

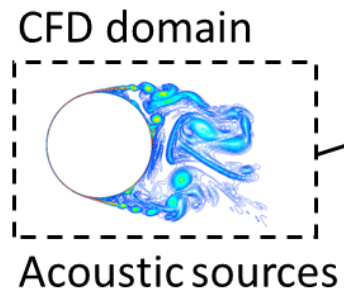
Numerická simulace šíření akustické emise dronů

Radim Burda



Simulační proces šíření akustické emise

- CFD analýza proudění při stanoveném letovém režimu
- Sběr tlakového záznamu v blízkosti dronů
- Převod na vlnové rovnice pro šíření zvuku
- Zpracování akustického signálu

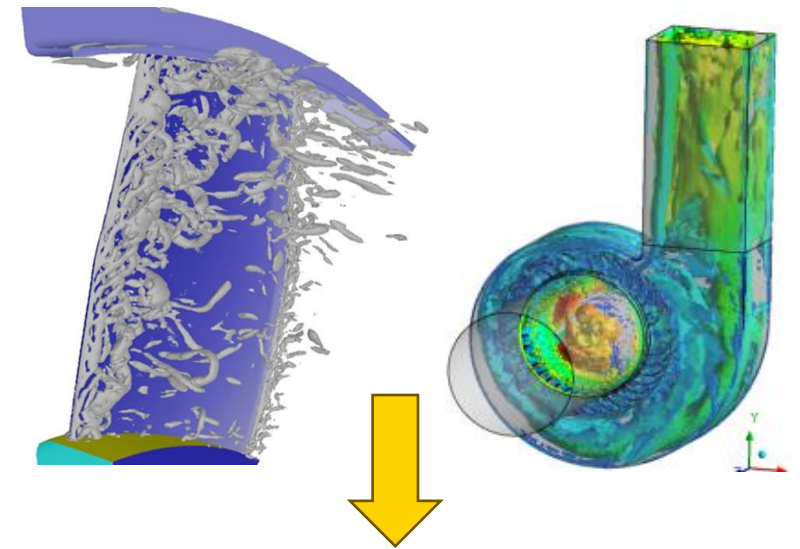


Wave equation solution
(Ffowcs Williams and
Hawking Method – FW-H)

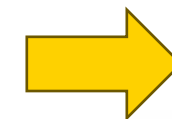
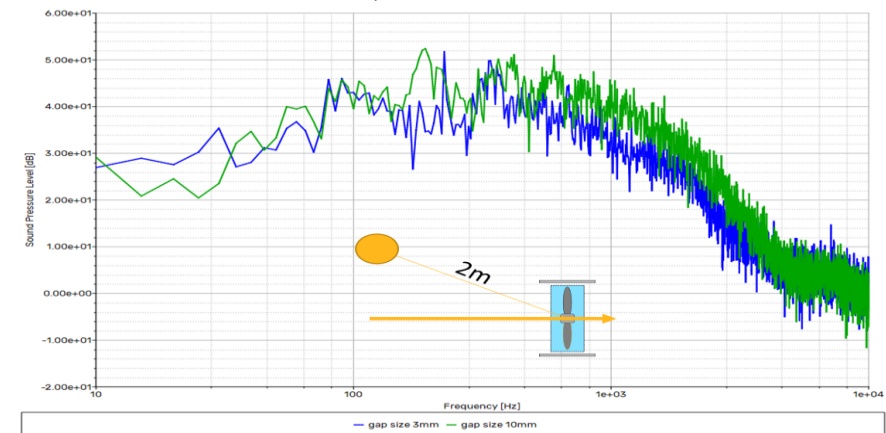


Acoustic receiver

CFD simulace proudění rotačního stoje

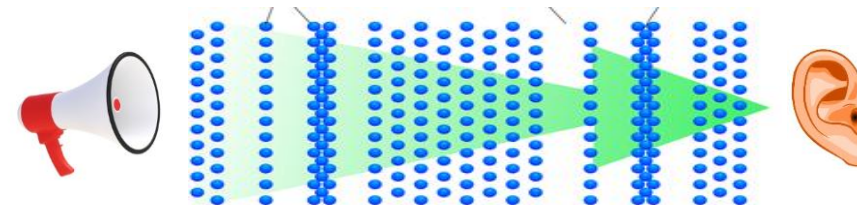


Změna akustického spektra změnou vůle mezi lopatkou a krycím diskem



SVS FEM

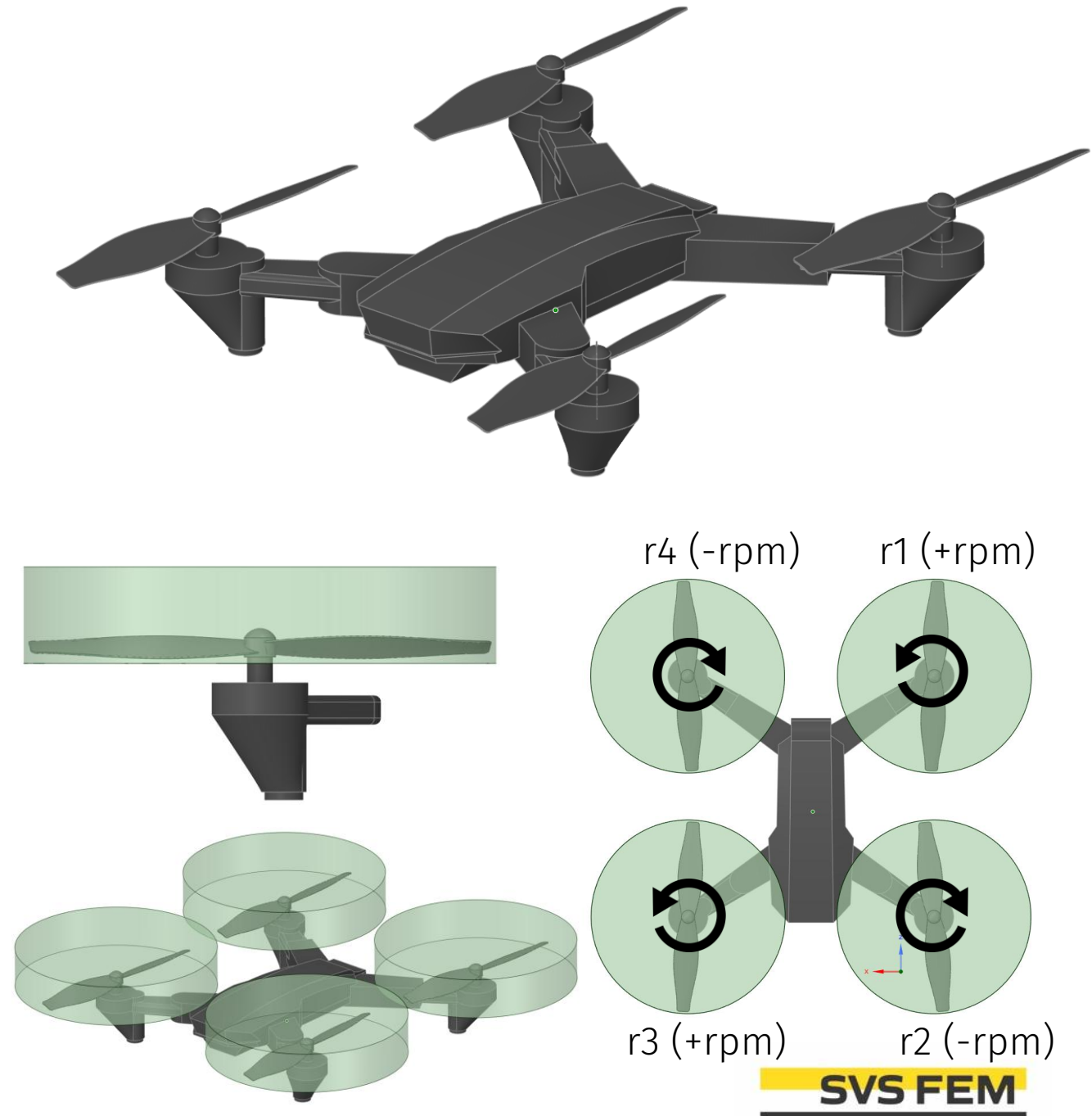
- V šířící se zvukové vlně vytváří výměna hybnosti mezi molekulami tekutiny kolísání tlaku.



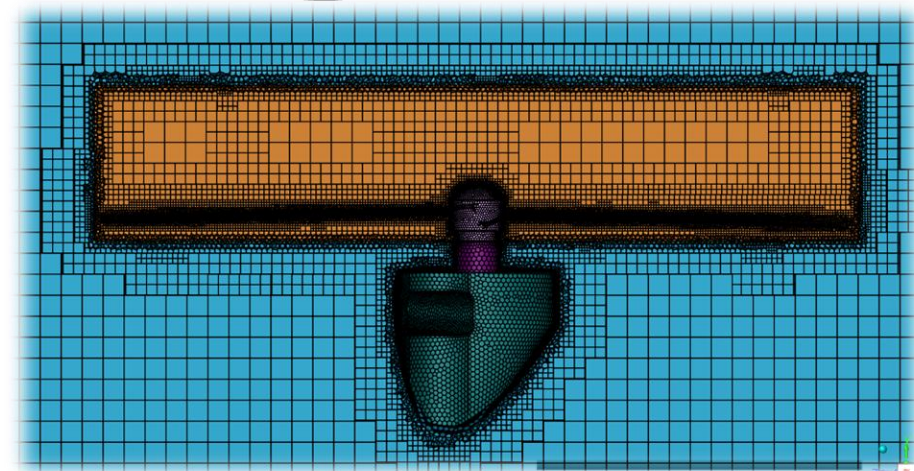
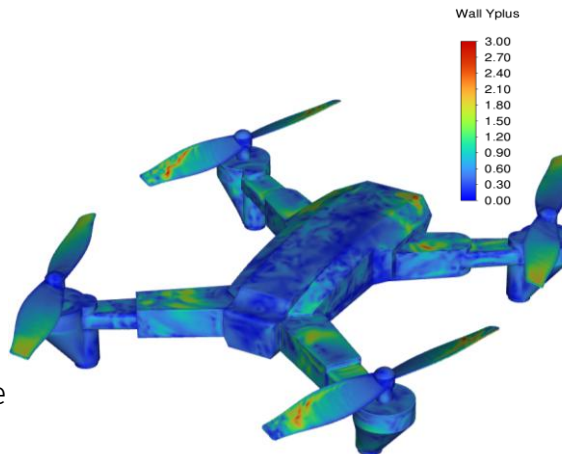
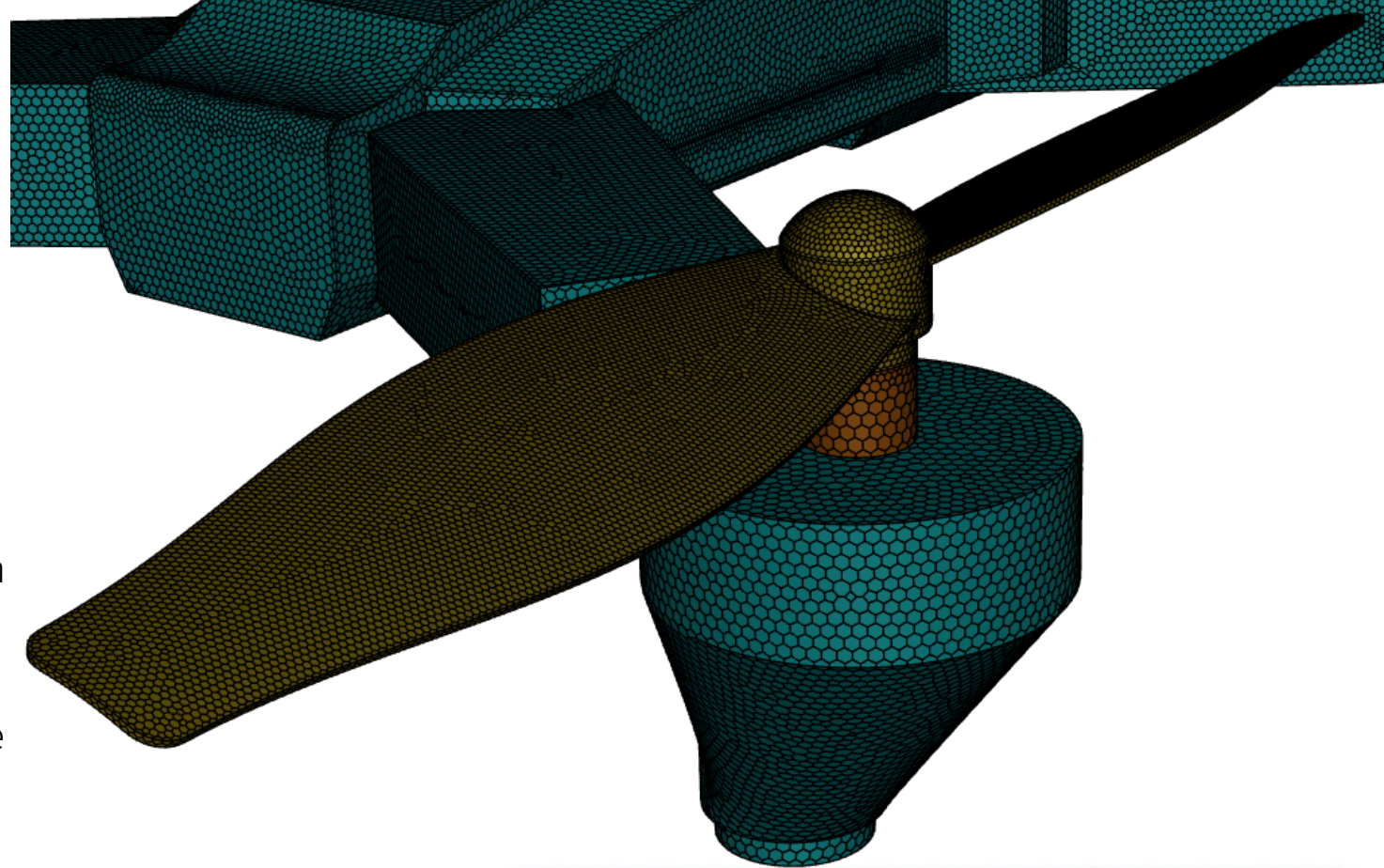
- Transientní analýza v softwaru Ansys Fluent
- Otáčky lopatek 5000 rev/min
- Proudění větru 0 m/s
- Okolní tlak 101 325 Pa

- Stlačitelný vzduch dle ideálního plynu
- Turbulentní model SBES (LES+SST)

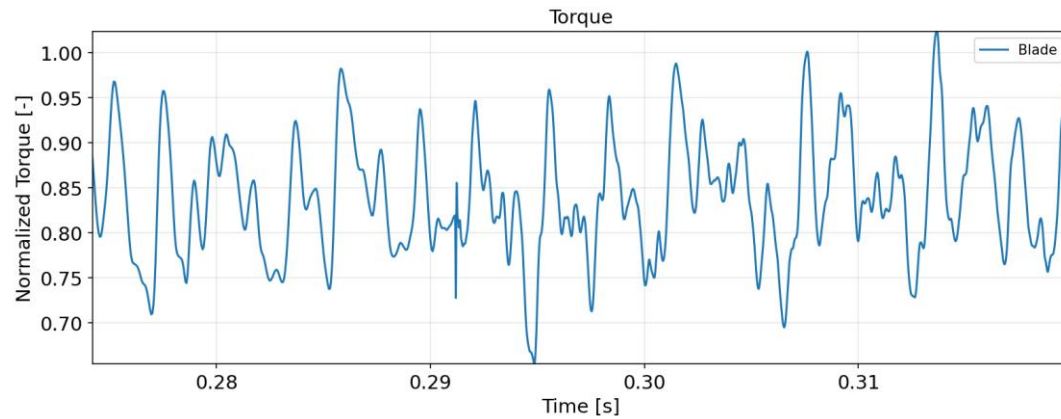
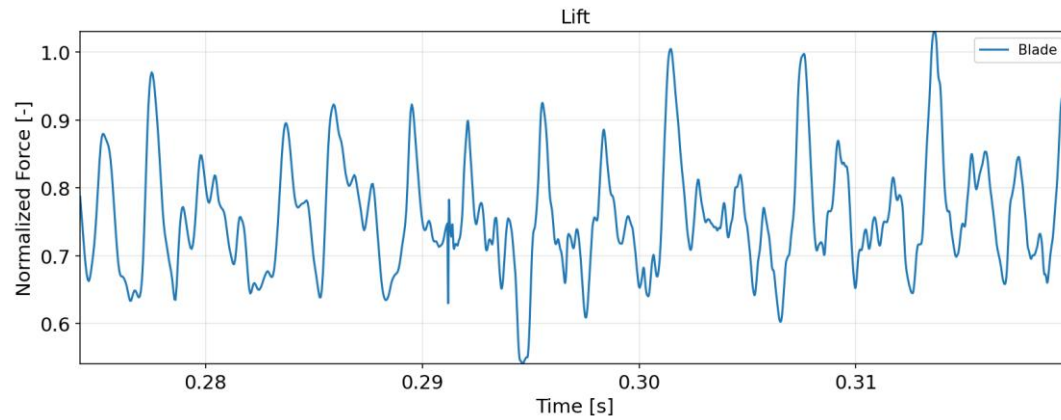
- Propojené tlaku a rychlosti metodou SIMPLE
- Prostorová diskretizace druhého řádu



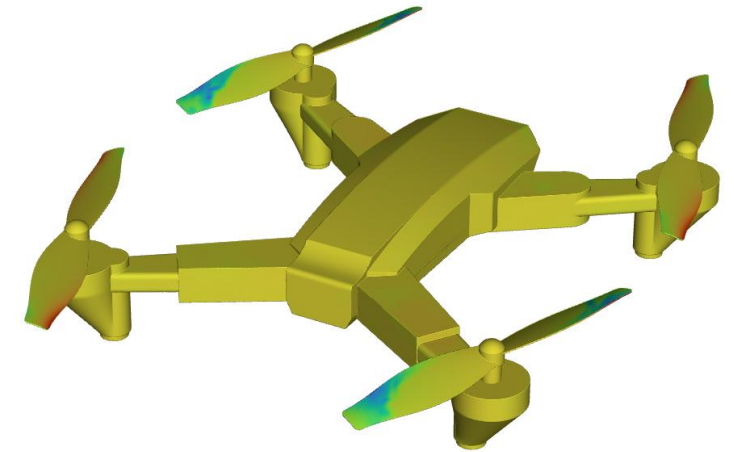
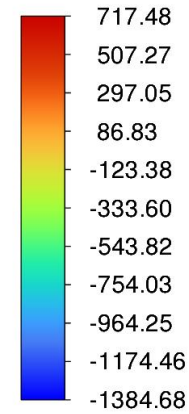
- Počet buněk 8.6 milionů
 - 4x Rotační zóna (0.58 M)
 - Oblast v blízkosti dronu (4.9M)
 - Oblast okolí (1.4 M)
- Povrch vrtule (0,5 mm):
 - Detailní zachycení zdroje hluku.
 - Nezbytné pro rozlišení mezní vrstvy a tlakových gradientů.
- Oblast blízkého pole (až 4,0 mm):
 - Vysoká hustota sítě v blízkém poli minimalizuje numerickou disipaci
 - Široké spektrum provozních režimů dronu při zachování špičkové kvality akustických dat.
- Vzdálené pole (až 32,0 mm):
 - Úmyslné zvětšení buněk
 - přirozený útlum vln před hranicí domény
 - zamezení nežádoucím odrazům zvuku zpět dronu.



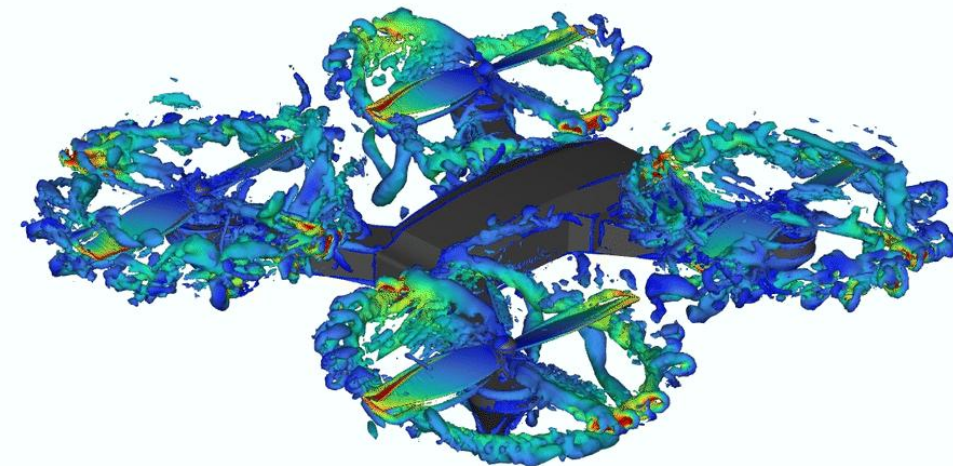
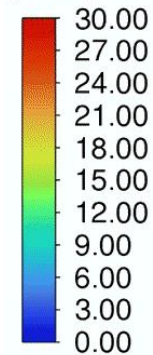
Výsledky – silové působení



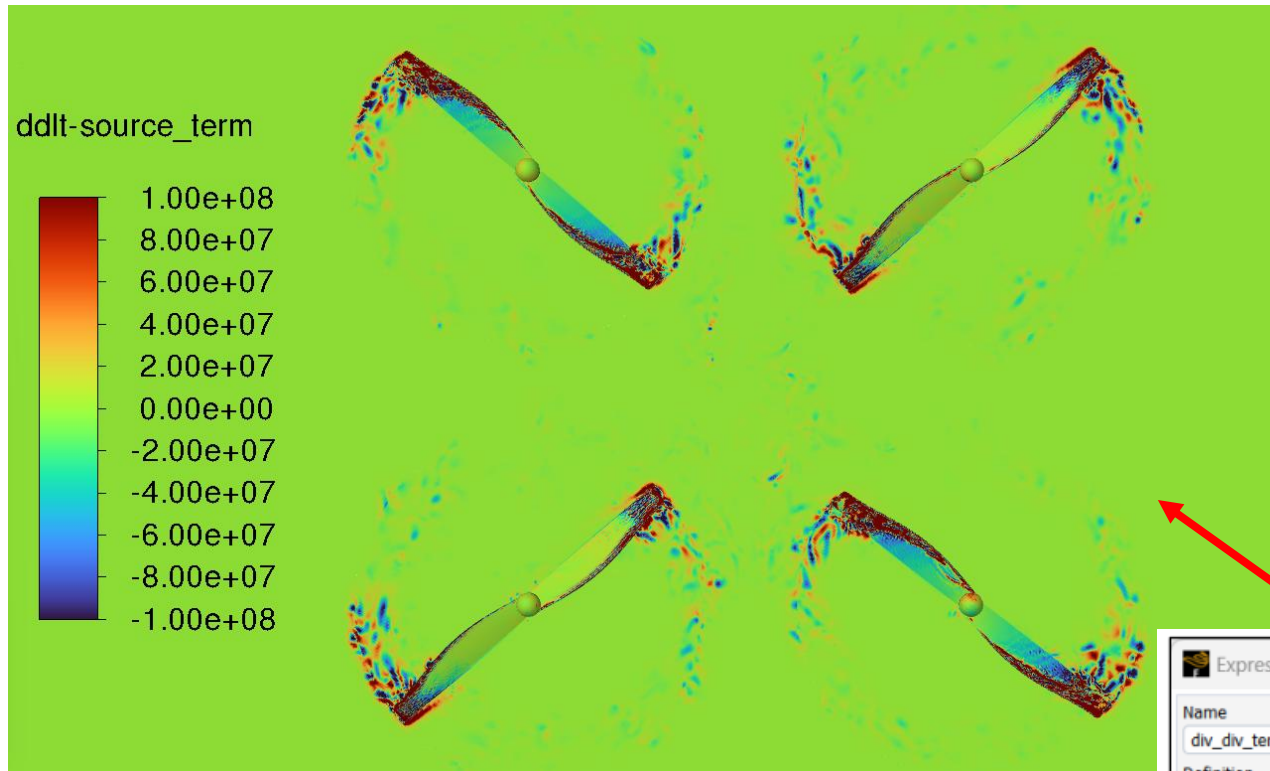
Static Pressure
[Pa]



[m/s]



Výsledky – zdroj akustického signálu (Lighthill Tensor)



Expression

Name: divtx1

Definition: `Density*(Velocity.x*dVelocitydx.x+Velocity.y*dVelocitydy.x+Velocity.z*dVelocitydz.x)`

$$D_x = \rho_0 \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$D_y = \rho_0 \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$D_z = \rho_0 \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Expression

Name: div_div_tensor

Definition: `Density*(dVelocitydx.x*dVelocitydx.x+dVelocitydy.x*dVelocitydx.y+dVelocitydz.x*dVelocitydx.z+dVelocitydx.y*dVelocitydy.x+dVelocitydy.y*dVelocitydy.y+dVelocitydz.y*dVelocitydy.z+dVelocitydx.z*dVelocitydx.x+dVelocitydy.z*dVelocitydz.y+dVelocitydz.z*dVelocitydz.z)`

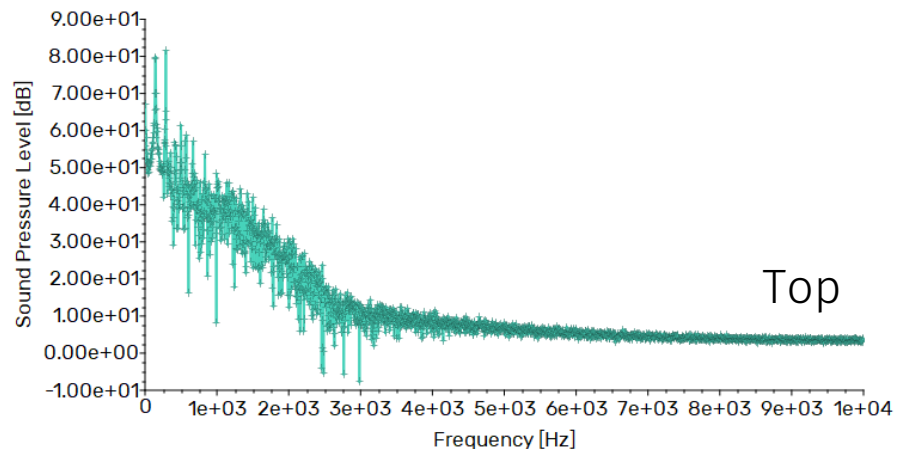
$$\nabla \cdot (\nabla \cdot \bar{\bar{T}}_L) \approx \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \nabla \cdot (\nabla \cdot \bar{\bar{T}}_L)$$

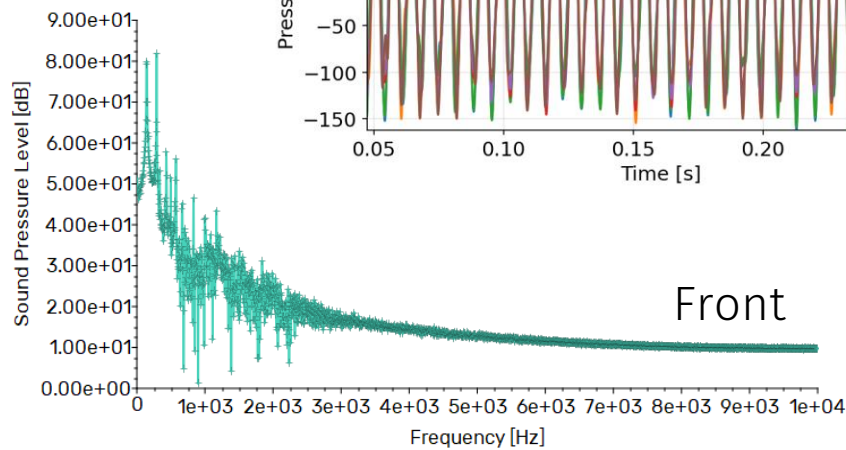
$$\nabla \cdot (\nabla \cdot \bar{\bar{T}}_L) \approx \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Výsledky – akustický signál

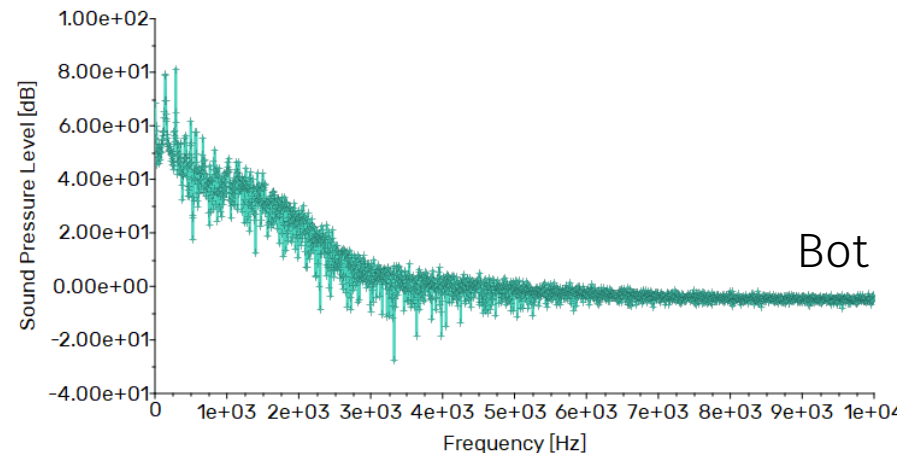
Vzdálenost mikrofonů 0.5 m do všech směrů



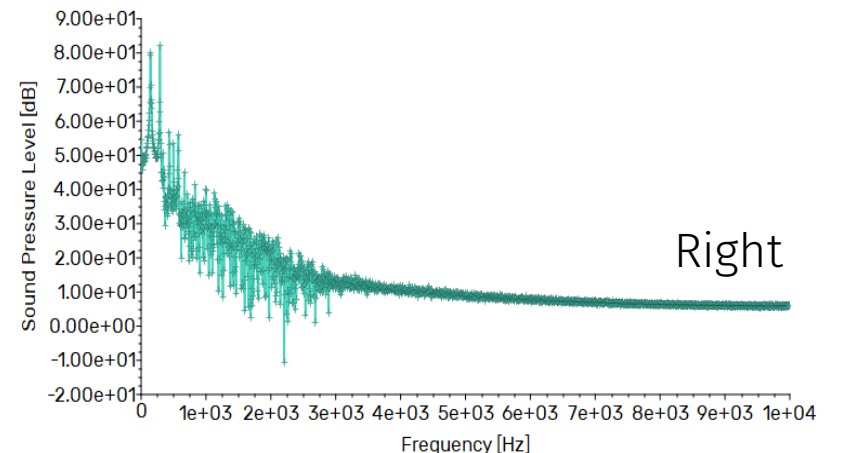
Top



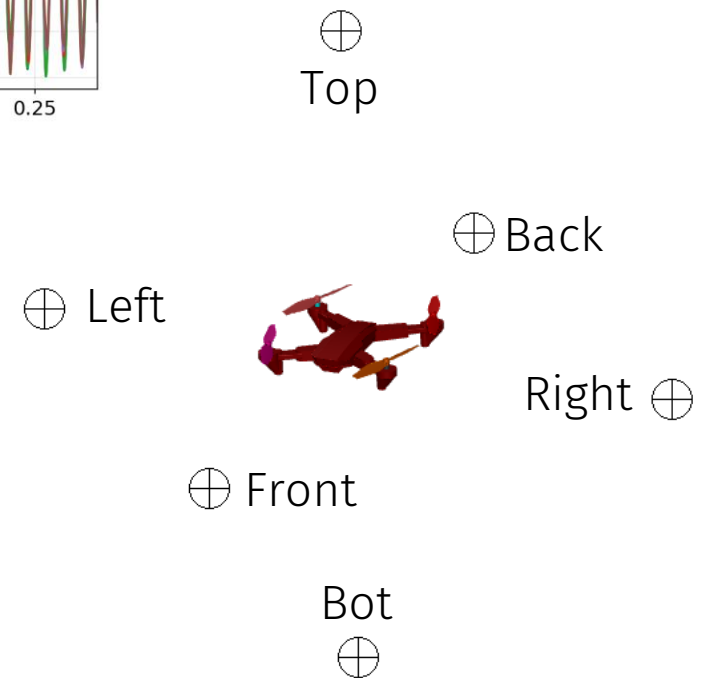
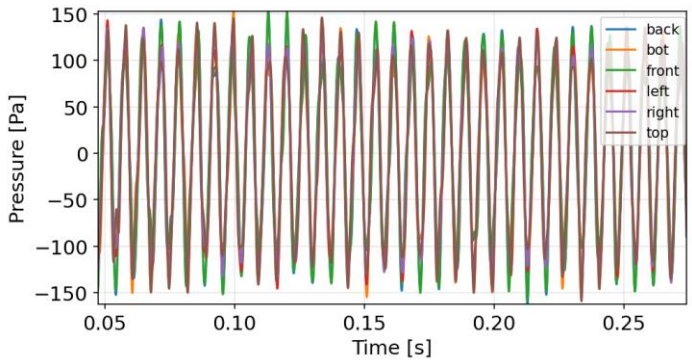
Front



Bot



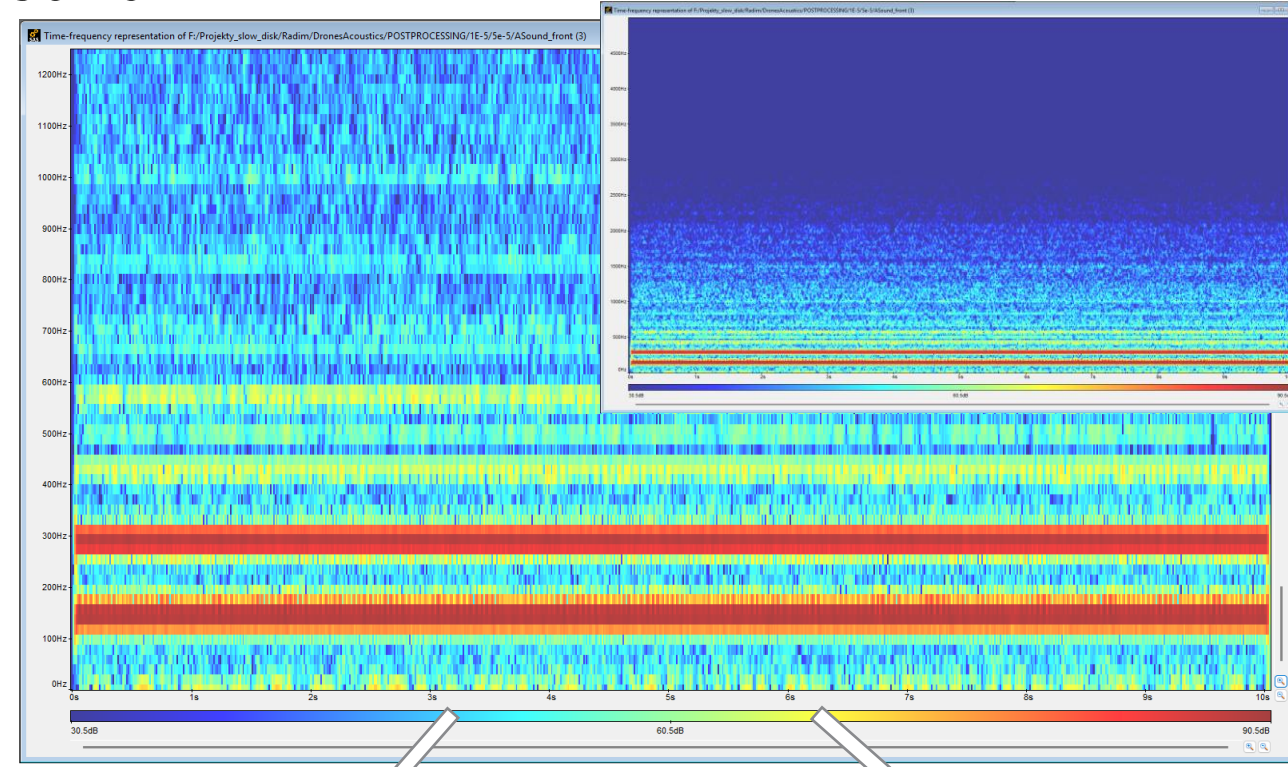
Right



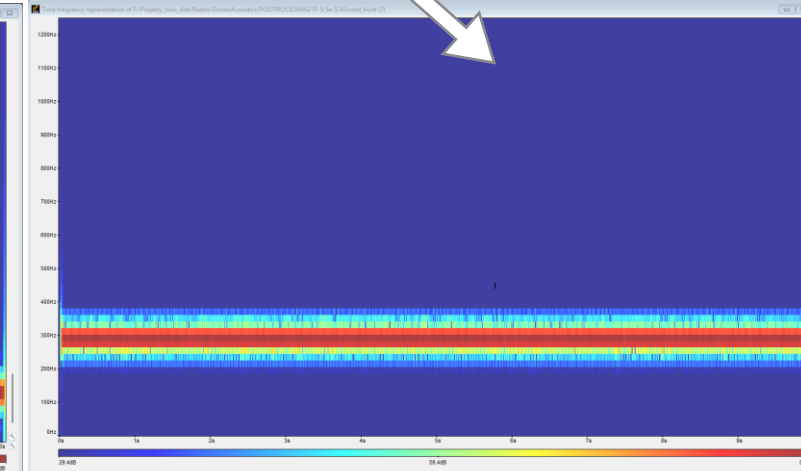
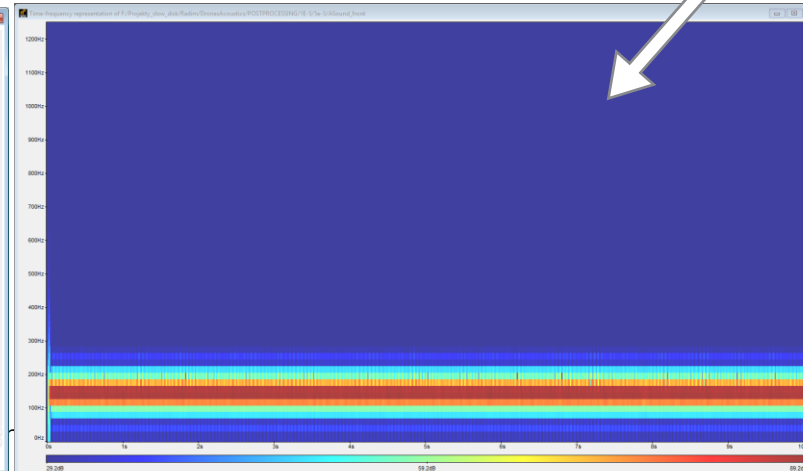
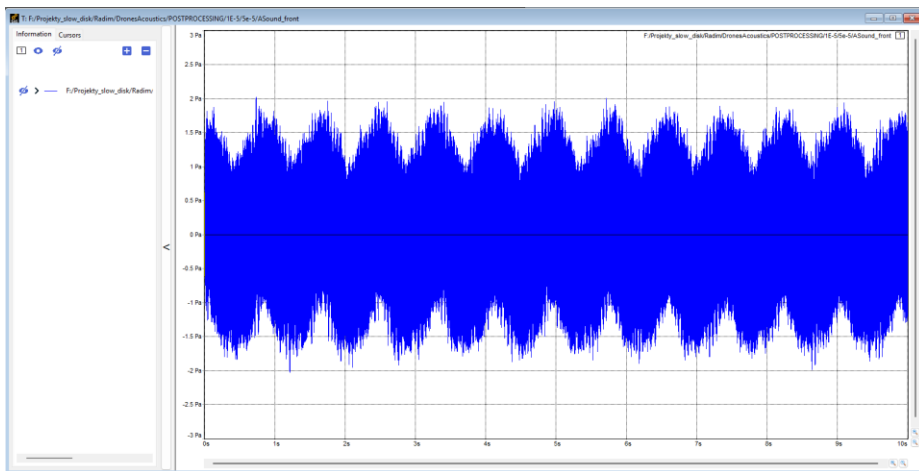
- Sound Level A-weighted (korekce na citlivost lidského ucha):
 - 0.5 m pod dronem = 83.1987 dBA
 - 20m pod dronem = 51.0609 dBA

Mikrofon	X [m]	Y [m]	Z [m]	Označení
1	0.066	0.5848	0.1214	top
2	0.066	-0.415	0.1214	bot
3	0.566	0.0848	0.1214	left
4	-0.434	0.0848	0.1214	right
5	0.066	0.0848	0.6214	back
6	0.066	0.0848	-0.3784	front

- Ukázka zpracování mikrofону „Front“
- Výpočet časové frekvenční reprezentace
 - Změna v frekvence v čase
 - Zde konstantní otáčky
- Isolace signálu konkrétní frekvence
 - Jak zní bez okolních šumu
 - Jak nepříjemná je daná frekvence



Původní signál



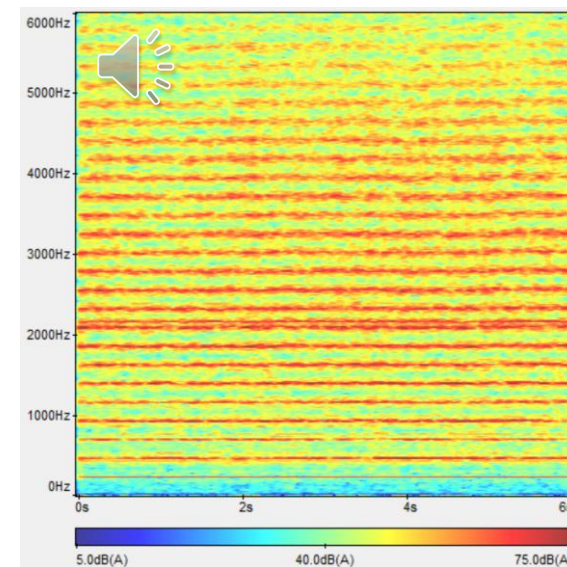
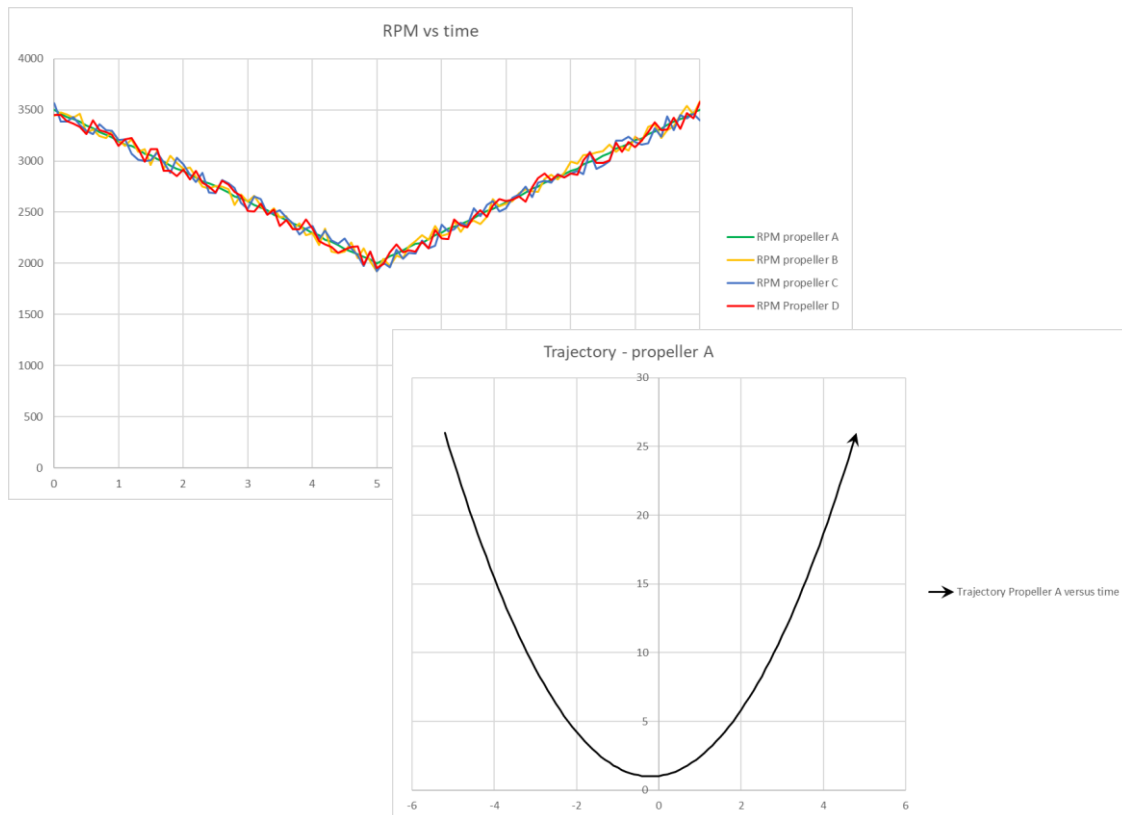
- Subjektivní lidské vnímání kvality zvuku.
- Hlasitost a vnímání (Phon, Sone):
 - Zatímco decibely měří energii, tyto jednotky zohledňují citlivost ucha na různých frekvencích.
- Ostrost (Sharpness):
 - Měří zastoupení vysokých frekvencí. Vysoká ostrost je pro člověka agresivní a vyvolává pocit „řezání“ do uší.
- Drsnost (Roughness):
 - Vyjadřuje rychlé kolísání zvuku v čase. Čím je zvuk drsnější, tím je vnímán jako více nepříjemný.
- Tonalita (Tonality):
 - Udává, nakolik zvuk tvoří čisté tóny (pískání motorů a lopatek) oproti širokopásmovému šumu (svištění větru).
- Tónová slyšitelnost a korekce:
 - Dominance tónu nad okolní hluk. Tónový hluk je pro obyvatele mnohem rušivější než rovnoměrný šum.

Leq dB	Leq dB(A)	dB(A) vs time	dB(B) vs time	Spectral Centroid (Hz)	ISO532-1 Loudness (sone)	ISO532-1 Loudness (phon)	ISO532-1 Loudness vs time (sone)	ISO532-1 Loudness level vs time (phon)	Sharpness (acum)	Roughness (asper)	Tone-to-Noise Ratio (dB)	Details Tone-to-Noise Ratio
92.45 dB SPL	82.56	Display	Display	208.96	42.07	93.95	Display	Display	0.57	0.03	Display	Display

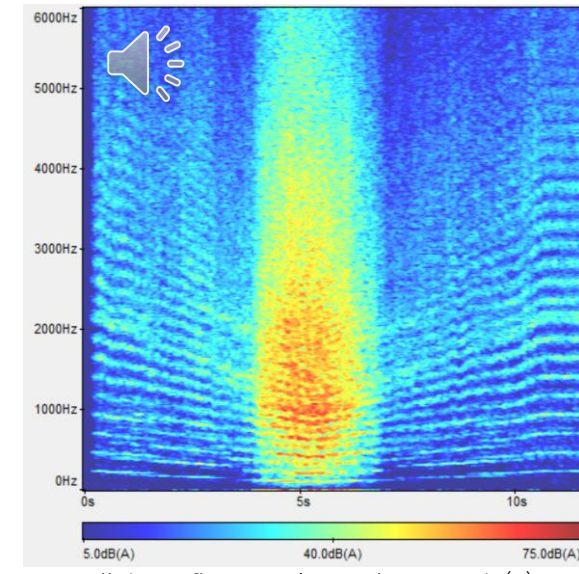
Tonal Audibility ISO1996-2:2007 (dB) (full signal)	Tonal Adjustment Kt ISO1996-2:2007 (dB) (full signal)	ISO1996-2:2007 Details (full signal)	Tonal Audibility ISO1996-2:2007 (dB) vs time	ISO1996-2:2007 details vs time	Average Tonality Aures (tu)	Average Tonality Aures (tu) vs time
36.35	6.00	Display	Display	Display	0.71	Display

Zpracování signálu v Ansys Sound – Možnost převodu do 3D prostoru

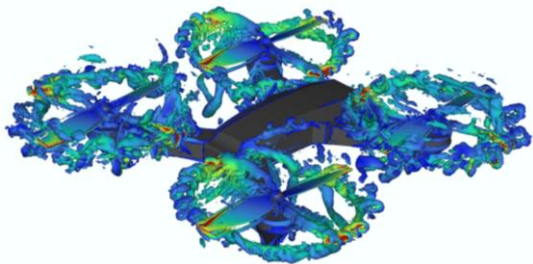
- Získaná data lze doplnit o informace o změně otáček a změně vzdálenosti dronu od pozorovatele v čase.
- Modifikace probíhá v prostředí Ansys Sound bez nutnosti další CFD analýza
- Vytvoření věrného akustického signálu celého dronu pro poslech v 3D prostředí.
- Výrazné omezení počtu fyzických prototypů a náročného testování při dosahování optimální kvality zvuku.



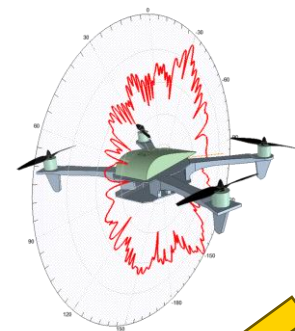
Single propeller - colormap - dB(A)



Full drone flyover noise - colormap - dB(A)



STK



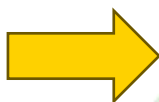
HFSS



- Generování RCS
- Ray tracing
- Generování EM pole
- Vyzařovací charakteristiky antén v reálné instalaci

Ansys Fluent

- Rychlé generování CFD dat a jejich export do STK.
- Využití detailních dat pro zpřesnění trajektorií letu
- Přenos výkonových parametrů
- Přenos akustického zdroje do reálného prostředí
- Výpočet proudění větru v zastavěných oblastech



MISSION



ModelCenter

- Prostedí pro integraci nástrojů
- Nástroje pro automatizované srovnávací studie

Mechanical



- Termální analýza
- Analýza napětí a deformace
- Interakce proudění a deformace

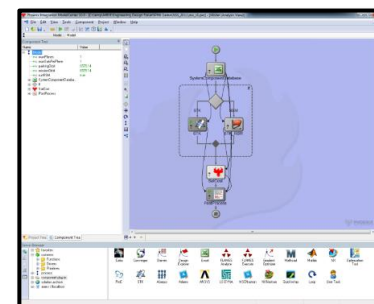


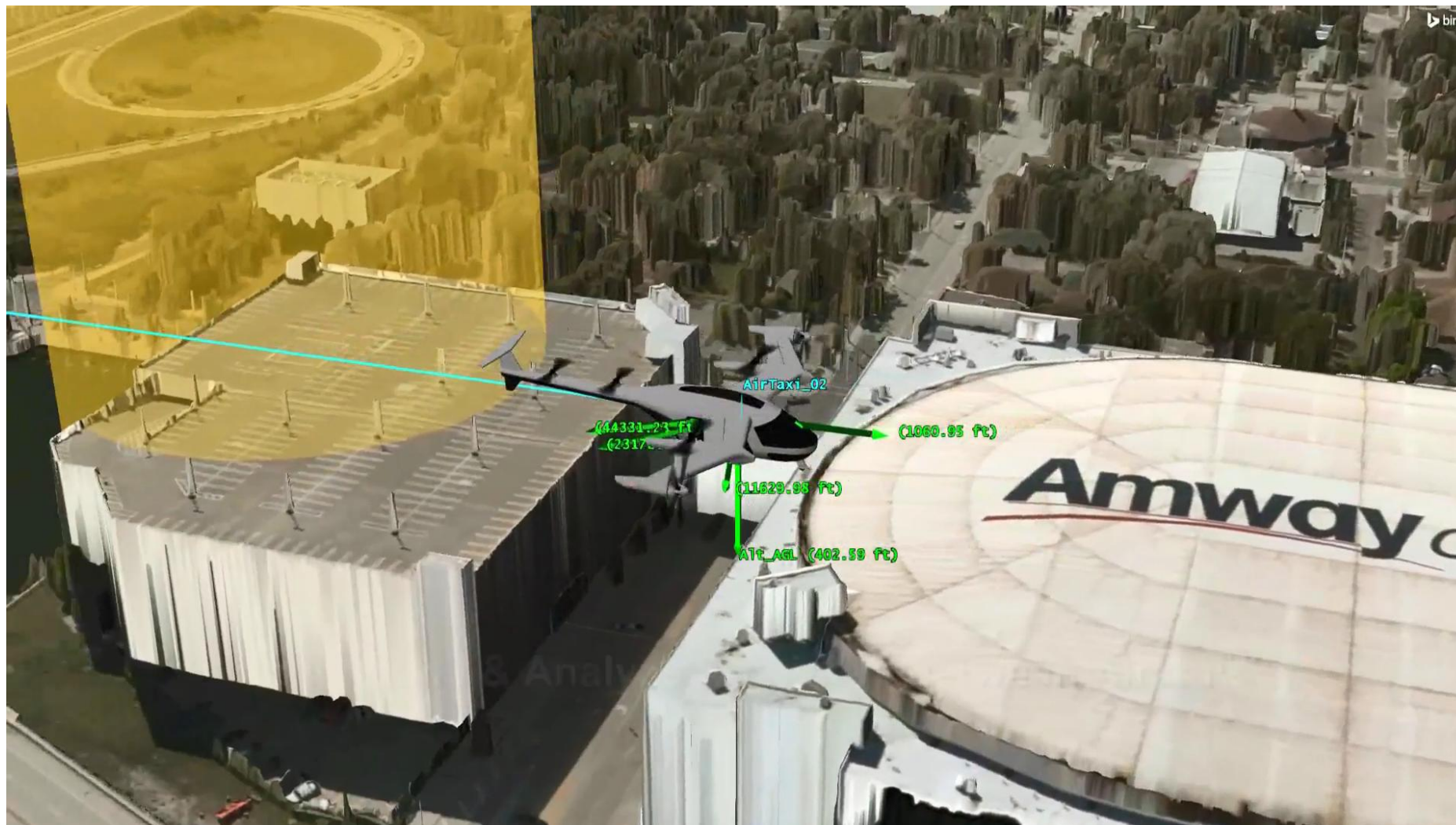
Embedded Software



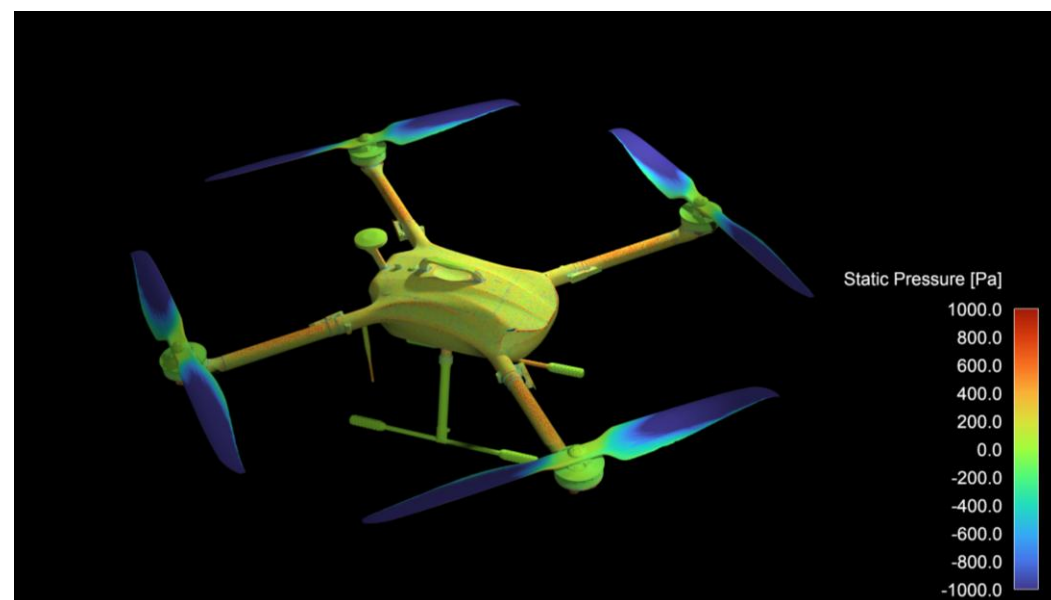
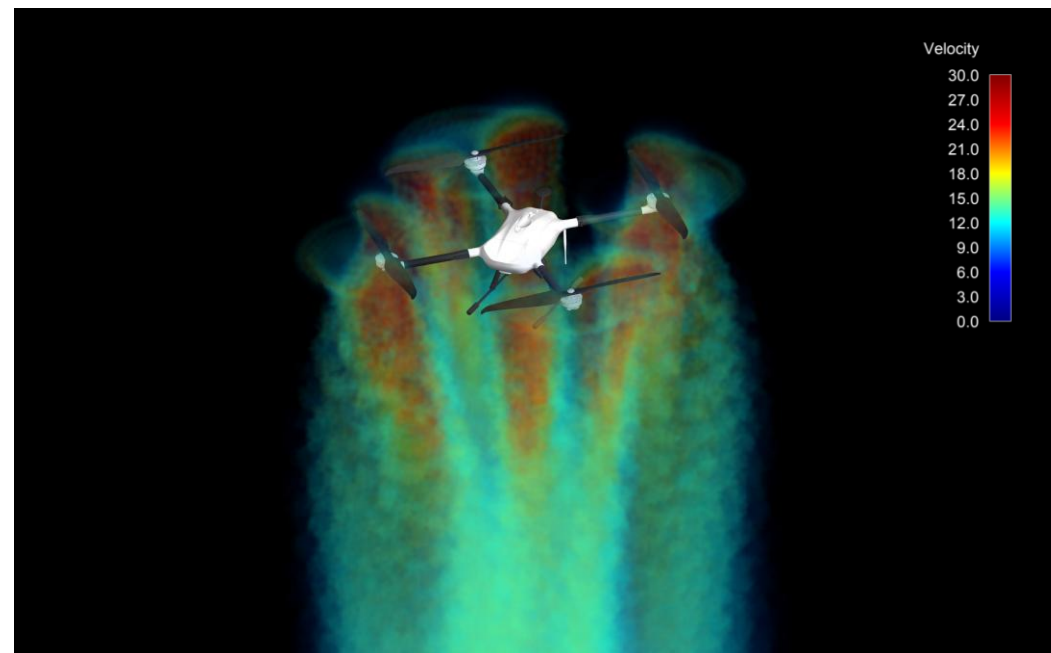
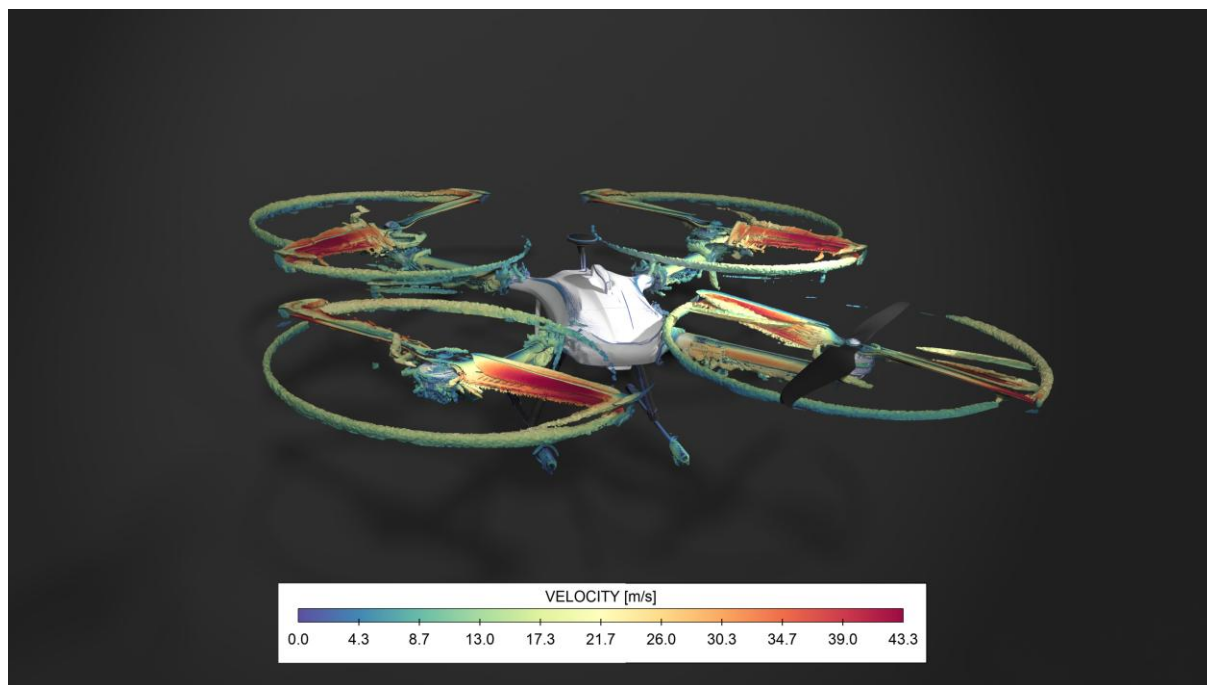
SCADE

- Prostedí pro vývoj embedded systémů

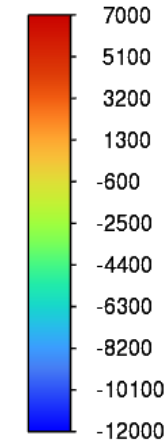
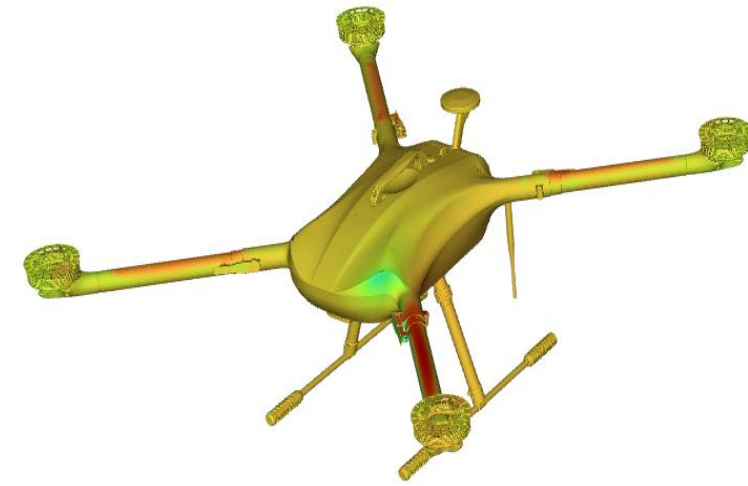
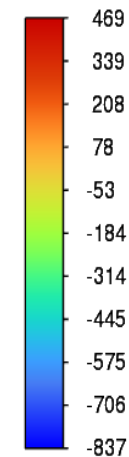


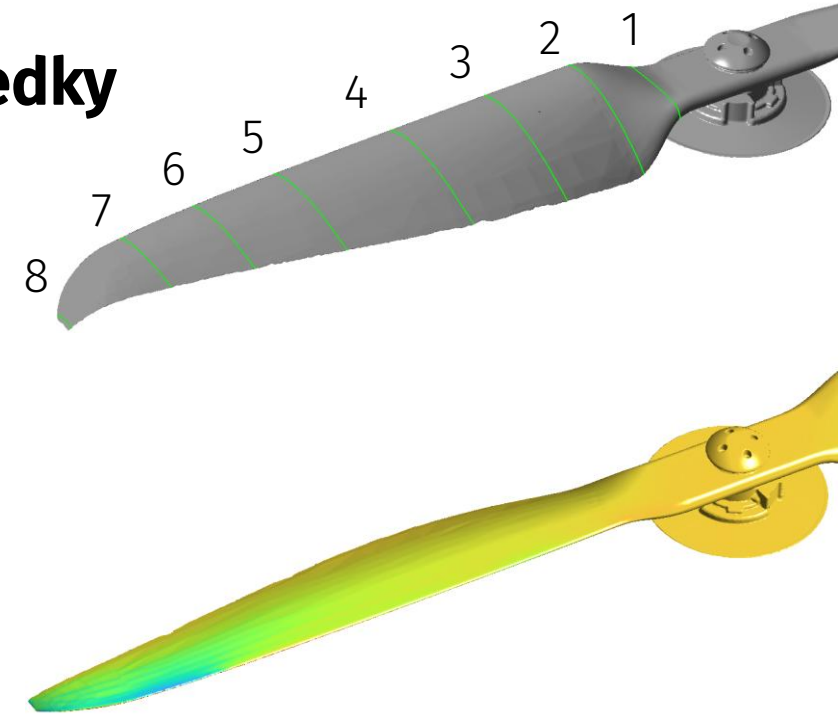
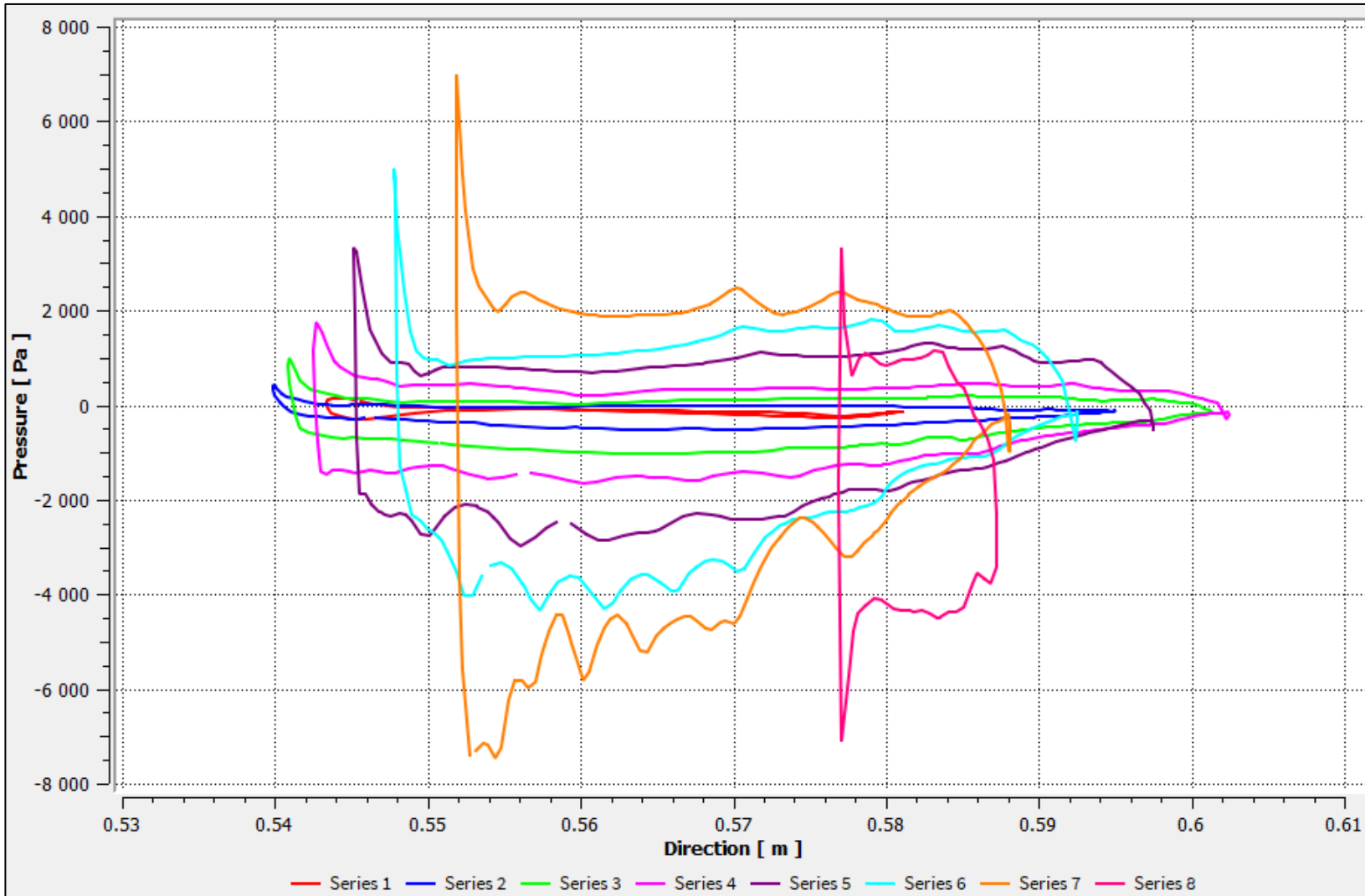


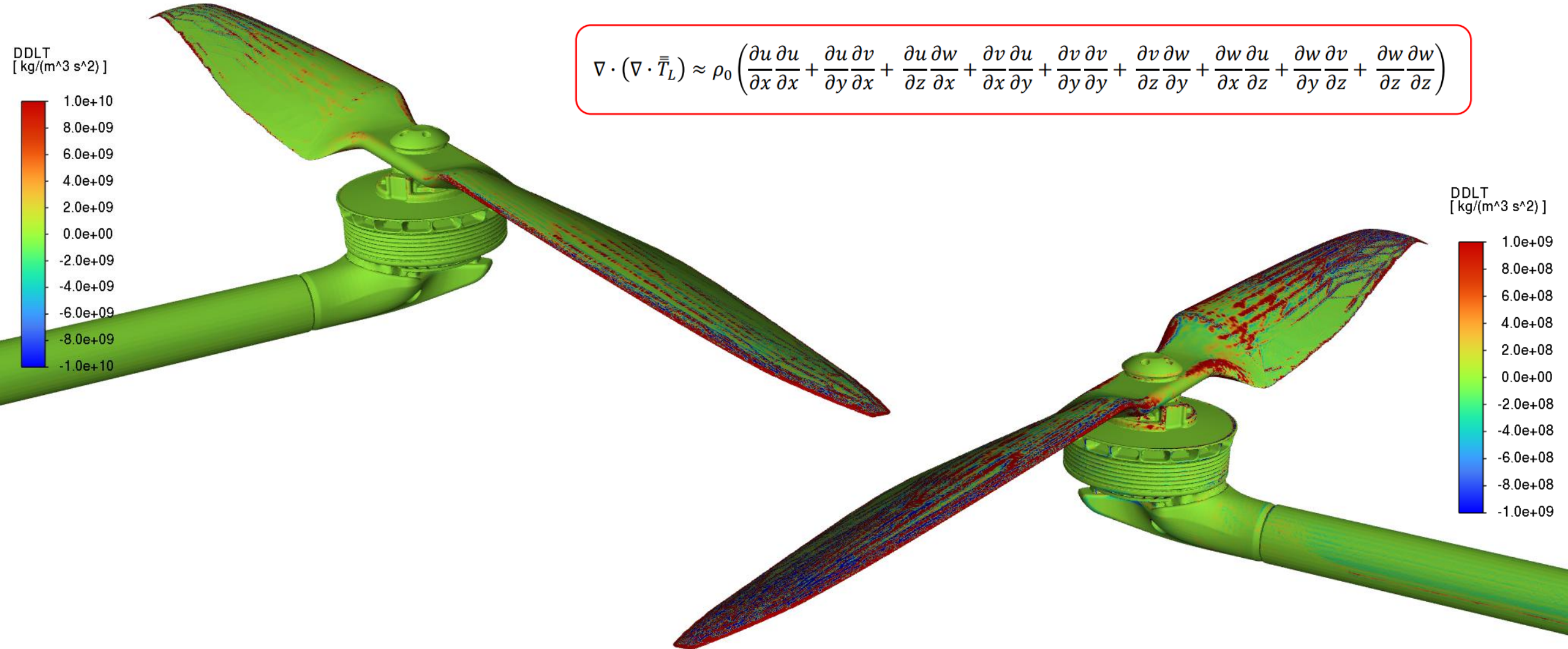
- Víceúčelová letová platforma s vysokou výdrží



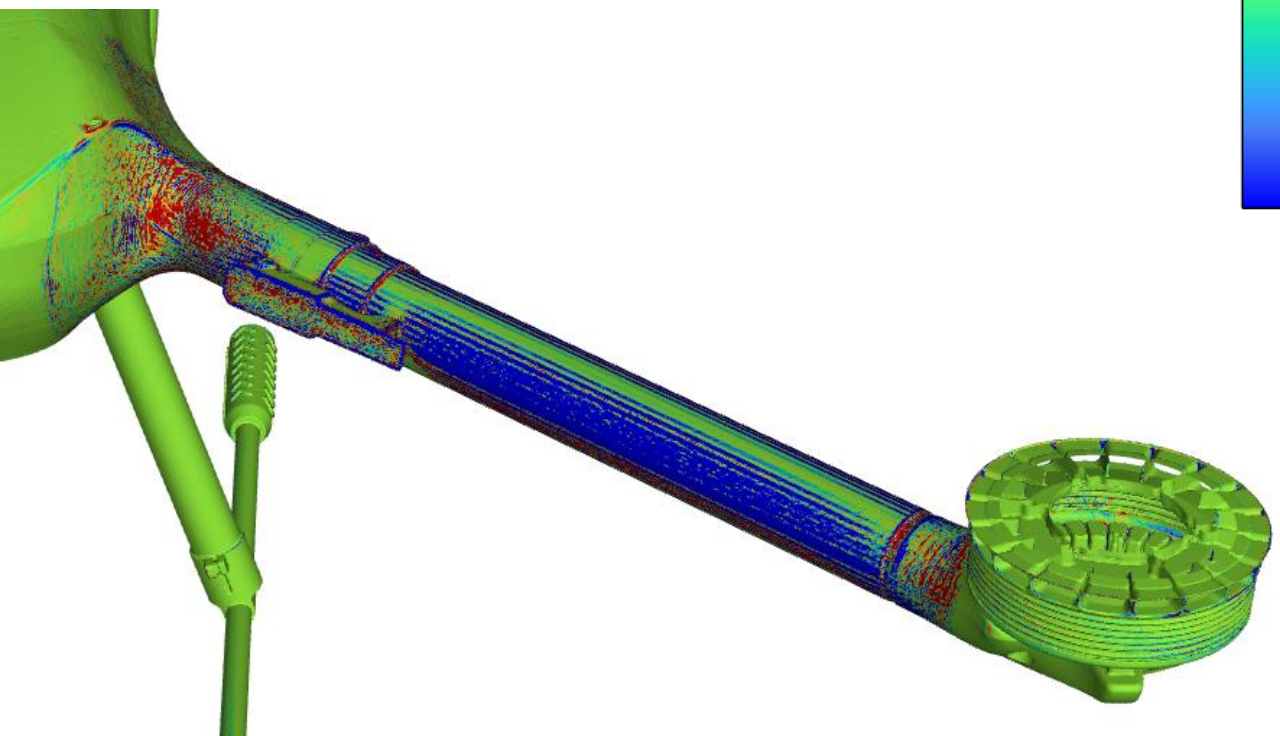
- Okamžitá vztlaková síla:
 - $F_{R1} = 78 \text{ N}$
 - $F_{R2} = 77 \text{ N}$
 - $F_{R3} = 79 \text{ N}$
 - $F_{R4} = 94 \text{ N}$
- Okamžitý kroutící moment
 - $Mk_{R1} = -3.75 \text{ Nm}$
 - $Mk_{R2} = 4.12 \text{ Nm}$
 - $Mk_{R3} = -3.80 \text{ Nm}$
 - $Mk_{R4} = 5.17 \text{ Nm}$
- Simulace pro různé náklony a rychlost větru → import do STK

Static Pressure
[Pa]Static Pressure
[Pa]

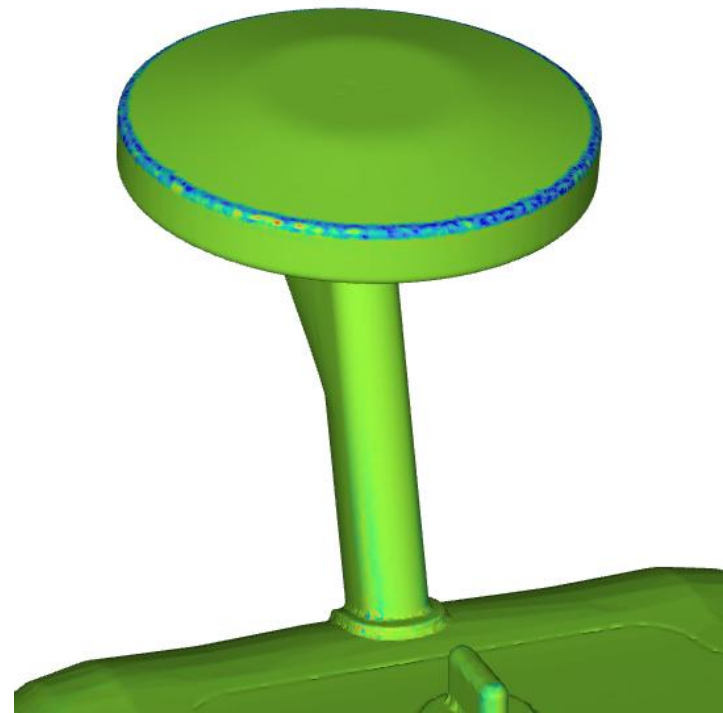
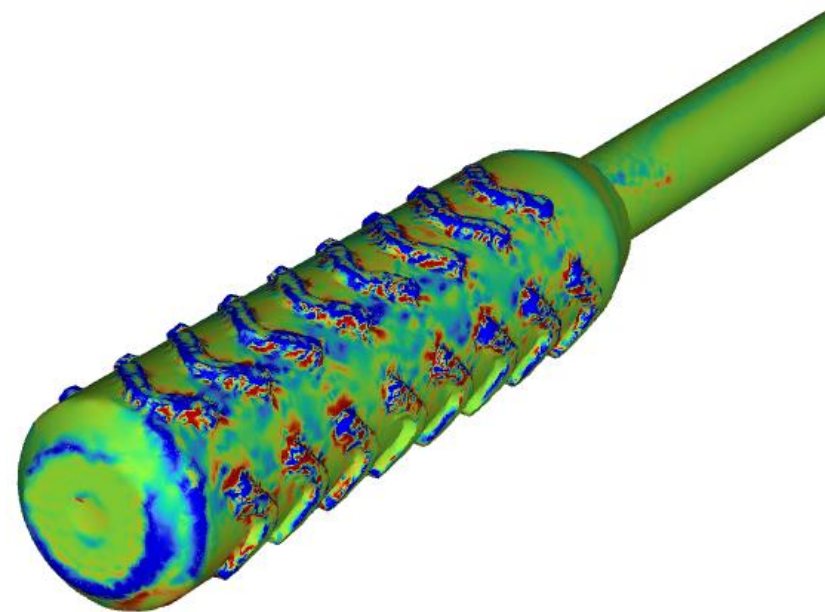
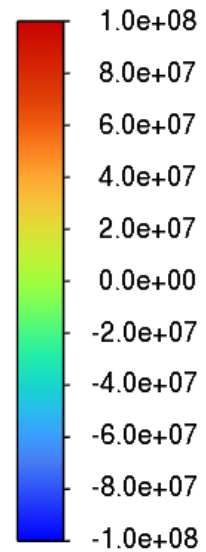




Simulace Dronu EC 11 – Akustické výsledky



DDL
[kg/(m³ s²)]





**Díky za pozornost
a zůstaňme ve spojení**

 Radim Burda rburda@svsfem.cz