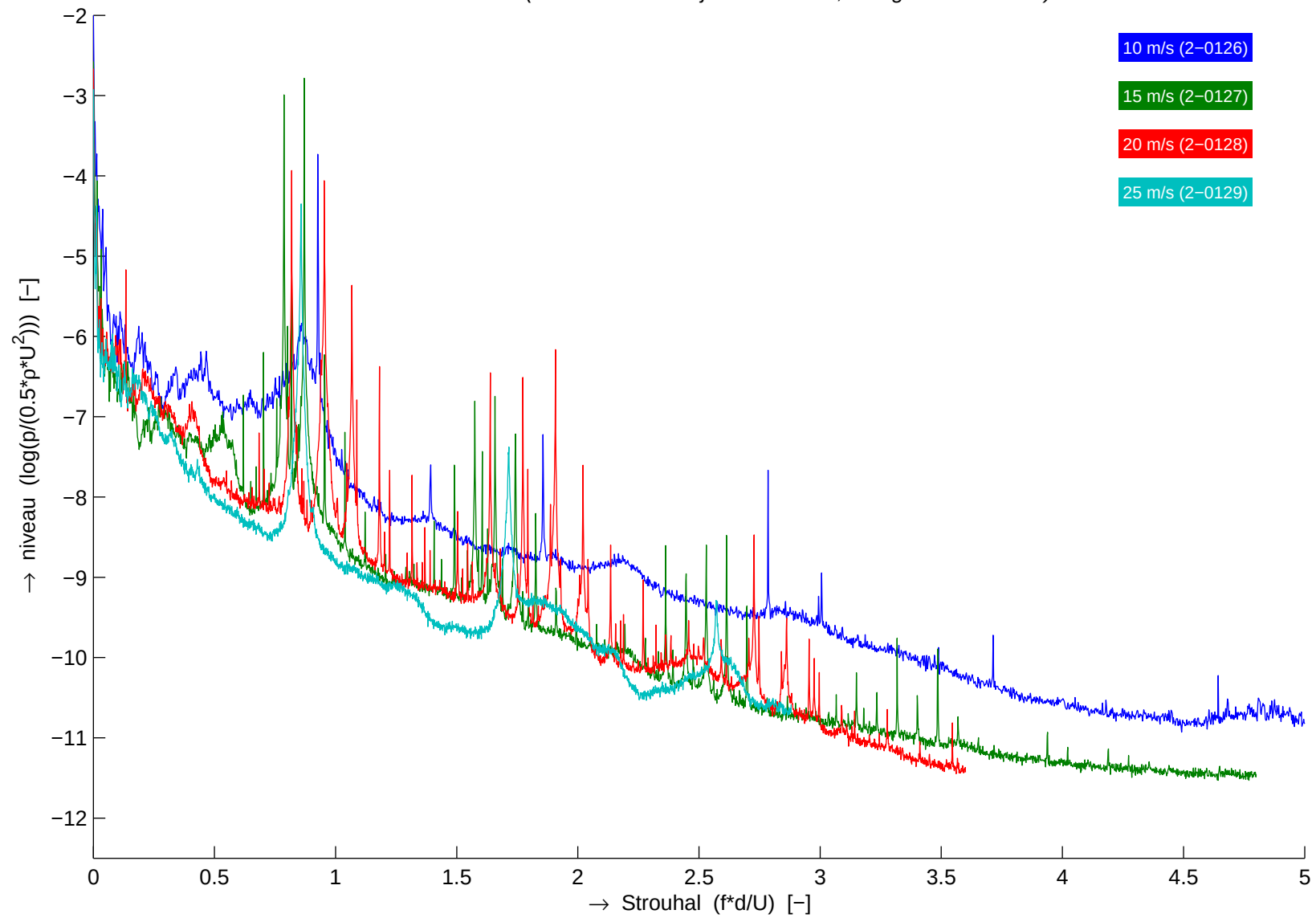
meetserie 2-0118 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)



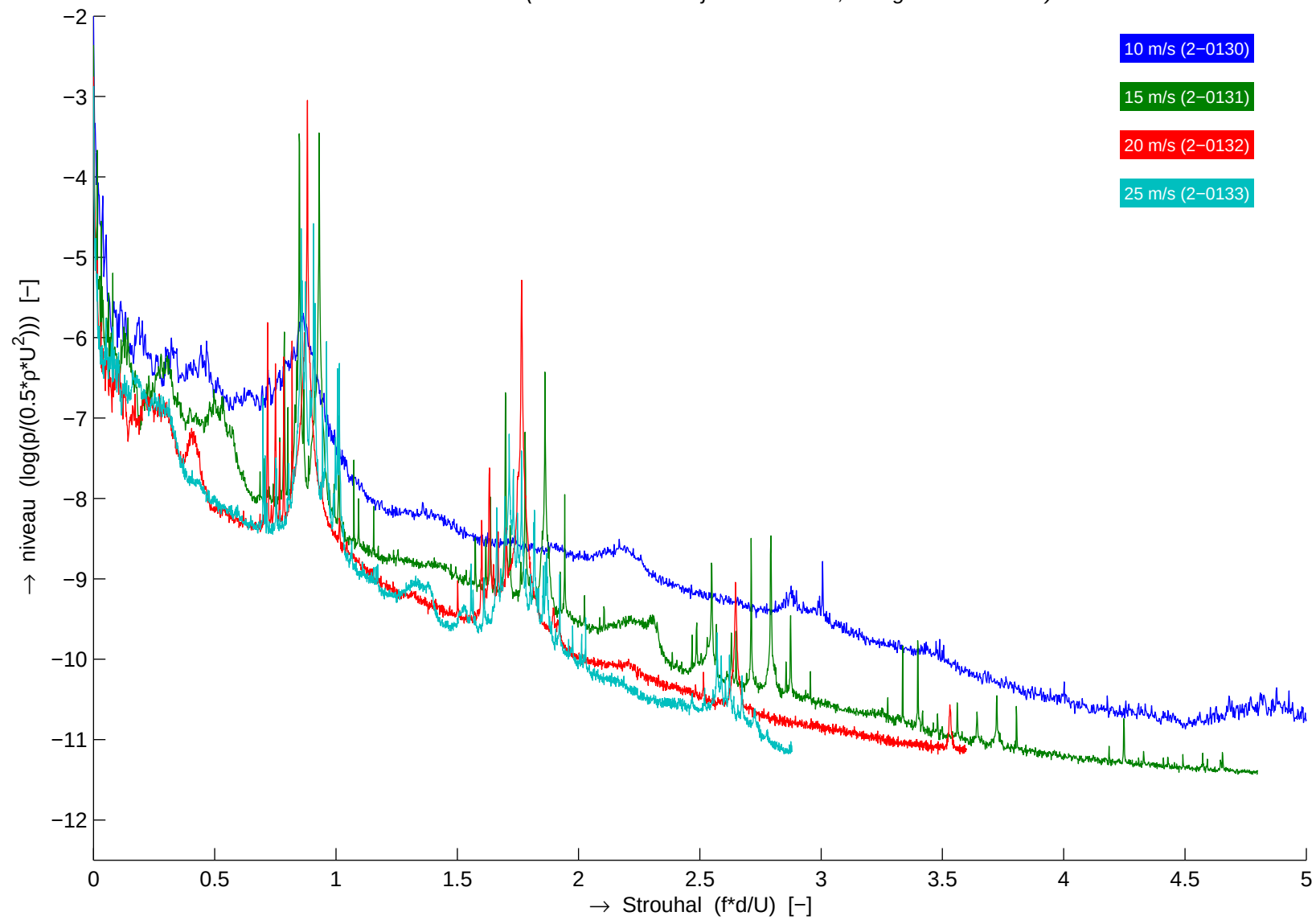
meetserie 2-0122 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)



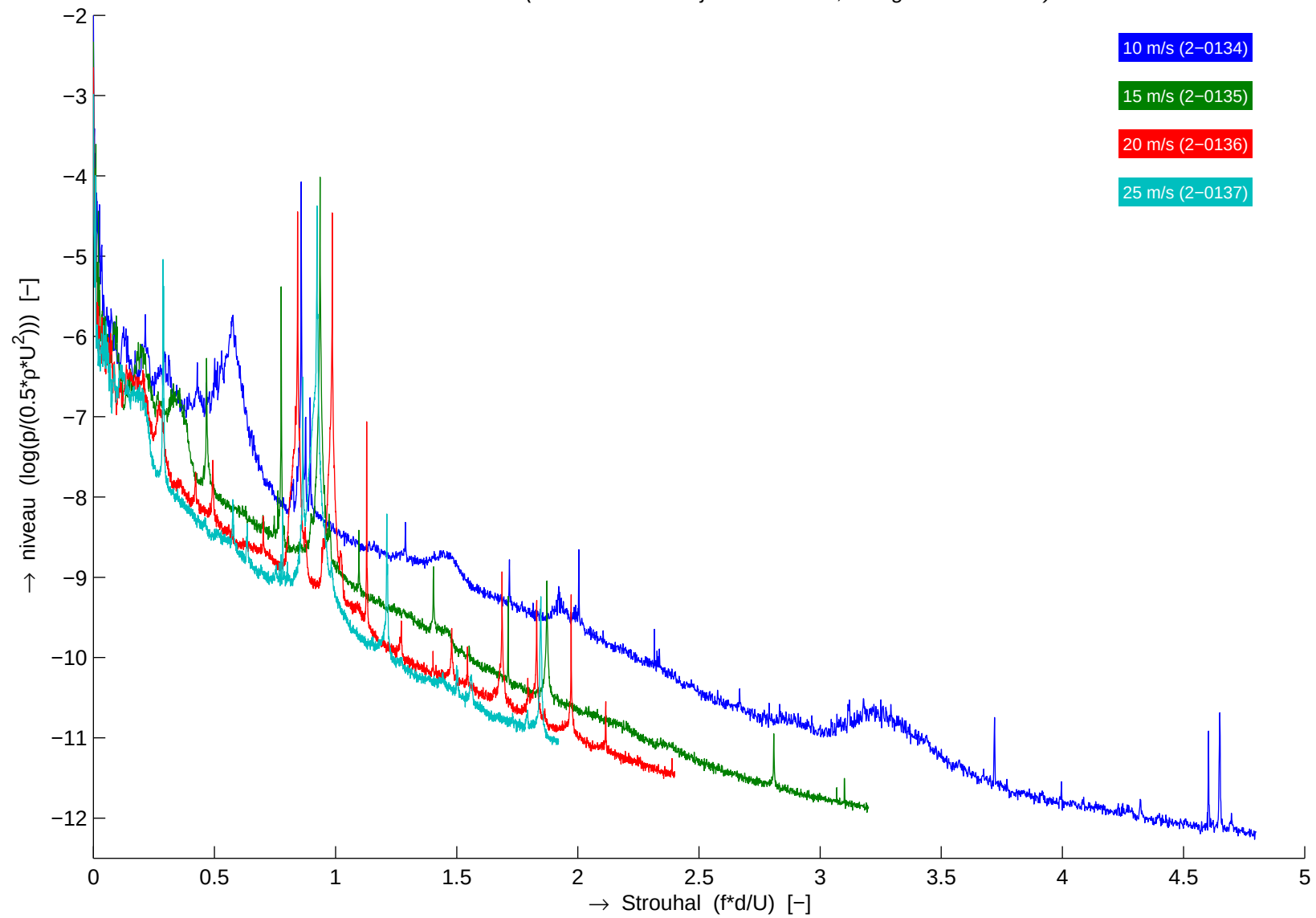
meetserie 2-0126 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)



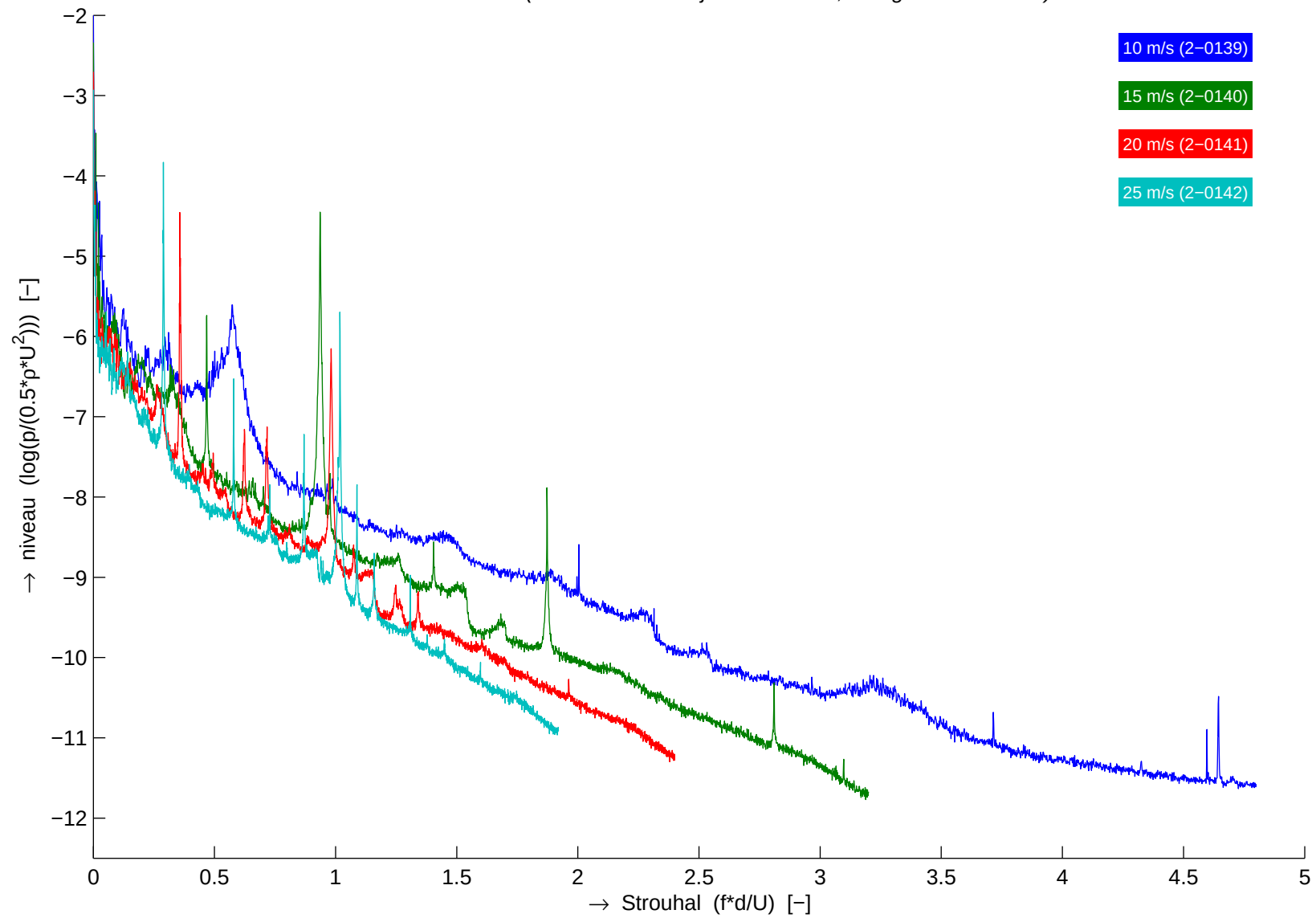
meetserie 2-0130 (rooster 2: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x3 mm)



meetserie 2-0134 (rooster 7: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)



meetserie 2-0139 (rooster 7: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)



meetserie 2-0143 (rooster 7: maaswijdte 33.33 mm, draagstaaf 30x2 mm)

