



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ

DISERTAČNÍ PRÁCE

doktorský studijní program: P2301 Strojní inženýrství
studijní obor: Stavba strojů a zřízení

Výzkum a vývoj hybridních skříní pro kolejová vozidla – hmotnostně úsporné prvky větracího systému

Autor:
Školitel:

Ing. Ladislav Tříška
doc. Ing. Petr Heller, CSc.

Plzeň 2017

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

Výzkum a vývoj hybridních skříní pro kolejová vozidla – hmotnostně úsporné prvky větracího systému

vypracoval samostatně, pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji podpoře v rámci projektu „Regionální technologický institut“ č. projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0093 a projektu TAČR č. TA04030774 „Výzkum a vývoj hmotnostně optimalizovaných komponentů pro kolejová vozidla“.

ANOTACE

AUTOR	Příjmení (včetně titulů) Ing. Tříška	Jméno Ladislav
STUDIJNÍ OBOR	Stavba strojů a zařízení	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Heller, CSc.	Jméno Petr
PRACOVISTĚ VEDOUcíHO	ZČU – FST – KKS	
DRUH PRÁCE	disertační	
NÁZEV PRÁCE	Výzkum a vývoj hybridních skříní pro kolejová vozidla – hmotnostně úsporné prvky větracího systému	

Fakulta: Strojní
Katedra: Stavba strojů a zařízení
Rok odevzdání: 2017

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	166	Textová část	124	Grafická část	42
---------------	-----	---------------------	-----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Předmětem řešení je navržení a odzkoušení nové koncepce větracího systému pro vozidla městské hromadné dopravy. Hlavním přínosem by měla být úspora hmotnosti celého systému, jednoduchá montáž a snížení hlučnosti větracího systému. V rámci této disertační práce se zaměřuji na parametry pohodlí v oblasti salonu vozu metra (měření na funkčním vzorku dle požadovaných norem a jeho vyhodnocení).
KLÍČOVÁ SLOVA	metro, vložený vůz metra, parametry pohodlí, větrací systém, hybridní skřín, měření, kolejová vozidla, úspora hmotnosti, městská hromadná doprava, tkaninové potrubí, větrací jednotka, ventilátor, CFD výpočty, proudění vzduchu

SUMMARY

AUTHOR	Surname (including of Degrees) Ing. Tříška	Name Ladislav
FIELD OF STUDY	Materials Engineering and Engineering Metallurgy	
SUPERVISOR	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Heller, CSc.	Name Petr
INSTITUTION	University of West Bohemia – Faculty of Mechanical Engineering – Department of Machine Design	
TYPE OF WORK	dissertation	
TITLE OF THE WORK	Research and development of hybrid railway vehicles - weight-saving elements of the ventilation system	

Faculty: Mechanical Engineering
 Department: Design of Machines and Equipment
 Submitted in: 2017

Number of pages (A4 a eq. A4)

Totally	166	Text part	124	Graphical part	42
----------------	-----	------------------	-----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This project involves designing and testing a new concept of the ventilation system for urban mass transit vehicles. The key merits sought include weight savings in the entire system, straightforward installation and reduced noise of the ventilation system. This dissertation focuses on comfort parameters in the saloon of a metro car (measurement on a functional sample in accordance with relevant standards and its evaluation).
KEY WORDS	metro, mid-train metro car, comfort parameters, ventilation system, hybrid body, measurement, rail vehicles, weight savings, urban mass transit, fabric ducting, ventilation unit, fan, CFD computation, air flow

Obsah

Obsah.....	1
Seznam použitých symbolů a zkratk	4
Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	14
Seznam příloh.....	16
1 Úvod – cíle disertační práce	17
2 Požadavky na skříňové kolejových vozidel	18
2.1 Provozní požadavky na skříňové kolejových vozidel	18
2.2 Význam lehké stavby skříňového kolejového vozidla	18
2.2.1 Technický význam	18
2.2.2 Význam ekonomický.....	19
2.2.3 Význam ekologický.....	19
2.3 Požadavky na konstrukci skříňového kolejového vozidla.....	19
2.3.1 Hmotnost skříňového vozidla v provozním stavu m_1	20
2.3.2 Maximální hmotnost nákladu m_2	20
2.3.3 Hmotnost podvozku nebo pojezdu m_3	20
2.3.4 Výjimečné užitečné zatížení m_4	20
3 Konstrukční varianty hrubé stavby skříňové.....	21
3.1 Používané konstrukční varianty stavby skříňového kolejového vozidla.....	21
3.1.1 Zhodnocení hybridní stavby skříňového kolejového vozidla	22
4 Rešerše hybridních konstrukcí u vozů kolejových vozidel – použití moderních materiálů v samotné stavbě	23
4.1 Konstrukce skříňové Stockholm C20	23
4.2 Konstrukce částí skříňové tramvaje 15T	23
4.3 Konstrukce vysokorychlostního vozu ve Finsku (Alstom Transport, Fibrocom)	24
4.4 Variel vozy	25
4.5 Vysokorychlostní vůz Korea Railroad Research Institute (KRRI)	26
4.6 Hmotnostně úsporné materiály používané v oblasti stavby hybridních skříňových kolejových vozidel – strukturální materiály	27
4.6.1 Technologie laminace	28
4.6.2 Spojování kompozitních dílů v oblasti stavby hybridních skříňových vozidel – lepení	34
4.6.3 Textilní materiály – tkaniny – použití ve větracím systému	36
5 Výzkum, vývoj a stavba hybridní skříňové kolejového vozidla	38
5.1 Výzkum hybridní skříňové vloženého vozu vozidla metra	38
5.1.1 Spojení jednotlivých hybridních částí vozu pro vůz metra v rámci projektu FR- TI3/449	40
5.1.2 Poznatky pro použití lepených spojů a použití možného lepidla pro hybridní vůz metra řešeného v rámci projektu FR-TI3/449	43
5.1.3 Zavádění osamělých sil	43
6 Oblast střechy vozu a větrání	44
6.1 Normy ovlivňující konstrukci střechy vozu a větrání	44
6.2 Koncepční konstrukční uzel střechy vozu, návrh koncepce, funkční vzorek.....	45
6.3 Větrání	46
6.3.1 Množství vzduchu pro různé režimy ventilace vozů metra.....	47
6.4 Návrh větracího systému, větracích kanálů	49
6.5 Koncepční řešení větrací jednotky umístěné na střeše představku	51

6.6	Koncepční řešení větracího kanálu	52
6.6.1	Distribuce vzduchu do salonu vozu	53
6.7	Aerodynamika v oblasti větrací jednotky vozidla	54
6.7.1	Základní pojmy a vztahy	55
6.7.2	Proudění vzduchu potrubím	56
6.7.3	Tlakové ztráty při průtoku potrubím	57
6.7.4	Tlakové ztráty třením	57
6.7.5	Tlaková ztráta místní	58
6.7.6	Tlakové poměry v potrubní síti	58
6.7.7	Model větrací jednotky, proudění větrací jednotkou	58
6.7.8	Simulace proudění v salonu vozu, distribuce perforací bez usměrňovacích prvků	62
6.7.9	Simulace proudění v salonu vozu, distribuce perforací s usměrňovacími kapsami	64
6.7.10	Simulace usměrnění proudění z větracího kanálu, distribuce s usměrňovací kapsou	67
6.8	Hluk uvnitř kolejových vozidel	68
6.8.1	Aerodynamický hluk	69
6.8.2	Pohlcování zvuku	72
6.8.3	Porézní absorbéry	73
6.8.4	Rezonanční absorbéry	74
6.8.5	Samostatné absorbéry	74
6.9	Hluk vzduchotechniky	75
6.10	Klasifikace zvuku	76
6.10.1	Příklad porovnávání různých produktů na základě jejich absorpční třídy	76
7	Měření a ověření funkčnosti navrženého řešení v oblasti větrání	77
7.1	Měření tlaků a rychlostí ve ventilačním kanálu větraného vozu metra	77
7.1.1	Seznam použitých měřidel a vybavení	77
7.1.2	Popis měřicí techniky	77
7.1.3	Měření za ventilátorem	79
7.1.4	Výsledky a vyhodnocení	80
7.1.5	Měření rychlostí ve tkaninovém potrubí	85
7.1.6	Výsledky a vyhodnocení	87
7.1.7	Závěr měření tlaků a rychlostí ve ventilačním kanálu větraného vozu metra	97
7.2	Měření rychlostí a turbulencí v prostoru salonu vozu metra	97
7.2.1	Měřidla – Seznam měřidel a vybavení	98
7.2.2	Popis měřicí techniky	98
7.2.3	Výsledky a vyhodnocení měření rychlostí a turbulencí	99
7.2.4	Uspořádání měření rychlostí a turbulencí – s podhledovou mříží	104
7.2.5	Výsledky a vyhodnocení měření rychlostí a turbulencí – s podhledovou mříží	105
7.3	Experiment zvýraznění proudnic planárním laserem	108
7.3.1	Seznam měřidel	108
7.3.2	Uspořádání experimentu zvýraznění proudnic planárním laserem	108
7.3.3	Výsledky a vyhodnocení experimentu zvýraznění proudnic planárním laserem	108
7.3.4	Závěry experimentu zvýraznění proudnic planárním laserem	109
7.4	Měření hluku ve funkčním vzorku hybridní skříně vozidla metra	109
7.4.1	Popis měření	109
7.4.2	Použitá zařízení	109

7.4.3	Změřené hodnoty akustického tlaku pro případ nezaizolovaného propojovacího kanálu	111
7.4.4	Změřené hodnoty akustického tlaku pro případ zaizolovaného propojovacího kanálu	113
7.4.5	Závěry měření hluku ve funkčním vzorku hybridní skříně vozidla metra	118
8	Zhodnocení a závěry řešeného uzlu střešní části vozidla metra v oblasti větrání	118
8.1	Zhodnocení z hlediska vlastní hmotnosti jednotlivých prvků větracího systému ...	118
8.2	Zhodnocení z hlediska funkce	119
8.3	Zhodnocení z hlediska snižování hlučnosti	119
8.4	Závěr	121
9	Použitá literatura	122
10	Přílohy	i
	Příloha č. 1: Statické pevnostní požadavky na skříně kolejových vozidel	i
	Příloha č. 2: Tabulka možných technologických postupů výroby kompozitů	x
	Příloha č. 3: Tabulka pevnostních požadavků na skříně kolejových vozidel dle normy ČSN EN 663-1, kategorie P III a porovnání naměřených hodnot zkoušek	xiv
	Příloha č. 4: Produktový list použitého ventilátoru větrací jednotky	xv
	Příloha č. 5: Naměřené průběhy rychlostí v salonu vozu pro jednotlivé výkony ventilátoru .	xix
	Příloha č. 6: Fotodokumentace z průběhu stavby hybridní skříně vozu metra	xxxvii
	Příloha č. 7: Fotodokumentace větracího systému v průběhu výzkumu	xxxix

Seznam použitých symbolů a zkratk

SYMBOLY:

- A – čelní plocha [m²]
b – šířka přeplátovaného spoje [mm]
c – rychlost vlny [m/s]
c₁ – součinitel odporu valení [-]
C₁ – součinitel odporu vzduchu [-]
d – charakteristický rozměr [m]
D_i – dílčí útlum [dB]
D_p – celkový přirozený útlum [dB]
E – celková spotřeba energie [kWh]
f – frekvence [Hz]
F_{max} – maximální síla [N]
F_{pr} – průměrná síla [N]
I – intenzita zvuku vlny [W/m²]
j – počet ventilačních jednotek [-]
l – délka přeplátovaného spoje [mm]
l – ujetá dráha [m]
L_c – vypočítané zatížení [N]
L_{cb} – kritické deformační zatížení [N]
L_i – dílčí hladina hluku (i – pořadí zdroje hluku) [dB]
L_N – přípustná korigovaná hladina hluku [dB]
L_p – celková hladina akustického výkonu [dB]
L_{SO} – hladina hluku při spolupůsobení 2 zdrojů (1 větrací jednotka obsahuje 2 ventilátory) [dB]
L_{sp} – hladina měrného akustického výkonu [dB]
m – celková hmotnost vozidla $m = (m_1 + m_2)$ [kg]
M – hmotnostní průtok [kg/s]
m₁ – vlastní hmotnost vozidla [kg]
m₂ – užitečná hmotnost zařízení, cestujících nebo nákladu [kg]
N – obsaditelnost [-]
n – počet sedáků (mimo sedáků n_{in}) [-]
n_{in} – počet sedáků pro cestující se sníženou schopností pohybu a orientace [-]
N_{max} – maximální obsaditelnost [-]
N_{sed} – obsaditelnost sedících cestujících [-]
O – obvod potrubí [m]
Ø – průměr
p – tlak [Pa]
p_c – celkový tlak [Pa]
p_d – dynamický tlak [Pa]
p_s – statický tlak [Pa]
Q_v – množství dodaného vzduchu do salonu vozu [m³/h]
R – plynová konstanta [J/kmol]
R – tlakový spád [Pa/m]
r – vnitřní poloměr potrubí [m]
Re – Reynoldsovo číslo [-]
R_m – mezní zatížení materiálu [MPa]
S – kontrolní bezpečnostní součinitel [-]

S – plocha spoje $S = b \cdot l$ [mm²]
 S_2 – bezpečnostní součinitel pro mezní poruchu
 S_3 – bezpečnostní součinitel pro nestabilitu
 sp – maximální spotřeba vzduchu při teplotě nad 26 °C [m³/h]
 S_{sed} – užitečná plocha pro sedící cestující [m²]
 $S_{sed,in}$ – užitečná plocha pro sedící cestující se sníženou schopností pohybu a orientace [m²]
 S_{st} – užitečná plocha pro stojící cestující [m²]
 S_u – užitečná plocha pro stojící i sedící cestující [m²]
 s_{wa} – maximální pevnost [N/mm]
 s_{ws} – střední pevnost [N/mm]
 T – čas [s]
 T – termodynamická konstanta [K]
 U – využití prvku [-]
 V – objem prostoru [m³]
 V_p – vzduchový výkon [m³/h]
 W – jízdní odpor [N/kN]
 w – rychlost proudící kapaliny [m/s]
 w_{max} – maximální rychlost na ose potrubí (pro osově symetrické proudění) [m/s]
 y – poloměr bodu, v němž je vyšetřována rychlost w [m]
 α – činitel hlukové pohltivosti, NRC (Noise Reduction Coefficient) [-]
 Δp – tlakový výkon [Pa]
 Δp_λ – tlaková ztráta třením [Pa]
 Δp_ξ – místní tlaková ztráta [Pa]
 λ – součinitel tření [-]
 λ – vlnová délka [m]
 ξ – součinitel místní tlakové ztráty [-]
 ρ – hustota vzduchu [kg/m³]
 σ_c – vypočtené napětí při výjimečném zatížení [MPa]
 σ_{cb} – kritické deformační napětí [MPa]
 τ – smyková pevnost v tahu [MPa]
 ν – kinematická viskozita [m²/s]

ZKRATKY:

2D – dvourozměrný (dvoudimenzionální)

3D – trojrozměrný (trojdimenzionální)

A/D převodník – Analog/Digital Converter – součástka určená k převodu spojitého (analogového) signálu na signál diskrétní (digitální)

Al₂O₃ – plnivo Aluminium Trihydrát

CAD – Computer Aided Program – počítačové projektování

cDAQ-9184 – typ šasi CompactDAQ (Data Acquisition systém – systém sběru dat)

CE – Conformité Européene (Evropská shoda) – označení výrobků, které jsou ve shodě se všemi evropskými směrnici a nařízeními

CF1263 – uhlíková vlákna (Carbon Fabric)

CFD – Computational Fluid Dynamics – počítačová simulace proudění kapalin

CNC – Computer Numerical Control – počítačově řízený obráběcí stroj

CO₂ – oxid uhličitý

ČSN – Česká státní norma

DIN – Deutsche Industrie Norm (Německá technická norma) vydaná Německým ústavem pro průmyslovou normalizaci (Deutsches Institut für Normung e. V.)

EC ventilátory – ventilátory s úspornými EC (Electronic Commutation – elektronicky usměrňovanými) motory

EN – Evropská norma

EN AW 5754 – označení hliníkové slitiny AlMg3

FS – chyba použitého měřicího rozsahu (z angl. Full Scale)

HL 2 – střední třída požární odolnosti (Hazard Level 1 - 3)

ISO – Mezinárodní organizace pro normalizaci

KRRI – Korea Railroad Research Institute

Mpix – Megapixel – milion pixelů – jednotek digitální rastrové (bitmapové) grafiky

NI 9217 – síťová karta National Instruments

NiCR-Ni – nikl – chrom – nikl

OSB – Oriented Strand Board – deska z orientovaných plochých třísek

PC – Portable Computer (osobní počítač)

PMI – Polymethakrylimid

PP – Polypropylen

PS – Polystyren

PU – Polyuretan

PVC – Polyvinylchlorid

RFI – sycení suché výztuže pryskyřicí ve formě fólie (Resin Film Infusion)

RTM – přetlakové sycení suché výztuže pryskyřicí v kapalně formě (Resin Transfer Moulding)

SW – Software – programové vybavení

T_g – teplota skelného přechodu

TR 4HR 30x30x1 – profil trubkový čtyřhranný čtvercový o průřezu 30x30 mm a tloušťce stěny 1 mm

UHMWP – Polyetylen ultra vysoce molekulární

VARTM – sycení suché výztuže pryskyřicí v kapalně formě pouze za působení podtlaku (Vacuum Assisted RTM)

VI – sycení suché výztuže pryskyřicí v kapalně formě pouze za působení podtlaku, kdy skladba není zcela uzavřena na rozdíl od technologie VARTM, kde je skladba zcela uzavřena (Vacuum Infusion)

Seznam obrázků

Obr. 1 Postup vývoje technologií výroby staveb skříní vozů [2].....	21
Obr. 2 Přehled technologií výroby hrubých staveb skříní vozů.....	21
Obr. 3 Ukázka hybridní vozové skříně (použití různých materiálů pro stavbu skříně) [24]....	22
Obr. 4 Vůz metra Stockholm C20 [29]	23
Obr. 5 Tramvaj 15T For City [29].....	24
Obr. 6 Modul čelní kabiny tramvaje 15T [19]	24
Obr. 7 Skříň vagónu Fibrocom Talgo [19].....	25
Obr. 8 Kompozitní skříň vozu vyrobená navíjením sklolaminátu [29].....	25
Obr. 9 Kompozitní skříň vozu Korea Railroad Research Institute (KRRI) [30].....	26
Obr. 10 Řez skříně vozu Korea Railroad Research Institute (KRRI) a pohled na stavbu použitých sendvičů [30]	27
Obr. 11 Proces vytvrzování vozu Korea Railroad Research Institute (KRRI) v autoklávu [30]	27
Obr. 12 Typické položení technologických vrstev při výrobě z prepregových polotovarů [1]29	
Obr. 13 Multiaxiální tkanina s orientací vrstev 0/90 [8]	31
Obr. 14 Multiaxiální tkanina s orientací vrstev -45/90/45/90/0 [8]	31
Obr. 15 Schéma konstrukce příkladu sendviče s voštinovým jádrem [31].....	32
Obr. 16 Sendvič s voštinovým papírovým jádrem napuštěný fenolickou pryskyřicí [28].....	32
Obr. 17 Řez celohliníkovým sendvičem s voštinovým jádrem [28]	32
Obr. 18 Řez hliníkovým sendvičem s hliníkovou pěnou [28].....	33
Obr. 19 Závislost ceny materiálu jádra na jeho mechanických vlastnostech [7]	33
Obr. 20 Rozdělení lepidel podle principu tuhnutí ve spoji [20].....	35
Obr. 21 Polyair – klasická tkanina [25].....	37
Obr. 22 Polyair strong – extra pevná tkanina [25]	37
Obr. 23 Izolace – netkaná textilie [25]	37
Obr. 24 Vložený motorový vůz metra [15]	38
Obr. 25 Fotografie z montáže bočnicových a mezidveřních modulů a vaznice a pohled do hotové skříně	38
Obr. 26 3D model hybridní skříně vozu metra.....	39
Obr. 27 Rozstřel hybridní skříně vozu metra	39
Obr. 28 Statické pevnostní zkoušky skříně, vlevo zkouška tlakem na čelnici pod úrovní dolní hrany oken	40
Obr. 29 Konečné provedení hybridní skříně vozu metra na přepravních podvozcích.....	40
Obr. 30 Vložený vůz metra řešený v rámci projektu FR-TI3/449 [11].....	41
Obr. 31 Spojení kompozitní bočnice s hlavním rámem vozidla [11].....	41
Obr. 32 Spojení ocelové vaznice s kompozitní bočnicí [11].....	42
Obr. 33 Spojení kompozitního čela s kompozitní bočnicí [11].....	42
Obr. 34 Spojení kompozitních dílů střechy a ocelové vaznice [11].....	43
Obr. 35 Insert pro zavedení osamělých sil z překližky [17].....	43
Obr. 36 Insert z tenkostěnného profilu s nýtovací maticí [17].....	43
Obr. 37 Insert tenký plech s nýtovací maticí [17]	44
Obr. 38 Izometrický pohled na hrubou stavbu hybridní skříně vozu metra – pohled na rovné střechy na koncích vozu	45
Obr. 39 Detail rovné střechy vozu pro větrací jednotu	46
Obr. 40 Příčný 3D řez zobrazující umístění větracího kanálu ve střeše vozu.....	46
Obr. 41 Vložený vůz metra [15].....	48
Obr. 42 Pohled na umístění větracího kanálu a větrací jednotky vozu metra	49

Obr. 43 Půdorysný detail větrací jednotky znázorňující polohu jednotky na střeše vozu a princip nasávání a výfuku vzduchu do větracího kanálu vozu.....	50
Obr. 44 Celkový detailní pohled na řešení výstupu vzduchu z interiéru vozu.....	50
Obr. 45 Charakteristika ventilátoru ve větracích jednotkách – ventilátor s volně oběžným kolem R3G310-RR12-P1 – viz Příloha č. 4.....	51
Obr. 46 Koncepční řešení větrací jednotky bez viditelného víka (víko jednotky je pro zobrazení průhledné).....	51
Obr. 47 Pohled do větrací jednotky.....	52
Obr. 48 Skica větracího kanálu s propojovacími lomenými kanály pro propojení s ventilátory.....	52
Obr. 49 Detail F propojovacího kanálu větrací jednotky a umístění zipů.....	52
Obr. 50 Skica příčného pohledu na kanál vozu s propojovacími kanály větrací jednotky	53
Obr. 51 Detail uchycení textilního kanálu v oblasti vypínání C profilem a propojení jednotlivých částí suchým zipem	53
Obr. 52 Způsoby distribuce vzduchu (A – prodyšná tkanina, B – mikroperforace, C – perforace) [25].....	54
Obr. 53 Detail možného usměrnění proudu vzduchu do salonu vozu (vlevo tkaninové trysky, vpravo perforace + kapsy 180°) [25]	54
Obr. 54 Rychlostní profil laminárního proudění [31]	56
Obr. 55 Rychlostní profil turbulentního proudění [31]	56
Obr. 56 Moodyho diagram – závislost součinitele tření na Reynoldsovo čísla a poměrné drsnosti materiálu potrubí [9, 31].....	57
Obr. 57 Model vstupního traktu pro stropní větrací jednotku.....	58
Obr. 58 Model výstupního traktu z větrací jednotky do větracích kanálů	59
Obr. 59 Výsledky simulace proudění vzduchu v sací vstupní části větrací jednotky, tj. vektory rychlosti vzduchu v rovině bočního vstupu (ve výřezu poloha výsledkové roviny v modelu) [6]	60
Obr. 60 Detail proudění vzduchu ve výstupním hrdle modelu výstupního traktu větrací jednotky (ve formě vektorů rychlosti, délka a barva vektorů úměrná rychlosti), patrný vliv „ostrých“ přechodů kanálů na vývoj proudění (zpomalení, popř. vznik vírů) [6]	60
Obr. 61 Zobrazení rychlostí v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 100% průtok 2x 1825 m ³ /h.....	61
Obr. 62 Zobrazení tlaků v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 100% průtok 2x 1825 m ³ /h	61
Obr. 63 Zobrazení rychlostí v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 75% průtok 2x 1368 m ³ /h	61
Obr. 64 Zobrazení tlaků v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 75% průtok 2x 1368 m ³ /h	61
Obr. 65 Zobrazení rychlostí v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 50% průtok 2x 912 m ³ /h	62
Obr. 66 Zobrazení tlaků v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 50% průtok 2x 912 m ³ /h	62
Obr. 67 Detail zjednodušení výpočtového modelu – nakloněné štěrbin.....	63
Obr. 68 Půdorysný pohled na rozmístění štěrbin bez usměrňujících kapes.....	63
Obr. 69 Izometrický pohled na rozmístění štěrbin v rámci zjednodušeného modelu pro CFD výpočet bez usměrňujících kapes	63
Obr. 70 Celkový pohled na rychlostní pole salonu vozu metra s použitím varianty větracího kanálu – perforace bez usměrňujících kapes.....	64
Obr. 71 Podélný řez rychlostního pole salonu vozu metra s použitím varianty větracího kanálu – perforace bez usměrňujících kapes	64

Obr. 72 Půdorysný pohled na zjednodušený model ve variantě s usměrňujícími kapsami (1/2 vozu).....	64
Obr. 73 Izometrický pohled na zjednodušený model 1/2 vozu s usměrňujícími kapsami.....	65
Obr. 74 Izometrický pohled na simulaci proudění v 1/2 salonu vozu (zobrazení podélného řezu a dvou příčných řezů).....	65
Obr. 75 Příčný řez ve vzdálenosti 6750 mm od čela vozu (v ose proudu).....	66
Obr. 76 Příčný řez ve vzdálenosti 4250 mm od čela vozu (mezi proudy).....	66
Obr. 77 Podélný řez salonem vozu (řez je veden v podélné ose vozu).....	66
Obr. 78 Detail vstupní části stropního textilního kanálu vzduchovodu („drátový model“ s průhlednými stěnami) s vyznačenou polohou a hlavními rozměry modelu výřezu pro simulace (model výřezu vyznačen červeně) [11].....	67
Obr. 79 Model výřezu kanálu vzduchovodu – vlevo průhledný „drátový“ model, vpravo model s naznačenými hraničními plochami pro zadání typů okrajových podmínek pro simulaci proudění [11].....	68
Obr. 80 Vývoj proudění a vzájemná interakce proudů vzduchu z jednotlivých výdechových otvorů ve stěně kanálu při proudění do prostoru interiéru vozu [11].....	68
Obr. 81 Vlnová délka [32].....	69
Obr. 82 Oktávová pásma v závislosti na hladině hluku a frekvenci [32].....	70
Obr. 83 Oktávová pásma [32].....	70
Obr. 84 Energetická bilance při dopadu zvukové vlny na stěnu [10].....	71
Obr. 85 Princip šíření hluku [32].....	72
Obr. 86 Vliv tloušťky vrstvy na koeficient absorpce [32].....	73
Obr. 87 Průběh dozvuku [32].....	74
Obr. 88 Příklad hlukové izolace v obdélníkovém kanálu 500 mm [32].....	75
Obr. 89 Absorpční diagram [32].....	77
Obr. 90 Schéma propojení měřicí techniky [22].....	78
Obr. 91 Pohled na měřené místo v bodě 1 tkaninového potrubí v oblasti připojovacího kanálu (za ventilátorem).....	79
Obr. 92 Pohled na měřené místo v tkaninovém potrubí v oblasti připojovacího kanálu (za ventilátorem).....	79
Obr. 93 Schéma rozmístění měřených bodů za ventilátorem.....	80
Obr. 94 Schéma rozmístění měřených bodů ve ventilačním kanálu.....	86
Obr. 95 Vyobrazení zasunutí Prandtlovy sondy do kanálu skrze otvory ve tkaninovém potrubí v bodě 81.....	86
Obr. 96 Průběh rychlostí v kanálu – příčný řez, 100% výkon ventilátoru.....	92
Obr. 97 Průběh rychlostí v kanálu – podélný řez, 100% výkon ventilátoru.....	92
Obr. 98 Průběh rychlostí v kanálu – příčný řez, 75% výkon ventilátoru.....	93
Obr. 99 Průběh rychlostí v kanálu – podélný řez, 75% výkon ventilátoru.....	93
Obr. 100 Průběh rychlostí v kanálu – příčný řez, 50% výkon ventilátoru.....	94
Obr. 101 Průběh rychlostí v kanálu – podélný řez, 50% výkon ventilátoru.....	94
Obr. 102 Průběhy objemových průtoků v kanálu v závislosti na vzdálenosti od vstupu.....	97
Obr. 103 Stožan pro měření umístěný ve vagonu.....	98
Obr. 104 Fotografie stožanu s upevněnou trojicí sond.....	99
Obr. 105 Ukázka průběhu rychlostí v první měřené poloze pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda).....	101
Obr. 106 Znárodnění polohy vyhodnocované oblasti (červenou barvou).....	101
Obr. 107 Kontury rychlostí pro výkon 50 % - podélný řez 0,65 m.....	102
Obr. 108 Kontury rychlostí pro výkon 75 % - podélný řez 0,65 m.....	102
Obr. 109 Kontury rychlostí pro výkon 100 % - podélný řez 0,65 m.....	102
Obr. 110 Kontury rychlostí pro výkon 50 % - podélný řez 1,3 m.....	103

Obr. 111 Kontury rychlostí pro výkon 75 % - podélný řez 1,3 m	103
Obr. 112 Kontury rychlostí pro výkon 100 % - podélný řez 1,3 m	103
Obr. 113 Kontury rychlostí pro výkon 50 % - podélný řez 1,95 m	104
Obr. 114 Kontury rychlostí pro výkon 75 % - podélný řez 1,95 m	104
Obr. 115 Kontury rychlostí pro výkon 100 % - podélný řez 1,95 m	104
Obr. 116 Kontury rychlostí pro výkon 50 % s mříží – příčný řez 0,65 m	106
Obr. 117 Kontury rychlostí pro výkon 75 % s mříží – příčný řez 0,65 m	106
Obr. 118 Kontury rychlostí pro výkon 50 % s mříží – příčný řez 1,3 m	106
Obr. 119 Kontury rychlostí pro výkon 75 % s mříží – příčný řez 1,3 m	107
Obr. 120 Kontury rychlostí pro výkon 50 % s mříží – příčný řez 1,95 m	107
Obr. 121 Kontury rychlostí pro výkon 75 % s mříží – příčný řez 1,95 m	107
Obr. 122 Zvýrazněné proudnice pro výkon 100 % - varianta s kapsičkami (červeně vyznačený svazek proudů s patrnou nedostatečnou funkcí kapsičky)	108
Obr. 123 Zvýrazněné proudnice pro výkon 100 % - varianta bez kapsiček	108
Obr. 124 Schéma měřících bodů ve vzdálenostech po 1 m od čela vozu a ve výšce 1300 mm	109
Obr. 125 Schéma modulu LAN-XI [21]	110
Obr. 126 Free field mikrofon [21].....	110
Obr. 127 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 1 m od čela vozu	111
Obr. 128 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 2 m od čela vozu	111
Obr. 129 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 3 m od čela vozu	111
Obr. 130 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 4 m od čela vozu	112
Obr. 131 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 5 m od čela vozu	112
Obr. 132 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 6 m od čela vozu	112
Obr. 133 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 7 m od čela vozu	112
Obr. 134 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 8 m od čela vozu	113
Obr. 135 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 9 m od čela vozu	113
Obr. 136 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 1 m od čela vozu – s tlumícím rukávem.....	114
Obr. 137 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 2 m od čela vozu – s tlumícím rukávem.....	114
Obr. 138 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 3 m od čela vozu – s tlumícím rukávem.....	115
Obr. 139 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 4 m od čela vozu – s tlumícím rukávem.....	115
Obr. 140 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 5 m od čela vozu – s tlumícím rukávem.....	116
Obr. 141 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 6 m od čela vozu – s tlumícím rukávem.....	116
Obr. 142 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 7 m od čela vozu – s tlumícím rukávem.....	117
Obr. 143 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 8 m od čela vozu – s tlumícím rukávem.....	117
Obr. 144 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 9 m od čela vozu – s tlumícím rukávem.....	118
Obr. 145 Pohled do funkčního vzorku vozidla metra s ukázkou podhledového panelu – krytí textilního kanálu.....	119
Obr. 146 Porovnání rychlostí v původní geometrii a v geometrii upravené v oblasti lomeného větracího kanálu	120

Obr. 147 Porovnání tlaků v původní a v upravené geometrii v oblasti lomeného větracího kanálu	120
Obr. 148 Závislost Tlakové ztráty v kolenu a aerodynamického hluku	121
Obr. 149 Designová studie vnitřního interiéru vozu metra v rámci řešeného projektu TA04030774.....	121
Obr. 150 Průběh rychlostí v poloze High 1 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xix
Obr. 151 Průběh rychlostí v poloze High 2 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xix
Obr. 152 Průběh rychlostí v poloze High 3 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xix
Obr. 153 Průběh rychlostí v poloze High 4 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xx
Obr. 154 Průběh rychlostí v poloze High 5 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xx
Obr. 155 Průběh rychlostí v poloze High 6 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xx
Obr. 156 Průběh rychlostí v poloze High 7 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxi
Obr. 157 Průběh rychlostí v poloze High 8 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxi
Obr. 158 Průběh rychlostí v poloze High 9 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxi
Obr. 159 Průběh rychlostí v poloze Low 1 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxii
Obr. 160 Průběh rychlostí v poloze Low 2 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxii
Obr. 161 Průběh rychlostí v poloze Low 3 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxii
Obr. 162 Průběh rychlostí v poloze Low 4 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxiii
Obr. 163 Průběh rychlostí v poloze Low 5 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxiii
Obr. 164 Průběh rychlostí v poloze Low 6 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxiii
Obr. 165 Průběh rychlostí v poloze Low 7 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxiv
Obr. 166 Průběh rychlostí v poloze Low 8 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxiv
Obr. 167 Průběh rychlostí v poloze Low 9 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxiv
Obr. 168 Průběh rychlostí v poloze High 1 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxv
Obr. 169 Průběh rychlostí v poloze High 2 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxv
Obr. 170 Průběh rychlostí v poloze High 3 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxv
Obr. 171 Průběh rychlostí v poloze High 4 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxvi

Obr. 172 Průběh rychlostí v poloze High 5 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxvi
Obr. 173 Průběh rychlostí v poloze High 6 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxvi
Obr. 174 Průběh rychlostí v poloze High 7 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxvii
Obr. 175 Průběh rychlostí v poloze High 8 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxvii
Obr. 176 Průběh rychlostí v poloze High 9 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxvii
Obr. 177 Průběh rychlostí v poloze Low 1 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxviii
Obr. 178 Průběh rychlostí v poloze Low 2 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxviii
Obr. 179 Průběh rychlostí v poloze Low 3 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxviii
Obr. 180 Průběh rychlostí v poloze Low 4 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxix
Obr. 181 Průběh rychlostí v poloze Low 5 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxix
Obr. 182 Průběh rychlostí v poloze Low 6 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxix
Obr. 183 Průběh rychlostí v poloze Low 7 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxx
Obr. 184 Průběh rychlostí v poloze Low 8 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxx
Obr. 185 Průběh rychlostí v poloze Low 9 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxx
Obr. 186 Průběh rychlostí v poloze High 1 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxii
Obr. 187 Průběh rychlostí v poloze High 2 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxii
Obr. 188 Průběh rychlostí v poloze High 3 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxii
Obr. 189 Průběh rychlostí v poloze High 4 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxiii
Obr. 190 Průběh rychlostí v poloze High 5 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxiii
Obr. 191 Průběh rychlostí v poloze High 6 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxiii
Obr. 192 Průběh rychlostí v poloze High 7 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxiii
Obr. 193 Průběh rychlostí v poloze High 8 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxiii
Obr. 194 Průběh rychlostí v poloze High 9 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxiii
Obr. 195 Průběh rychlostí v poloze Low 1 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxiv
Obr. 196 Průběh rychlostí v poloze Low 2 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxiv

Obr. 197 Průběh rychlostí v poloze Low 3 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxiv
Obr. 198 Průběh rychlostí v poloze Low 4 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxv
Obr. 199 Průběh rychlostí v poloze Low 5 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxv
Obr. 200 Průběh rychlostí v poloze Low 6 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxv
Obr. 201 Průběh rychlostí v poloze Low 7 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxvi
Obr. 202 Průběh rychlostí v poloze Low 8 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxvi
Obr. 203 Průběh rychlostí v poloze Low 9 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)	xxxvi
Obr. 204 Pohled do hrubé stavby skříně vozu	xxxvii
Obr. 205 Modul kompozitního čela vozu metra	xxxvii
Obr. 206 Průběh montáže střechy vozu metra	xxxviii
Obr. 207 Pohled na funkční vzorek hrubé stavby hybridní skříně s osazenými větracími jednotkami	xxxix
Obr. 208 Detail větrací jednotky osazené na střeše vozu.....	xxxix
Obr. 209 Příprava vozu pro měření provětratelnosti – zaslepení okenních a dveřních otvorů .	xl
Obr. 210 Pohled do větrací jednotky na nezaizolované lomené kanály.....	xl
Obr. 211 Pohled do větrací jednotky na zaizolované lomené větrací kanály	xli
Obr. 212 Průběh měření provětratelnosti vozu metra všesměrovými sondami	xli
Obr. 213 Průběh zkoušky planárním laserem – varianta perforace + usměrňující kapsy	xlii
Obr. 214 Průběh zkoušky planárním laserem – varianta perforace	xlii
Obr. 215 Zkouška hlučnosti v oblasti lomeného kanálu větrací jednotky	xlii

Seznam tabulek

Tab. 1 Zařídění kategorie vozidla dle ČSN EN 14750-1 [35]	45
Tab. 2 Hodnoty pro vložený vůz metra	48
Tab. 3 Množství vzduchu dle ČSN 281310 [35]	48
Tab. 4 Stanovení potřebného množství vzduchu pro vložený vůz	49
Tab. 5 Tlakové ztráty	55
Tab. 6 Ekvivalentní drsnost stěn vzduchovodů	57
Tab. 7 Tlakové ztráty při jednotlivých průtocích	62
Tab. 8 Celková úroveň akustického tlaku dle ČSN EN 14750-1 [36]	69
Tab. 9 Základní fyzikální veličiny v oblasti zvuku	70
Tab. 10 Parametry použitého ventilátoru viz Příloha č. 4	71
Tab. 11 Příklady činitelů pohltivosti konkrétních materiálů [32]	73
Tab. 12 Rozdělení do absorpčních tříd dle koeficientu absorpce [32]	76
Tab. 13 Tabulka měřených hodnot za ventilátorem pro měření ve 3 x 3 bodech	80
Tab. 14 Tabulka objemových průtoků za ventilátorem pro měření ve 3 x 3 bodech	82
Tab. 15 Tabulka měřených hodnot za ventilátorem pro měření ve 3 x 5 bodech	82
Tab. 16 Tabulka objemových průtoků za ventilátorem pro měření ve 3 x 5 bodech	85
Tab. 17 Tabulka měřených hodnot v trojúhelníkovém kanálu pro výkon ventilátoru 100 % ..	87
Tab. 18 Tabulka měřených hodnot v trojúhelníkovém kanálu pro výkon ventilátoru 75 % ..	88
Tab. 19 Tabulka měřených hodnot v trojúhelníkovém kanálu pro výkon ventilátoru 50 % ..	89
Tab. 20 Tabulka průměrných diferencí celkových tlaků v jednotlivých řadách	91
Tab. 21 Tabulka objemových průtoků pro výkon 100 %	95
Tab. 22 Tabulka objemových průtoků pro výkon 75 %	95
Tab. 23 Tabulka objemových průtoků pro výkon 50 %	96
Tab. 24 Údaje o anemometru typu 54T33 od firmy Dantec Dynamics	98
Tab. 25 Časově průměrné hodnoty rychlostí ve všech měřených místech vagonu	100
Tab. 26 Časově průměrné hodnoty intenzit turbulence ve všech měřených místech vagonu	100
Tab. 27 Časově průměrné hodnoty rychlostí ve všech měřených místech vagonu	105
Tab. 28 Časově průměrné hodnoty intenzit turbulencí ve všech měřených místech vagonu	105
Tab. 29 Názvy a kalibrační listy použitých zařízení	109
Tab. 30 Změřená hladina akustického tlaku	111
Tab. 31 Změřená hladina akustického tlaku zaizolovaného propojovacího kanálu	113
Tab. 32 Tlaková síla v úrovni nárazníků [kN]	i
Tab. 33 Tlaková síla 50 mm pod úrovní nárazníků [kN]	i
Tab. 34 Tlaková síla působící úhlopříčně v úrovni nárazníků [kN]	i
Tab. 35 Tahová síla v prostoru spřáhla [kN]	ii
Tab. 36 Tlaková síla u hlavového vozidla působící 150 mm nad podlahou [kN]	ii
Tab. 37 Tlaková síla v úrovni dolního okraje okenních otvorů (spodní rám) [kN]	ii
Tab. 38 Tlaková síla v úrovni vaznice (hrany střechy) [kN]	ii
Tab. 39 Maximální provozní zatížení [N]	iii
Tab. 40 Zvedání jednoho konce vozidla ve stanovených zvedacích místech [N]	iii
Tab. 41 Zvedání celého vozidla ve stanovených zvedacích místech [N]	iii
Tab. 42 Kombinace případů statického zatížení skříně vozidla [N]	iii
Tab. 43 Zrychlení ve směru x [m/s ²]	iv
Tab. 44 Zrychlení ve směru y [m/s ²]	iv
Tab. 45 Zrychlení ve směru z [m/s ²]	iv
Tab. 46 Zrychlení ve směru x [m/s ²]	v
Tab. 47 Zrychlení ve směru y [m/s ²]	v
Tab. 48 Zrychlení ve směru z [m/s ²]	v

Tab. 49 Konstrukční kategorie odolnosti proti nárazu u kolejových vozidel	viii
Tab. 50 Scénáře srážky a překážky působící srážku	ix

Seznam příloh

Příloha č. 1: Statické pevnostní požadavky na skříň kolejových vozidel

Příloha č. 2: Tabulka možných technologických postupů výroby kompozitů

Příloha č. 3: Tabulka pevnostních požadavků na skříň kolejových vozidel dle normy ČSN EN 663-1, kategorie P III a porovnání naměřených hodnot zkoušek

Příloha č. 4: Produktový list použitého ventilátoru větrací jednotky

Příloha č. 5: Naměřené průběhy rychlostí v salonu vozu pro jednotlivé výkony ventilátoru

Příloha č. 6: Fotodokumentace z průběhu stavby hybridní skříň vozu metra

Příloha č. 7: Fotodokumentace větracího systému v průběhu výzkumu

1 Úvod – cíle disertační práce

Skříň kolejového vozidla je konstrukční celek, jehož stavební struktura odpovídá účelu, pro který je vozidlo určeno. Obecným požadavkem při jeho řešení je, ve většině případů, dosažení nízké vlastní hmotnosti, s výjimkou posunovacích lokomotiv a většiny traťových lokomotiv nezávislé trakce, které vyžadují zachování dostatečné pevnosti, provozní spolehlivosti, bezpečnosti a požární odolnosti. Jmenované vlastnosti musí být zachovány po celou dobu životnosti vozidla, která bývá obvykle 20 let.

Za skříň kolejového vozidla se považuje konstrukce vozidla nad systémem vypružení. Zahrnuje všechny součásti, které jsou k této konstrukci pevně připojeny a přímo přispívají k její pevnosti, tuhosti a stabilitě. V samotné stavbě skříň kolejového vozidla je nutné uvažovat i funkci a upevnění potřebné výbroje a dalších komponent (vzduchotechnika, osvětlení...) Pro celkovou sledovanou hmotnost kolejového vozidla je žádoucí sdružená funkce některých prvků stavby (nosná, funkční, designová). To vede k celkové výrazné úspoře hmotnosti vozidla.

Konstrukce skříň kolejového vozidla musí být řešena dle předpisů a norem. Norma ČSN EN 12663-1 pro účely pevnosti rozděluje vozidla do tří hlavních skupin:

- L (lokomotivy),
- F (nákladní vozy),
- P (vozidla osobní přepravy).

Konstrukční kategorie odolnosti proti nárazu u kolejových vozidel norma ČSN EN 15227 dělí vozidla na čtyři kategorie, C-I až C-IV. Norma má za účel chránit cestující zachováním konstrukční celistvosti, avšak nevztahuje se na další pracovníky železnice a zákazníky, kteří nejsou ve vozidlech, ani na třetí subjekty.

V disertační práci bych se chtěl věnovat výzkumu a vývoji hybridní skříň kolejového vozidla v oblasti střechy a zařízení pro větrání salonu vozu podporovanému projektem FR-TI3/449 a projektem v programu technologické agentury TA04030774. Oblast výzkumu v této práci je směřovaná vozidlům kategorie P-III (Vozidla metra a vozidla rychlé městské dopravy), jehož výstupem bude výroba funkčního vzorku skříň vozidla metra, který bude podroben řadě testů dle norem. Do funkčního vzorku je následně navržen větrací systém pro salon vozu metra s ohledem na funkci a hmotnost.

Úvodní část této disertační práce popisuje celkový náhled funkcí a požadavků na skříň kolejových vozidel pro kategorii P-III (vozidla metra) se zaměřením na oblast střechy vozu – větrání vozidla. Pro správnou funkci větrání je třeba brát v úvahu hrubou stavbu vozu a použití vhodných materiálů pro možnou hmotnostní úsporu jejich jednotlivých komponent. V této části práce je také popsán význam lehké stavby vozu, a to z různých hledisek.

Jedním z cílů mé práce je návrh větracího systému pro vozidlo kategorie P-III (vozidla metra). Při návrhu jsem se zaměřil především na použití hmotnostně úsporných materiálů. Navržený větrací systém vozidla je vestavěn do již postaveného funkčního vzorku hybridní skříň metra, jehož jsem spoluautorem v rámci projektu FR-TI3/449. Tento větrací systém byl navržen pomocí výpočtových programů CFD s následným propracováním koncepce do finálního modelového řešení v počítačovém softwaru SolidWorks 2016.

Další cíl v rámci disertační práce je samotná stavba funkčního vzorku větracího systému vozidla metra s ověřením jeho funkčnosti. Toto bylo prováděno sledováním provětratelnosti vozu a sledováním hlučnosti větracího systému jako zdroje hlukových emisí v salonu vozu metra. Obě tato sledování byla provedena dle příslušných norem.

Závěrečným cílem práce bylo prováděný výzkum celkově zhodnotit a popsat jeho výhody a nevýhody. Pro případné nevýhody navrženého systému dále navrhnout možná zlepšení.

V závěrečné části disertační práce jsem popsal vzniklé problémy, které byly zachyceny během vývoje a samotného měření a poté jsem navrhl jejich možná zlepšení.

2 Požadavky na skříně kolejových vozidel

Na skříně kolejových vozidel je kladena celá řada požadavků, které ovlivňují konstrukční stavbu celé skříně. Jsou to požadavky například provozní, konstrukční, pevnostní apod. [2]

2.1 Provozní požadavky na skříně kolejových vozidel

Vývoj kolejových vozidel je trvale vystaven konkurenčnímu tlaku ostatních dopravních prostředků, zejména vozidel silničních. Aby jim mohla úspěšně vzdorovat, prochází kolejová vozidla, i jejich jednotlivé komponenty, vývojovým procesem, jehož výsledkem je nová kvalita, která se odráží v lepších technických parametrech, ve větší hospodárnosti a v důsledku toho i v příznivějších ekologických vlastnostech. [2] Jedním z vývojových trendů je také lehká stavba.

Pojem lehká stavba (lehká konstrukce, hmotnostně úsporná konstrukce) se objevil v oblasti kolejových vozidel koncem padesátých let minulého století a byl převzat ze stavby letadel. Původně byl však tento pojem zjednodušeně spojován pouze s použitím materiálů s nižší měrnou hmotností, než má železo.

Do hrubé stavby kolejového vozidla zahrnujeme jeho spodek nebo hlavní rám, bočnice, čelnice a střechu.

U kolejových vozidel lze lehkou konstrukci definovat použitím jen takového množství materiálu a materiálu takového druhu, aby byly splněny požadavky a účel konstrukce. [2]

2.2 Význam lehké stavby skříně kolejového vozidla

Důvody pro lehkou stavbu jsou technické, ekonomické i ekologické. Všechny důvody jsou vzájemně provázány.

2.2.1 Technický význam

Hmotnost všech dopravních prostředků, a tedy i kolejových vozidel je jedním z důležitých parametrů, který charakterizuje jejich technickou úroveň. Úzce souvisí s jízdním odporem a návazně se spotřebou energie.

Jízdní odpor vozidla lze odvodit ze vztahu:

$$W = c_1 \cdot m \cdot g \pm s \cdot g \cdot m \pm a \cdot m + C_1 \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \text{ [N]}$$

The diagram shows the equation $W = c_1 \cdot m \cdot g \pm s \cdot g \cdot m \pm a \cdot m + C_1 \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \text{ [N]}$ with four arrows pointing from the terms to their respective labels below: $c_1 \cdot m \cdot g$ points to "Odpor valení", $s \cdot g \cdot m$ points to "Odpor stoupání", $a \cdot m$ points to "Odpor zrychlení", and $C_1 \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$ points to "Odpor prostředí".

kde:

m – celková hmotnost vozidla $m = (m_1 + m_2)$,

m_1 – vlastní hmotnost vozidla,

m_2 – užitečná hmotnost zařízení, cestujících nebo nákladu,

c_1 – součinitel odporu valení,

C_1 – součinitel odporu vzduchu,

A – čelní plocha,

ρ – hustota vzduchu.

Z rovnice pro jízdní odpor vyplývá, že vlastní hmotnost vozidla m_1 se ve výpočtu odporu vozidla pod celkovou hmotností m objevuje 3x, její podíl na jízdním odporu je významný, protože následně ovlivňuje celkovou spotřebu energie po dobu životnosti vozidla. Hmotnost hrubé stavby skříně činí 12–18 % celkové hmotnosti vozidla m . Přitom v odporu zrychlení musíme vzít v úvahu také podíl rotačních hmot, který, zejména u trakčních vozidel, je značný.

Celková spotřeba energie: $E = f(W, l)$ [kWh]. Celková spotřeba energie je funkcí jízdního odporu a délky ujeté dráhy po dobu životnosti vozidla. [2]

Hmotnost některých trakčních vozidel, zejména elektrických lokomotiv, je omezena maximálním nápravovým zatížením, které je dáno únosností železničního svršku, na kterém je vozidlo provozováno. Pro současné lokomotivy o výkonu 5 až 6 MW bývá omezeno hodnotou 21,5 t, což dává maximální hmotnost čtyřnápravové lokomotivy 86 t. Hmotnost a objem elektrické asynchronní výzbroje dosahuje takové hodnoty, že maximální hmotnost lokomotivy je obvyklými prostředky obtížně dosažitelná. Proto i zde je aktuální lehká konstrukce skříně. [2, 3]

2.2.2 Význam ekonomický

Lehkou konstrukcí se dosahuje úspor nižší spotřebou materiálu na konstrukci vozidla, z čehož dále vyplývá i nezanedbatelná úspora energie při jeho výrobě, a v neposlední řadě i nižší spotřeba energie při jeho přepravě a zpracování.

Vozidlo s nižší hmotností sekundárně způsobuje nižší opotřebení dvojkolí, koleje a některých dalších částí kolejového vozidla. [2]

2.2.3 Význam ekologický

Význam z ekologického hlediska je díky nižší spotřebě energie při výrobě polotovarů, při přepravě materiálu potřebného k výrobě, a také při vlastním zpracování ve výrobním procesu. Vozidlo hmotnostně úsporné konstrukce má nižší spotřebu energie v provozu. Vše dohromady ovlivňuje ekologickou zátěž na životní prostředí. [2]

2.3 Požadavky na konstrukci skříně kolejového vozidla

Požadavky na konstrukce vycházejí z několika zdrojů. Jednak jsou to požadavky investora, dále požadavky předepsané normami a předpisy platnými pro daný druh vozidla a obecně předpokládané požadavky.

Obvyklé požadavky na pevnost skříně kolejového vozidla se v průběhu doby vyvíjely, v současné době jsou dané normou ČSN EN 12 663-1 (platná od října 2010). Jak již bylo zmíněno v úvodu, tato norma rozděluje pro účely pevnosti vozidla do třech hlavních skupin: lokomotivy – skupina **L**, nákladní vozy – skupina **F** a vozidla osobní přepravy – skupina **P**. [34]

Skupiny se dále dělí do kategorií:

Lokomotivy:

Kategorie **L** – lokomotivy a hnací jednotky.

Nákladní vozy (všechny vozy pro přepravu zboží):

Kategorie **F-I** Vozidla, která mohou být posunována bez omezení.

Kategorie **F-II** Vozidla, která nesmí přejíždět svážný pahrbek a nesmí být posunována odrazem.

Osobní vozy (všechny druhy kolejových vozidel pro přepravu osob, lokomotivy i motorové vozy):

Kategorie **P-I**..... Osobní vozy.

Kategorie **P-II**..... Ucelené jednotky.

Kategorie **P-III**..... Vozidla metra a vozidla rychlé městské dopravy.

Kategorie **P-IV**..... Vozidla lehkého metra a tramvajové rychlodráhy.

Kategorie **P-V**..... Tramvajová vozidla.

Statické požadavky na skříně kolejových vozidel pro kategorii P-III jsou uvedeny v Příloze č. 1.

2.3.1 Hmotnost skříně vozidla v provozním stavu m_1

Hmotnost skříně vozidla v provozním stavu podle EN 15663 bez hmotnosti podvozků.

2.3.2 Maximální hmotnost nákladu m_2

Zahrnuje hmotnost veškerého zařízení včetně vypružení, která jsou pod skříní vozidla a nejsou její součástí. Hmotnost propojovacích částí musí být rozdělena mezi hmotnosti m_1 a m_2 . [34]

2.3.3 Hmotnost podvozku nebo pojezdu m_3

Je maximální užitečné zatížení; určuje se podle druhu vozidla: pro nákladní vozy je to dovolená hmotnost nákladu, pro osobní vozy je stanovena provozovatelem. [34]

Typická hmotnost cestujících:

- u dálkové přepravy.....80 kg na cestujícího se zavazadlem,
- u přepravy městské/předměstské.....70 kg na cestujícího.

Typická obsaditelnost pro cestující v prostorech pro stání:

- u dálkové přepravy.....2 až 4 cestující na m^2 ,
- u přepravy městské/předměstské.....5 až 10 cestujících na m^2 .

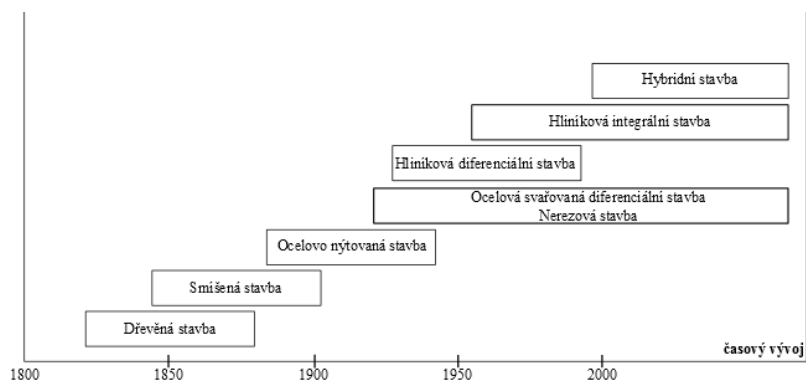
Typická hmotnost v zavazadlovém prostoru...300 kg/ m^2 .

2.3.4 Výjimečné užitečné zatížení m_4

Hmotnost výjimečného užitečného zatížení podle EN 15663.

3 Konstrukční varianty hrubé stavby skříně

V průběhu technologického vývoje stavby skříní vozů v závislosti na technickém pokroku a na úrovni požadavků, které přinesla doba.

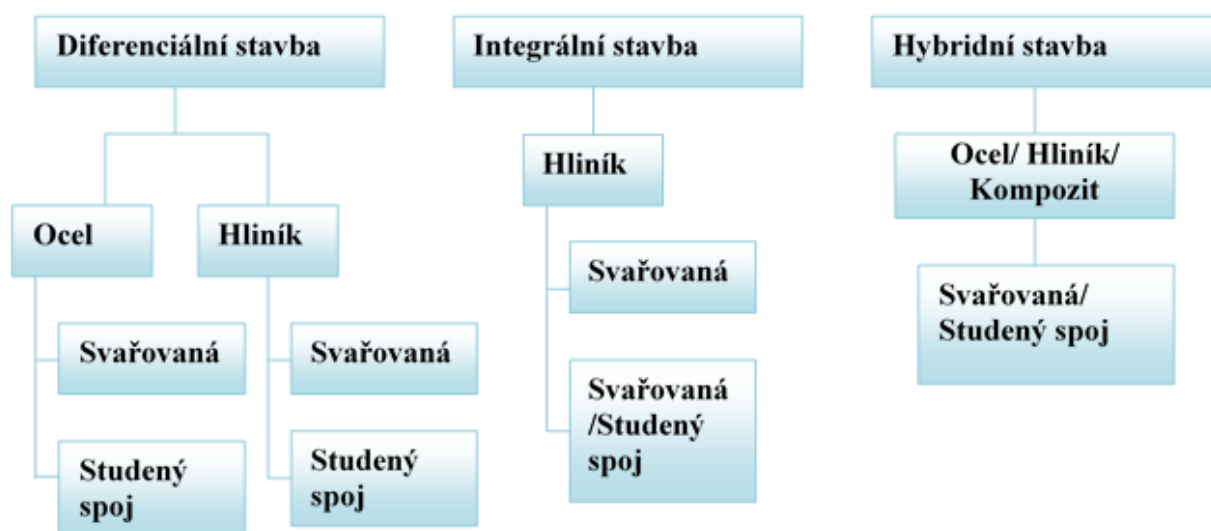


Obr. 1 Postup vývoje technologií výroby staveb skříní vozů [2]

Z diagramu na Obr. 1 je patrné, že v současné době existují tři hlavní směry stavby, které mají své vlastnosti, přednosti i nedostatky a podle toho jsou vhodné pro různý způsob použití. Jedná o stavby ocelové svařované diferenciální, hliníkové integrální a hybridní.

3.1 Používané konstrukční varianty stavby skříně kolejového vozidla

Přehled na následujícím schématu na Obr. 2 zobrazuje rozdělení jednotlivých druhů staveb (konstrukcí) do hlavních skupin.



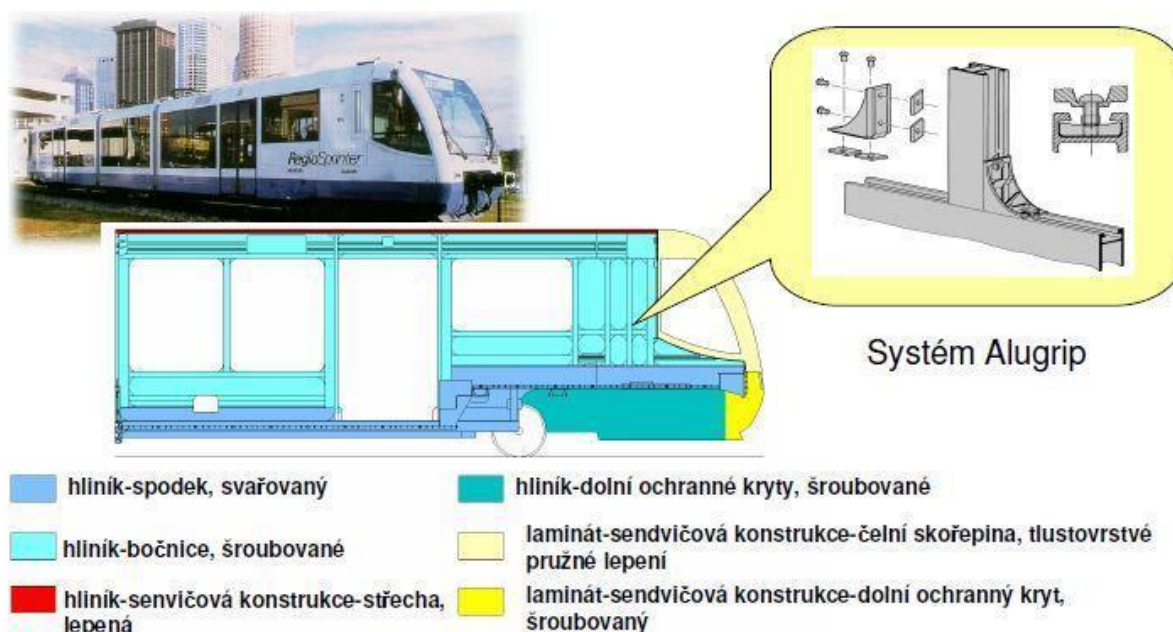
Obr. 2 Přehled technologií výroby hrubých staveb skříní vozů

Diferenciální konstrukce stavby skříně vyplývá z rozdílných (diferencovaných) funkcí jednotlivých konstrukčních prvků. Lze ji definovat tak, že každý stavební díl vzniká spojováním jednotlivých elementů. [2]

Zcela odlišný od předchozí konstrukce je princip integrální hrubé stavby skříně. Definicí integrální stavby skříně je, že každý stavební díl se skládá z jednoho stavebního prvku. Základ konstrukce tvoří integrované, nejčastěji hliníkové, protlačované profily probíhající po celé délce vozové skříně, ve kterých je začleněno (integrováno) několik funkcí. Tyto profily jsou

součástí nosné struktury skříně a jejich součástí jsou prvky pro výstroj a výbroj vozu (upevnění sedadel, zavazadlových polic, přístrojových skříní apod.). [2]

Hybridní stavbu definujeme tak, že každý stavební díl se skládá z jednotlivých stavebních prvků z různého materiálu. Moderní technologické možnosti přináší nové koncepce stavby, které využívají špičkových vlastností nových materiálů pro jednotlivé prvky a konstrukční celky ve stavbě skříní kolejových vozidel, aplikovaných v hybridní stavbě skříní. [2] Na Obr. 3 je patrné použití různých materiálů na jednotlivé stavební díly konstrukce. Mohou být použity různé technologie spojování jednotlivých podsestav – šroubování, lepení, nýtování. Použití kompozitních dílů je výhodné na tvarově členité díly konstrukce. Studené spoje, tedy šroubované, nýtované a lepené jsou výhodné, neboť při nich nevznikají deformace jako při svařování.



Obr. 3 Ukázka hybridní vozové skříně (použití různých materiálů pro stavbu skříně) [24]

3.1.1 Zhodnocení hybridní stavby skříně kolejového vozidla

Výhody hybridní konstrukce:

- optimální využití specifických vlastností díky použití různých materiálů,
- při vhodné technologii spojování prvků jsou nízké náklady na přípravky a nářadí,
- možnost zakomponování integrovaných prvků do konstrukce – sdružené funkce prvků (např. uchycení výbroje v oblasti nosného prvku, vnější a vnitřní obložení je součástí montovaných panelů apod.),
- malé deformace díky použití studených spojů,
- při použití vhodných kombinací materiálů při stavbě vozidla se výrazně uspoří hmotnost.

Nevýhody hybridní konstrukce:

- náročné způsoby spojování,
- při kusové výrobě a použitím kompozitních materiálů jsou náklady vysoké (navýšeny o náklady v oblasti forem a přípravků),
- recyklace materiálů je podmíněná a obtížná,
- hybridní stavba je teprve v začátcích svého vývoje, má zatím netušené možnosti.

4 Rešerše hybridních konstrukcí u vozů kolejových vozidel – použití moderních materiálů v samotné stavbě

4.1 Konstrukce skříně Stockholm C20

Bočnice tohoto vozu je tvořena ze dvou hladkých ocelových plechů, které jsou vázané na tuhé pěnové jádro. Tyto sendvičové panely přenášejí zatížení skříně. Není použito nosné konstrukce v podobě sloupků, vazníků a podobně; tento přístup je aplikován u trupů letadel. U typu Ficas je bočnice až 120 mm tenčí než bočnice u tradiční karoserie. Použití typu Ficas sendvičů na upraveném Stockholm C20 vlakových souprav má za následek nárůst o 210 mm vnitřní šířky, což umožňuje větší užitečnou plochu pro stání při zachování stejného uspořádání sedadel (33% nárůst). Čistá hmotnost při nastavení vozu byla také snížena o 2,6 t; zvýšení spotřeby energie. Ficas používá lepení a mechanické upevnění na rozdíl od běžných svařování. Větrací systém v tomto voze je řešen nuceným větráním pomocí větracích jednotek umístěných na střeše vozu. Z těchto jednotek je vzduch vháněn do větracích kanálů a přes mřížky v místě svítidel je vzduch distribuován do salonu vozu. Ficas technologie byla aplikována na vozy metra v Guangzhou a v Bukurešti.



Obr. 4 Vůz metra Stockholm C20 [29]

4.2 Konstrukce částí skříně tramvaje 15T

Tramvaj 15T For City patří do skupiny hybridních staveb skříně kolejového vozidla. Čelní kabina tramvaje je řešena jako samonosný strukturální modul. Ten se člení na základní modul a nenosné pohledové nebo funkční kryty. Základní modul je tvořen ocelovými výztuhami, plně strukturálním kompozitním čelníkem, samonosnými bočními prvky a střešním dílcem, což zaručuje optimální využití vlastností použitých materiálů. Všechny části jsou zároveň jednotlivě vyměnitelné. Dolní díl – čelník – je řešen jako plně strukturální kompozitní dílec.

Jeho stavba je dimenzována na přenos sil vzniklých jako důsledek zdvihání vozu za přední částí spodku tramvaje. Při tomto zatížení je zvedací síla ve středu vozu přenesena čelníkem do ocelových výztuh. Ostatní dílce jsou navrženy dle jejich funkce jako samonosné. Výroba všech kompozitních dílců je realizována vakuací technologií. Vytvrzování laminátu ve vakuu přináší optimální spojení všech vrstev laminátu a případných pěnových jader při sendvičové konstrukci a minimalizuje možnost následné delaminace vrstev laminátu. Ve stanovišti strojvedoucího jsou použity pro ofuk čelního skla textilní vzduchové kanály.



Obr. 5 Tramvaj 15T For City [29]



Obr. 6 Modul čelní kabiny tramvaje 15T [19]

4.3 Konstrukce vysokorychlostního vozu ve Finsku (Alstom Transport, Fibrocom)

Fibrocom využívá své vlastní patentované technologie kompozitní stavby skříně vysokorychlostního vozidla (Pendolino ve Finsku). Skříň vozidla je složena ze sendvičové konstrukce laminátu a voštinového jádra. To přináší takové výhody, jako je vysoká mechanická pevnost a vynikající odolnost proti poškození. Vozidlo je formováno jako celek, což přináší vysoké náklady na zařízení a zajištění vytvrzovacího procesu. Výhodou však zůstává jednoduchost výroby, i přes tvarové požadavky na skříň vozidla. Větrání je v tomto voze

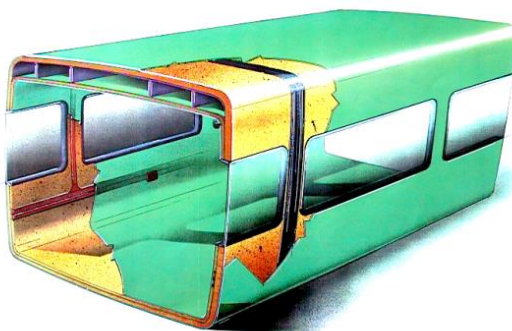
realizováno pomocí klimatizačních jednotek umístěných na střeše vozu. Větrací kanály jsou vyrobeny z kompozitních sendvičů.



Obr. 7 Skříň vagónu Fibrocom Talgo [19]

4.4 Variel vozy

Skříně těchto vozů jsou vyráběny unikátní technikou navíjení sklolaminátu, která umožňuje realizovat výrobky samonosných kompozitních skeletů hromadných dopravních prostředků.



Obr. 8 Kompozitní skříň vozu vyrobená navíjením sklolaminátu [29]

Navíjení tubusu skříňe vozidla je prováděno na kopyto formy. V podélné ose formy je zajištěna rotace celé formy pro navíjení kompozitního sendviče. Otvory pro dveře a okna jsou dodatečně vyřezávány po ztuhnutí a sejmutí tubusu skříňe z formy.



Obr. 9 Finální stavba skříně vyráběné technologií navíjení [19]



Obr. 10 Navíjení skříně Variel [29]

Výměna vzduchu v těchto vozech je zajištěna pomocí klimatizačních jednotek, rozvod vzduchu v salonu vozu je součástí vlastní hrubé stavby skříně vozu – v konstrukci strop

4.5 Vysokorychlostní vůz Korea Railroad Research Institute (KRRI)

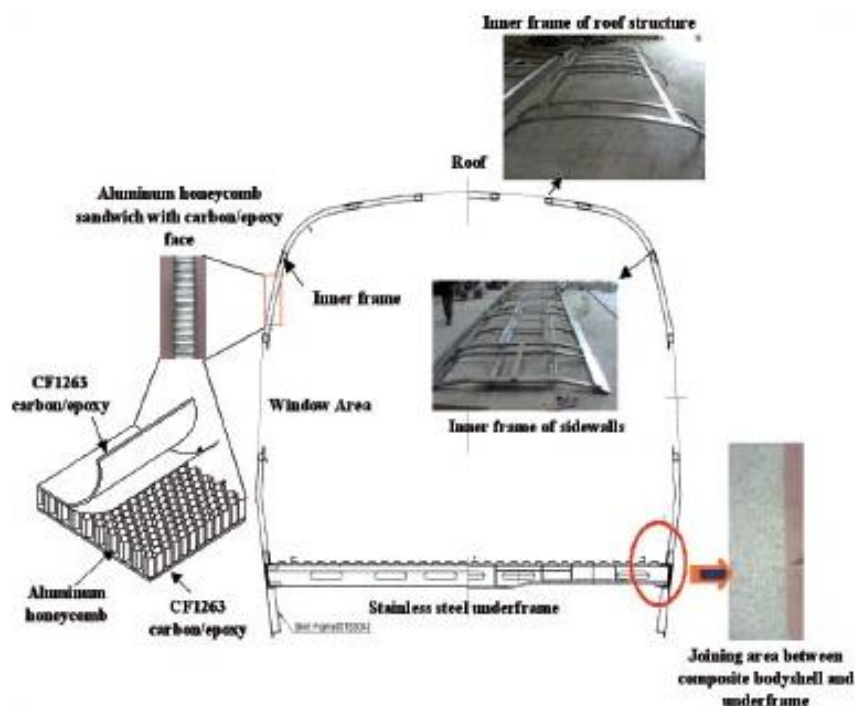
Korea Railroad Research Institute (KRRI) a Hankuk Fiber Glass Company vyvinuli naklápečí vůz s maximální konstrukční rychlostí 200 km/h. Karosérie tohoto vozu je vyvinuta s použitím hybridního konceptu konstrukce. Skříň vozu je řešena pomocí sendvičové kompozitní struktury s nerezovou konstrukcí, aby vůz čelil náročným požadavkům.

Sendvičová kompozitní skříň vozu byla použita z důvodu výrazného snížení hmotnosti oproti jiným stavbám. Sendvič použitý u tohoto vozidla se skládá z hliníkové voštiny a tkaniny z uhlíkových vláken (CF1263).



Obr. 9 Kompozitní skříň vozu Korea Railroad Research Institute (KRRI) [30]

Příčný řez vozidlem znázorňuje stavbu této skříně, viz Obr. 10. Tloušťka jádra hliníkových voštin je 40 mm, tloušťka vnitřního potahu sendviče je 1,5 mm a na vnější straně 3,5 mm.



Obr. 10 Řez skříně vozu Korea Railroad Research Institute (KRRI) a pohled na stavbu použitých sendvičů [30]

Kompozitní konstrukce je 23 m dlouhá, 3 m široká a 2,7 m vysoká. Vůz jako celek je formován; vytvrzovací proces probíhá ve velkém autoklávu (zařízení s délkou 30 m o průměru 5 m), viz Obr. 11. V autoklávu je teplota v rozmezí od pokojové teploty do 180 °C a maximální tlak je tam 7 bar.



Obr. 11 Proces vytvrzování vozu Korea Railroad Research Institute (KRRI) v autoklávu [30]

Větrání v těchto vozech je opět řešeno klimatizačními jednotkami. Větrací kanály vozidla jsou vyrobeny z kompozitních sendvičů, které jsou vzájemně slepeny a snýtovány.

4.6 Hmotnostně úsporné materiály používané v oblasti stavby hybridních skříní kolejového vozidla – strukturální materiály

Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani

prostou sumací. Vlastnosti výsledného kompozitu závisí na vlastnostech jeho jednotlivých složek. [7]

Kompozitní materiály se stále častěji používají v mnoha strojírenských oborech včetně kolejových vozidel. Důvody jsou především: vysoké hodnoty mechanických vlastností v poměru k hustotě, vyšší mez únavy v porovnání s kovy, nižší hmotnost při splnění stejných požadavků na funkčnost, možnost snadné výroby i velmi složitých tvarů, odolnost proti vnějšímu prostředí (koroze). Výhody použití kompozitních materiálů jsou obecně známé, přesto je jejich použití v konstrukci kolejových vozidel relativně nízké v porovnání s letectvím (u velkých dopravních letadel zaujímají až 50 % hmotnosti letadla kompozitní materiály – např. B787, Airbus A350; u malých a sportovních letadel je procentuální zastoupení kompozitních materiálů vyšší než 50 %). Dnes se kompozitní materiály používají pro konstrukci externích dílů jako jsou kabiny řidiče, čela vozů včetně části kabiny řidiče či cestujících, části podvozku, vnější panely nebo dveře. Druhým velkým segmentem jsou díly interiéru jako interiérové obkladové panely, podlahy, sedačky, zavazadlové prostory a další prvky interiéru především pohledové.

Nejrozšířenější technologií pro výrobu součástí kolejových vozidel z kompozitních materiálů je v České republice kontaktní laminace. Ve většině případů je následné vytvrzení prosycené skladby provedeno pod vakuovou plachetkou, kdy je skladba stlačována přetlakem vnější atmosféry až 98 kPa. U některých dílů se vytvrzování pod plachetkou neprovádí a prosycená skladba je vytvrzována bez působení přtlaku atmosféry. V ČR se začíná rovněž prosazovat infuzní technologie jako VARTM (VI) a RTM. V malé míře je používána i technologie prepregová. V zahraničí jsou infuzní a prepregové technologie nejrozšířenější viz Příloha č. 2.

Pro výrobu vzduchovodů má nesporně mnoho výhod použití speciálních textilních materiálů. Používá se pro distribuci vzduchu v kabinách strojvedoucího, v salonech vozů, pro distribuci vzduchu pro ofuk skel, ale i pro vytápění. Jednou z nejvýznamnějších výhod použití těchto materiálů je nízká vlastní hmotnost větracích systémů.

4.6.1 Technologie laminace

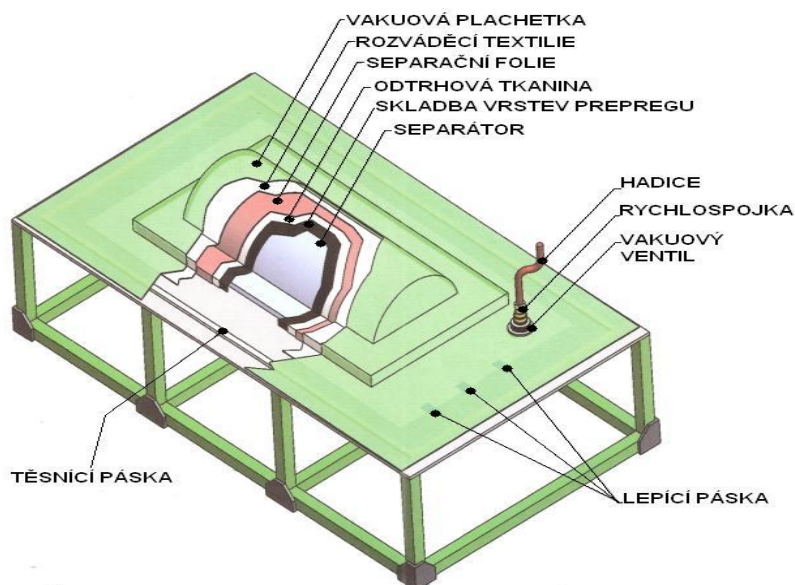
Technologie výroby jednotlivých dílů je dána jednak možnostmi dosažení požadovaných parametrů dílu (tvar, přesnost, mechanické vlastnosti, hmotnost), ale i možnostmi a zkušenostmi výrobního podniku. Příklad používaných technologií:

- **Prepregová technologie** – díl je vyskládán z vrstev předimpregnované výztuže (prepregu). Pojivo v prepregovém polotovaru je v takzvaném B-stavu, tedy byl započat proces jeho vytvrzování, ale zmrazením byl tento proces téměř zastaven. Vytvrzení probíhá v autoklávu za zvýšené teploty a tlaku působícího na vakuovou plachetku nebo v peci za zvýšené teploty a působení přtlaku atmosféry až 98 kPa na vakuovou plachetku,
- **RFI (Resin Film Infusion)** – sycení suché výztuže pryskyřicí ve formě fólie probíhá až při vystavení skladby pod vakuovou plachetkou působení teploty a tlaku v autoklávu či peci.
- **RTM (Resin Transfer Moulding)** – přtlakové sycení suché výztuže pryskyřicí v kapalně formě. Skladba je zcela uzavřena ve formě.
- **VARTM (Vacuum Assisted RTM)** – sycení suché výztuže pryskyřicí v kapalně formě pouze za působení podtlaku. Skladba je zcela uzavřena ve formě.
- **VI (Vacuum Infusion)** – sycení suché výztuže pryskyřicí v kapalně formě pouze za působení podtlaku. Z lícové strany dílu je forma, z rubové strany je tvar dílu dán vakuovou plachetkou, na kterou působí přtlak atmosféry.

- **Kontaktní laminace** – prosycování suché výtzuže pojivem v tekuté formě. Prosycování je prováděno válečkem či štětcem. Vytvrzování při normální teplotě pod vakuovou plachetkou nebo volně.

V příloze č. 2 je uveden obecný popis výhod a nevýhod jednotlivých výše uvedených technologií.

Na Obr. 12 je zobrazena typická skladba technologických vrstev při vytvrzování dílu z prepregových polotovarů.



Obr. 12 Typické položení technologických vrstev při výrobě z prepregových polotovarů [1]

4.6.1.1 Pojiva

- **Polyestery** (vinylestery) – nenasyčené polyestery jsou nejrozšířenějším druhem pojiv, která jsou používána pro výrobu částí dopravní techniky, pro sanitární techniku, ve stavebnictví, na výrobu potrubí a nádob. Výhodou těchto pojiv je jejich nízká cena a snadná modifikace pro danou aplikaci (přidáním plniv) a dobrá odolnost proti vnějšímu prostředí a chemickým látkám. [8] Velmi snadná je rovněž zpracovatelnost. V případě podskupiny vinylesterových pojiv je odolnost proti vnějšímu prostředí a chemickým látkám významně zvýšena, ale na úkor zvýšené ceny. Nevýhodou polyesterových pojiv jsou jejich nižší mechanické vlastnosti a velká smrštitivost po vytvrzení. Adheze vláken uhlíkových či kevlarových k polyesterovým pojivům je poměrně nízká. Proto jsou polyesterová pojiva používána pouze pro málo namáhané díly. Samozhášivých vlastností je možno dosáhnout přidáním aditiva.
- **Epoxidová pojiva** – jsou nejpoužívanějšími pojivy pro výrobu dílů z kompozitních materiálů, které jsou vystaveny velkému zatížení a agresivnímu vnějšímu prostředí. Přestože jsou citlivá na vystavení vlhkosti, stále překonávají velmi významně, co se týče mechanických vlastností a odolnosti proti vnějšímu prostředí, polyestery. [8] Epoxidová pojiva vykazují mnohem nižší smrštitivost v porovnání s polyestery. Epoxidová pojiva jsou tak nejvhodnějším materiálem, co se týče poměru mechanických vlastností, zpracovatelnosti a ceny pro vysoce namáhané díly. Navíc jsou již od 70. let minulého století používány i pro primární konstrukce letadel. Zkušenosti s tímto druhem pojiv z provozu jsou široké a existuje řada materiálových dat pro konkrétní typy epoxidových pojiv. Jejich nevýhodou je poměrně malá deformace při porušení, což je ale řešeno zvyšováním houževnatosti epoxidových pojiv přidáváním aditiv. Samozhášivé vlastnosti je opět nutné

zajistit přidáním plniva ATh. Jelikož mechanické vlastnosti epoxidových pojiv velmi významně poklesnou při dosažení teploty skelného přechodu, je nutné znát provozní teploty, kterým budou díly s epoxidovým pojivem vystaveny a tomu přizpůsobit zpracování (především teplotu vytvrzování) epoxidového pojiva.

- **Bismaleinimidová pojiva** – BMI pojiva vykazují velmi dobré mechanické vlastnosti srovnatelné s epoxidy. S výjimkou hodnoty deformace při porušení, která je dokonce nižší než u epoxidů. Z tohoto důvodu se v současnosti všichni výrobci těchto pojiv věnují zvýšení houževnatosti BMI pojiv. [8] Excelentní jsou BMI pojiva v odolnosti proti vnějšímu prostředí v kombinaci vysoká teplota a vlhkost. BMI pojiva mohou být v provozu vystavena teplotám až 230 °C. Další významnou výhodou je inherentní samozhášivost bez nutnosti přidávání plniva do BMI pojiva. Nevýhodou tohoto druhu pojiva je jeho obtížnější zpracovatelnost infuzními technologiemi vzhledem k nutnosti ohřát pojivo na teplotu min. 80 °C, aby mělo viskozitu vhodnou pro sycení výztuže. Vytvrzování prepregů s BMI pojivem je rovněž komplikovanější než v případě epoxidů, protože je nutné zcela zabránit odvedení pojiva z dílu. Na rozdíl od epoxidových pojiv, u kterých je část pojiva možno odvést do rozváděcí textilie během vytvrzování prepregu a dosáhnout tak vyššího poměru výztuže k pojivu. Asi největší nevýhodou BMI pojiv je pak jejich cena, která omezuje jejich použití jen na špičkové aplikace, jako jsou díly primární konstrukce vojenských letounů (především bombardérů a stíhacích letounů posledních generací).
- **Fenolická pojiva** – tato pojiva vykazují vynikající vlastnosti, co se týče samozhášivosti, toxicity zplodin, kouřivosti, odolnosti proti působení vysokých teplot a proti uhlovodíkovým a chlórovaným rozpouštědlům bez nutnosti přidání jakýchkoliv aditiv. [8] Další výhodou těchto pojiv je jejich poměrně nízká cena v porovnání s epoxidy. Na druhou stranu jejich mechanické vlastnosti jsou významně horší než v případě epoxidových pojiv (mechanické vlastnosti jsou podobné jako u polyesterů). Zvláště interlaminární pevnost je poměrně nízká. V případě sendvičových dílů je problémem relativně nízká pevnost v odlupu. Nevýhodou je rovněž obtížnější zpracovatelnost v případě infuzní technologie a vysoká porezita dílů vyráběných touto technologií v důsledku vysokého obsahu těkavých látek v pojivu.

4.6.1.2 Výztuže

Pro použití skříně pro kolejové vozidlo je uvažována výztuž především ve formě dlouhých vláken z E-skla. Jiný typ skelných vláken nemá vzhledem k ceně a jejich určení smysl použít. Pro zvlášť namáhané části skříně kolejového vozidla je možné rovněž použít výztuž ve formě dlouhých uhlíkových vláken. Další materiály jako aramidová vlákna nebo vysoce molekulární polyethylen (UHMWP) nemají smysl vzhledem k jejich vysoké ceně a obtížnější zpracovatelnosti (především co se týče obrábění). Taktéž keramická vlákna i přírodní vlákna (dřevěná, jutová, lněná), kovová (ocelová, měděná, AL slitiny), syntetická (polyesterová, polypropylenová) nemají smysl uvažovat vzhledem k jejich ceně, dostupnosti a omezenému přístupu k materiálovým hodnotám.

Výztuž se standardně dodává v několika formách:

- Rohož – netkaná výztuž je ve formě dlouhých i krátkých vláken
- Jednosměrná výztuž
- Tkaniny 2D – skládají se z podélné osnovy a příčně tkaného útku
 - Plátnová vazba
 - Keprová
 - Saténová
 - Křížová vazba
 - Non-crimp

- 3D tkaniny (například Parabeam)
- Hybridní tkaniny
- Opletení

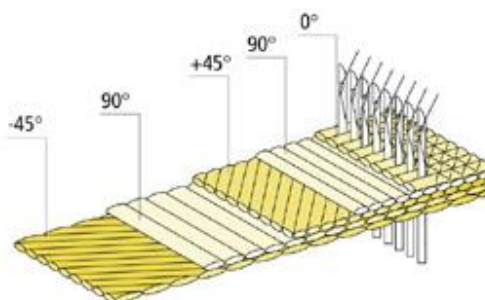
Na součásti kolejových vozidel se velmi často používá netkaná výztuž, která se vyznačuje nízkou cenou. Nevýhodou netkané výztuže je skutečnost, že vlákna nejsou orientována a její mechanické vlastnosti lze považovat za téměř izotropní, a tím se vytrácí jedna z hlavních výhod kompozitních materiálů, kterou je možnost orientace výztuže vzhledem ke směru zatížení. Rohože jsou proto využívány především u pohledových dílů s malým namáháním.

Nejvhodnější variantou výztuže pro stavbu hybridní skříně kolejového vozidla je 2D tkaná výztuž ze skelných vláken typu E-sklo, která nabízí ideální poměr mezi cenou a užitnými vlastnostmi. Další možností je použití non-crimp tkanin viz obr. 13. Tyto tkaniny jsou tvořeny ze dvou a více vrstev jednosměrných pramenců (multiaxiální tkanina viz Obr. 14). Jednotlivé vrstvy pramenců mohou být vůči sobě pootočený. Vrstvy pramenců jsou dohromady spojeny sešitím polyesterovou nití. Tyto tkaniny jsou dražší, ale jejich mechanické vlastnosti jsou výrazně lepší a produktivita práce je větší, protože je několik vrstev položeno najednou. Použití jednosměrné výztuže nemá smysl vzhledem k relativně nízké hodnotě napětí v konstrukci hybridní skříně kolejového vozidla a zvýšené pracnosti při výrobě dílů z jednosměrné výztuže.

Hybridní tkaniny se rovněž nepoužívají vzhledem k vyšší ceně. Jejich použití je nejčastěji v aplikacích, kde je vyžadována vysoká pevnost a tuhost dílu (uhlíková vlákna) se zvýšenou odolností proti rázům (aramidová vlákna). Typickým příkladem je skořepina trupu letounu v místě pilotní kabiny nebo kompozitní ochranná helma apod.



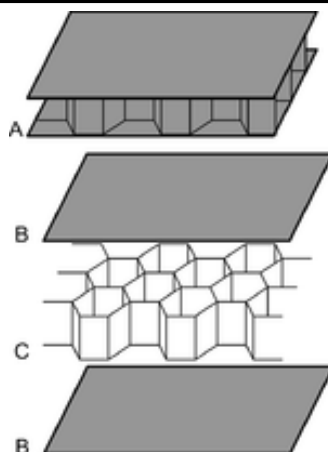
Obr. 13 Multiaxiální tkanina s orientací vrstev 0/90 [8]



Obr. 14 Multiaxiální tkanina s orientací vrstev -45/90/45/90/0 [8]

4.6.1.3 Sendvičová jádra

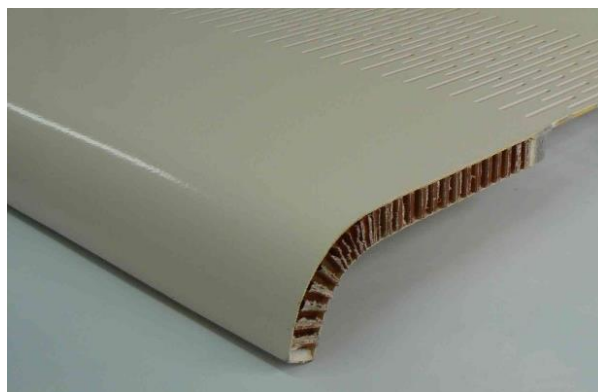
Sendvič je zvláštní druh laminárního kompozitu, který se skládá ze dvou vnějších vrstev překrývajících mezivrstvu (jádro) z lehkého materiálu. Vnější části jsou tenké ale tuhé, vnitřní vrstva, tzv. distanční, je tlustší, zpravidla méně pevná hmota. Principem působení sil je, že na vnější vrstvy sendviče působí tažné a tlakové síly, zatímco distanční materiál musí udržovat velikost průřezu a čelit smykovému zatížení. Mezivrstva může být např. z voštin, z lehkého dřeva nebo z polymerních pěn (PVC, PU apod.)



Obr. 15 Schéma konstrukce příkladu sendviče s voštinovým jádrem [31]

Legenda: A – sendvičový panel, B – obě vnější vrstvy, C – voštinové jádro laminátu.

Nejen při výrobě kolejových vozidel je jedním z nejčastěji používaných materiálů pro výrobu lehkých jader sendvičových dílů voštinové jádro. Voštinové jádro se dodává v několika variantách tvaru, velikosti a hustoty buněk. Nejčastěji používaný tvar jádra je hexagonální nebo přeexpandovaný. Materiál voštinových jader je nejčastěji aramidový papír napuštěný fenolickou pryskyřicí.



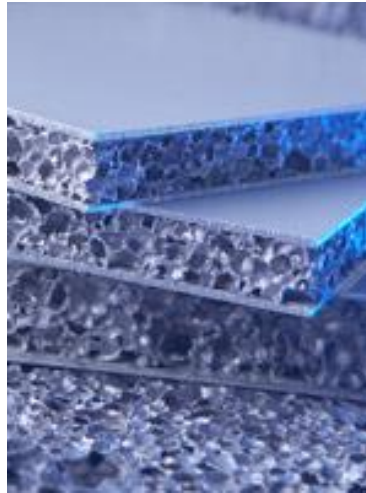
Obr. 16 Sendvič s voštinovým papírovým jádrem napuštěný fenolickou pryskyřicí [28]

Častá jsou rovněž voštinová jádra z hliníku nebo v poslední době z termoplastu. Hustoty voštinových jader se pohybují od 29 kg/m^3 a výše.



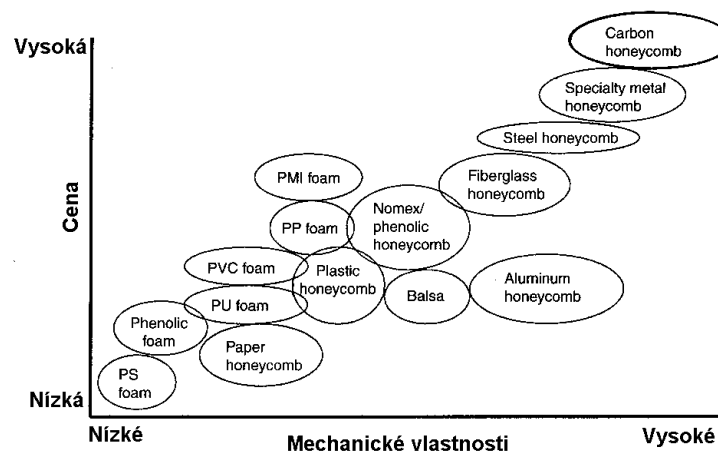
Obr. 17 Řez celohliníkovým sendvičem s voštinovým jádrem [28]

Další širokou skupinou materiálů pro sendviče jsou pěny. Používají se pěny s uzavřenou buňkou z celé řady materiálů: polyuretan (PU), polyvinylchlorid (PVC), polypropylen (PP), polymethakrylimid (PMI) – ten má nejlepší mechanické vlastnosti. Používají se rovněž hliníkové pěny. Tento druh sendviče se skládá ze dvou tenkých plechů slitiny EN AW 5754 a jádra z hliníkové pěny ALPORAS, které jsou slepeny speciální technologií. Mezi pozitivní vlastnosti tohoto sendviče patří nízká hmotnost, vysoká tuhost, vysoká pevnost ve smyku, dlouhodobá výdrž při teplotách od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, nehořlavost (podle DIN 5510), povrch – válcovaný s ochrannou fólií, velmi rovný (tolerance v tloušťce $\pm 0,3\text{ mm}$), rovinnost $\leq 0,5\text{ mm/m}$, přivařování svorníků a bodové sváření možné. Hustoty pěnových materiálů jsou vyšší, proto se používají v omezené míře.



Obr. 18 Řez hliníkovým sendvičem s hliníkovou pěnou [28]

Poslední možností je použití speciálních materiálů, jejichž hustota se pohybuje mezi hustotami standardních materiálů na výrobu jader a hustotami vlákny vyztuženého kompozitu. Jedná se například o produkty Coremat nebo Soric. Tyto materiály na rozdíl od klasického sendvičového jádra absorbují část pojiiva při sycení, méně než klasická výtuz, ale více než voštinové či pěnové jádro. Proto je jejich hustota $500\text{ až }700\text{ kg/m}^3$ (po prosycení). Jejich výhodou je možnost použití i v místě šroubového spoje na rozdíl od klasických materiálů jádra (jako je pěna či voština), u kterých je nutné použít vložku v místě šroubového spoje. Použití těchto materiálů není v současnosti zvažováno, protože je snaha o dosažení co nejnižší hmotnosti dílů a zároveň jsou používány tloušťky jádra přes 20 mm , což je na materiály jako Soric či Coremat příliš mnoho. Na dalším Obr. 19 je graf zobrazující závislost ceny materiálu pro jádra v závislosti na jeho mechanických vlastnostech.



Obr. 19 Závislost ceny materiálu jádra na jeho mechanických vlastnostech [7]

4.6.2 Spojování kompozitních dílů v oblasti stavby hybridních skříní kolejového vozidla – lepení

Kompozitní díly hybridní skříně kolejového vozidla jsou nejčastěji spojovány lepením. U modulové konstrukce, vzhledem k technologii montáže, je nejnvýhodnější použít kombinovaný lepeno-šroubový spoj.

Lepení je proces spojování materiálů (adherentů), při kterém se dosahuje trvalého spojení stejných, případně různých, materiálů prostřednictvím lepidel (adhesiv). Lepidlo je látka schopná utvořit pevné a trvalé spojení mezi dvěma materiály. Uvedená schopnost závisí na adhezi (přilnavosti) k povrchům lepených materiálů a na kohezi (soudržnosti) samotného lepidla. [14, 20]

V praxi rozeznáváme mechanické adhezní síly, které mají původ v mechanickém uchycení (ukotvení) lepidla v nerovnostech a pórech spojovaných materiálů a specifické adhezní síly, které se skládají z chemických sil (např. primární chemické vazby) a fyzikálních sil (van der Waalovy mezimolekulární síly, difuzní síly, Londonovy disperzní síly, Keesomovy elektrostatické síly, Debeyovy indukční síly, valenční adhezní síly apod.). Koheze je teoreticky definována jako stav, ve kterém jsou částice jednoduché látky drženy pohromadě valenčními a mezimolekulárními silami (van der Waalovo přitahování).

Nosnost a v některých případech i deformace lepených konstrukcí závisí na mechanických vlastnostech a napěťovo-deformačním stavu lepeného spoje.

Standardní vzorec pro stanovení smykové pevnosti v tahu:

$$\tau = \frac{F_{\max}}{S}$$

kde:

τ – smyková pevnost v tahu [MPa]

F_{\max} – maximální síla [N]

S – plocha spoje ($b \cdot l$) [mm²]

b – šířka přelátovaného spoje [mm]

l – délka přelátovaného spoje [mm]

Pevnost v odlupování dělíme na počáteční (absolutní) pevnost s_{wa} , která je daná vztahem:

$$s_{wa} = \frac{F_{\max}}{b}$$

kde:

s_{wa} – maximální pevnost [N/mm],

F_{\max} – maximální síla [N]

a střední pevnost s_{ws} , která je daná vztahem:

$$s_{ws} = \frac{F_{pr}}{b}$$

kde:

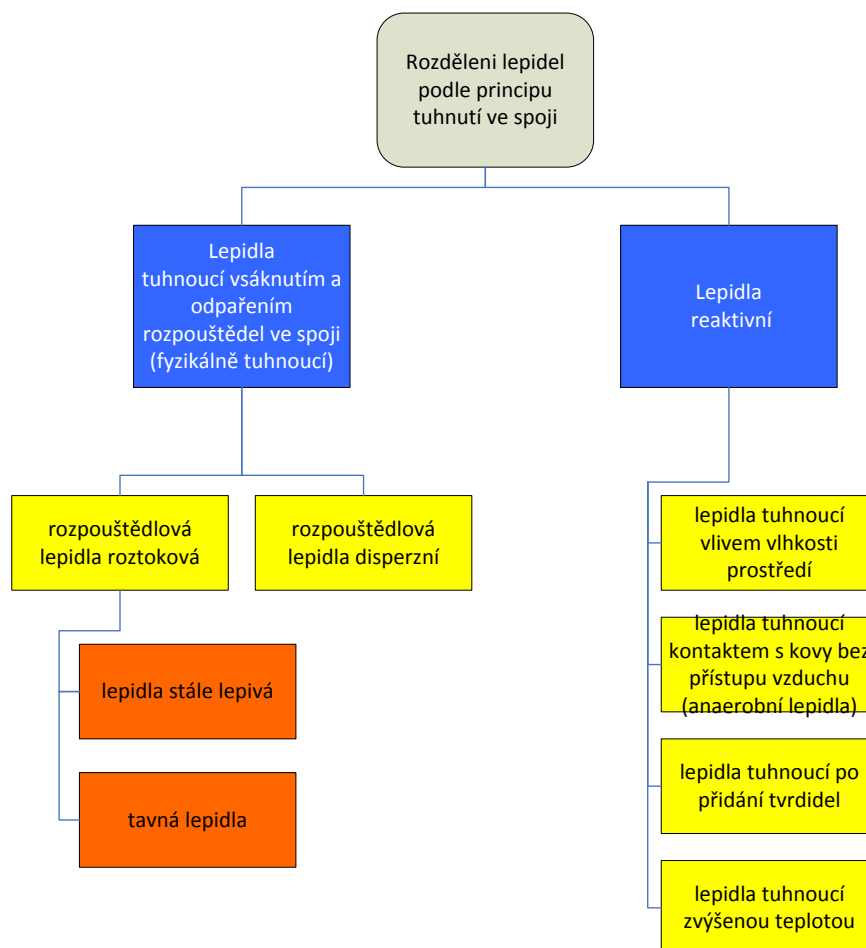
s_{ws} – střední pevnost [N/mm]

F_{pr} – je průměrná síla [N]

Podle teorie lepení lepené spoje nejméně odolávají namáhání v odlupování a ohybovému namáhání. U konstrukčních spojů je důležité vyvarovat se ohybovému namáhání. Všeobecně se doporučuje při lepení volit tenké vrstvy lepidla, které vykazují kvalitnější pevnostní vlastnosti. Lepené spoje dosahují vysokých pevností ve smyku, tahu (tlaku) a v dynamickém (cyklickém) namáhání (v případě nízkocyklové a vysokocyklové únavy materiálů překonávají lepené spoje svarové spoje). Jsou již dlouhá léta úspěšně aplikována v lepených konstrukčních spojih zejména v leteckém průmyslu.

4.6.2.1 Základní rozdělení lepidel

- Rozdělení lepidel podle principu tuhnutí ve spoji



Obr. 20 Rozdělení lepidel podle principu tuhnutí ve spoji [20]

Rozdělení lepidel dle chemické báze:

- lepidla na přírodní bázi,
- lepidla anorganického a minerálního původu (vodní sklo, asfaltová, fosfátová a metalická lepidla, keramická lepidla, silikáty atd.),
- lepidla organického původu (glutinová, kaseinová, škrobová lepidla atd.),
- lepidla na syntetické bázi (např. epoxidová, polyuretanová, akrylátová lepidla, silikony atd.).

4.6.2.2 Technologie lepení

Mezi základní parametry ovlivňující lepený spoj patří správná volba lepeného materiálu a lepidla, správný návrh konstrukce spoje, vhodná povrchová úprava materiálů, dodržování předepsaného postupu při lepení, vytvoření fyzikálně-chemických a jiných podmínek pro vznik pevných vazeb. Při volbě materiálů pro lepení se přihlíží na jejich chemickou povahu (chemické složení), polaritu, mechanické, povrchové, fyzikální a fyzikálně-chemické vlastnosti. V případě lepidel přihlížíme k těmto vlastnostem: chemická povaha, viskozita lepidla, povrchové napětí, bod vzplanutí, způsob vytvrzování, tepelná roztažnost a mechanické vlastnosti. [20]

Příprava lepení se skládá z přípravy povrchu lepených materiálů, přípravy lepidla, nanášení lepidla, montáže spoje a vytvoření pevného spoje (např. vytvrzování). Kvalitu lepeného spoje můžeme ovlivnit jednak způsobem nanášení lepidla, tloušťkou nanesené vrstvy, okolními podmínkami při vytvrzování (tlak, teplota, čas), případně použitím technologií pro urychlení či vylepšení vytvrzovacího procesu (ultrazvuk, tepelné ovlivnění lepidla např. infračerveným paprskem), mechanickou či chemickou úpravou povrchu materiálu.






Příprava materiálů na lepení se skládá z dělení, obrábění, čištění, odmaštění a slícování lepených dílců. Cílem přípravy povrchu je dosáhnout maximální adheze lepidla. Povrchová úprava plochy lepeného materiálu je jednou z nejdůležitějších operací před lepením a záleží na druhu a stavu lepeného materiálu, druhu použitého lepidla, na provozních podmínkách a životnosti spoje, únosnosti apod. Čištění a odmašťování se provádí buď alkalickým odmašťováním, tamponováním rozpouštědly nebo odmašťováním v parách rozpouštědel. Vedle speciálních rozpouštědel dodávaných výrobcem lepidel jsou hojně používána standardní rozpouštědla jako např. aceton, technický líh, toluen atd. Poměrně často se používá moření materiálů v různých kyselinách. V případě moření se obvykle dosahuje vyšší pevnosti spojů jako při mechanické úpravě povrchu. Z hlediska kvality lepených spojů je důležitá také drsnost povrchu.

4.6.3 Textilní materiály – tkaniny – použití ve větracím systému

Použití textilních materiálů pro stavbu větracího systému je přínosem nejen v jejich nízké vlastní hmotnosti, ale i ve vysoké pevnosti, požární odolnosti, antistatickém účinku, antibakteriálním účinku, nenáročnosti na údržbu a jednoduchosti instalace.

Na výrobu jsou používány certifikované tkaninové materiály dle normy ČSN EN 45545-2. Jedná se o kanály z tkaniny (POLYAIR – Classic fabric, POLYAIR – strong, INSULATION – netkaná textilie) s hmotností mezi 220 a 360 g/m². U výustek z těchto materiálů stačí pouze 20 Pa statického tlaku k dobrému nafouknutí. Na Obr. 21 až Obr. 23 jsou uvedeny příklady používaných tkanin v oblasti systémů větrání. Tyto příklady jsou uvedeny z nabídky firmy Příhoda s.r.o. a jsou používány, certifikovány jako materiály do kolejových vozidel.






POLYAIR - Classic fabric

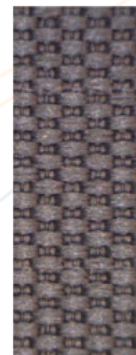
COMPOSITION	100% polyester +1 x polyurethan, endless fibres (multifilament), with inwrought carbonic fibre (less than 1%)		
PROPERTIES	fire resistant, antibacterial (EN ISO 20645), antistatic, washable in washing-machine		
WEIGHT	EN 12127	220	g/m ²
THICKNESS	EN ISO 5084	0,31	mm
STRENGTH WARP / WEFT	EN ISO 13934-1	1920 / 1120	N
PERMEABILITY	by 120 Pa	0	m ³ /h/m ²
FIRE RESISTANCE	EN 45545	HL 2	
TEMPERATURE RESISTANCE		-30 to +110	°C
TREATMENT SYMBOLS	    		



Obr. 21 Polyair – klasická tkanina [25]






POLYAIR STRONG - Extra strong

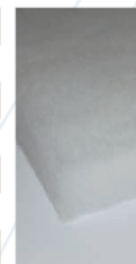
COMPOSITION	100 % polyester + 1x polyuretan, endless fibres (multifilament) with inwrought carbonic fibre (less than 1 %)		
PROPERTIES	fire resistant, antibacterial (EN ISO 20645), antistatic, washable in washing-machine		
WEIGHT	EN 12127	340	g/m ²
THICKNESS	EN ISO 5084	0,4	mm
STRENGTH WARP / WEFT	EN ISO 13934-1	2800 / 1400	N
PERMEABILITY	by 120 Pa	0	m ³ /h/m ²
FIRE RESISTANCE	EN 45545	HL 1	
TEMPERATURE RESISTANCE		-30 to +110	°C
TREATMENT SYMBOLS	    		



Obr. 22 Polyair strong – extra pevná tkanina [25]

INSULATION - Non Woven

COMPOSITION	100 % polyester, non-woven		
PROPERTIES	fire resistant		
WEIGHT	EN 12127	360	g/m ²
THICKNESS	EN ISO 5084	30	mm
FIRE RESISTANCE	EN 45545	HL 3	
TEMPERATURE RESISTANCE		-30 to +110	°C
TREATMENT SYMBOLS	    		



Obr. 23 Izolace – netkaná textilie [25]

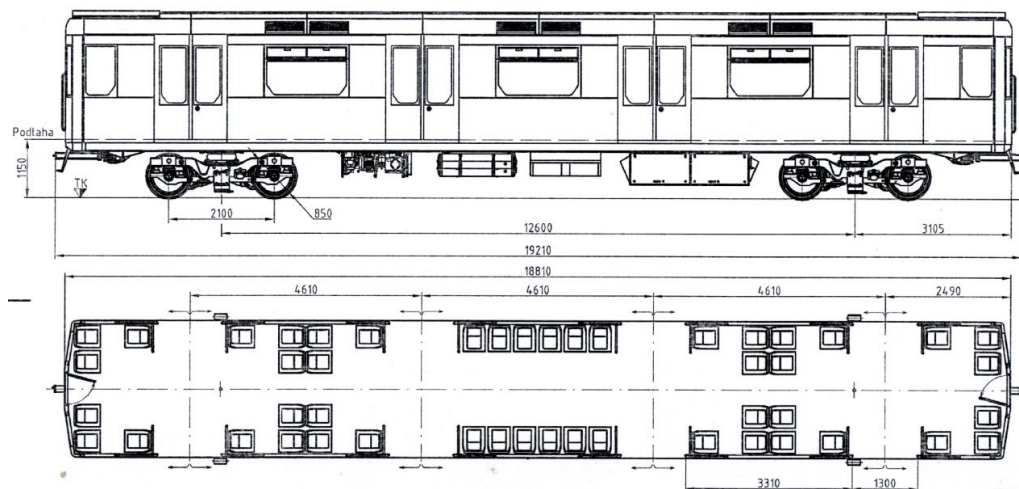
Tkaniny z nekonečných vláken jsou velmi ploché a minimalizují usazování nečistot z procházejícího vzduchu. Ten je distribuován otvory a textilní vyústky zůstávají zevnitř téměř čisté (v běžném prostředí). Nevyžadují tak prakticky jinou údržbu než oprašování zvenku. Antistatický účinek lze docílit vetkáním uhlíkového vlákna v materiálech a umožňuje odvádění elektrického náboje z povrchu tkaniny.

5 Výzkum, vývoj a stavba hybridní skříně kolejového vozidla

5.1 Výzkum hybridní skříně vloženého vozu vozidla metra

V rámci programu TIP Ministerstva průmyslu a obchodu, pod označením FR-TI3/449, byl v letech 2011 až 2013 řešen úkol výzkumu a vývoje stavby hybridní skříně kolejového vozidla. Řešitelem úkolu byla Západočeská univerzita v Plzni, FST, Regionální technologický institut, spoluřešiteli byli ŠKODA TRANSPORTATION a.s., LA Composite s.r.o. a Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.

Pro stavbu byla zvolena hybridní hrubá stavba skříně pro vůz metra, rozměrově shodná s vozem metra, které se ve ŠKODA TRANSPORTATION vyráběly v období realizace tohoto funkčního vzorku. V této kapitole je stručně popsána konstrukce stavby hybridní skříně vozidla metra. Následně byl do stavby skříně navržen a instalován funkční vzorek větracího systému.



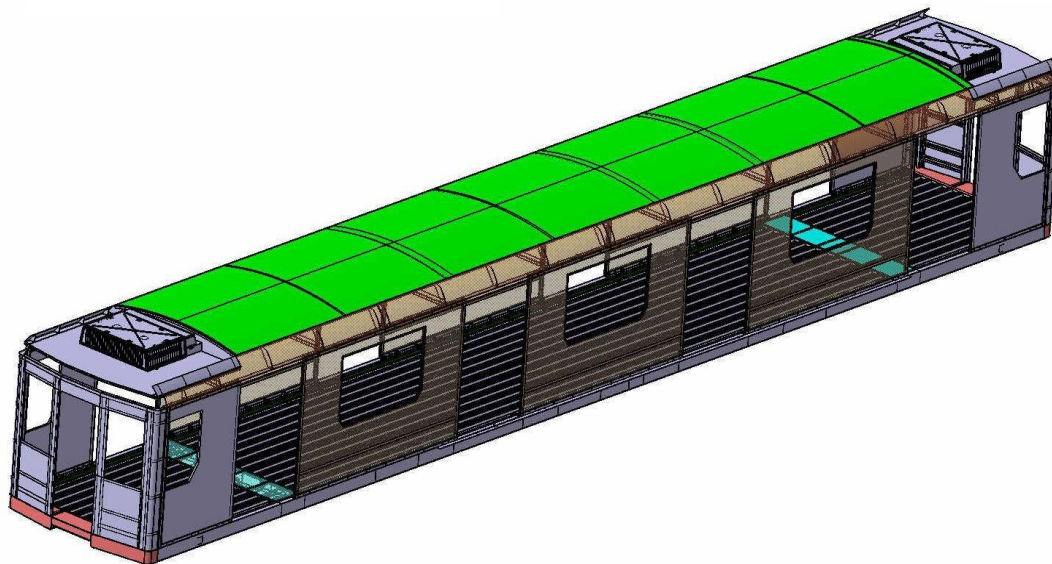
Obr. 24 Vložený motorový vůz metra [15]

Základ hybridní stavby skříně tvoří spodek vozu – hlavní rám. Konstrukce hlavního rámu z počátku přípravných prací vycházela z hlavního rámu vozu metra v Petrohradu. Dokumentace byla přepracována a byla použita ocel o vysoké mezi kluzu – 700 MPa. Z této oceli je postaven celý hlavní rám, kromě plechové podlahy, která je z ocelového nerezového vlnitého omega plechu. Z materiálu o vysoké mezi kluzu jsou také vyrobeny vaznice, spojující kompozitní bočnice s kompozitními střešními díly. Díky použití výše zmíněné oceli o vysoké mezi kluzu bylo možné snížit tloušťky některých celků na hlavním rámu.

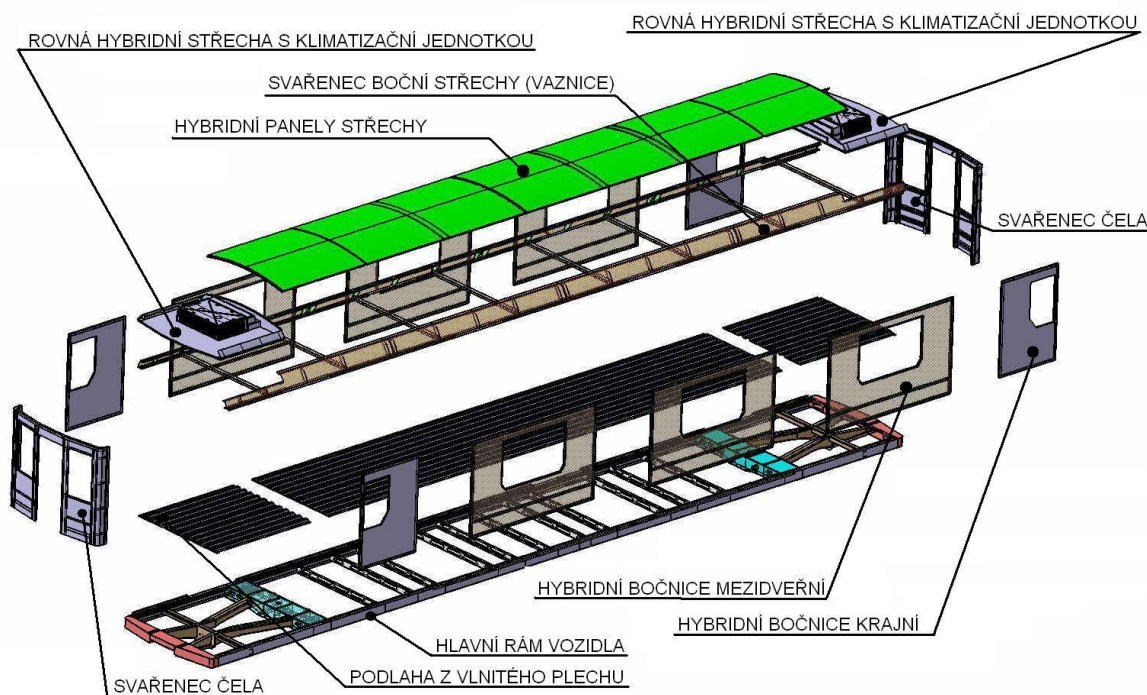


Obr. 25 Fotografie z montáže bočnicových a mezidvěrných modulů a vaznice a pohled do hotové skříně

Bočnicové kompozitní sendvičové panely jsou složeny z ocelového rámu z dutých obdélníkových profilů, do kterého je umístěno jádro, které tvoří polyuretanová pěna. Povrch dílu tvoří sklolaminátový potah, vytvořený tzv. prepregovou technologií. Celá skříň obsahuje 6 bočnicových mezidveřních panelů a 4 panely krajní, navazující na čela. Střešní obloukové díly jsou vzhledem k vyšší tvarové náročnosti vyrobeny jako sendvič z papírové voštiny (voština z aramidového papíru) a potažené sklolaminátovým potahem. Není zde použit ocelový rám. Střešní díl vykazuje dostatečnou tuhost. Lamináty, pěnová i voštinová jádra mají zvýšenou odolnost proti hoření, potvrzenou atestem.



Obr. 26 3D model hybridní skříně vozu metra



Obr. 27 Rozstřel hybridní skříně vozu metra

Dokončená hrubá stavba skříně byla podrobena statickým pevnostním zkouškám v oddělení výzkumu ŠKODY TRANSPORTATION a.s. podle ČSN EN 12663-1. Skříň sice nevyhověla všem zatěžovacím stavům, např. svislé zatížení vyvolalo větší průhyb skříně zejména ve dveřních otvorech, ale při žádném zatěžovacím stavu nedošlo k překročení dovoleného namáhání na ocelových částech.



Obr. 28 Statické pevnostní zkoušky skříně, vlevo zkouška tlakem na čelnici pod úrovní dolní hrany oken

Lze konstatovat, že snížení hmotnosti oproti hliníkové integrální konstrukci je kolem 600 kg a proti ocelové konstrukci je přes 1 000 kg. Další úspory hmotnosti byly očekávány v oblasti interiérového obložení, které v oblasti bočnic není třeba řešit, neboť ho tvoří již samotná bočnice, která může být vhodně povrchově upravena.

Výsledky statické pevnostní zkoušky skříně a porovnání s normou jsou uvedeny v příloze č. 3.



Obr. 29 Konečné provedení hybridní skříně vozu metra na přepravních podvozcích

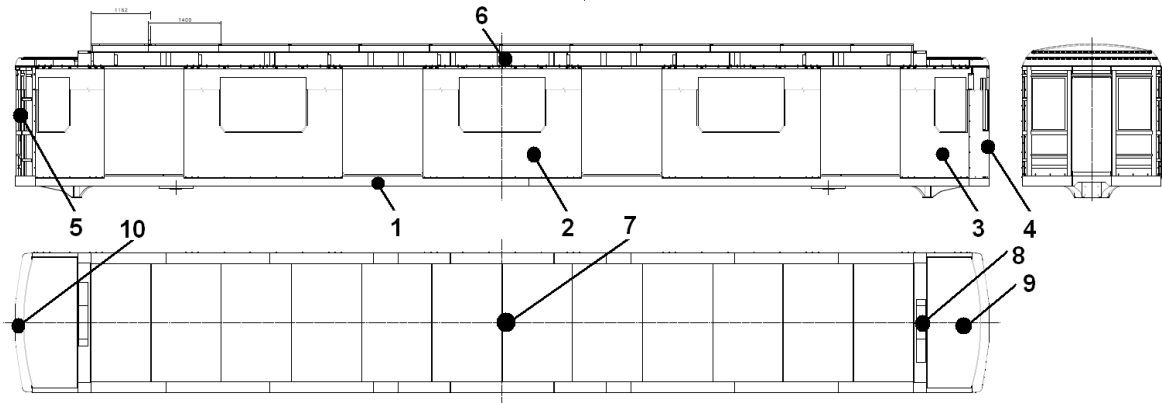
5.1.1 Spojení jednotlivých hybridních částí vozu pro vůz metra v rámci projektu FR-TI3/449

Spojení kompozitních dílů s ocelovou konstrukcí skříně kolejového vozidla je jeden z klíčových bodů. V zásadě lze toto spojení rozdělit mezi:

- *funkční* – mající zásadní vliv na stavbu celé hybridní skříně a její vlastnosti,
- *podružné* – spojení obkladových dílů s hrubou stavbou.

Do první skupiny lze zařadit spojení kompozitních bočnic a podélníku hlavního rámu, spojení kompozitního čela a čelníku, dále pak spojení kompozitních bočnic a obou čel, tedy jak ocelového, tak kompozitního, a na závěr spojení kompozitních bočnic a ocelové části střechy tzv. vaznice.

Do druhé skupiny můžeme zařadit spojení kompozitních částí střechy a ocelové části střechy – vaznice, spojení kompozitních dílů obloukové části střechy mezi sebou a uzavírací kompozitní díl, spojující rovnou část kompozitní střechy a čela (ocelové i kompozitní).



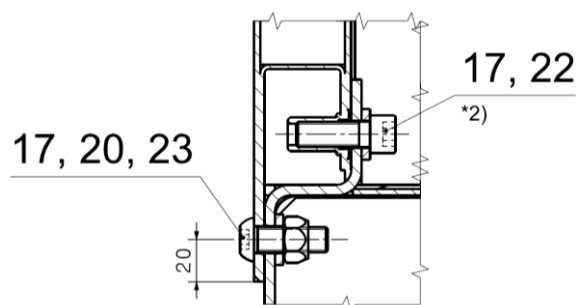
Obr. 30 Vložený vůz metra řešený v rámci projektu FR-TI3/449 [11]

Legenda:

- 1 – Hlavní rám
- 2 – Kompozitní bočnice dlouhá
- 3 – Kompozitní bočnice krátká
- 4 – Kompozitní čelo
- 5 – Ocelové čelo
- 6 – Ocelová část střechy – vaznice
- 7 – Kompozitní část střechy – obloukové segmenty
- 8 – Kompozitní část střechy – rovná část pro výstup vzduchu z ventilační jednotky
- 9 – Kompozitní část střechy – rovná část pro umístění ventilační jednotky
- 10 – Uzavírací kompozitní díl spojující poz. 9 a poz. 4, 5

5.1.1.1 Spojení kompozitních bočnic s hlavním rámem vozidla

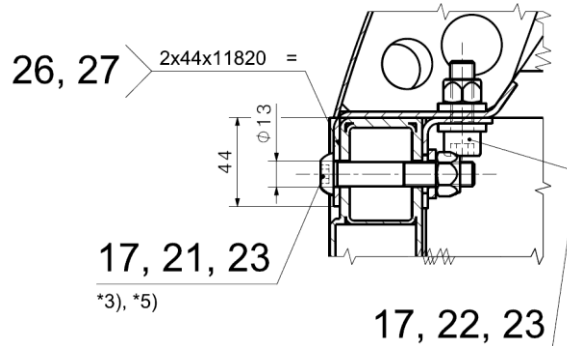
Spojení kompozitních bočnic s hlavním rámem vozidla je provedeno použitím šroubů s vnitřním šestihranem a válcovou hlavou a v místě stykových ploch lepením. Do rámu modulu bočnice jsou nýtovací matice (uvnitř profilu na dolním okraji bočnice), což zaručí pohodlnější a rychlejší montáž. Z vnějšku vozu je designový šroub s vnitřním šestihranem.



Obr. 31 Spojení kompozitní bočnice s hlavním rámem vozidla [11]

5.1.1.2 Spojení ocelové vaznice s kompozitní bočnicí

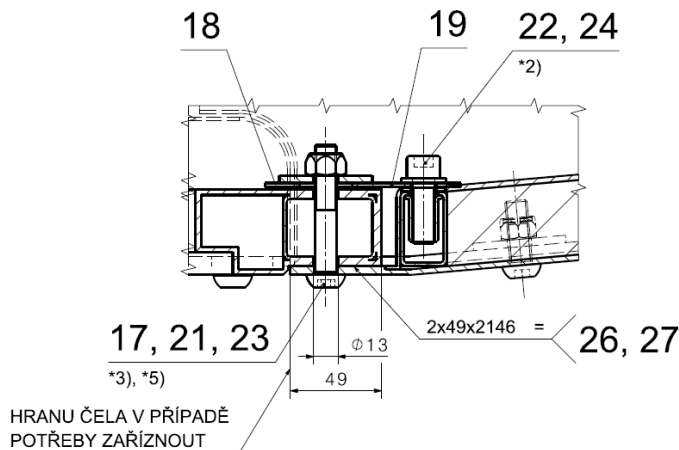
Pro spojení vaznice s kompozitní bočnicí je použit původní model spojení bočnice s podélníkem, a to pomocí příložného L profilu. L profil je přilepen a zároveň stažen šroubovým spojením k bočnici a vaznici.



Obr. 32 Spojení ocelové vaznice s kompozitní bočnicí [11]

5.1.1.3 Spojení kompozitního čela s kompozitní bočnicí

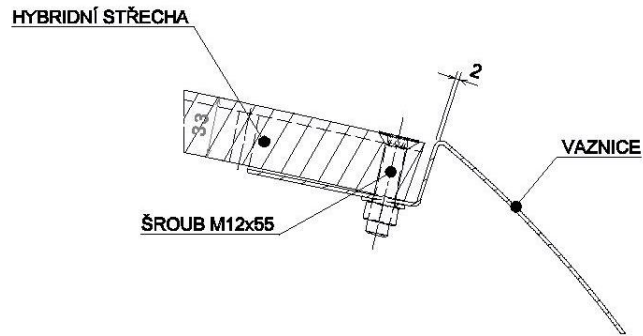
U tohoto spojení je opět použita kombinace lepeného a šroubového spojení. Kompozitní čelo má na vnější straně břit s otvory pro šroubové spojení. Z vnitřní strany je šroubové spojení zajištěno kombinací průchozího šroubu-matice, příložného spojovacího pásku, šroubu s vnitřním šestihranem utaženého do nýtovací matice na vnitřní straně kompozitního čela. Toleranci délky na hlavním rámu eliminujeme případným zaříznutím břitu na vnější straně kompozitního čela a oválnými otvory na spojovacím pásku umístěném na vnitřní straně.



Obr. 33 Spojení kompozitního čela s kompozitní bočnicí [11]

5.1.1.4 Spojení kompozitních dílů střechy a ocelové vaznice

Spojení kompozitních dílů střechy a ocelové vaznice je řešeno pomocí jednoduchého šroubového spoje a lepeného spoje. Kompozitní díly jsou na ploše stýkající se s ocelovou konstrukcí s touto konstrukcí slepeny a poté staženy šroubovým spojem. Není zde již podmínka sevření a prolepení kompozitního dílu z obou stran. Vzniklá mezera je po zatvrdnutí lepidla vytmelená, aby byla zaručena vodotěsnost. Jednotlivé panely jsou sesazeny do „zámků“.



Obr. 34 Spojení kompozitních dílů střechy a ocelové vaznice [11]

5.1.2 Poznatky pro použití lepených spojů a použití možného lepidla pro hybridní vůz metra řešeného v rámci projektu FR-TI3/449

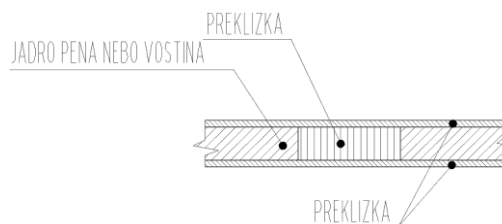
Lepený konstrukční celek je nutné rozdělit na menší a co nejjednodušší části vhodné pro lepení. Při lepení je třeba dodržovat technologický postup daný výrobcem lepidla. Není vhodné lepit dílce, které jsou při montáži vystavené odlupujícím silám. Mechanické namáhání musí být rozděleno rovnoměrně a nesoustředilo se pouze v místě spoje. Spoj musí být namáhán v tahu a smyku a minimálně namáhán v odlupování. Plocha spoje musí být dostatečně velká a napětí v celém lepeném spoji musí být rovnoměrně rozdělené.

5.1.3 Zavádění osamělých sil

Obecným problémem sendvičových konstrukcí je zavádění osamělých sil. Bylo proto navrženo několik způsobů zavedení osamělých sil do sendvičového jádra. V rámci instalace výstroje vozidla v oblasti nejen větracího systému se uchycuje pomocí insertů.

5.1.3.1 Insert z překližky

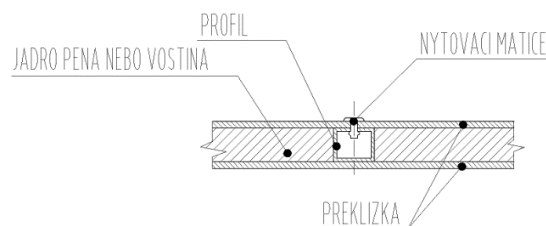
Výhodou tohoto řešení je nízká hmotnost, technologická nenáročnost a vysoká únosnost. Předpokladem pro provedení tohoto řešení je použití šroubů s hlavou.



Obr. 35 Insert pro zavedení osamělých sil z překližky [17]

5.1.3.2 Uzavřený tenkostěnný profil v místě, kde bude použit šroubový spoj

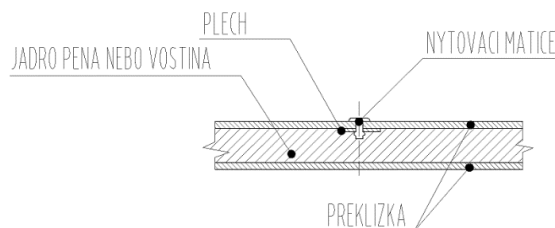
Do stěny tohoto profilu je možné nainstalovat nýtovací matici a šroubový spoj tak nemusí být průchozí.



Obr. 36 Insert z tenkostěnného profilu s nýtovací maticí [17]

5.1.3.3 Insert tenký plech s nýtovací maticí

Dalším řešením je použití plechu o tloušťce 1,5 až 2 mm pod potahem sendvičového jádra. Do tohoto plechu je možné instalovat rovněž nýtovací matici.



Obr. 37 Insert tenký plech s nýtovací maticí [17]

5.1.3.4 Zavedení menších osamělých sil

Pro zavedení menších osamělých sil mohou být použity nalepovací matice, které jsou v případě potřeby nalepeny přímo na potah bez nutnosti použití insertů.

6 Oblast střechy vozu a větrání

6.1 Normy ovlivňující konstrukci střechy vozu a větrání

Řada evropských norem, které ovlivňují stavbu skříní kolejových vozidel v oblasti železniční aplikace se sestává z následujících částí:

- ČSN EN 14750-1: Železniční aplikace – Klimatizace pro městská a příměstská kolejová vozidla – Část 1: Parametry pohodlí
- ČSN EN 14750-2: Železniční aplikace – Klimatizace pro městská a příměstská kolejová vozidla – Část 2: Typové zkoušky
- V souvislosti s touto řadou existují dvě další řady norem zabývající se klimatizací kolejových vozidel:
- ČSN EN 13129-1: Železniční aplikace – Klimatizace pro kolejová vozidla hlavních tratí – Část 1: Parametry pohodlí
- ČSN EN 13129-2: Železniční aplikace – Klimatizace pro kolejová vozidla hlavních tratí – Část 2: Typové zkoušky
- ČSN EN 14813-1: Železniční aplikace – Klimatizace pro stanoviště strojvedoucího/řidiče – Část 1: Parametry pohodlí
- ČSN EN 14813-2: Železniční aplikace – Klimatizace pro stanoviště strojvedoucího/řidiče – Část 2: Typové zkoušky

Evropská norma ČSN EN 14750-1 stanovuje jednotlivé parametry pohodlí pro evropské železnice. Tato norma platí pro příměstská nebo regionální kolejová vozidla a také pro vozidla metra a tramvajová vozidla vybavená chladíci, nebo vytápěcími větracími systémy.

Podmínky měření fyzikálních parametrů jsou definovány v normě ČSN EN 14750-2.

Norma ČSN EN 14750-1 rozděluje vozidla na dvě základní kategorie, viz Tab. 1.

Tab. 1 Zatřídění kategorie vozidla dle ČSN EN 14750-1 [35]

	Kategorie A	Kategorie B
Stojící cestující	<4 cestující /m ²	≥4 cestující /m ²
Průměrná jízdní doba cestujícího	>20 min	≤20 min
Průměrná doba mezi dvěma stanicemi	>3 min	≤3 min

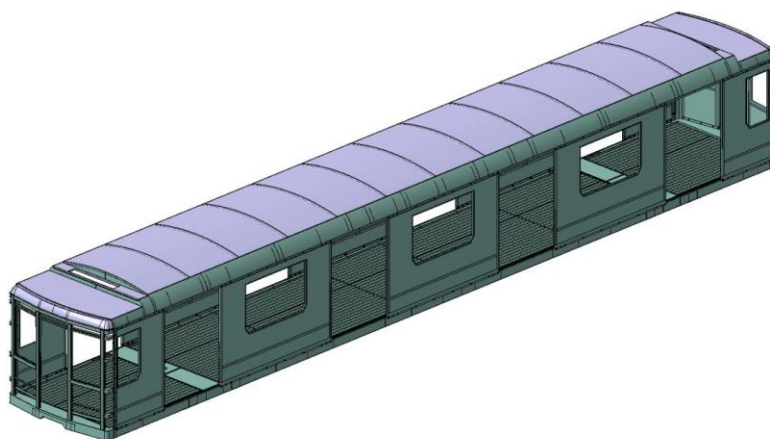
Příměstská a regionální vozidla musí být běžně uvažována v kategorii A, ostatní vozidla musí být uvažována v kategorii B. Pro vozidla kategorie A, pokud je průměrná jízdní doba delší než 1 hodina, je možno aplikovat normu pro vozidla hlavních tratí ČSN EN 13129-1.

Zmíněné normy udávají celou řadu sledovaných parametrů pro různé kategorie vozidel. Níže v této práci jsou uvedeny parametry a principy, které přímo nebo nepřímo ovlivňují konstrukci střechy funkčního vzorku kolejového vozidla vloženého vozu z hlediska funkce.

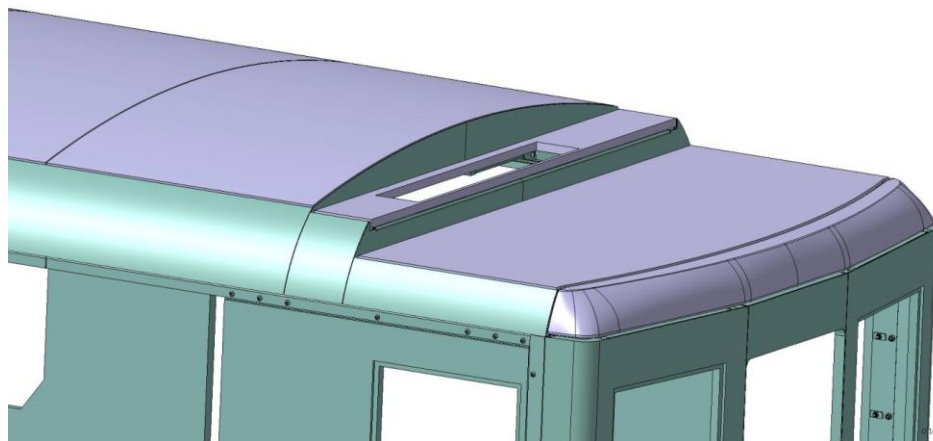
6.2 Koncepční konstrukční uzel střechy vozu, návrh koncepce, funkční vzorek

Vlastní konstrukce hybridní skříně vozidla je přizpůsobena pro instalaci větracího systému. Konstrukce větracího systému, který je podrobněji popsán v následujících kapitolách, spočívá v umístění dvou větracích jednotek. Jejich umístění je na střeše, na krajích představku vozu. Střecha pod větrací jednotkou je rovná. V rámci této stavby je rovná střecha navržena a vyrobena jako panel střechy klenuté. Tyto panely jsou sendvičové konstrukce s jádrem z voštinového papíru tloušťky 30 mm a dvou prepregových potahů o tloušťkách 2 mm. Není zde již podmínka sevření a prolepení kompozitního dílu z obou stran. Vzniklá mezera je po zatvrdnutí lepidla vytmelena, aby byla zaručena vodotěsnost. Jednotlivé panely jsou sesazeny do zámků. Pro uchycení komponent větracího systému je použito insertů pro osamělé síly.

Uchycení větrací jednotky je realizováno přes 4 silentbloky do ocelového profilu, který je do střechy vozu zalaminován. V profilu v místě dosedání větrací jednotky je pryžový silentblok, který je přichycen přes nýtovací matici v profilu TR 4HR 30 x 30 x 1, který je do panelu zalaminován.

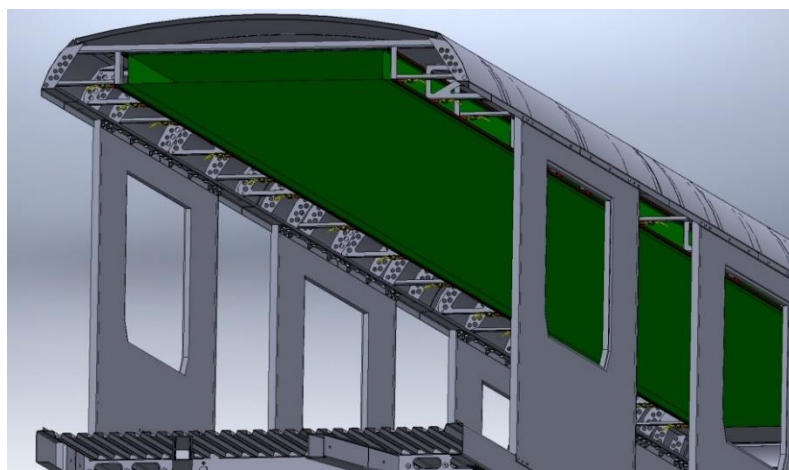


Obr. 38 Izometrický pohled na hrubou stavbu hybridní skříně vozu metra – pohled na rovné střechy na koncích vozu



Obr. 39 Detail rovné střechy vozu pro větrací jednotku

Textilní větrací kanál je v celé délce vozu umístěn do střechy vozu. Umístění je patrné na Obr. 40. Vypnutí větracího kanálu je realizováno pomocí napínáků. Uchycení je provedeno do ocelové vaznice, kde jsou připravena kotevní místa pro vypínání větracího kanálu.



Obr. 40 Příčný 3D řez zobrazující umístění větracího kanálu ve střeše vozu

6.3 Větrání

Základním prostředkem k zajištění kvality vzduchu ve vnitřním prostředí salonu vozu metra je větrání, které má zásadní vliv na zdraví a pohodu osob při cestování. Úkolem větrání je zajistit hygienické požadavky při současném odvodu škodlivin z větraného prostoru (vlhkost, CO₂, alergeny, pach apod.).

V případě nevhodného řešení větrání vnitřních prostor v salonech vozu metra může docházet k řadě negativních jevů, jakými jsou např. kondenzace vodní páry na chladných površích skříně vozu, snižování dýchacelnosti při větším obsazení vozu, nebo víření prachu. Víření prachu bývá způsobené podtlakem v salonu vozu, kdy při otevření dveří dochází k nasávání vzduchu z prostoru nástupiště i s prachovými částicemi. Nepříjemný tlak v uších cestujícího je zapříčiněn větším přetlakem v salonu vozu.

Dalším ukazatelem nevhodného řešení větrání je nepříjemný hluk způsobený vibracemi částí větracího systému. V současnosti je větrání vozu předepsáno normami, např. GOST P 50850-96, ČSN 281310, ČSN EN 14750-1. V praxi ještě přísnější požadavky určují i samotní zákazníci.

6.3.1 Množství vzduchu pro různé režimy ventilace vozů metra

6.3.1.1 Provozní režim standardní

Norma ČSN 281310 nařizuje, že výměna vzduchu v prostoru pro cestující musí být zajištěna nuceným větráním. Regulace nuceného větrání musí být automatická v závislosti na obsazení a teplotě. Musí mít navíc možnost ručního nastavení minimálně ve dvou stupních z kabiny strojvedoucího centrálně pro celou vlakovou soupravu. Regulace vzduchu v prostoru pro cestující je řešena u zadání vozu metra pro Prahu pomocí zátěžových čidel umístěných v sekundárním vypružení vozu. Pro určení potřebného množství vzduchu je nutné znát maximální obsaditelnost vozu (počet sedících + počet stojících). Počet sedících osob se určí z typového nákresu a koncepčního rozložení sedaček, viz Obr. 41. Počet stojících osob se určí z předpisu normy ČSN 281310 pro obsazení 1 m² užitečné plochy určené k stání. Obsazení stojících osob je uvažováno s 5 osobami/m² a maximálním obsazením je uvažováno s 8 osobami/m². Užitečná plocha se pro sedící cestující S_{sed} a $S_{sed,in}$ podle normy ČSN 281310 určí součtem průmětů sedáků vozu do podlahové plochy a plochy před sedáky, určené pro nohy sedících cestujících. Není-li podlahová plocha pro nohy cestujících vymezena uspořádáním sedáků, počítá se jako plocha před sedáky, určená jejich šířkou a přesahem 750 mm přes hranu sedadla pro sedícího cestujícího a 1050 mm pro sedícího cestujícího se sníženou schopností pohybu a orientace, měřeno od zadní části sedací plochy, popř. od spodní hrany zádové opěrné plochy. Užitečná plocha pro stojící cestující S_{st} se určí vztahem:

$$S_{st} = S_u - (S_{sed} * n) - (S_{sed,in} * n_{in})$$

kde:

S_{st} – užitečná plocha pro stojící cestující [m²]

S_u – užitečná plocha pro stojící i sedící cestující [m²]

S_{sed} – užitečná plocha pro sedící cestující [m²]

$S_{sed,in}$ – užitečná plocha pro sedící cestující se sníženou schopností pohybu a orientace [m²]

n – počet sedáků (mimo sedáků n_{in}) [-]

n_{in} – počet sedáků pro cestující se sníženou schopností pohybu a orientace [-]

Obsaditelnost N se vypočte ze vztahu:

$$N = N_{sed} + 5 * S_{st}$$

kde:

N – obsaditelnost [-]

N_{sed} – obsaditelnost sedících cestujících [-]

S_{st} – užitečná plocha pro stojící cestující [m²]

Maximální obsaditelnost N_{max} se určí pomocí vztahu:

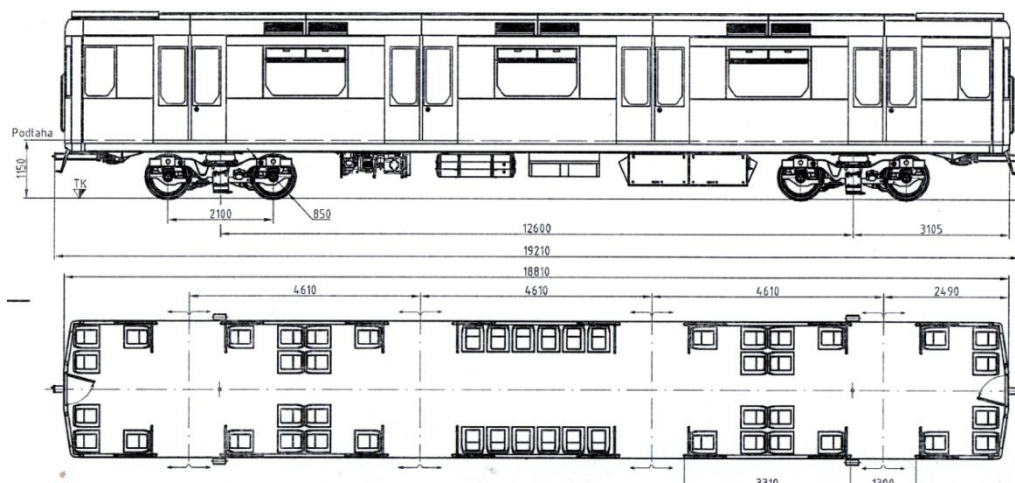
$$N_{max} = N_{sed} + 8 * S_{st}$$

kde:

N_{max} – maximální obsaditelnost [-]

N_{sed} – obsaditelnost sedících cestujících [-]

S_{st} – užitečná plocha pro stojící cestující [m²]



Obr. 41 Vložený vůz metra [15]

Tab. 2 Hodnoty pro vložený vůz metra

Vložený vůz metra		
Obsaditelnost vozu	Sedící + stojící	Celkem
Sedící	48	48
Sedící + stojící 5 os/m ²	48 + 152	184
Sedící + stojící 8 os/m ²	48 + 244	292
Užitečná plocha pro stojící cestující je 30,5 m ²		

Množství vzduchu požadované normou GOST P 50850-96 je 4 500 m³/h. Množství vzduchu podle ČSN 281310:

Tab. 3 Množství vzduchu dle ČSN 281310 [35]

teplota [°C]	množství vyměněného vzduchu na osobu [m ³ /h]
nižší než 0	8
0-26	12,5
více než 26	25

Poznámka: Uvedené údaje podléhají změně Z2 z prosince 2006. Tato změna se odvolává na normu ČSN EN 14750-1 Železniční aplikace – klimatizace pro městská, příměstská kolejová vozidla – část 1: parametry a pohodlí. Pro tuto kategorii vozidel B stanovuje množství čerstvého vzduchu rovno nebo větší 12 m³/h na jednoho cestujícího a minimální množství 8 m³/h na jednoho cestujícího.

Tab. 4 Stanovení potřebného množství vzduchu pro vložený vůz

Stanovení množství vzduchu	8 m ³ /h	10 m ³ /h	12 m ³ /h	Podle GOSTu
Vložený vůz: 292 osob	2 336 m ³ /h	2 920 m ³ /h	3 504 m ³ /h	4 500 m ³ /h

Pro dimenzování větracího systému vozidla metra uvažujeme nejvyšší možnou spotřebu vzduchu na osobu a maximální obsaditelnost vloženého vozu metra. Nejvyšší spotřeba vzduchu při teplotě nad 26 °C je 25 m³/h na osobu.

$$Q_v = sp * n = 25 * 292 = 7\,300 \text{ [m}^3\text{/h]}$$

kde:

Q_v – množství dodaného vzduchu do salonu vozu [m³/h]

sp – maximální spotřeba vzduchu při teplotě nad 26 °C [m³/h]

n – maximální počet cestujících ve voze metra [-]

Pro jeden vůz, se dvěma ventilačními jednotkami, uloženými na koncích představku střechy vozu je dodávané množství jedné ventilační jednotky dáno vztahem:

$$Q_{1v} = \frac{Q_v}{j} = \frac{7\,300}{2} = 3\,650 \text{ [m}^3\text{/h] tj. } 1,01 \text{ m}^3\text{/s}$$

kde:

Q_{1v} – objemové množství vzduchu dodávaného ventilační jednotkou do vozu metra [m³/h]

Q – celkové objemové množství vzduchu dodávaného do vozu metra [m³/h]

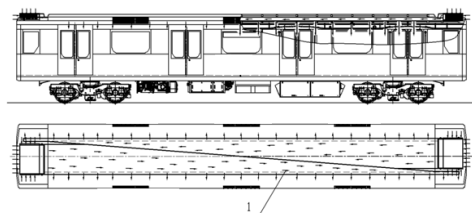
j – počet ventilačních jednotek [-]

6.3.1.2 Provozní nouzový režim

Nucená ventilace prostoru pro cestující musí být schopna pracovat v nouzovém režimu při výpadku trakčního napětí po dobu minimálně jedné hodiny při výkonu 50 %. V nouzovém režimu, pro případ vozu metra Praha je množství vzduchu 3 650 m³/h. Při tomto režimu je použita jen jedna ventilační jednotka na vůz, která je napájena z baterie vozu metra.

6.4 Návrh větracího systému, větracích kanálů

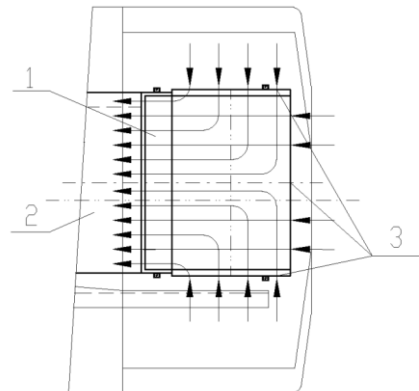
Návrh systému spočívá v umístění dvou větracích jednotek. Jejich umístění je na střeše, na krajích představku vozu. Střecha pod větrací jednotkou je rovná. Z pohledu cestujícího je kryta laminátovým zákrytem.



Obr. 42 Pohled na umístění větracího kanálu a větrací jednotky vozu metra

Legenda: 1 - kanál větrání vozu

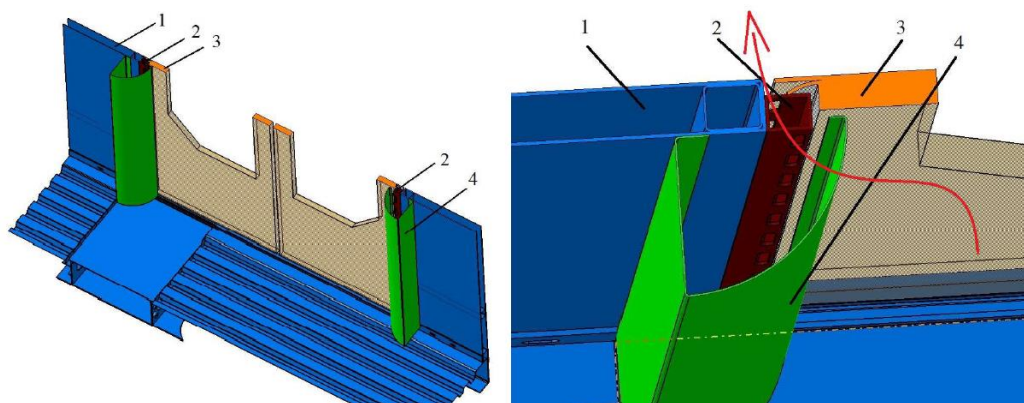
Navržená větrací jednotka nasává vzduch ze tří stran přes ochranné kompozitní žaluzie a následně ho vyfukuje do větracího kanálu vozu metra, viz Obr. 43. Dva větrací kanály ve voze metra uložené proti sobě se směrem od ventilačních jednotek zužují. Průřez kanálu v nejširším místě je 1600 mm x 165 mm. Výška větracího kanálu vozu je konstantní.



Obr. 43 Půdorysný detail větrací jednotky znázorňující polohu jednotky na střeše vozu a princip nasávání a výfuku vzduchu do větracího kanálu vozu

Legenda: 1 – výfuková oblast větrací jednotky, 2 – větrací kanál, 3 – oblast žaluzií

Výstup vzduchu z větraného salonu pro cestující je stejně důležitý jako přívod. Lze jej realizovat mřížkou na vaznici. Nevýhodou tohoto uspořádání je nedostatečné provětrání prostoru u sedících cestujících. Jiné řešení je například využití dveřních otvorů k výstupu vzduchu. Jednou z variant je využití samotných křídel dveří. Toto řešení je známé u několika výrobců. My jsme se zde snažili ubírat jinou cestou, a to, využít pro výstup vzduchu oblast okolo těsnění dveřních křídel k bočnici. Při návrhu jsme využili dutého profilu, na který dosedá těsnění křídla dveří. Do tohoto profilu jsou vytvořeny otvory, které se vzájemně nepřekrývají, čímž je snížen prostup hluku do interiéru. Kromě požadavku na minimální prostup hluku z vnějšku vozu do interiéru, je dalším požadavkem zabránit vnikání vody do interiéru. Tuto funkci by opět měly plnit přesazené otvory s tím, že poslední otvor směrem k podélníku vozu je umístěn na vnější straně, tudíž by tímto otvorem měla prosáklá voda vystupovat zpět mimo vůz. Dalším prvkem, který zabrání vstupu hluku do salonu vozu je zákryt pohybového mechanismu dveří – ovládací tyče dveří. U tohoto zákrytu se počítá s pokrytím vnitřní plochy materiálem s vysokou pohltivostí hluku. Více je zřejmé z následujícího Obr. 44.

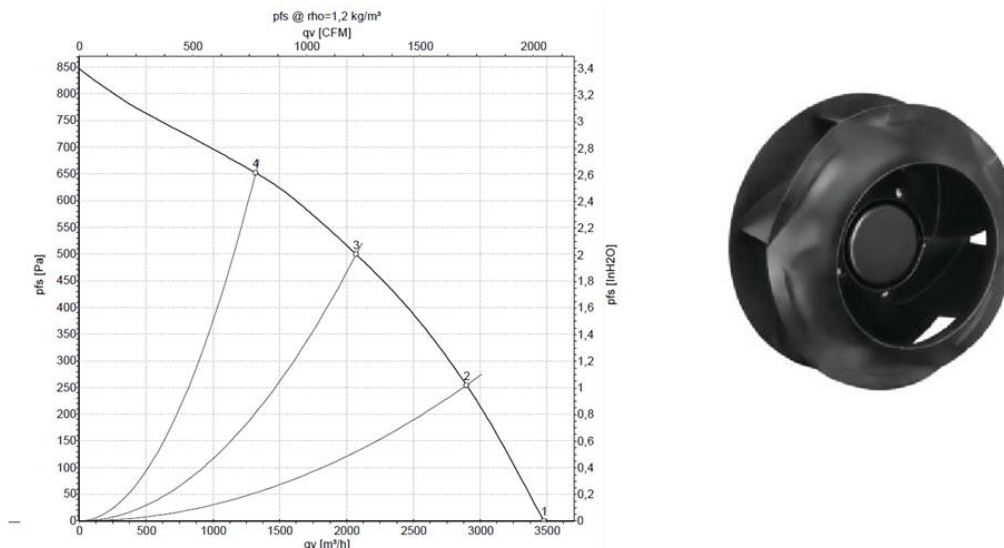


Obr. 44 Celkový detailní pohled na řešení výstupu vzduchu z interiéru vozu

Legenda: 1 – hrubá stavba vozu, 2 – dutý perforovaný profil, 3 – křídla přesuvných dveří, 4 – zákryt ovládací tyče dveří

6.5 Konceptní řešení větrací jednotky umístěné na střechu představku

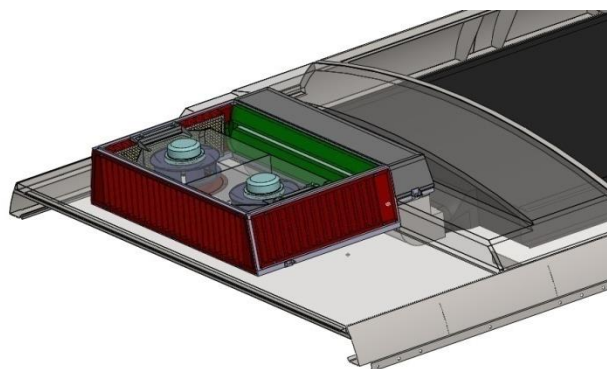
Koncepce této větrací jednotky předpokládá použití ventilátorů s volně oběžným kolem. Ve větrací jednotce jsou použity dva radiální EC ventilátory s volně oběžným kolem, jeho charakteristika je znázorněna na následujícím Obr. 45.



Obr. 45 Charakteristika ventilátoru ve větracích jednotkách – ventilátor s volně oběžným kolem R3G310-RR12-P1 – viz Příloha č. 4

Radiální ventilátory jsou ventilátory, u kterých vzduch vstupuje do ventilátoru v axiálním směru (vodorovně s osou) a opouští ventilátor radiálně (kolmo na rotující osu). Jedná se o radiální ventilátory s dozadu zahnutými lopatkami, které mají podstatně méně lopatek než radiální ventilátory s dopředu zahnutými lopatkami. Lopatky jsou zahnuty dozadu, tedy po směru otáčení oběžného kola. Radiální ventilátory s dozadu zahnutými lopatkami nepotřebují spirální skříň a mohou být tedy volně zabudovány.

Jednou větrací jednotkou je nutno do vozu dodat 3 650 m³/h (jeden ventilátor 1 825 m³/h) s uvažováním tlakové ztráty 540 Pa.



Obr. 46 Konceptní řešení větrací jednotky bez viditelného víka (víko jednotky je pro zobrazení průhledné)

Ventilátory jsou napájeny stejnosměrným napětím 110 V. Skříň s ventilátory jsou uloženy na společný nosič sacím otvorem dolů. Celé toto soustrojí je uloženo na silentblokách a propojeno s kanálem větrací jednotky spojovacím kolenem z textilní tkaniny. Tím je zabráněno přenosu vibrací od soustrojí ventilátorů na konstrukci celé větrací jednotky. Vzduch je nasáván přes žaluzie do nasávací skříň jednotky, poté do skříň ventilátoru a následně do kanálu větrací

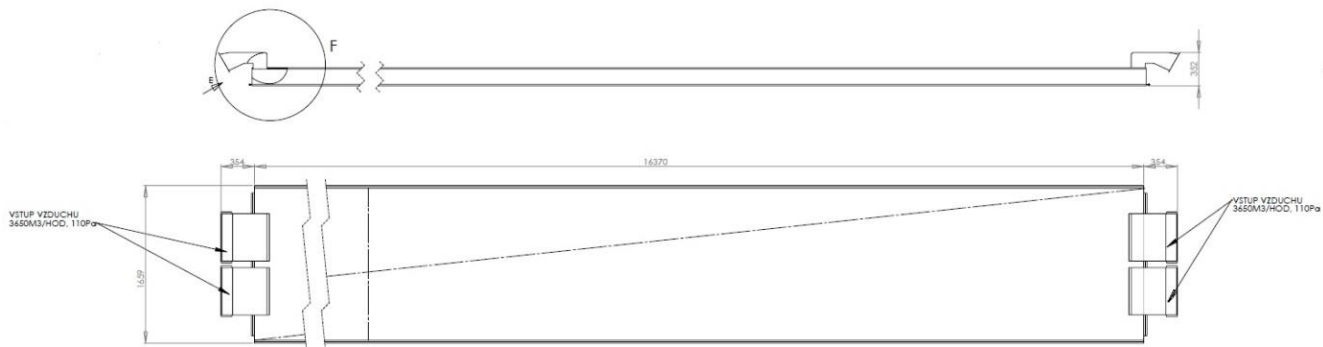
jednotky. Přímá cesta proudu vzduchu do větracího kanálu vozu je lomena pomocí propojovacího kanálu, kde se hluk částečně utlumí.



Obr. 47 Pohled do větrací jednotky

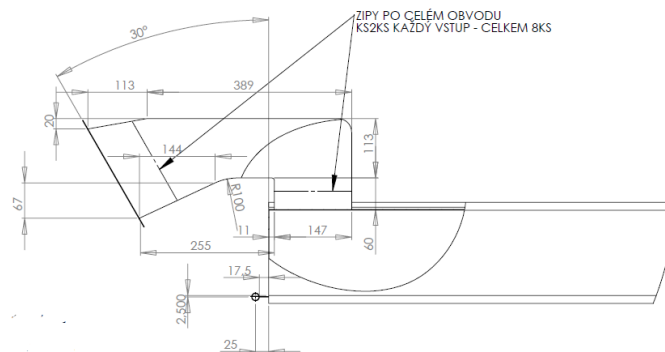
6.6 Koncepční řešení větracího kanálu

Koncepce větracího kanálu vyplývá z funkce systému větrání, viz kapitola 8.4. Dva větrací kanály ve voze metra uložené proti sobě se směrem od větracích jednotek zužují. Průřez kanálu v nejširším místě je 1 600 mm x 165 mm. Výška ventilačního kanálu vozu je konstantní.

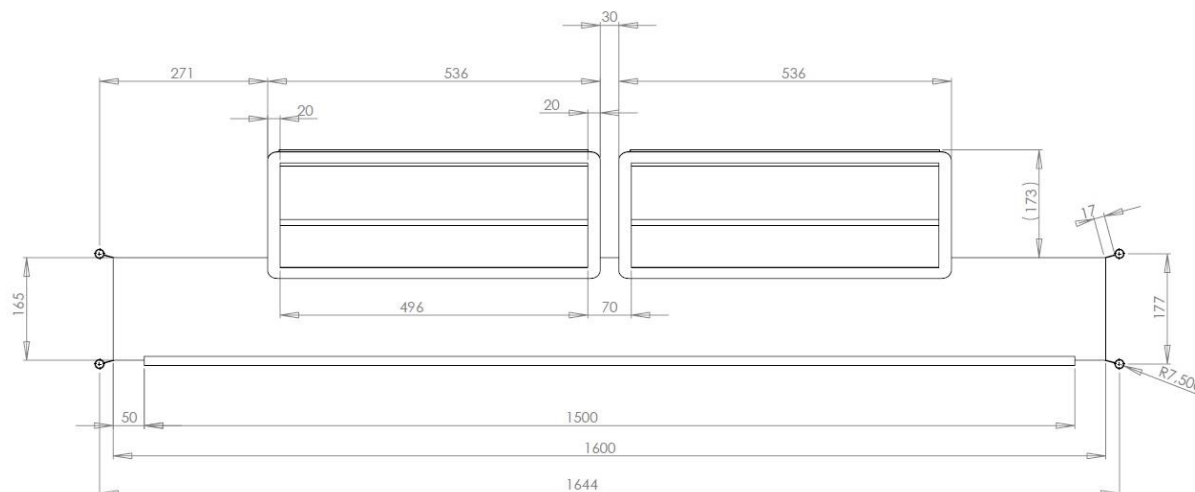


Obr. 48 Skica větracího kanálu s propojovacími lomenými kanály pro propojení s ventilátory

Napojení větrací jednotky na větrací kanál je pomocí propojovacích lomených kanálů. Připojení ke skříním každého ventilátoru je provedeno pomocí suchých zipů. Toto uchycení usnadňuje samotnou montáž i případnou výměnu jednotlivých variant při samotném měření na funkčním vzorku.



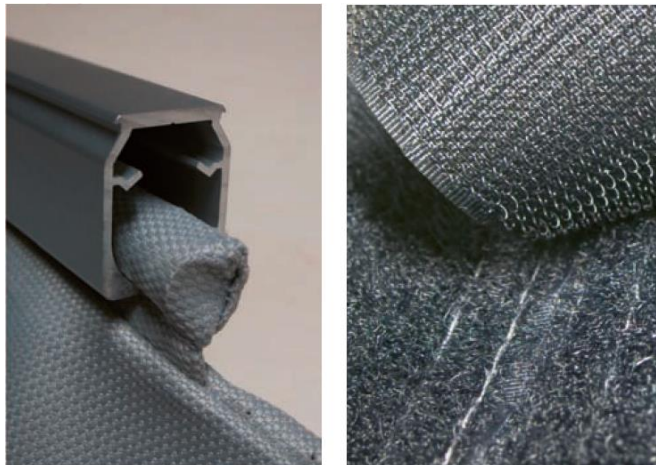
Obr. 49 Detail F propojovacího kanálu větrací jednotky a umístění zipů



Obr. 50 Skica příčného pohledu na kanál vozu s propojovacími kanály větrací jednotky

Pro výrobu větracího kanálu byl vybrán certifikovaný tkaninový materiál POLYAIR – Classic fabric (vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny na Obr. 21). Materiál splňuje požadavky normy ČSN EN 45 545-2. Výhodou použití této koncepce a použití tohoto materiálu je výrazné snížení hmotnosti (plechové provedení 200 kg, tkaninové provedení 11 kg).

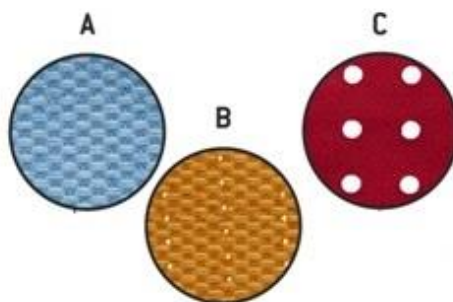
Kanály jsou upnuty pomocí hliníkových C profilů umístěných v rozích obdélníkového průřezu kanálu. Hliníkové profily jsou uchyceny do ocelové vaznice vozu pomocí napínáků, které mají funkci textilní kanál dostatečně vypnout, aby při spuštění větrání byl zachován požadovaný obdélníkový průřez. Pro nafouknutí nevypnutých částí kanálu v oblasti propojovacího kanálu postačí pouze 20 Pa statického tlaku.



Obr. 51 Detail uchycení textilního kanálu v oblasti vypínání C profilem a propojení jednotlivých částí suchým zipem

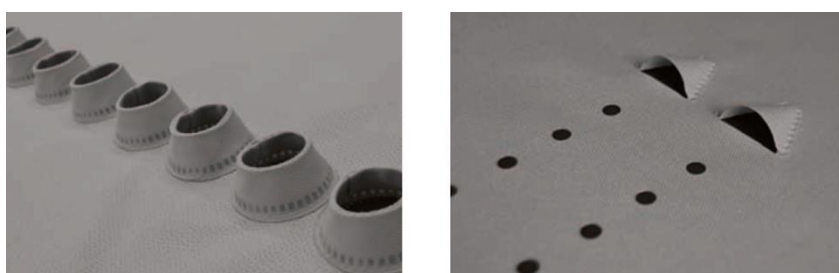
6.6.1 Distribuce vzduchu do salonu vozu

Distribuce vzduchu do salonu vozu je možná několika způsoby: prodyšnou tkaninou, mikroperforací nebo perforací. Mikroperforace je definována otvory v tkanině o průměru 200 - 400 μm a perforace otvory většími než 4 mm.



Obr. 52 Způsoby distribuce vzduchu (A – prodyšná tkanina, B – mikroperforace, C – perforace) [25]

Při distribuci vzduchu ve vozidle metra v oblasti stropního větrání je nejvhodnější použití varianty perforace. Z důvodu dostatečné provětratelnosti je možno použít usměrňovacích prvků.



Obr. 53 Detail možného usměrnění proudu vzduchu do salonu vozu (vlevo tkaninové trysky, vpravo perforace + kapsy 180°) [25]

Pro výrobu funkčního vzorku větracího kanálu byly zvoleny dvě varianty spodní výstupní části větracího kanálu. Varianta první pouze perforace (perforace o průměru 6 mm s roztečí v podélném směru 20 mm a v příčném směru 82 mm). V druhé variantě je perforace s usměrněním proudu vzduchu s použitím kapes 180° (perforace o průměru 6 mm s roztečí v podélném směru 20 mm, v příčném směru 82 mm, usměrňovací kapsa je umístěna každý desátý otvor v podélném směru). Princip usměrnění vzduchu pomocí kapes 180° je řešen v kapitole 6.8.7.1

6.7 Aerodynamika v oblasti větrací jednotky vozidla

Vnitřní aerodynamika pro kolejová vozidla představuje řešení proudění vzduchu pro větrání interiéru vozidla. Úkol „větrání interiéru vozu“ lze rozdělit na simulace proudění vzduchu v prostoru cestujících, v rozváděcím traktu vzduchovodů a v prostoru zdroje vzduchu pro větrání. Tato část disertační práce se věnuje popisu příspěvku počítačových simulací (CFD) při návrhu jednotlivých částí. Ilustruji zde základní výsledky simulačních výpočtů proudění vzduchu v jednotlivých částech větracího systému funkčního vzorku větrání ve vozidle hybridní stavby skříně metra.

Úkol (a vlastní CFD simulace) je součástí řešení projektu, který klade důraz na lehkou konstrukci všech komponentů vozu metra včetně větrací soustavy – větrací jednotka na střeše vozu, rozváděcí trakt vzduchu ve stropu vozu, výdechy vzduchu do interiéru a návrh efektivního větrání prostoru cestujících. Vlastnímu zadání simulací předcházely designérské návrhy interiéru vozu metra a návrhy umístění a konstrukčního provedení stropní větrací jednotky. Z konstrukčních návrhů větrací jednotky, sacího a výtlačného traktu, vznikly modely, které byly vytvořeny CAD SW prostředky. Geometrické modely pak byly ve vhodném formátu importovány datovým souborem do CFD výpočetního systému. V rámci správné funkce větrání

vozidla je nutné řešit průtokové množství vzduchu, rychlosti proudění a tlakové ztráty v jednotlivých částech větracího systému.

Při proudění vzduchu v kanálech dochází neustále k přeměně části kinetické energie tekutiny vlivem tření na teplo, projevem tohoto procesu je klesání celkového tlaku a vznik tlakové ztráty. Zdrojem tlakových ztrát je zavíření proudu vzduchu, které vzniká při náhlé změně směru proudění nebo změně rychlosti z důvodu změny průtočného průřezu kanálu (zúžením, resp. rozšířením ventilačního kanálu).

K určení tlakových ztrát byly použity výsledky CFD simulací průtoku vzduchu – modely vstupní a výstupní části větrací jednotky. Hodnoty použité při návrhu konstrukce jednotky jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 5.

Tab. 5 Tlakové ztráty

Oblast tlakové ztráty	Tlaková ztráta [Pa]
Ochranné žaluzie s filtrem	120
Nasávací skříň větrací jednotky	30
Ventilátor	135
Propojovací kanál větrací jednotky	170
Větrací kanál vozu	70
Celkem	525

Oblast tlakové ztráty v propojovacím kanále větrací jednotky je řešena v dalších kapitolách. V této části je prostor pro případnou úpravu rozměru a její snížení. Tato část má několik funkcí. Funkci propojovací, funkci odloučení vibrací od soustrojí ventilátoru a funkci pohlcující hluk.

6.7.1 Základní pojmy a vztahy

Aerodynamický výpočet rozvodu vzduchu je založen na poznacích o proudění tekutiny potrubím. K určení stavu proudícího vzduchu určují veličiny: tlak, teplota, hustota a rychlost. [9] Vzduch považujeme jako nestlačitelný a předpokládáme, že měrná tepelná kapacita vzduchu nezávisí na teplotě a tlaku a platí jednoduchá stavová rovnice:

$$p = \rho R T$$

kde:

p [Pa] – tlak

ρ [kg/m³] – hustota

R [J/kmol] – plynová konstanta

T [K] – termodynamická konstanta

Dále počítáme s podmínkou kontinuity proudu, podle níž pro ustálené proudění platí:

$$M = \rho w S$$

kde:

M [kg/s] – hmotnostní průtok

S [m²] – průřez

w [m/s] – rychlost

Při řešení praktických úloh se dále využívá Bernoulliova rovnice a věta o změně hybnosti.

6.7.2 Proudění vzduchu potrubím

Proudění potrubím může být laminární nebo turbulentní. Hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním udává Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{w d}{\nu}$$

kde:

ν [m²/s] – kinematická viskozita

d [m] – charakteristický rozměr

w [m/s] – rychlost proudící kapaliny

Je-li hodnota Re vyšší než kritická hodnota Re_{KRIT} , je proudění turbulentní. Bude-li pro kruhový průřez $Re \leq 2\,300$, proudění bude vždy laminární, je-li $Re \geq 3\,000$, bude proudění vždy turbulentní. Ve větracích zařízeních bude charakter proudění vzduchu převážně turbulentní.

Vlivem vazkosti je rychlost na stěnách potrubí nulová. Se vzdáleností od stěny rychlost zpočátku prudce stoupá, gradient rychlosti pak směrem ke středu potrubí klesá. Rychlostní profil lze vyjádřit mocninným zákonem, který je vhodný především k popisu rychlostních profilů v oblasti okolo jádra proudu, ale nevhodný pro oblasti blízko stěny potrubí:

$$\frac{w}{w_{max}} = \left(1 - \frac{y}{r}\right)^{\frac{1}{n}}$$

kde:

w [m/s] – vyšetřovaná rychlost v daném místě

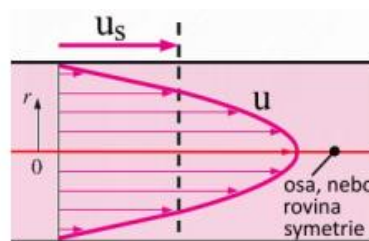
w_{max} [m/s] – maximální rychlost na ose potrubí (pro osově symetrické proudění)

y [m] – poloměr bodu, v němž je vyšetřována rychlost w

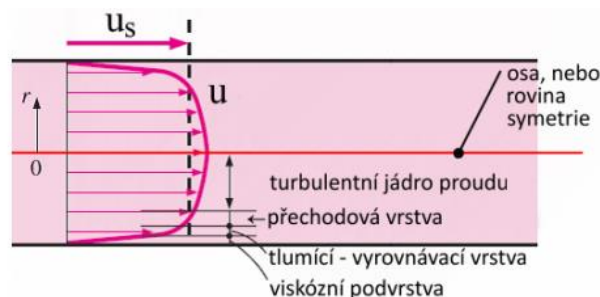
r [m] – vnitřní poloměr potrubí

n [-] – bezrozměrný exponent, který se mění v závislosti na Reynoldsovo čísle a na drsnosti potrubí

[10]



Obr. 54 Rychlostní profil laminárního proudění [31]



Obr. 55 Rychlostní profil turbulentního proudění [31]

6.7.3 Tlakové ztráty při průtoku potrubím

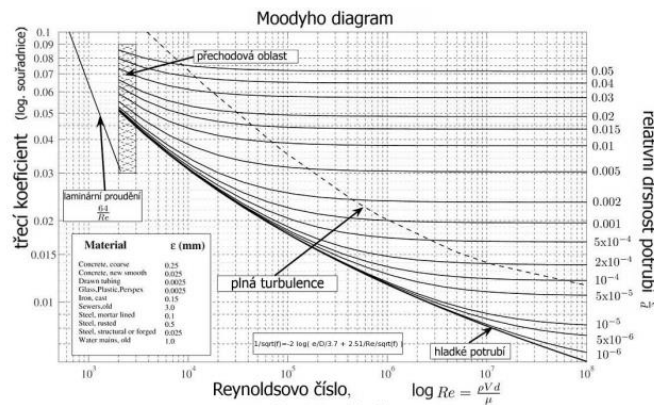
Při proudění vzduchu v kanálech dochází neustále k přeměně části kinetické energie tekutiny vlivem tření na teplo, projevem tohoto procesu je klesání celkového tlaku a vznik tlakové ztráty. Zdrojem tlakových ztrát je zavíření proudu vzduchu, které vzniká při náhlé změně směru proudění nebo změně rychlosti z důvodu změny průtočného průřezu kanálu (zúžením, resp. rozšířením ventilačního kanálu).

Podle toho, jak ztráty vznikají, rozlišujeme je na ztráty:

- *třením* – provází proudící vzduch po celé délce potrubí,
- *místní* – vznikají tam, kde je proud vzduchu narušen.

6.7.4 Tlakové ztráty třením

Pro překonání odporu potrubí o průřezu S , obvodu O (konstantní po délce l), dojde k úbytku tlaku. Velikost tohoto úbytku závisí na délce, charakteristickém průřezu a drsnosti potrubí.



Obr. 56 Moodyho diagram – závislost součinitele tření na Reynoldsovo čísla a poměrné drsnosti materiálu potrubí [9, 31]

Tlaková ztráta třením se počítá ze vztahu:

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \frac{l}{d} p_a = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} w^2$$

kde:

λ [-] – součinitel tření

d [m] – charakteristický rozměr

Tab. 6 Ekvivalentní drsnost stěn vzduchodů

Provedení	ϵ [mm]
Pozinkovaný ocelový plech	0,15
Azbestocement	0,2 – 0,6
Keramika s glazurou	1,4
Překližka	0,6
Vinidur, sklo, plast, fólie	0,0015 – 0,01

6.7.5 Tlaková ztráta místní

Místní tlakové ztráty se počítají ze vztahu:

$$\Delta p_{\xi} = \xi p_d = \xi \frac{\rho}{2} w^2$$

kde součinitel místní tlakové ztráty ξ je dán experimentálně. Výsledky analytických řešení se od naměřených hodnot totiž značně liší. Jediné analytické řešení, které odpovídá experimentům platí pro náhlé rozšíření proudu a je dáno Bordovým vztahem:

$$\Delta p_{\xi} = \frac{\rho}{2} (w_1 - w_2)^2$$

6.7.6 Tlakové poměry v potrubní síti

Při průtoku vzduchu mezi průřezy 1 a 2, pro vyrovnaný rychlostní profil a za předpokladu, že hustota vzduchu je konstantní ($\rho = \text{konst.}$), platí:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} w_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} w_2^2 + \Delta p_{z1,2} = \text{konst.}$$

Součet tlaku statického a dynamického v prvním průřezu se musí rovnat součtu těchto tlaků ve druhém průřezu a tlakové ztráty. Součet statického a dynamického tlaku se nazývá tlak celkový:

$$p_s + p_d = p_c$$

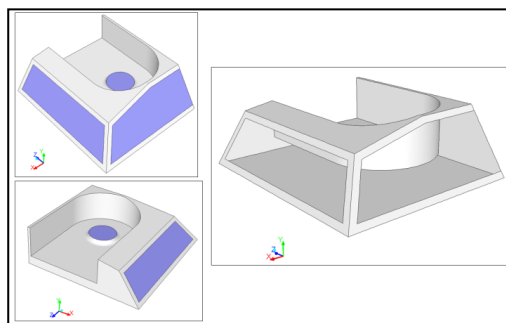
Při výpočtech se můžeme setkat s tlakovou ztrátou na 1 bm potrubí, označovanou také jako tlakový spád:

$$R = \frac{\lambda}{d} \frac{\rho}{2} w^2$$

Odvození součinitele tření λ je pro ruční výpočet složitý, proto se používají pomocné tabulky nebo normogramy tlakových ztrát třením. [9, 10]

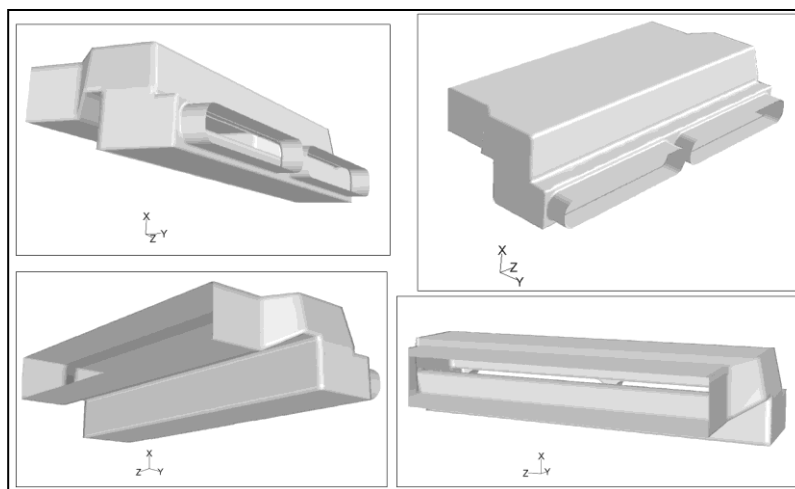
6.7.7 Model větrací jednotky, proudění větrací jednotkou

Z konstrukčních návrhů větrací jednotky, sacího a výtlačného traktu, vznikly modely, které byly vytvořeny CAD SW prostředky. Geometrické modely pak byly ve vhodném formátu importovány v datovém souboru do CFD výpočetního systému. Model vstupního traktu větrací jednotky (Obr. 57) je tvořen sacími otvory na povrchu jednotky (čelní a boční), převáděcím traktem a vyústěním do části sání ventilátoru. Model je uvažován jen pro jeden ventilátor stropní jednotky (simulováno proudění jen v jedné symetricky stejné polovině). Na Obr. 57 je znázorněna výpočtová oblast objemu vzduchového prostoru modelu vstupního traktu, sací otvory a sací průřez ventilátoru jsou naznačeny modře.



Obr. 57 Model vstupního traktu pro stropní větrací jednotku

Model výstupního traktu větrací jednotky (Obr. 58) je tvořen převáděcím kanálem obdélníkového průřezu z výstupní skříně ventilátorů a dvěma výtlačnými kanály s vyústěním do kanálů stropních výdechů. V převáděcím traktu dochází k několika změnám směru proudění včetně změn průřezu kanálu.

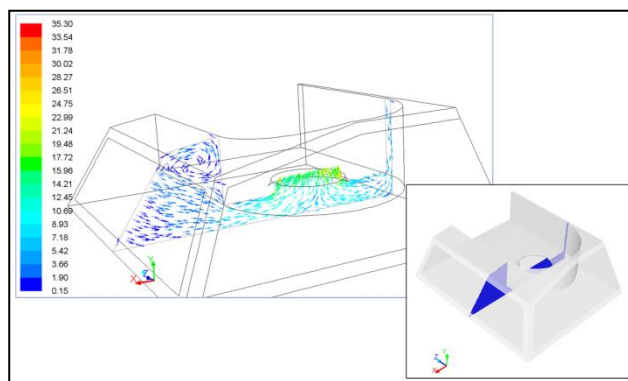


Obr. 58 Model výstupního traktu z větrací jednotky do větracích kanálů

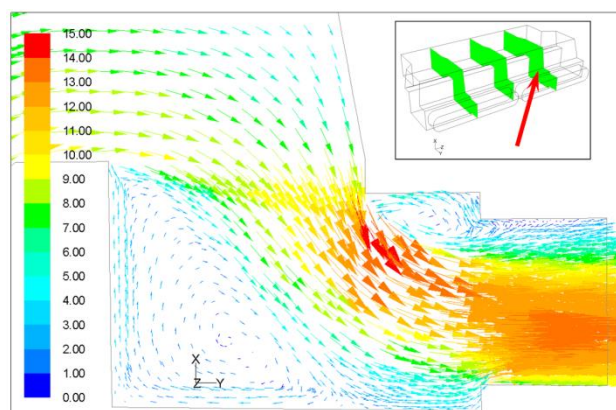
Oba modely vstupní a výstupní části větrací jednotky byly pro CFD simulace tvarově zjednodušeny o některé drobné detaily (lemy a osazení dílů, spojovací prvky) a byly ponechány pouze aerodynamicky významné části.

Cílem CFD simulací proudění modelem jednotky je zjištění tlakových poměrů při proudění vzduchu a určení tlakových ztrát. Výpočtové modely pro obě části větrací jednotky byly nastaveny a odladěny pro simulaci nestlačitelného turbulentního proudění vzduchu o konstantní teplotě 20 °C a hustotě 1,164 kg/m³. Okrajové podmínky na vstupu a výstupu do výpočtové oblasti byly dány hmotnostním průtokem vzduchu (dáno parametry použitých ventilátorů) a hodnotou atmosférického tlaku (980,6 kPa). V rámci ladění simulačního výpočtu proudění v modelu vstupního traktu byly testovány některé kombinace typů vstupních a výstupních okrajových podmínek pro modelování „efektu sacího účinku“ ventilátoru.

Výsledky simulací (v číselné i grafické podobě) popisují základní situaci při proudění vzduchu v sací i výtlačové části větrací jednotky. Na Obr. 59 a Obr. 60 jsou zobrazeny vektory rychlosti vzduchu v několika rovinách. Výsledky ukazují na složitý charakter proudění v modelech obou traktů větrací jednotky, kde jsou časté změny směru proudění, ostré a hranaté přechody. Proudění je pak zvířené, dochází ke změně jeho směru, promíchávání a ubrzďování, je patrná složitost proudu vzduchu. To má vliv i na tlakovou ztrátu. Proto byla na základě výsledků CFD simulací provedena revize konstrukce zejména výstupního traktu a výrazně upraveno tvarování traktu mezi výstupem z ventilátorů a vstupem do kanálů stropních výdechů.



Obr. 59 Výsledky simulace proudění vzduchu v sací vstupní části větrací jednotky, tj. vektory rychlosti vzduchu v rovině bočního vstupu (ve výřezu poloha výsledkové roviny v modelu) [6]

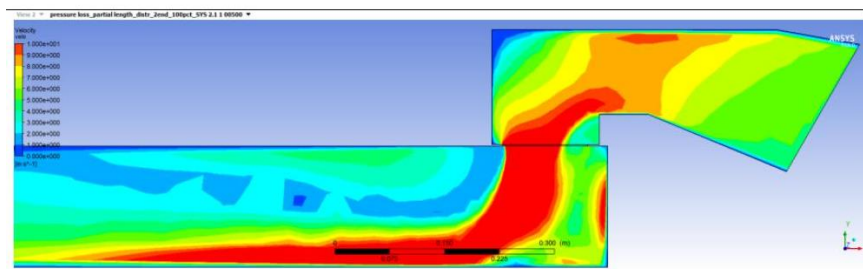


Obr. 60 Detail proudění vzduchu ve výstupním hrdle modelu výstupního traktu větrací jednotky (ve formě vektorů rychlosti, délka a barva vektorů úměrná rychlosti), patrný vliv „ostrých“ přechodů kanálů na vývoj proudění (zpomalení, popř. vznik vírů) [6]

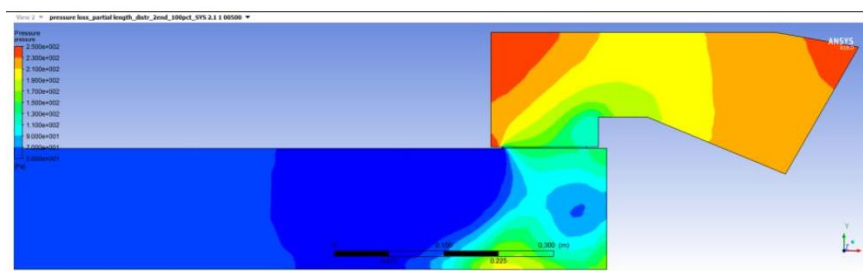
Výsledky simulací ukazují na složitý charakter proudění v modelech obou traktů větrací jednotky, kde jsou časté změny směru proudění, ostré a hranaté přechody. Proudění je pak zvířené, dochází ke změně jeho směru, promíchávání a ubrzdování. Je zde patrná složitost proudu vzduchu. To má vliv i na tlakovou ztrátu. Proto byla na základě výsledků CFD simulací provedena revize konstrukce zejména výstupního traktu a poté výrazně upraveno tvarování traktu mezi výstupem z ventilátorů a vstupem do stropních kanálů.

Pro stavbu funkčního vzorku této části větracího traktu bylo realizováno zjednodušení v oblasti přechodového prvku. Mezi ventilátorem a větracím kanálem salonu vozu je umístěn propojovací kanál, který má za úkol zmenšit počet přechodových průřezů. Další funkcí je již výše popsaná funkce tlumení vibrací pohlcením hluku směrem od ventilátoru. Problematika hluku je uvedena v kapitole 6.8.

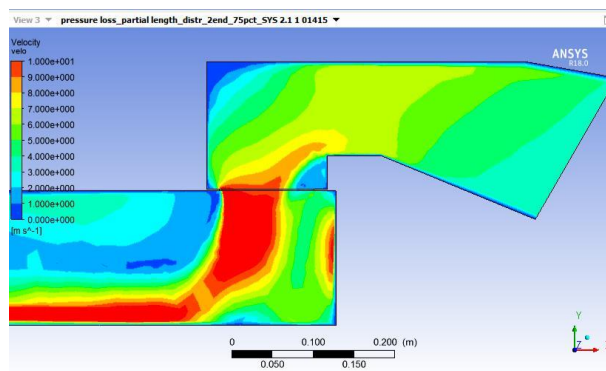
Následující obrázky zobrazují rychlosti a tlakové poměry při jednotlivých objemových průtocích. Pro 7 300 m³/h (100 % dodávaného množství vzduchu), 5 475 m³/h (75 % dodávaného množství vzduchu), 3 650 m³/h (50 % dodávaného množství vzduchu). Vůz metra je osazen dvěma větracími jednotkami. Ve výstroji jedné větrací jednotky jsou dva ventilátory a dva propojovací kanály, které se propojují s hlavním větracím kanálem vozu. Níže je uvedena simulace, na níž jsou zobrazené v řezu jednoho propojovacího kanálu, tj. 100% průtok vzduchu (1 825 m³/h), 75% průtok vzduchu (1 365 m³/h), 50% průtok vzduchu (912 m³/h).



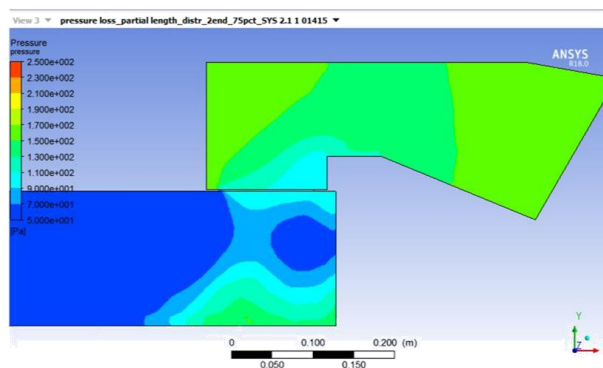
Obr. 61 Zobrazení rychlostí v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 100% průtok 2x 1825 m³/h



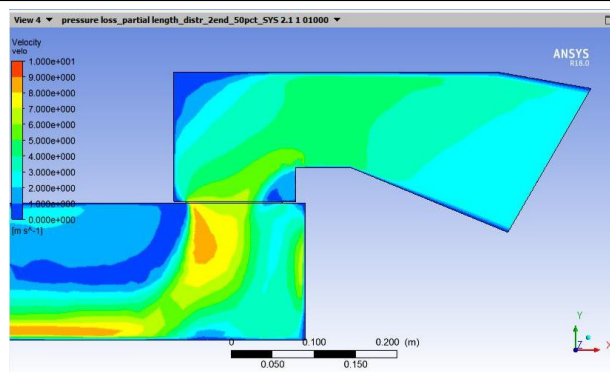
Obr. 62 Zobrazení tlaků v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 100% průtok 2x 1825 m³/h



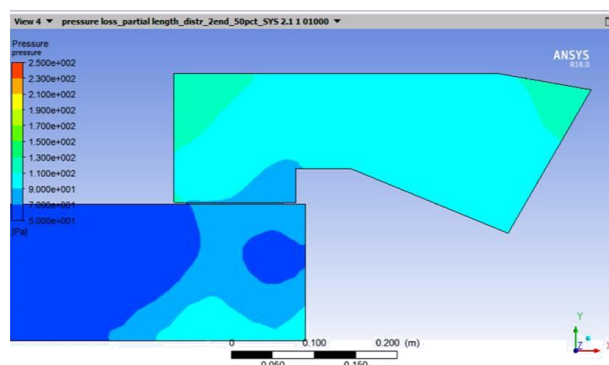
Obr. 63 Zobrazení rychlostí v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 75% průtok 2x 1368 m³/h



Obr. 64 Zobrazení tlaků v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 75% průtok 2x 1368 m³/h



Obr. 65 Zobrazení rychlostí v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 50% průtok 2x 912 m³/h



Obr. 66 Zobrazení tlaků v upravené části propojovacího textilního kanálu pro 50% průtok 2x 912 m³/h

Výsledky zjištěných tlakových ztrát při jednotlivých průtokových množstvích jsou uvedeny v následující Tab. 7. Tyto vypočtené tlakové ztráty odpovídají případu realizovaného funkčního vzorku větracího systému vozidla metra.

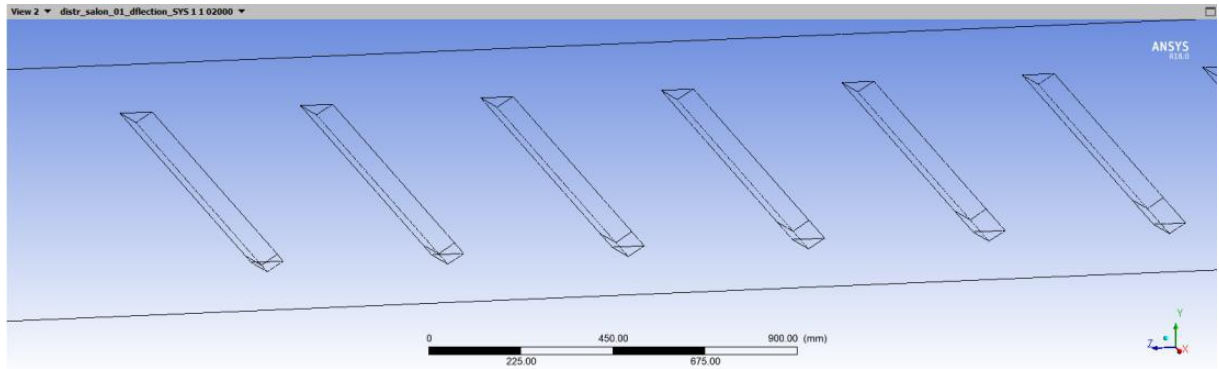
Tab. 7 Tlakové ztráty při jednotlivých průtocích

Průtokové množství vzduchu [m ³ /h]	Tlaková ztráta [Pa]
7 300	160
5 475	100
3 650	50

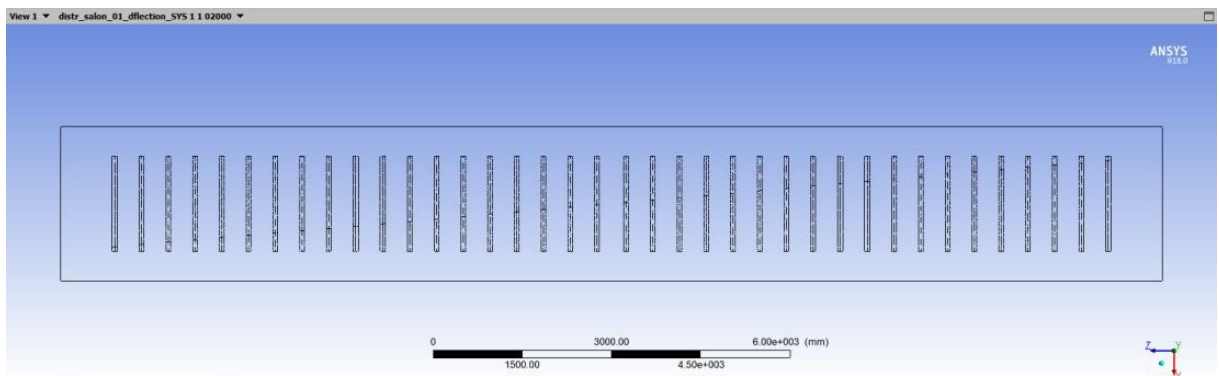
6.7.8 Simulace proudění v salonu vozu, distribuce perforací bez usměrňovacích prvků

Distribuce je zajištěna perforací, která neusměrňuje distribuovaný proud vzduchu a tím dochází k odklonu proudění ve směru osy vyústky. Do vozu je přiváděno 7 300 m³/h vzduchu. Na modelu pro CFD je distribuce nahrazena nakloněnými plochami s rovnoměrným přívodem vzduchu. Na níže uvedených simulacích rychlostního pole jsou patrné neprovětrané části salonu.

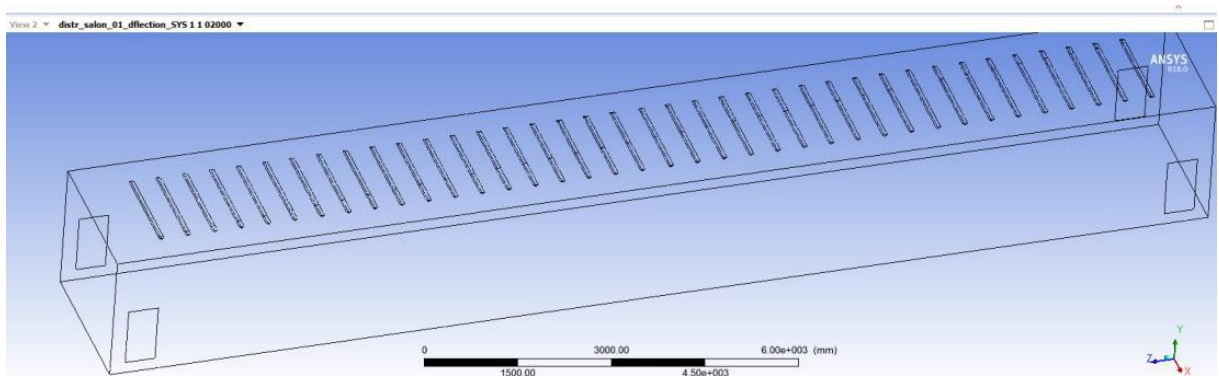
V rámci výpočtu CFD je nutné provést zjednodušení distribuce v salonu vozu – rovnoměrná perforace je nahrazena nakloněnými šterbinami. Šterbiny jsou navrženy tak, aby při stejném průtoku bylo zachováno rychlostní pole v salonu vozu a úhel zvolen tak, aby odpovídal odklonu reálné perforace.



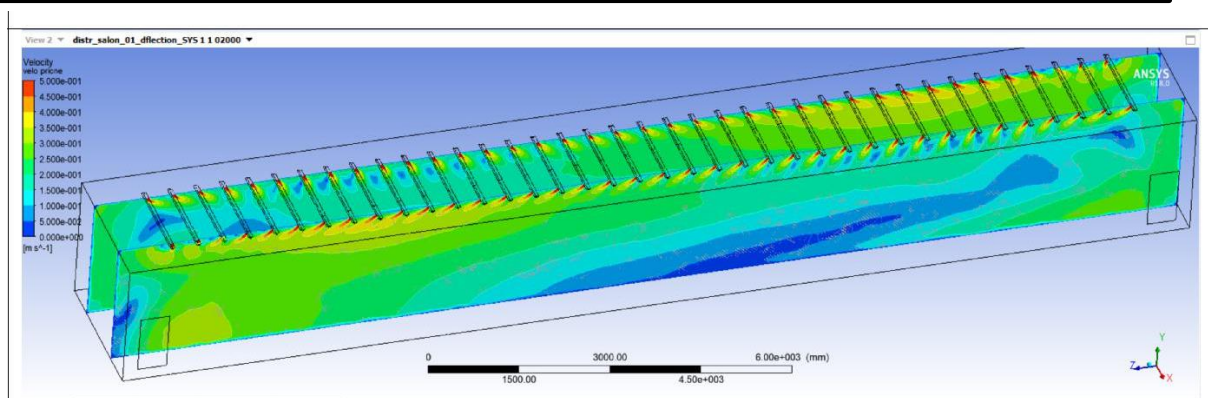
Obr. 67 Detail zjednodušení výpočtového modelu – nakloněné štěrbin



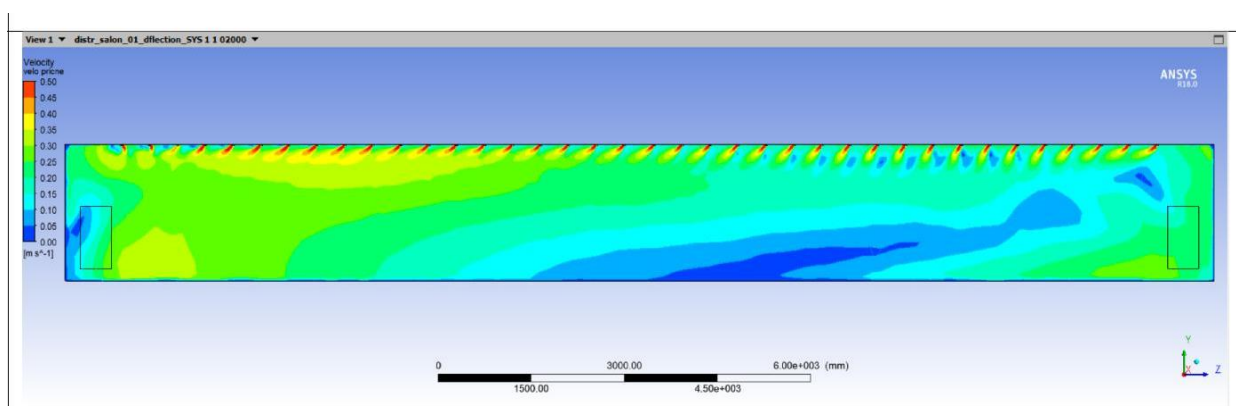
Obr. 68 Půdorysný pohled na rozmístění štěrbin bez usměrňujících kapes



Obr. 69 Izometrický pohled na rozmístění štěrbin v rámci zjednodušeného modelu pro CFD výpočet bez usměrňujících kapes



Obr. 70 Celkový pohled na rychlostní pole salonu vozu metra s použitím varianty větracího kanálu – perforace bez usměrňujících kaps

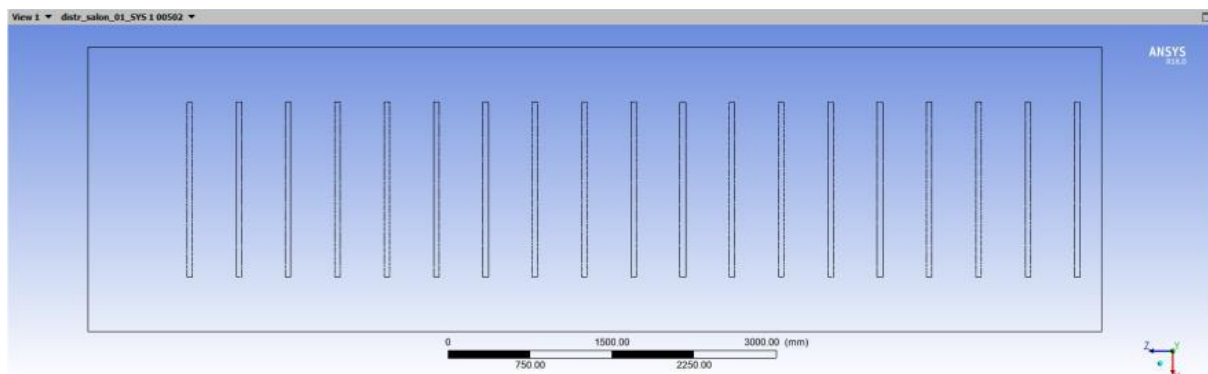


Obr. 71 Podélný řez rychlostního pole salonu vozu metra s použitím varianty větracího kanálu – perforace bez usměrňujících kaps

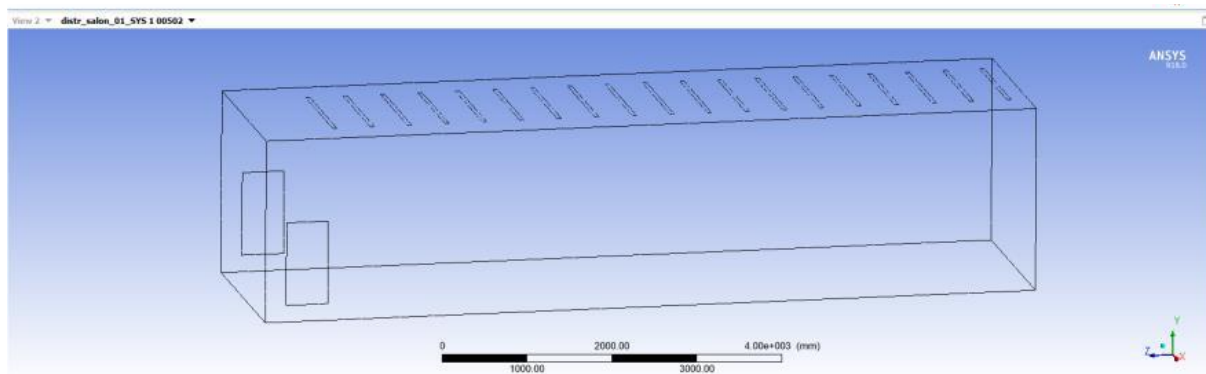
6.7.9 Simulace proudění v salonu vozu, distribuce perforací s usměrňovacími kapsami

V rámci této simulace je opět jako v předchozím případě přiváděno $7\ 300\ \text{m}^3/\text{h}$ vzduchu. Distribuce je zajištěna perforací s kapsičkami, které usměrňují distribuovaný proud vzduchu a zajišťují kolmý výstup proudu z vyústky. Na modelu pro CFD je distribuce nahrazena plochami s rovnoměrným přívodem vzduchu.

Zjednodušená distribuce v salónu vozu – rovnoměrná perforace je nahrazena štěrbinami. Štěrbiny jsou umístěny tak, aby při stejném průtoku bylo zachováno rychlostní pole v salónu vozu.

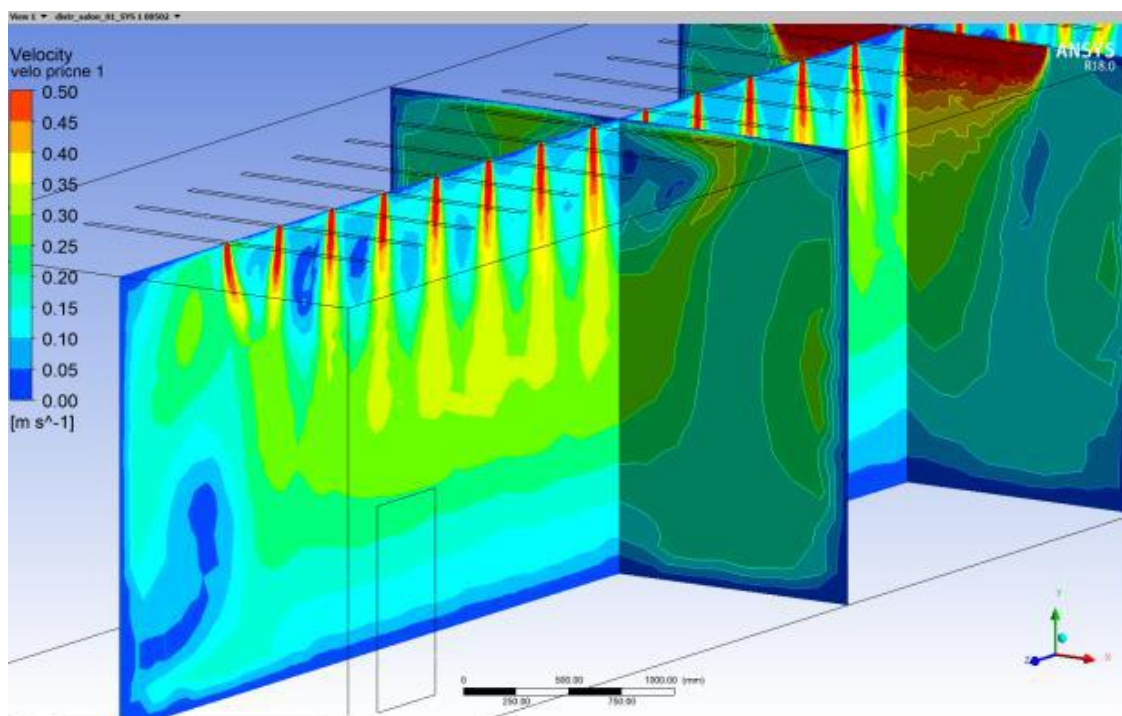


Obr. 72 Půdorysný pohled na zjednodušený model ve variantě s usměrňujícími kapsami (1/2 vozu)

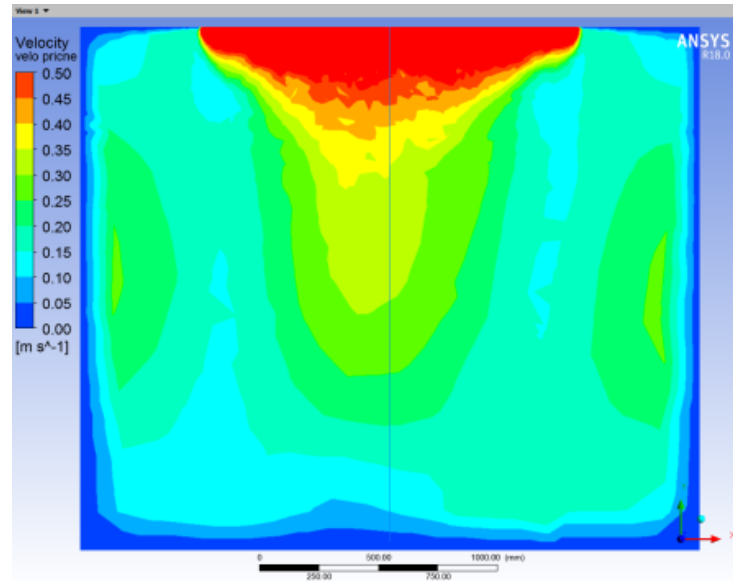


Obr. 73 Izometrický pohled na zjednodušený model 1/2 vozu s usměrňujícími kapsami

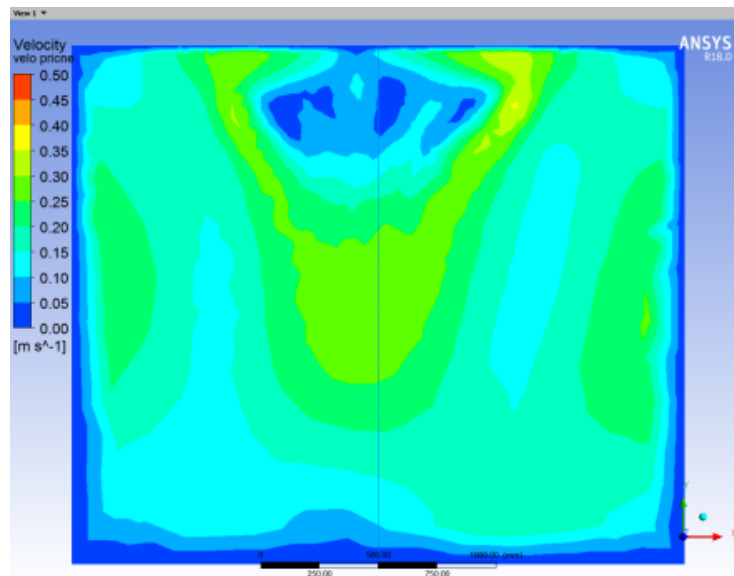
Celkový pohled na proudění může být ještě ovlivněn prodyšností podhledu, který je v rámci tohoto řešení uvažován. V rámci funkčního vzorku byly realizovány i vzorky podhledů, které v části vozu byly instalovány. Popis řešení a ovlivnění je řešen v kapitole 10. Simulace znázorněná na Obr. 74 zobrazuje celkový pohled na proudění v 1/2 vozu. Simulace znázorňuje i pohled dvou příčných řezů. Vzdálenosti příčných řezů od čela vozu jsou 4 250 mm a 6 750 mm.



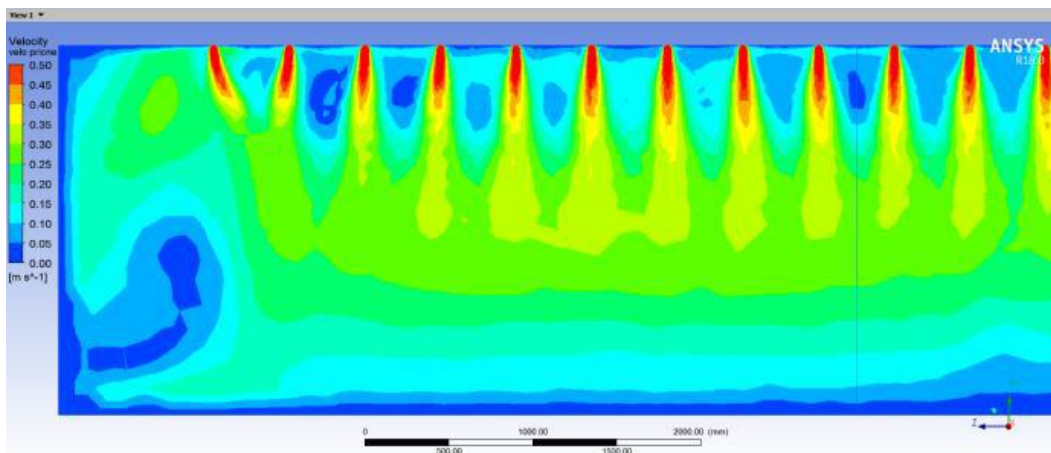
Obr. 74 Izometrický pohled na simulaci proudění v 1/2 salonu vozu (zobrazení podélného řezu a dvou příčných řezů)



Obr. 75 Příčný řez ve vzdálenosti 6 750 mm od čela vozu (v ose proudu)



Obr. 76 Příčný řez ve vzdálenosti 4 250 mm od čela vozu (mezi proudy)



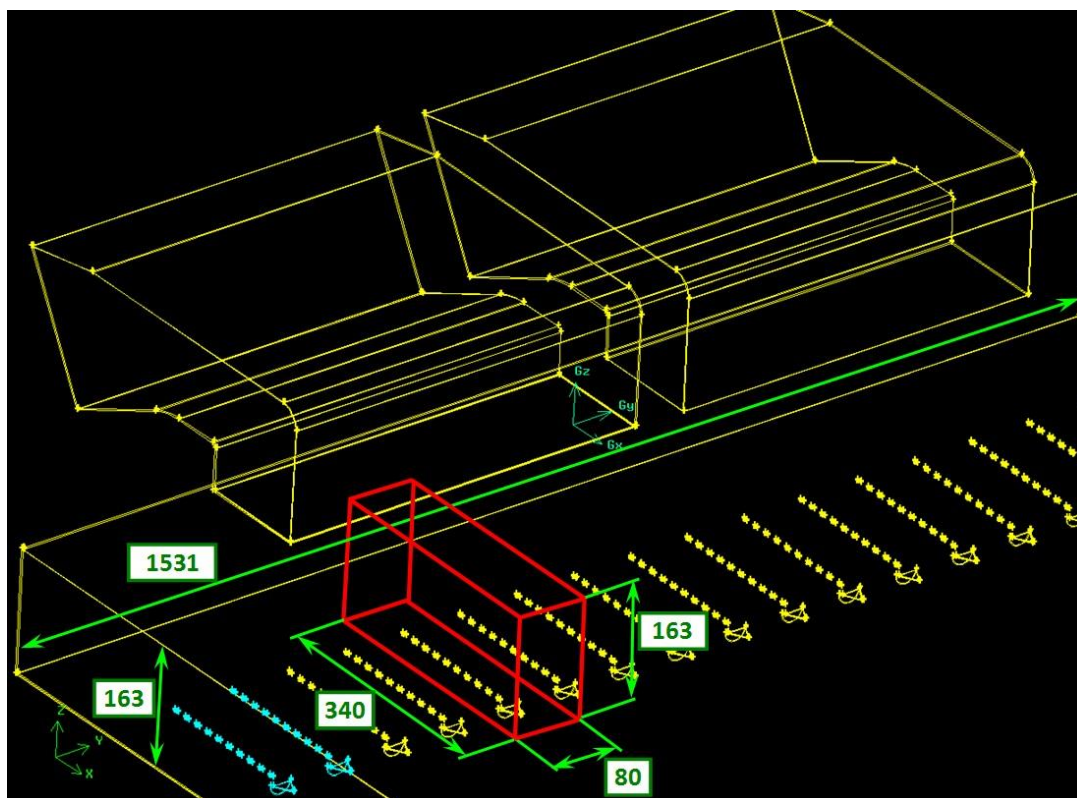
Obr. 77 Podélný řez salonem vozu (řez je veden v podélné ose vozu)

Na rychlostním poli v příčném řezu 6 750 mm od čela vozu je viditelné spojení proudu vzduchu z perforace a uprostřed je patrná nejvyšší rychlost. Rychlostní pole řezu vzdáleného od čela vozu 4 250 mm opět zobrazuje, že i v tomto případě dochází ke spojení proudu vzduchu z perforace a uprostřed je patrná nejvyšší rychlost. Podélný řez simulace na Obr. 77 zobrazuje rychlostní pole s rovnoměrnou distribucí vzduchu.

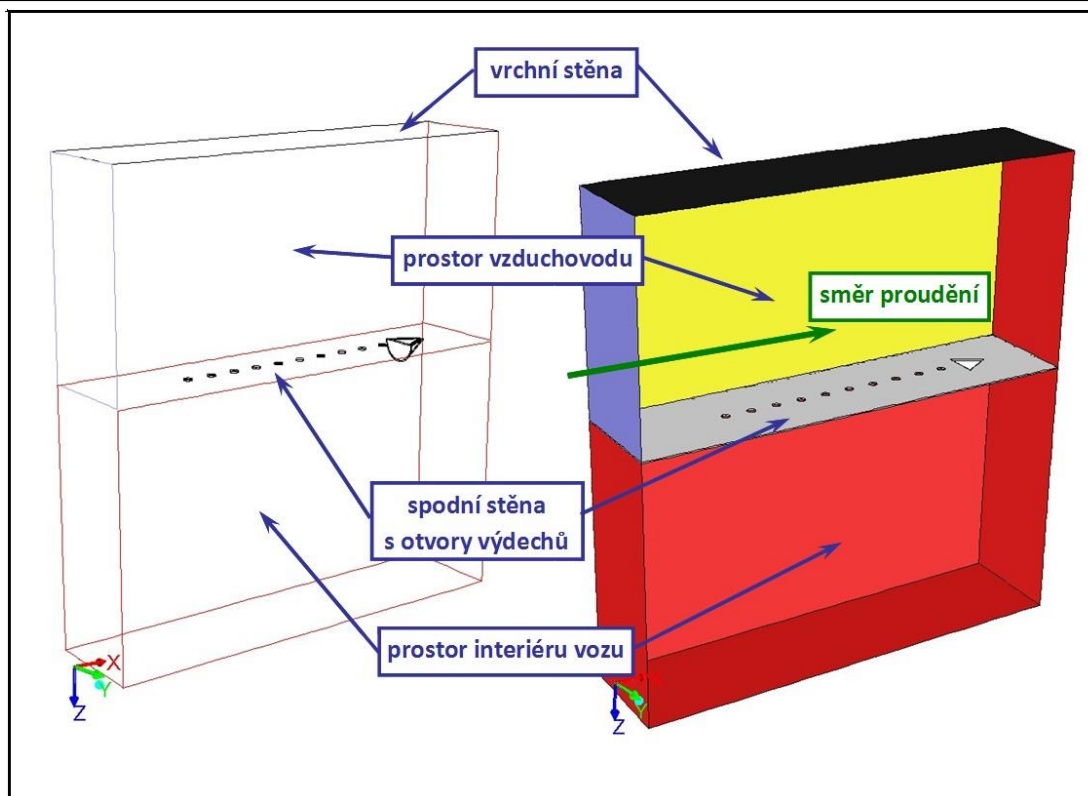
6.7.10 Simulace usměrnění proudění z větracího kanálu, distribuce s usměrňovací kapsou

Pro znázornění detailu distribuce vzduchu do prostoru salonu vozu byl vytvořen zjednodušený model vzduchového traktu. Model zahrnuje jednu sadu výstupních otvorů (perforace) s usměrňovací kapsou. Model byl pojat jako výřez části celého kanálu o stejné výšce (165 mm) jako kanál. Umístění modelu výřezu a jeho hlavní rozměry (tj. 163 x 340 x 80 mm) jsou ukázány na Obr. 78. Model byl celý vytvořen v preprocesoru Gambit CFD výpočetního systému.

Byla použita jedna sada deseti výdechových otvorů s průměrem 6 mm, s roztečí 20 mm. Sady výdechových otvorů mají mezi sebou příčnou rozteč 82 mm. Usměrňovací otvor je navržen s průřezem rovnostranného trojúhelníka (pro řešenou variantu funkčního vzorku byla strana zvolena délka strany trojúhelníka 25 mm) a usměrňovací klapka je kuželová (polovina komolého kužele). Pro řešenou variantu byl zvolen poloměr otvoru hrdla klapky 28 mm. Textilní stěna vzduchovodu byla v modelu uvažována tloušťky 1 mm. Celý model výřezu byl opatřen homogenní výpočetní sítí čtyřstěnných.

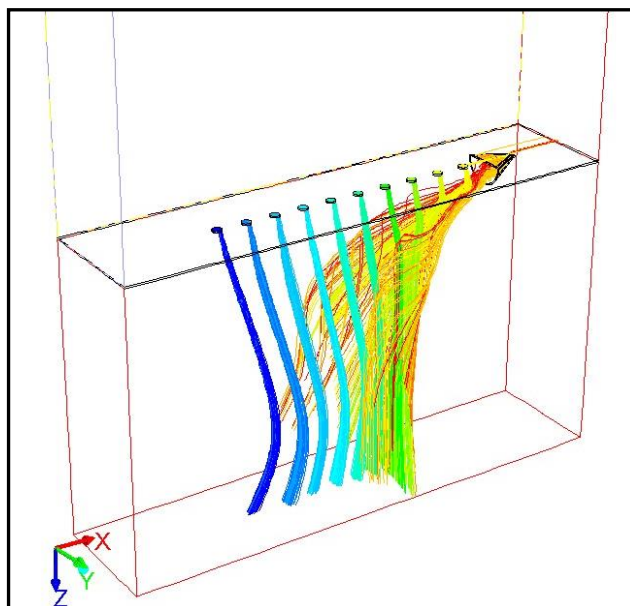


Obr. 78 Detail vstupní části stropního textilního kanálu vzduchovodu („drátový model“ s průhlednými stěnami) s vyznačenou polohou a hlavními rozměry modelu výřezu pro simulace (model výřezu vyznačen červeně) [11]



Obr. 79 Model výřezu kanálu vzduchovodu – vlevo průhledný „drátový“ model, vpravo model s naznačenými hraničními plochami pro zadání typů okrajových podmínek pro simulaci proudění [11]

Výsledky simulace ukazují situaci při proudění vzduchu z výdechových otvorů do prostoru interiéru vozu (na Obr. 80), tj. dosah proudů, rozptýlení úzkých paprsků a jejich vzájemnou „interakci“.



Obr. 80 Vývoj proudění a vzájemná interakce proudů vzduchu z jednotlivých výdechových otvorů ve stěně kanálu při proudění do prostoru interiéru vozu [11]

6.8 Hluk uvnitř kolejových vozidel

Jedním z dalších sledovaných parametrů uvnitř salonu vozu jsou hlukové emise. Evropská norma ČSN EN ISO 3381 stanovuje podmínky pro získávání reprodukováných a

porovnatelných výsledků měření hladin a spektra hluku uvnitř všech typů vozidel provozovaných na železničních kolejích nebo na jiných druzích pevných tratí, dále konvenčně nazývaných „vlak“ s výjimkou vozidel pro údržbu tratí za provozu.

V našem případě hrubé stavby konstrukce hybridní skříně vloženého vozu metra uvažujeme pouze stojící vozidlo a chod větracího zařízení. U stojících vozidel nesmí v zóně pohodlí celková úroveň hluku vytvářeného klimatizačním (větracím) zařízením, během jakýchkoliv provozních podmínek (s výjimkou přípravy vozidla), překročit stanovené hodnoty. V úvodu bylo uvedeno, že pro řešení funkční vzorek hybridní skříně vozidla metra se pohybujeme v kategorii B.

Tab. 8 Celková úroveň akustického tlaku dle ČSN EN 14750-1 [36]

Kategorie A	Kategorie B
63 dB	66 dB
>20 min	≤20 min
>3 min	≤3 min

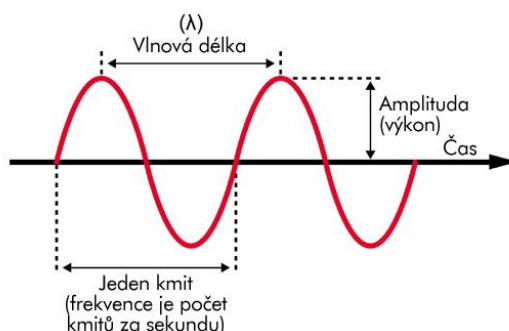
6.8.1 Aerodynamický hluk

Provoz řady technických zařízení a technologických procesů je doprovázen zvukem. Vzniká i při tvorbě interního mikroklimatu vozidel vzduchotechnickým zařízením a projevuje se jako hluk nebo chvění s negativním dopadem na stav prostředí.

Na zvuk, který se šíří vzduchem, můžeme pohlížet jako na změnu tlaku vzduchu v ovzduší. Je definován vlnovou délkou, frekvencí a intenzitou. Zvuk se šíří od zdroje, v našem případě od ventilátorové jednotky, do místa přijetí v prostředí prostoru salonu vozu. Když udeří energie do molekul v prostředí, způsobí, že molekuly vibrují sem a tam a vytvářejí vlnu, která přenáší zvukovou energii. Rychlost zvuku závisí na prostředí, kterým vlny procházejí, a je základní vlastností materiálu.

V salonech vozů se hluk šíří vzduchem, zařízením vzduchotechniky (zejména potrubím) a konstrukcemi (chvěním částmi připojenými k zařízením). Zvuk je akustický tok, který je doprovodným a přirozeným projevem přírodních dějů, technologických procesů a životního prostředí člověka. Hluk lze definovat jako zvuk, který působí rušivě či škodlivě zejména na člověka. Chvění lze charakterizovat jako projev zvukových vln v tuhých tělesech.

Vzhledem k tomu, že se zvuková vlna skládá z opakujícího se vzoru vysokotlakových a nízkotlakových oblastí pohybujících se přes prostředí, je někdy označována jako tlaková vlna. Zvukové vlny jsou často zobrazeny v grafech, viz Obr. 81, kde osa x je čas a osa y je tlak nebo hustota prostředí, přes které se zvuk šíří.



Obr. 81 Vlnová délka [32]

Tab. 9 Základní fyzikální veličiny v oblasti zvuku

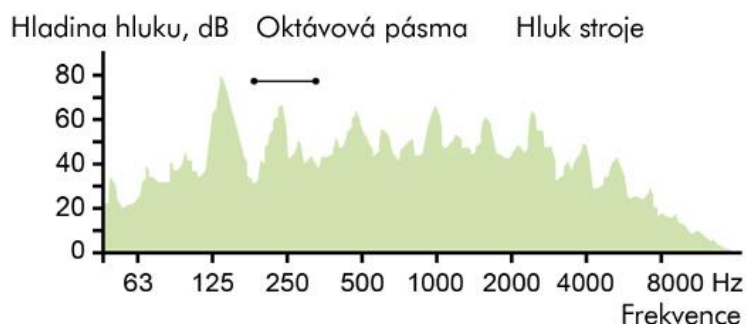
Fyzikální hodnota	Symbol	Jednotka	Vzorec
Frekvence	$f = 1/T$	Hz = 1/s	$f = c/\lambda$
Vlnová délka	Λ	M	$\lambda = c/f$
Časové období nebo trvání cyklu	$T = 1/f$	S	$T = \lambda/c$
Rychlost vlny	C	m/s	$c = \lambda \cdot f$

Vzhledem k široké škále hladiny akustického tlaku, kterou průměrné lidské ucho dokáže detekovat (0,00002 Pa – 200 Pa), je nepraktické používat lineární stupnici, proto se hladiny akustického tlaku obvykle vyjadřují pomocí logaritmické stupnice (označené jako dB). Výrazy dB a bel (= 10 dB) jsou ve skutečnosti čistě matematické pojmy a nejsou určeny zvlášť pro akustiku.

Bel je logaritmus pro vztah mezi dvěma množstvími akustického tlaku.

Lidské ucho je velmi citlivé a stačí jen nízká míra energie, aby slyšelo. Lidský sluch se pohybuje v oblasti mezi 0 dB (práh slyšení) a 120 dB (práh bolesti) o frekvencích mezi 20 – 20 000 Hz. Kmitočty, které se vyskytují pod oblastí sluchu, jsou známé jako infrazvuk, a kmitočty nad touto oblastí se nazývají ultrazvuk.

Zvuky nejsou obvykle čisté tóny, ale zahrnují různou zvukovou energii šířenou v širokém pásmu kmitočtů. Střední kmitočty jsou mezinárodně normované a níže uvedená tabulka na Obr. 83 ukazuje některá ze standardních frekvenčních pásem.



Obr. 82 Oktávová pásma v závislosti na hladině hluku a frekvenci [32]

31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k																
25	31.5	40	50	63	80	100	125	163	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k

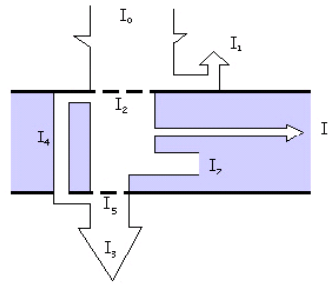
Obr. 83 Oktávová pásma [32]

Hlavními zdroji hluku a chvění ve vzduchotechnice jsou ventilátory, vzduchovody, elementy výtoku a sání vzduchu.

Zvukový dojem závisí na:

- hladině hluku,
- frekvenci,
- typu zvuku, pokud je stálý nebo přerušovaný.

Při dopadu zvukové vlny na překážku, např. na povrch stěny, se část zvukové vlny odrazí a část je překážkou pohlcena. Kromě toho může ještě část zvukové vlny projít do prostoru za překážkou. Energetická bilance při dopadu zvukové vlny na stěnu je znázorněna na Obr. 84.



Obr. 84 Energetická bilance při dopadu zvukové vlny na stěnu [10]

- I_1 – intenzita zvuku vlny odražené,
- I_2 – intenzita zvuku vlny pohlcené,
- I_3 – intenzita zvuku vlny vyzářené za stěnu celkem,
- I_4 – intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry,
- I_5 – intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru,
- I_6 – intenzita zvuku vlny, která je vedena ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí,
- I_7 – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo.

V souvislosti s návrhem vzduchotechnického zařízení ke tvorbě interního mikroklimatu je nutno navrhnout opatření minimalizující jeho negativní účinek na lidský organismus efektivními technickými prostředky a řešením minimalizující jeho projev. Spektrum hluku se popisuje základními akustickými veličinami jako jsou hladiny akustického tlaku.

Zdroje hluku ve vzduchotechnice lze rozdělit na zdroje hlavní, podružné a zdroje pozadí. Hlavní zdroj hluku ve vzduchotechnice tvoří ventilátor s elektromotorem. Celková hladina akustického výkonu ventilátoru L_p závisí na jeho vzduchovém výkonu V_p , tlakovém výkonu Δp a konstrukci. Pro radiální ventilátory lze hodnotu L_p určit z následující rovnice:

$$L_p = L_{sp} + 10 \log V_p + 20 \log 0,1 \Delta p_c$$

kde L_{sp} je hladina měrného akustického výkonu (dle použitého ventilátoru 68 až 80 dB).

Tab. 10 Parametry použitého ventilátoru viz Příloha č. 4

	Conn.	U	n	P_{ed}	I	LpA_{in}	LwA_{in}	qv	P_{fs}
		V	min ⁻¹	W	A	dB(A)	dB(A)	m ³ /h	Pa
1	Y	110	2355	356	3.24	73	80	3475	0
2	Y	110	2290	436	3.96	68	75	2895	250
3	Y	110	2260	465	4.20	62	68	2070	500
4	Y	110	2300	441	4.00	65	72	1320	650

Conn. = Connection · U = Supply voltage · n = Speed · P_{ed} = Power input · I = Current draw · LpA_{in} = Sound pressure level inlet side · LwA_{in} = Sound power level inlet side · qv = Air flow
 p_{fs} = Pressure increase

Podružné zdroje tvoří turbulentní proudění vzduchu potrubím při změnách profilu a rychlosti proudění. Hluk vzniká dále v kolenech, odbočkách i v koncových prvcích přívodu a odvodu vzduchu. Násobné zdroje se vytváří současným působením dvou nebo více zdrojů hluku o hladinách L_i . Společný účinek dvou zdrojů (na jednu větrací jednotku připadají 2 ventilátory – tj. 2 zdroje hluku) lze vyjádřit superpozicí dle následujícího vztahu:

$$L_{SO} = 10 \log(\Sigma 10^{0,1L_i})$$

Decibel je logaritmická hodnota, která nemůže být přičtena nebo odečtena stejným způsobem jako lineární hodnoty. Je tedy nutné vrátit se k lineárním jednotkám Pa (N/m^2), aby bylo možné provést aritmetiku a poté se vrátit do logaritmických hodnot.

Přirozený útlum tvoří dílčí útlumy v potrubí, kolenech, odbočkách, koncových elementech (vyústkách apod.), žaluziích, v uzavřeném prostoru a další. Hodnoty složek útlumu se zjišťují zpravidla teoreticko-experimentálními metodami. Nejvýznamnější přirozené útlumy v oblasti řešení funkčního vzorku větrání hybridní skříně vozidla jsou útlumy v přímém potrubí, útlumy v odbočce a útlumy změnou průřezu.

Přirozený útlum zvuku v přímém potrubí dosahuje malých hodnot a pro pozinkované potrubí se uvažuje pro všechny frekvence 0,1 až 0,2 dB na metr délky. Útlum ve filtrech vzduchotechniky dosahuje hodnot do 3 dB v celém frekvenčním pásmu. Útlum v místě změny průřezu dosahuje hodnot dle experimentálních údajů do 5 dB v celém frekvenčním pásmu. Útlum v pravoúhlé odbočce závisí na průřezu v oblasti kolene a na materiálu vnitřního vzduchovodu kolene.

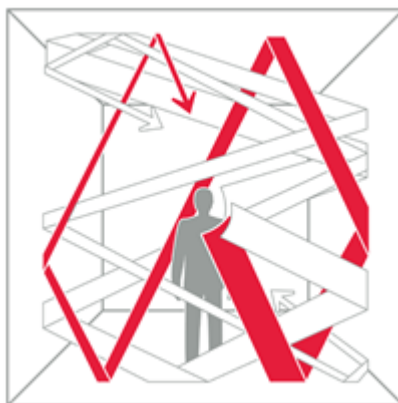
Celkový přirozený útlum je dán součtem dílčích složek dle vztahu:

$$D_p = \sum D_i$$

[10, 32]

6.8.2 Pohlcování zvuku

Prostorová akustika se zabývá chováním zvuku v prostoru. Pokud nejsou v salonu vozu téměř žádné zvukově izolační plochy (stěna, střecha a podlaha), bude se zvuk odrážet mezi povrchy a bude trvat dlouho, než zvuk zanikne. Tento případ byl realizován ve zkušebním funkčním vzorku skříně vozidla metra. Princip šíření hluku znázorňuje Obr. 85.



Obr. 85 Princip šíření hluku [32]

Ve skutečnosti jsou ve vstrojeném voze sedačky a další bariéry, proto lze uvažovat s další formou útlumu. Útlum hluku zajišťují tzv. elementy útlumu, které tvoří materiály a konstrukce pohlcující hluk. Ve vzduchotechnice se jedná o tlumiče hluku. Tyto prvky je třeba navrhnout tehdy, pokud přirozený útlum nestačí eliminovat hluk šířený ze zdroje – z ventilátoru. Pro návrh vycházíme z hodnoty požadovaného útlumu. Tlumičem nežádoucího hluku, v případě vzduchotechniky větrání vozidla metra, jsou tlumiče absorpční. Materiály a konstrukce pohlcující hluk jsou pórovité, vláknité či houbovité s malou objemovou hmotností. Jejich účinek neprůzvučnosti se zvyšuje různými konstrukčními úpravami pomocí materiálů s vysokým součinitelem poměrné pohltivosti. Vložený útlum hluku se definuje jako rozdíl hladin akustického hluku před a za tlumičem, dle vztahu:

$$D = L_{S0} - L_N$$

kde L_N představuje přípustnou korigovanou hladinu. Kladná hodnota D pak vyžaduje řešení útlumu hluku tlumičem.

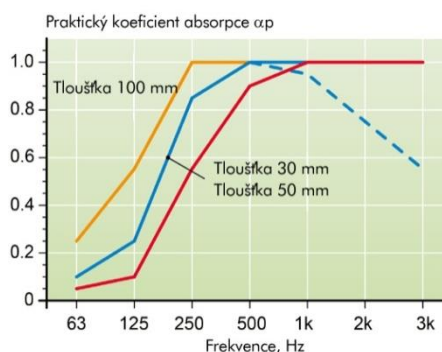
Zvukově izolační vlastnosti materiálu jsou vyjádřeny činitelem zvukové pohltivosti α (alfa) v závislosti na frekvenci. Alfa (α) se pohybuje od 0 do 1,00 (od celkového odrazu po celkové pohlcení).

Tlumiče hluku lze rozdělit do tří hlavních kategorií:

- porézní absorbéry,
- rezonanční absorbéry,
- samostatné absorbéry.

6.8.3 Porézní absorbéry

Příkladem porézního absorbéru zvuku je kamenná vlna. Teorie uvádí, že když zvuková vlna proniká porézním absorbérem (například minerální vlnou), pak se změní zvuková energie třením na teplo. Tloušťka materiálu má podstatný vliv na zvukově izolační vlastnosti materiálu. Vysoké frekvence (nad 500 Hz) jsou lépe pohlcovány minerální vlnou o tloušťce 30 - 50 mm. Náročnější je pohlcování zvuků o frekvencích nižších než 500 Hz. Zde je zapotřebí tlustší vrstvy kamenné vlny pro vytvoření lepší zvukové pohltivosti. Tloušťka materiálu může být nahrazena vzduchovým prostorem za akustickým stropem nebo stěnovým panelem pro zlepšení nízkofrekvenčního výkonu. Pro tyto zvukové absorbenty je velmi důležité neklást vzduchotěsné vrstvy na povrch, protože to významně snižuje jejich zvukově izolační vlastnosti. Vliv vzduchotěsné vrstvy je na Obr. 86 (čárkovaná čára).



Obr. 86 Vliv tloušťky vrstvy na koeficient absorpce [32]

V následující Tab. 11 naleznete několik praktických činitelů pohltivosti pro konkrétní materiály:

Tab. 11 Příklady činitelů pohltivosti konkrétních materiálů [32]

oktákové pásmo (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
sádrokarton	0.2	0.15	0.1	0.08	0.05	0.05
okna	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
50 mm deska z minerální vlny s pevným podkladem	0.2	0.65	1.0	1.0	1.0	1.0
100 mm deska z minerální vlny s pevným podkladem	0.45	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0

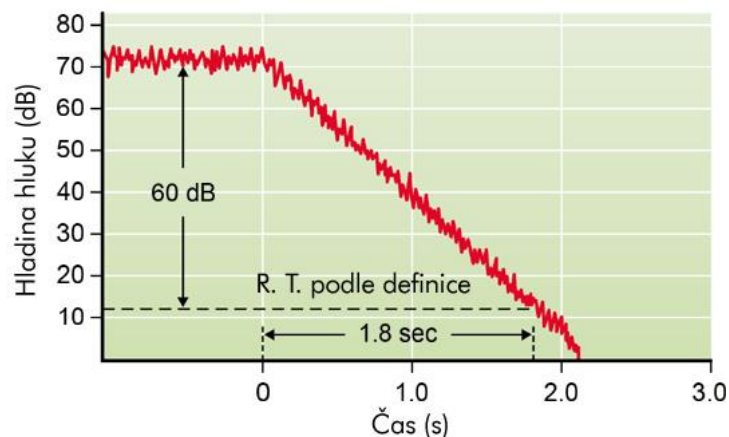
6.8.4 Rezonanční absorbéry

Rezonanční absorbéry se skládají z mechanického nebo akustického oscilačního systému. Může se jednat o membránové absorbéry – pevná deska s těsným vzdušným prostorem za ní. Pohlcování dosahuje svého maxima na rezonanční frekvenci. Pokud se vyplní dutina porézním materiálem jako je např. kamenná vlna, absorpce zvuku přes kmitočtový rozsah se rozšíří. [10]

6.8.5 Samostatné absorbéry

Do této kategorie řadíme objekty jako stoly, židle, osoby atd. Pohlcování těmito objekty se v Sabinově vzorci udává v m² na objekt.

Doba dozvuku v prostoru charakterizuje, jak dlouho v něm akustická energie zůstává. Tato doba je obvykle definována jako doba pro snížení akustické intenzity o faktor jednoho miliónu (60 dB). [10]



Obr. 87 Průběh dozvuku [32]

V malém prostoru (objem <1 000 m³), kde se zvukové pole šíří a průměrná pohltivost je menší než 0,3 m², lze použít empirický vzorec zvaný Sabinův vzorec pro výpočet doby dozvuku:

$$T_S = 0,16 \frac{V}{A}$$

kde:

T – doba dozvuku [s],

V – objem místnosti [m³],

A – (Σ plochy povrchů (S) * α) = absorpční plocha místnosti [m²],

kde α je činitel akustické pohltivosti (materiálová konstanta), který je frekvenčně závislý, takže tím se i doba dozvuku stává frekvenčně závislou. Je proto třeba určovat, pro jakou frekvenci provádíme výpočet doby dozvuku. Většinou jsou hodnoty α tabelovány pro frekvenci 500 Hz, takže i doba dozvuku z nich vypočítaná se vztahuje k této frekvenci. Někdy se také můžeme setkat s dobou dozvuku vypočítanou pomocí činitele akustické pohltivosti α_{NRC} (Noise Reduction Coefficient), získaného jako aritmetický průměr z činitelů akustických pohltivosti α pro frekvence 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz a 2 000 Hz.

Pokud dobu dozvuku měříme, máme možnost určovat doby dozvuku v jedno-oktávových frekvenčních pásmech nebo ve třetino-oktávových pásmech, čímž dostáváme dosti podrobnou informaci o době dozvuku v místnosti v závislosti na frekvencích. Měření ovšem můžeme provádět i širokopásmově (pro všechny frekvence souhrnně), čímž dostáváme dobu dozvuku,

kteřá je ovlivněna všemi frekvencemi. Vypočtené a naměřené hodnoty bychom tedy měli srovnávat vždy s ohledem na jejich frekvenční příslušnost.

Absorpční plocha místnosti A je součtem jednotlivých ploch povrchu S vynásobeným jeho činitelem pohltivosti α .

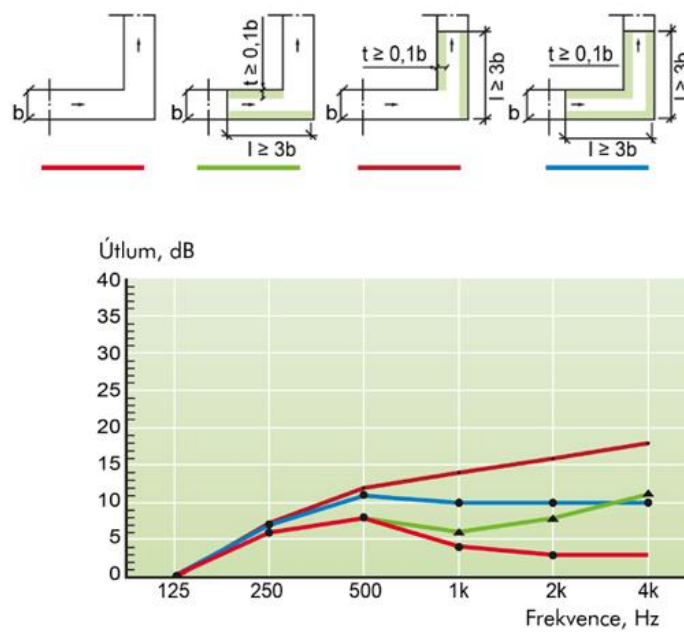
Optimální doba dozvuku pro prostor závisí na velikosti, materiálech a účelu využití prostoru (místnosti). Každý objekt umístěný uvnitř sledovaného prostoru může ovlivnit také tuto dobu dozvuku, včetně lidí a jejich věcí.

Pro lepší představu této teorie lze parametr doby dozvuku shrnout v praktickém případě z běžného života: místnosti, které jsou určeny k vzájemnému promlouvání mezi lidmi, vyžadují kratší dobu dozvuku. Naopak prostory, které slouží k hudebním účelům, potřebují dobu dozvuku delší. Delší doba dozvuku může být obtížná pro porozumění řeči. Pokud je na druhou stranu doba dozvuku příliš krátká, může utrpět tonální vyváženost a hlasitost.

6.9 Hluk vzduchotechniky

Ve většině prostorů (místností) je nejčastějším zdrojem rušivého hluku hluk mechanického systému nebo hluk vzduchotechniky. Zde jsou některé faktory, které je třeba zohlednit při navrhování různých technických zařízení pro budovy, potažmo pro salon kolejového vozu, dále jen pro „prostor“:

- umístění různých strojů a zařízení vzduchotechniky v prostoru by mělo být správně zvoleno již na začátku návrhu konkrétního prostoru,
- vzduchotechnické zařízení by mělo být pečlivě vybráno, aby mělo nízkou úroveň zvukových vstupů,
- všechny možné vibrace zařízení by měly být izolovány,
- hluk ventilátoru by měl být izolován tlumiči.



Obr. 88 Příklad hlukové izolace v obdélníkovém kanálu 500 mm [32]

6.10 Klasifikace zvuku

Schopnost materiálu absorbovat zvuk je obecně uváděna absorpčními koeficienty měřenými v různých frekvencích. V praxi to znamená, že jeden materiál má řadu různých absorpčních koeficientů na základě frekvencí. [10]

Při určování vhodné absorpční třídy pro každý produkt se výrobek nejprve změří podle EN ISO 354. Výsledkem této zkoušky je absorpční křivka, která uvádí absorpční koeficienty pro každou frekvenci použitou v testu.

Vážený činitel zvukové pohltivosti (α_w) je výsledkem srovnání mezi hodnotami činitele zvukové pohltivosti při standardních frekvencích a referenční křivky v souladu s ISO 11654. Všichni dodavatelé zavěšených podhledů v Evropě uvádějí α_w , jelikož je to metoda, která byla přijata jako norma pro označení CE pro zavěšené podhledy.

EN ISO 11654 se používá také k zařazení zvukově absorpčních materiálů na základě naměřených křivek absorpce do kategorií od A do E. Třída A má nejlepší schopnost pohlcovat zvuk a E má nejslabší. Způsob instalace spolu s vlastnostmi materiálů má velký vliv na výsledek.

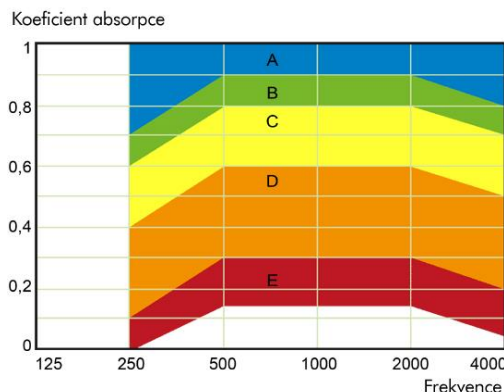
Tento klasifikační systém pomáhá konstruktérům porovnávat a vybírat vhodný absorpční materiál pro různé účely. Akustické desky založené na kamenné vlně patří obecně do nejlepší třídy A.

6.10.1 Příklad porovnávání různých produktů na základě jejich absorpční třídy

Produkt 1 má absorpční třídu A, produkt 2 má absorpční třídu C při stejném způsobu instalace. To znamená, že koeficient pohltivosti produktu 1 je o 50 % lepší než produktu 2. Úkolem je vytvořit hrací místnost pro mateřskou školu s dozvukem 0,6 sekundy. Po výpočtu množství potřebného absorpčního materiálu můžeme vidět, že rozměry místnosti jsou takové, že produkt 1 musí pokrýt celý strop místnosti a také velkou část zdí, aby se dosáhlo požadované doby dozvuku. Zvolíme-li produkt 2, musíme použít jedenapůlkrát větší množství produktu v porovnání s produktem 1 s cílem dosáhnout stejné doby dozvuku. V praxi situace vede k tomu, že k dispozici není dost montážní plochy pro produkt 2.

Tab. 12 Rozdělení do absorpčních tříd dle koeficientu absorpce [32]

α_w	Třída zvukové pohltivosti
1,00 – 0,95 – 0,90	A
0,85 – 0,80	B
0,75 – 0,70 – 0,65 – 0,60	C
0,55 – 0,50 – 0,45 – 0,40 – 0,35 – 0,30	D
0,25 – 0,20 – 0,15	E
0,10 – 0,05 – 0,00	Neklasifikováno



Obr. 89 Absorpční diagram [32]

7 Měření a ověření funkčnosti navrženého řešení v oblasti větrání

7.1 Měření tlaků a rychlostí ve ventilačním kanálu větraného vozu metra

V rámci této kapitoly je popsáno měření statických a dynamických tlaků vzduchu proudícího v rozváděcím tkaninovém potrubí.

Cílem měření bylo stanovit průtočné množství vzduchu za ventilátorem, tlakovou ztrátu kolene a rozložení rychlostí a průtoků vzduchu uvnitř kanálu.

7.1.1 Seznam použitých měřidel a vybavení

- Převodník tlaku NetScanner 9116
- Převodník tlaku Rosemount 3051S
- Ústředna VEGAMET 624
- Termočlánek typu K z NiCr-Ni
- cDAQ-9184 s vloženou kartou NI 9217
- Ethernet router
- Vyhodnocovací notebook

7.1.2 Popis měřicí techniky

Při měření byl použit šestnácti-kanálový diferenční tlakový převodník NetScanner s maximálním rozsahem 20 mm vodního sloupce. Na skeneru byly využívány dva diferenční kanály:

$$dp_c = p_c - p_{bar}$$

$$p_d = p_c - p_{stat}$$

Pomocí převodníku tlaku Rosemount 3051S a následné úpravě dat v ústředně VEGAMET 624 byl snímán barometrický tlak.

Absolutní tlak v každém měřeném místě se tedy dá spočítat jako:

$$p_{c,abs} = p_{bar} + dp_c$$

Signál z obou přístrojů byl poté pomocí sítě ethernet převeden do měřicího PC a dále zpracován. Snímání tlaků probíhalo s frekvencí 100 Hz po dobu 5 sekund. Celkem bylo tedy v každém měřicím bodě nasnímáno 500 hodnot tlaků z každého kanálu. Data byla statisticky

upravena tak, aby se z dalšího vyhodnocení vyřadily veškeré odlehlé hodnoty, které byly od průměrné hodnoty zjištěného tlaku dále, než $\pm 2x$ směrodatná odchylka. Poté byla data znovu přepočítána, zjištěn jejich nový průměr a teprve ten byl předán k dalšímu vyhodnocení.

Vlastní tlaky v průtočném kanálu byly měřeny pomocí standardní Prandtlovy sondy s průměrem dířku 5 mm. Sonda byla vždy natočena do proudu ve směru rovnoběžném se stěnou vozu, tedy do směru, ve kterém byl předpoklad, že vzduch bude proudit největší rychlostí. Pomocí sondy se tak přímo měřil dynamický tlak p_d .

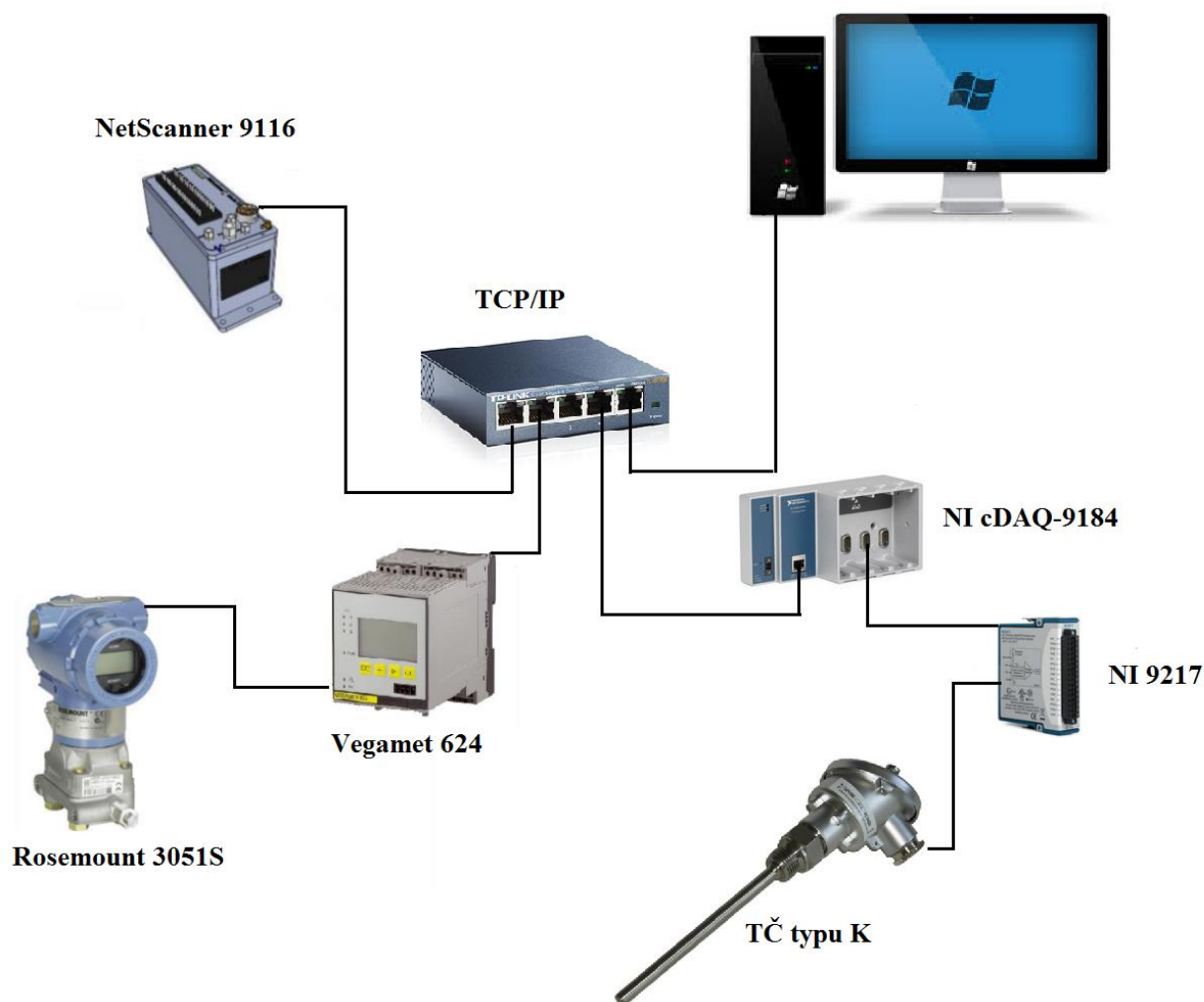
Pro určení hustoty vzduchu ze stavové rovnice ideálního plynu, byla měřena v blízkosti Prandtlovy sondy i teplota vzduchu pomocí termočlánku typu K NiCr-Ni. Signál z něj byl konvertován do digitální formy pomocí karty NI 9217 osazené v šasi cDAQ-9184. Signál byl dále vedený přes ethernet do měřicího PC.

Hustotu vzduchu v každém bodě lze pak jednoduše spočítat jako:

$$\rho = p_{c,abs} / (r * (t + 273,15))$$

Je nutné poznamenat, že teplota při měření byla po celou dobu vyrovnaná a držela se na úrovni 28 - 29 °C.

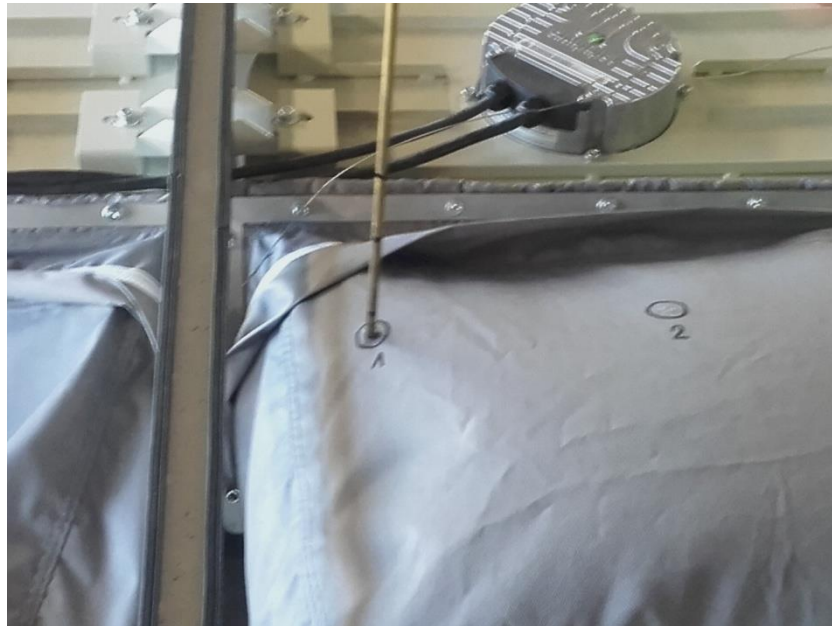
Měření diference tlaků bylo prováděno s absolutní nejistotou na úrovni $\pm 0,05$ % FS, tedy přibližně $\pm 0,1$ Pa. Nejistota měření teploty se pohybovala na úrovni $28 \pm 0,6$ °C



Obr. 90 Schéma propojení měřící techniky [22]

7.1.3 Měření za ventilátorem

Toto měření bylo provedeno pouze za jedním z radiálních ventilátorů. Nejdříve byl odebrán kryt ventilátoru, čímž se obnažila část rozváděcího tkaninového potrubí. Do tohoto potrubí byly proříznuty tři malé díry, aby bylo možné zasunout Prandtlovu sondu. Na Obr. 91 a Obr. 92 jsou fotografie tkaninového potrubí s měřicími otvory. Celkem byla provedena dvě měření s různě hustou sítí bodů. V obou případech byla sonda nasměrována v podélném směru vagonu. Vhodnější by bylo natáčecím zařízením směřovat sondu přímo proti proudu, k tomu však nebyly dostupné prostředky (rovněž montáž natáčecího zařízení by byla značně komplikovaná). Měření bylo provedeno postupně pro tři výkonové hladiny ventilátorů – 50 %, 75 % a 100 %.



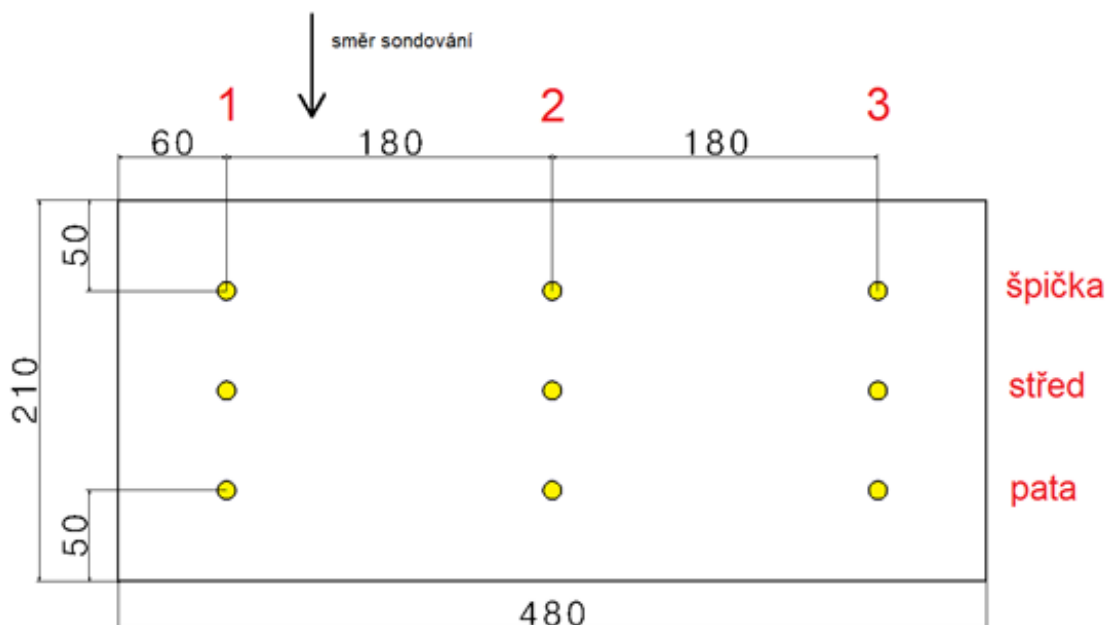
Obr. 91 Pohled na měřené místo v bodě 1 tkaninového potrubí v oblasti připojovacího kanálu (za ventilátorem)



Obr. 92 Pohled na měřené místo v tkaninovém potrubí v oblasti připojovacího kanálu (za ventilátorem)

Při prvním měření byly měřeny hodnoty veličin v celkem 9 bodech – ve 3 výškách v každém otvoru (v 1/4, 1/2 a v 3/4 výšky kanálu). Na Obr. 93 je vyobrazeno schéma rozmístění bodů v kanálu (z pohledu směrem k ventilátoru).

Při druhém měření bylo provedeno měření v 5 výškách, stále ale pouze ve 3 děrách. Měření bylo provedeno konkrétně v polohách 30 mm, 70 mm, 110 mm, 150 mm a 190 mm od horní stěny kanálu. Celkem tedy byly změřeny veličiny v 15 bodech.



Obr. 93 Schéma rozmístění měřených bodů za ventilátorem

7.1.4 Výsledky a vyhodnocení

V Tab. 13 jsou shrnuty naměřené veličiny pro první měření za ventilátorem (3 x 3 bodů). Kromě měřených hodnot diferencí celkového tlaku vůči atmosféře a hodnot dynamického tlaku je dopočtena rychlost proudění vztahem $\sqrt{2 \cdot p_d / \rho}$. Problémem nastává v tom, že v některých bodech byl dynamický tlak záporný (zřejmě dochází k recirkulaci proudění). To znamená, že v těchto místech vzduch proudí mimo rozsah měřicího úhlu sondy a měřené hodnoty jsou tak nevěrohodné. Pro tato místa byla rychlost z nezbytnosti alespoň stanovena jako $-\sqrt{2 \cdot (-p_d) / \rho}$. Tato místa jsou v tabulce označena červeně. Pro stanovení tlakové ztráty kolene je nutné stanovit průměrnou hodnotu difference celkového tlaku, jež činí 29,9 Pa pro 100% výkon, 19,8 Pa pro 75% výkon a 23,5 Pa pro 50% výkon. Tyto hodnoty jsou však zatíženy chybou v důsledku záporných měřených dynamických tlaků.

Tab. 13 Tabulka měřených hodnot za ventilátorem pro měření ve 3 x 3 bodech

Označení	Výkon	p_d [Pa]	Δp_c [Pa]	p_{bar} [Pa]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	w [m/s]
Otvor 1 nahore	100%	9,4	14,8	97375,4	28,55	1,124	4,089
Otvor 1 střed		33	39,2	97375,6	28,68	1,124	7,664
Otvor 1 dole		83,8	78,4	97376,6	28,75	1,123	12,214
Otvor 2 nahore		19,4	16,7	97377,8	28,65	1,124	5,876

Otvor 2 střed		-11,7	-18,7	97377,6	28,6	1,124	-4,563
Otvor 2 dole		-7,5	-21	97377,2	28,67	1,124	-3,653
Otvor 3 nahore		0,8	54,7	97377,4	28,7	1,124	1,193
Otvor 3 střed		-4,1	53,3	97377,8	28,74	1,124	-2,702
Otvor 3 dole		-4,2	51,9	97376,6	28,77	1,123	-2,734
Otvor 1 nahore		10,1	25	97371,9	28,43	1,125	4,238
Otvor 1 střed		39,5	48,2	97370,7	28,53	1,124	8,383
Otvor 1 dole		63	63,8	97370,9	28,54	1,124	10,587
Otvor 2 nahore		-1,6	2,3	97370,5	28,54	1,124	-1,687
Otvor 2 střed		-10,3	-11,6	97369,6	28,62	1,124	-4,281
Otvor 2 dole		-5,8	0,5	97367,8	28,64	1,124	-3,213
Otvor 3 nahore		-8,2	30,8	97368,2	28,67	1,124	-3,82
Otvor 3 střed		-6,1	4	97367,4	28,65	1,124	-3,295
Otvor 3 dole	75%	-8,4	15,6	97368,9	28,65	1,124	-3,867
Otvor 1 nahore		13,2	20,9	97362	27,99	1,126	4,842
Otvor 1 střed		30,5	38,9	97362	28,04	1,126	7,36
Otvor 1 dole		67,5	73,2	97361,5	28	1,126	10,949
Otvor 2 nahore		-3,2	1,7	97359,2	28,03	1,126	-2,384
Otvor 2 střed		8	6,9	97358,9	28,03	1,126	3,77
Otvor 2 dole		21,3	19,8	97357,7	28,03	1,126	6,151
Otvor 3 nahore		-2,3	31,9	97360,4	28,1	1,126	-2,021
Otvor 3 střed		-4,6	0,3	97360,4	28,1	1,126	-2,859
Otvor 3 dole	50%	-6	18,1	97359,9	28,16	1,125	-3,265

V Tab. 14 jsou uvedeny vypočtené hodnoty objemových průtoků vzduchu pro první měření. Průtoky jsou vypočteny z průměrných rychlostí pro jednotlivé výkony ventilátoru. Na první pohled je však patrné, že výsledné hodnoty jsou nesmyslné. Důvodem je právě to, že ve velké části bodů byly naměřeny záporné dynamické tlaky (v tabulce zapsáno červeným písmem).

Tab. 14 Tabulka objemových průtoků za ventilátorem pro měření ve 3 x 3 bodech

Výkon	w [m/s]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Objemový průtok [m ³ /s]
100%	1,932	210	480	0,219
75%	0,338			0,038
50%	2,504			0,284

V Tab. 15 jsou shrnuty naměřené veličiny pro druhé měření za ventilátorem (3 x 5 bodů). Opět je dopočítána rychlost proudění vzduchu. Místa se záporným naměřeným dynamickým tlakem jsou v tabulce opět vyznačena červeně. Průměrná hodnota difference celkového tlaku je v tomto případě 36,5 Pa pro 100% výkon, 27,0 Pa pro 75% výkon a 24,3 Pa pro 50% výkon. Tyto hodnoty jsou opět zatíženy chybou v důsledku záporných měřených dynamických tlaků.

Pro další vyhodnocení byla použita průměrná difference celkového tlaku z prvního a druhého měření – 33,2 Pa pro 100% výkon, 23,4 Pa pro 75% výkon a 23,9 Pa pro 50% výkon.

Tab. 15 Tabulka měřených hodnot za ventilátorem pro měření ve 3 x 5 bodech

Označení	Výkon	pd [Pa]	Δp_c [Pa]	pbar [Pa]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	w [m/s]
Otvor 1 30 mm odshora	100%	18,6	13,1	98376,4	30,58	1,128	5,742
Otvor 1 70 mm odshora		36,4	36,5	98385,2	30,59	1,128	8,033
Otvor 1 110 mm odshora		48,7	46,6	98385,4	30,7	1,128	9,293
Otvor 1 150 mm odshora		82,3	80,6	98387,6	30,6	1,128	12,079
Otvor 1 190 mm odshora		101,3	88,6	98386,5	30,62	1,128	13,401
Otvor 2 30 mm odshora		26,8	11,8	98386,4	30,57	1,128	6,892
Otvor 2 70 mm odshora		5,1	-17,6	98385,9	30,42	1,129	3,006
Otvor 2 110 mm odshora		-15,6	-25	98386,2	30,65	1,128	-5,259

Otvor 2 150 mm odshora		5,6	18	98387	30,42	1,129	3,15
Otvor 2 190 mm odshora		25,8	25,5	98386,2	30,38	1,129	6,76
Otvor 3 30 mm odshora		25,6	58,7	98387,1	30,46	1,129	6,735
Otvor 3 70 mm odshora		13,6	54,6	98385,8	30,42	1,129	4,909
Otvor 3 110 mm odshora		-6,1	53,6	98385,9	30,4	1,129	-3,287
Otvor 3 150 mm odshora		-8,2	51,7	98386	30,58	1,128	-3,813
Otvor 3 190 mm odshora		12,1	50,6	98386,6	30,38	1,129	4,63
Otvor 1 30 mm odshora	75%	2,8	20,8	98380,4	30,22	1,13	2,227
Otvor 1 70 mm odshora		20,9	46,5	98380,7	30,25	1,129	6,084
Otvor 1 110 mm odshora		58,1	75,5	98381,2	30,31	1,129	10,144
Otvor 1 150 mm odshora		58,1	70,5	98381,3	30,28	1,129	10,144
Otvor 1 190 mm odshora		52,1	50,6	98382	30,19	1,13	9,604
Otvor 2 30 mm odshora		-5,6	3,1	98379,5	30,18	1,13	-3,149
Otvor 2 70 mm odshora		-10,8	-15,4	98378,4	30,28	1,129	-4,373
Otvor 2 110 mm odshora		-15,7	10,6	98380,1	30,05	1,13	-5,271
Otvor 2 150 mm odshora		4,8	21,2	98379,2	30,18	1,13	2,915

Otvor 2 190 mm odshora		10,6	25,4	98378,9	30	1,13	4,331
Otvor 3 30 mm odshora		-5	25,4	98378,5	29,86	1,131	-2,974
Otvor 3 70 mm odshora		-7,4	15,4	98380,1	30,22	1,13	-3,62
Otvor 3 110 mm odshora		-9,4	20,6	98378,6	30,05	1,13	-4,079
Otvor 3 150 mm odshora		-15,4	28,7	98378,8	29,85	1,131	-5,219
Otvor 3 190 mm odshora		2,5	5,8	98379,3	29,8	1,131	2,102
Otvor 1 30 mm odshora	50%	6,7	5,4	98369,4	29,84	1,131	3,442
Otvor 1 70 mm odshora		11,7	22,8	98369,2	29,7	1,131	4,548
Otvor 1 110 mm odshora		0,7	34,9	98369,5	29,75	1,131	1,112
Otvor 1 150 mm odshora		28,5	72,1	98369,5	29,6	1,132	7,097
Otvor 1 190 mm odshora		64,1	85,8	98368,9	29,92	1,131	10,649
Otvor 2 30 mm odshora		-10,1	2,5	98368,8	29,87	1,131	-4,227
Otvor 2 70 mm odshora		8,2	8,1	98367,9	29,6	1,132	3,807
Otvor 2 110 mm odshora		26,7	25,4	98369,1	29,52	1,132	6,868
Otvor 2 150 mm odshora		21,3	18,7	98368,8	29,73	1,131	6,137
Otvor 2 190 mm odshora		6,1	5,5	98368,5	29,83	1,131	3,285

Otvor 3 30 mm odshora	-1,8	28,1	98367,8	29,74	1,131	-1,784
Otvor 3 70 mm odshora	-5,1	5,8	98369,8	29,56	1,132	-3,002
Otvor 3 110 mm odshora	-7,8	18,7	98368,6	29,87	1,131	-3,714
Otvor 3 150 mm odshora	-4,2	24,8	98367,5	29,61	1,132	-2,724
Otvor 3 190 mm odshora	3,7	5,6	98369,2	29,58	1,132	2,557

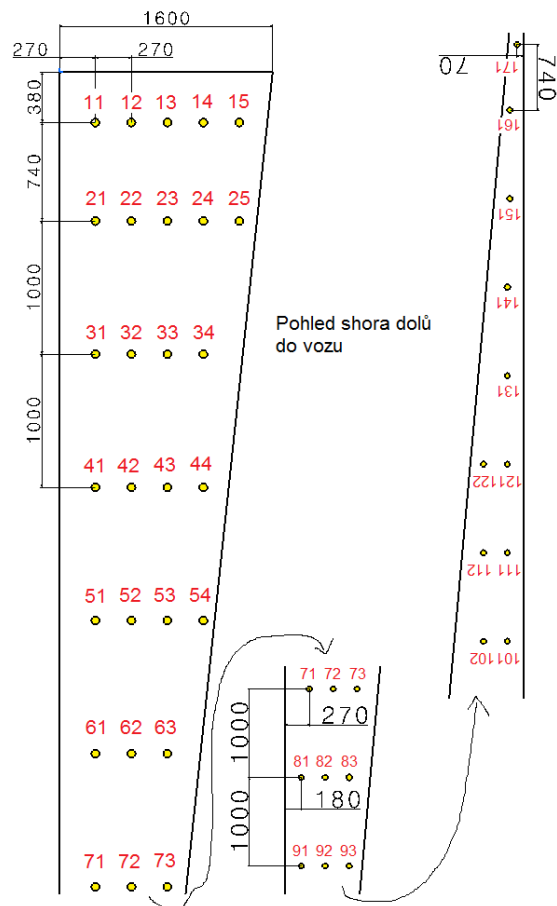
V Tab. 16 jsou uvedeny vypočtené hodnoty objemových průtoků vzduchu pro druhé měření. Ty jsou opět vypočteny z průměrných rychlostí pro jednotlivé výkony ventilátoru. Výsledné hodnoty jsou nesmyslné ze stejného důvodu jako v prvním měření.

Tab. 16 Tabulka objemových průtoků za ventilátorem pro měření ve 3 x 5 bodech

Výkon	w [m/s]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Objemový průtok [m ³ /s]
100%	4,818	210	480	0,548
75%	1,258			0,143
50%	2,27			0,259

7.1.5 Měření rychlostí ve tkaninovém potrubí

Toto měření bylo provedeno v mnoha bodech dvou trojúhelníkových kanálů tkaninového potrubí. Měřilo se pouze v jedné výšce, a to uprostřed výšky kanálu. Na Obr. 94 je v půdorysu vyobrazen tvar trojúhelníkových kanálů spolu s polohou všech měřených bodů (označení je ve formátu řada-pořadí otvoru, tedy například číslem 32 je označen druhý otvor od stěny ve třetí vyhodnocované řadě). Řady 1 až 9 byly měřeny na jednom kanálu a řady 10 až 17 na druhém, neboť se předpokládalo, že bude alespoň přibližně platit symetrie. K prostrčení Prandtlovy sondy do kanálu bylo využito již přítomných ventilačních otvorů ve stěně tkaninového potrubí viz Obr. 95. Sonda byla v každém bodě nasměrována v podélném směru vagonu. První řada měřených bodů se nacházela zhruba 380 mm za kolony přivádějícími vzduch z ventilátorů. Druhá řada otvorů byla umístěna s rozstupem 740 mm a další řady s rozestupy zhruba 1 000 mm. Měření bylo provedeno postupně pro tři výkonové hladiny ventilátorů – 50 %, 75 % a 100 %.



Obr. 94 Schéma rozmístění měřených bodů ve ventilačním kanálu



Obr. 95 Vyobrazení zasunutí Prandtlvy sondy do kanálu skrze otvory ve tkaninovém potrubí v bodě 81

7.1.6 Výsledky a vyhodnocení

V Tab. 17 jsou shrnuty naměřené hodnoty pro výkon ventilátoru 100 %, v Tab. 18 jsou shrnuty měřené hodnoty pro výkon ventilátoru 75 % a v Tab. 19 naměřené hodnoty pro výkon ventilátoru 50 %. Znovu je dopočítána rychlost proudění v jednotlivých bodech. Místa se záporným naměřeným dynamickým tlakem jsou opět vyznačena červenou barvou. V těchto měřeních však takovýchto míst bylo mnohem méně, než jich bylo při měření za ventilátorem. Z tabulky je patrné, že hodnoty celkového tlaku v řadě 1 jsou nižší než v ostatních řadách, což jde proti očekávání. Důvodem je zřejmě to, že tato řada se nachází těsně za kolenem ústícím do kanálu. Proudění tedy přiléhá ke spodní stěně kanálu a uprostřed kanálu, kde bylo prováděno měření, je tedy podtlak. Účinek kolene se začíná vyrovnávat až od druhé řady dále. Je rovněž patrné, že od 10. řady měřené hodnoty celkového tlaku nenavazují hladce na ty předchozí – důvodem je to, že 10. řada se již nacházela na druhém kanálu – úvaha symetrie tedy zřejmě nebyla vhodná. V Tab. 17 jsou uvedeny průměrné celkové tlaky v jednotlivých řadách, kde je patrné, že hodnoty celkového tlaku se od 3. řady dále téměř nemění (až na skok v 10. řadě, který ale vznikl kvůli uvažované symetrii). Hodnoty v 1. a 2. řadě jsou ovlivněny blízkostí ke koleni, a tak byl pro tlakovou ztrátu použit průměr tlaků z 3. až 9. řady. Průměr celkového tlaku ze 3. až 9. řady vychází přibližně 19,5 Pa pro 100% výkon, 18,0 Pa pro 75% výkon a 12,7 Pa pro 50% výkon. Odečtením těchto hodnot od celkových tlaků vyjde tlaková ztráta kolene 13,7 Pa pro 100% výkon, 5,4 Pa pro 75% výkon a 11,2 Pa pro 50% výkon.

Tab. 17 Tabulka měřených hodnot v trojúhelníkovém kanálu pro výkon ventilátoru 100 %

Označení	pd [Pa]	Δp_c [Pa]	pbar [Pa]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	w [m/s]
otvor 11	-0,4	1,3	97326,8	28,61	1,123	-0,844
otvor 12	10,3	15	97326,3	28,48	1,124	4,281
otvor 13	14,9	19,3	97326,4	28,48	1,124	5,149
otvor 14	-0,6	1	97325,4	28,51	1,124	-1,033
otvor 15	1,2	-2,8	97324,3	28,48	1,124	1,461
otvor 21	1	15,2	97324,6	28,5	1,124	1,334
otvor 22	2,3	15,5	97324,4	28,47	1,124	2,023
otvor 23	1,5	14,4	97325	28,51	1,124	1,634
otvor 24	7,1	20,3	97324,4	28,54	1,124	3,555
otvor 25	5,2	20,2	97324,9	28,56	1,124	3,042
otvor 31	1,2	18,1	97323	28,59	1,123	1,462
otvor 32	1,2	18	97320,8	28,61	1,123	1,462
otvor 33	2,1	18,5	97325,2	28,62	1,123	1,934
otvor 34	4,7	21,1	97321,6	28,72	1,123	2,893
otvor 41	1	18,4	97320,2	28,8	1,123	1,335
otvor 42	1,2	18,2	97319,9	28,8	1,123	1,462
otvor 43	3,2	20	97318,1	28,81	1,123	2,388
otvor 44	4,5	21,5	97319	28,83	1,122	2,832
otvor 51	0,9	18,3	97317,4	28,78	1,123	1,266
otvor 52	1,7	19	97315,8	28,65	1,123	1,74
otvor 53	3,6	21,1	97315	28,64	1,123	2,532
otvor 54	4,4	21,5	97313,8	28,63	1,123	2,799

otvor 61	1,2	18,3	97313,2	28,54	1,124	1,462
otvor 62	2,6	19,5	97312,6	28,56	1,123	2,151
otvor 63	3,6	20,6	97311,9	28,57	1,123	2,532
otvor 71	1	18,5	97311,3	28,65	1,123	1,334
otvor 72	2,6	19,9	97309,9	28,63	1,123	2,152
otvor 73	3,4	20,9	97308,3	28,65	1,123	2,461
otvor 81	1	18,3	97306,2	28,71	1,123	1,335
otvor 82	2,4	19,7	97308,5	28,73	1,123	2,068
otvor 83	2,7	20,4	97307,9	28,76	1,123	2,193
otvor 91	1,5	19,8	97307	28,77	1,123	1,635
otvor 92	0,9	19,5	97306,9	28,69	1,123	1,266
otvor 101	2,2	34,5	97298,4	28,22	1,125	1,978
otvor 102	2,4	35,1	97296,1	28,23	1,124	2,066
otvor 111	2	34,5	97297,7	28,24	1,124	1,886
otvor 112	1,8	34,2	97296,9	28,24	1,124	1,789
otvor 121	1,6	34,4	97293,7	28,22	1,124	1,687
otvor 122	1,5	34,3	97294,3	28,24	1,124	1,633
otvor 131	1,3	34,1	97296,7	28,19	1,125	1,52
otvor 141	1	33,7	97295,9	28,21	1,125	1,334
otvor 151	0,6	34	97293,2	28,23	1,124	1,033
otvor 161	0,5	33,9	97291,6	28,28	1,124	0,943
otvor 171	0,4	34,3	97291,2	28,31	1,124	0,844

Tab. 18 Tabulka měřených hodnot v trojúhelníkovém kanálu pro výkon ventilátoru 75 %

Označení	pd [Pa]	Δp_c [Pa]	pbar [Pa]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	w [m/s]
otvor 11	-0,5	0,1	97286,3	28,85	1,122	-0,944
otvor 12	1,5	4,5	97287,1	28,88	1,122	1,635
otvor 13	16,7	19,5	97287,4	28,85	1,122	5,456
otvor 14	3,1	2,8	97286,8	28,79	1,122	2,35
otvor 15	3,9	0,5	97285,4	28,8	1,122	2,636
otvor 21	1	12,9	97285,7	28,84	1,122	1,335
otvor 22	2	14	97284,6	28,87	1,122	1,888
otvor 23	1,9	13,8	97284,4	28,9	1,122	1,84
otvor 24	7,8	20,4	97285,5	28,9	1,122	3,729
otvor 25	5,1	19,2	97284,8	28,87	1,122	3,015
otvor 31	1	16,3	97284	28,83	1,122	1,335
otvor 32	1	16,3	97282,1	28,82	1,122	1,335
otvor 33	1,9	16,9	97281,9	28,78	1,122	1,84
otvor 34	4,8	19,9	97281,9	28,81	1,122	2,925
otvor 41	1,1	16,5	97282,2	28,82	1,122	1,4

otvor 42	1,3	17	97283,2	28,84	1,122	1,522
otvor 43	2,3	18	97281,2	28,86	1,122	2,025
otvor 44	4,3	19,3	97282,7	28,88	1,122	2,769
otvor 51	1,1	16,7	97280,4	28,81	1,122	1,4
otvor 52	1,9	17,4	97279,8	28,78	1,122	1,84
otvor 53	3,5	19	97279,4	28,72	1,122	2,497
otvor 54	4,4	20,1	97278,6	28,72	1,122	2,8
otvor 61	1,2	17,3	97277,5	28,68	1,123	1,462
otvor 62	2,1	18,3	97276,8	28,7	1,122	1,934
otvor 63	3,7	19,3	97277,1	28,74	1,122	2,568
otvor 71	0,8	16,9	97276,9	28,78	1,122	1,194
otvor 72	2,4	18,3	97275,7	28,75	1,122	2,068
otvor 73	3,5	19,2	97275	28,77	1,122	2,498
otvor 81	2,3	18,7	97270,1	28,88	1,122	2,025
otvor 82	2,6	18,8	97269,9	28,81	1,122	2,153
otvor 83	0,8	16,9	97269,6	28,83	1,122	1,194
otvor 91	0,6	17	97269,7	28,84	1,122	1,034
otvor 92	1,8	18,5	97269,1	28,85	1,122	1,791
otvor 101	1,8	25,8	97266,9	28,32	1,124	1,79
otvor 102	2,4	26,2	97265,1	28,27	1,124	2,067
otvor 111	1,6	25,7	97268	28,27	1,124	1,687
otvor 112	2,2	26,2	97265,8	28,27	1,124	1,979
otvor 121	1,3	25,2	97263,9	28,23	1,124	1,521
otvor 122	1	24,9	97264,6	28,24	1,124	1,334
otvor 131	1	24,9	97264,2	28,22	1,124	1,334
otvor 141	1	25,2	97263,1	28,26	1,124	1,334
otvor 151	0,7	25,2	97263,1	28,32	1,124	1,116
otvor 161	0,6	24,8	97263,7	28,33	1,124	1,033
otvor 171	0,4	24,8	97264	28,35	1,124	0,844

Tab. 19 Tabulka měřených hodnot v trojúhelníkovém kanálu pro výkon ventilátoru 50 %

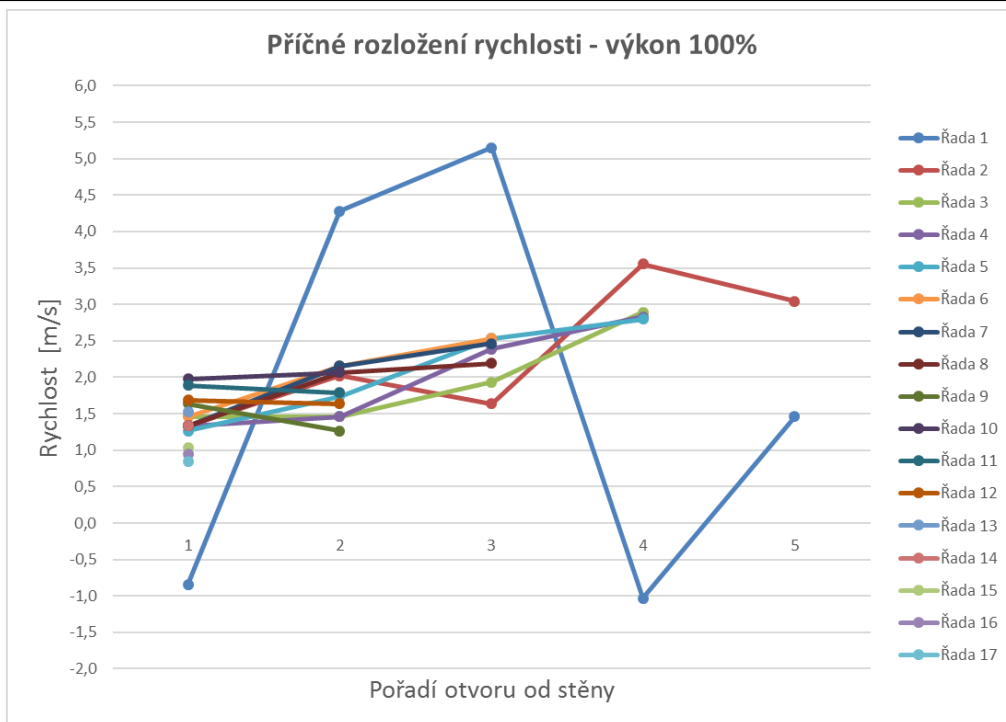
Označení	pd [Pa]	Δp_c [Pa]	pbar [Pa]	T [°C]	ρ [kg/m ³]	w [m/s]
otvor 11	1,1	0,5	97266,3	28,67	1,122	1,4
otvor 12	4	5,9	97264,8	28,68	1,122	2,67
otvor 13	14,8	15,4	97265,8	28,6	1,123	5,135
otvor 14	0,1	-0,7	97264,4	28,65	1,123	0,422
otvor 15	-0,6	-2,4	97265,2	28,63	1,123	-1,034
otvor 21	0,6	9,5	97264	28,58	1,123	1,034
otvor 22	1,3	10,3	97263,9	28,61	1,123	1,522
otvor 23	2,4	10,6	97263,9	28,58	1,123	2,068

otvor 24	5,9	14,4	97264,4	28,58	1,123	3,242
otvor 25	3,3	13	97265,4	28,57	1,123	2,424
otvor 31	1,2	12,1	97266,1	28,58	1,123	1,462
otvor 32	0,9	11,8	97265,3	28,59	1,123	1,266
otvor 33	1,5	12,1	97265,1	28,59	1,123	1,635
otvor 34	3,3	13,8	97265,5	28,65	1,123	2,425
otvor 41	0,9	11,8	97265,6	28,7	1,122	1,266
otvor 42	1,1	12,1	97265,8	28,68	1,122	1,4
otvor 43	2,3	13,2	97265,8	28,72	1,122	2,025
otvor 44	3,2	14,1	97266	28,7	1,122	2,388
otvor 51	0,9	12,1	97266,3	28,65	1,123	1,266
otvor 52	1,5	12,4	97267,9	28,66	1,123	1,635
otvor 53	2,7	13,7	97266,5	28,65	1,123	2,193
otvor 54	3,2	14	97266,2	28,66	1,123	2,388
otvor 61	0,8	12	97266,7	28,67	1,122	1,194
otvor 62	1,7	12,8	97266,7	28,64	1,123	1,74
otvor 63	2,8	13,7	97266,7	28,6	1,123	2,233
otvor 71	1	12,2	97265	28,54	1,123	1,335
otvor 72	1,8	12,7	97268,2	28,59	1,123	1,791
otvor 73	2,4	13,5	97268,1	28,59	1,123	2,068
otvor 81	0,8	12	97268,5	28,58	1,123	1,194
otvor 82	1,4	12,8	97268	28,58	1,123	1,579
otvor 83	2,1	13,2	97268,9	28,58	1,123	1,934
otvor 91	0,7	12	97270,2	28,55	1,123	1,117
otvor 92	1	12,6	97268,8	28,49	1,123	1,334
otvor 101	1,4	18,6	97267,4	28,24	1,124	1,578
otvor 102	2,1	18,2	97268,8	28,3	1,124	1,933
otvor 111	1,3	17,2	97267,6	28,53	1,123	1,522
otvor 112	1,7	18	97266,9	28,58	1,123	1,74
otvor 121	1,1	17,3	97266,9	28,59	1,123	1,4
otvor 122	1,3	17,7	97267,6	28,6	1,123	1,522
otvor 131	0,9	17,3	97266,1	28,59	1,123	1,266
otvor 141	0,7	17	97267,4	28,56	1,123	1,117
otvor 151	0,7	17,2	97266,4	28,57	1,123	1,117
otvor 161	0,5	17,2	97266,6	28,56	1,123	0,944
otvor 171	0,6	17,4	97266,1	28,57	1,123	1,034

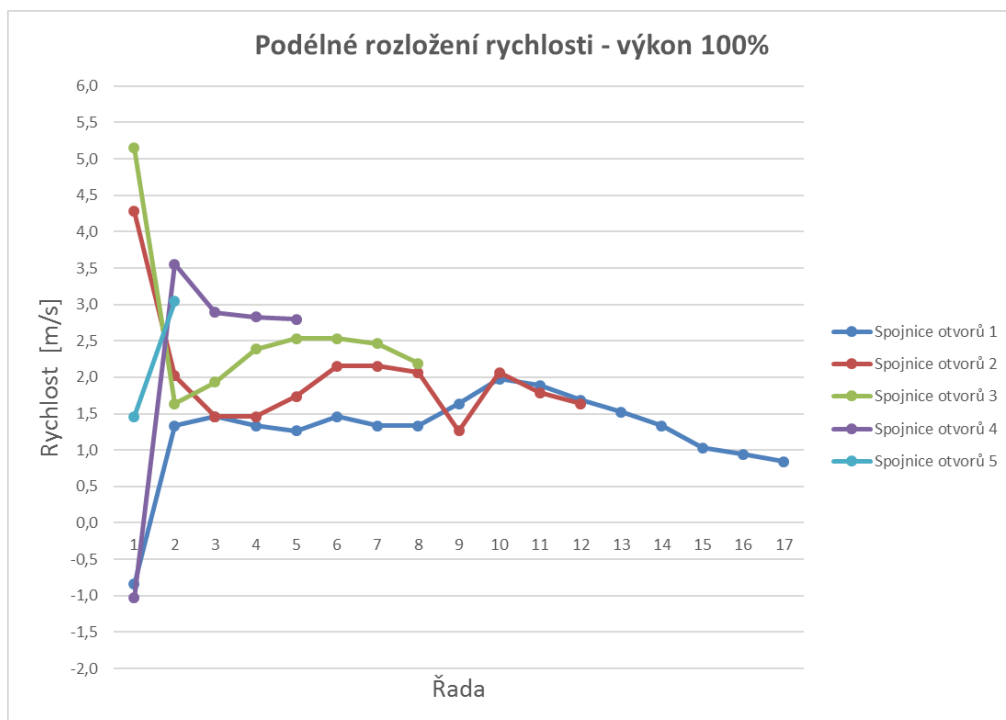
Tab. 20 Tabulka průměrných diferencí celkových tlaků v jednotlivých řadách

Řada	Průměrná Δp_c [Pa]		
	100% výkon	75% výkon	50% výkon
1	6,76	5,48	3,74
2	17,12	16,06	11,56
3	18,93	17,35	12,45
4	19,53	17,7	12,8
5	19,98	18,3	13,05
6	19,47	18,3	12,83
7	19,77	18,13	12,8
8	19,47	18,13	12,67
9	19,65	17,75	12,3
10	34,8	26	18,4
11	34,35	25,95	17,6
12	34,35	25,05	17,5
13	34,1	24,9	17,3
14	33,7	25,2	17
15	34	25,2	17,2
16	33,9	24,8	17,2
17	34,3	24,8	17,4

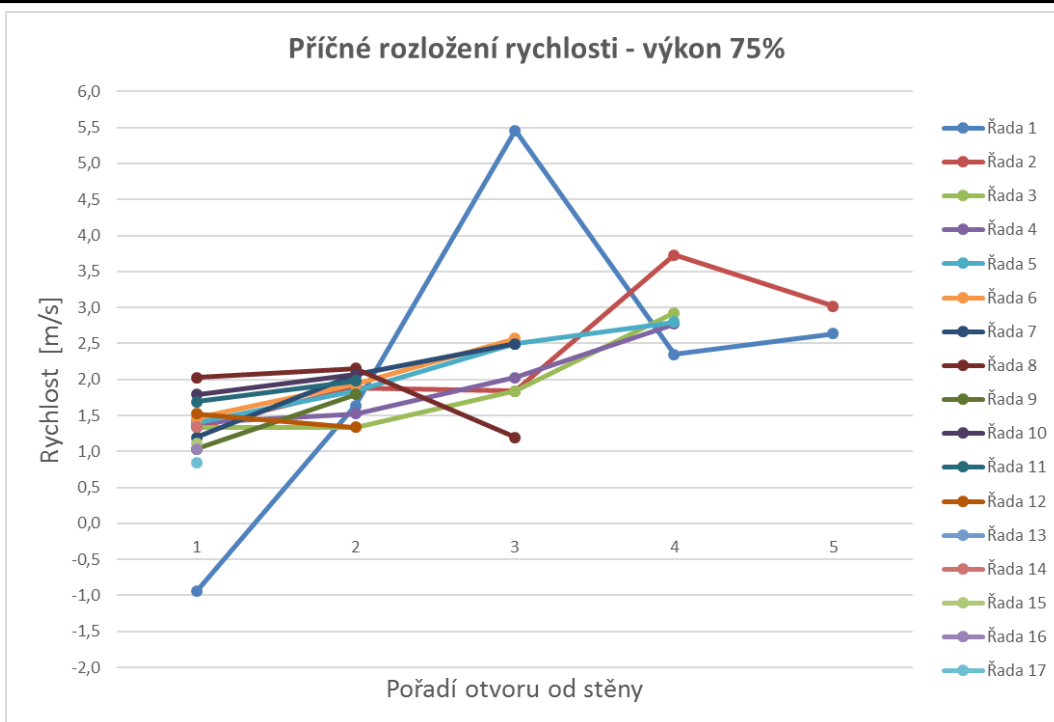
Na Obr. 96 až Obr. 101 jsou vyneseny grafy rychlostí v kanálu pro jednotlivé výkony ventilátoru. V příčných grafech jsou vyneseny průběhy rychlostí v řadách (tedy např. hodnoty v bodech 11, 12, 13, 14 a 15) a v podélných grafech jsou vyneseny průběhy rychlostí v za sebou ležících bodech ve všech řadách (tedy např. hodnoty v bodech 14, 24, 34, 44 a 54). Na podélných grafech lze opět pozorovat nespojitost kvůli nevhodně uvažované symetrii.



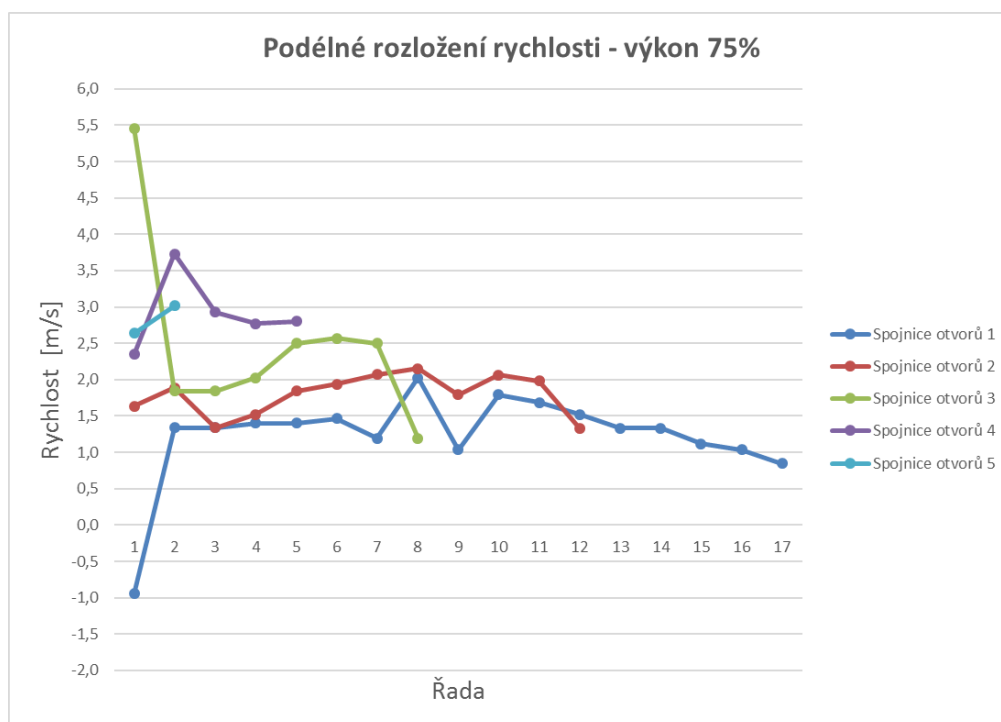
Obr. 96 Průběh rychlostí v kanálu – příčný řez, 100% výkon ventilátoru



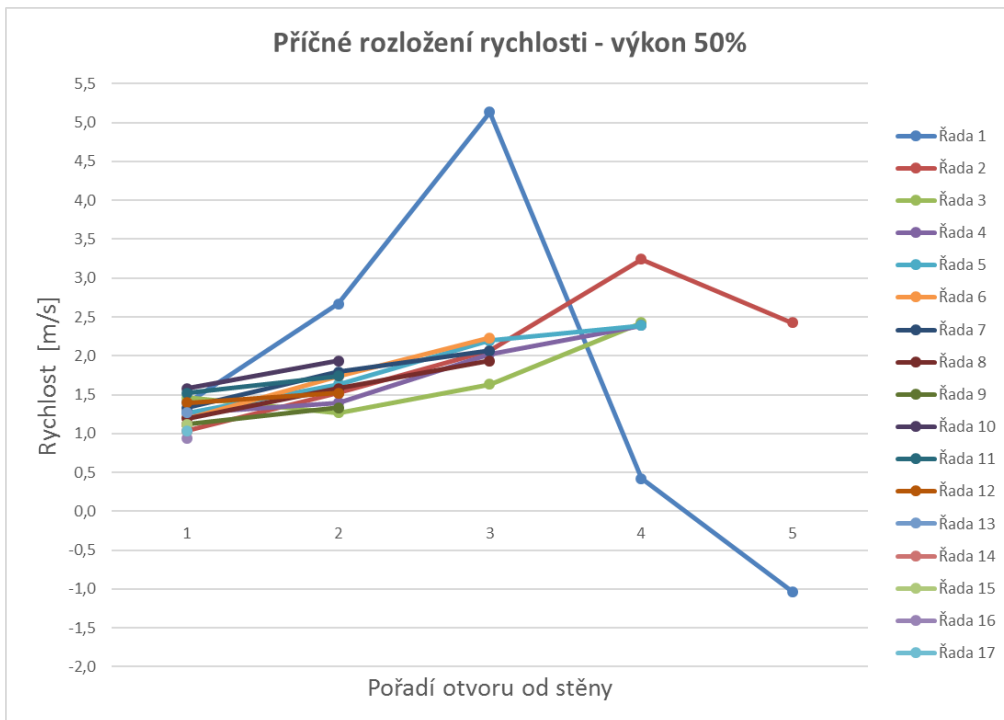
Obr. 97 Průběh rychlostí v kanálu – podélný řez, 100% výkon ventilátoru



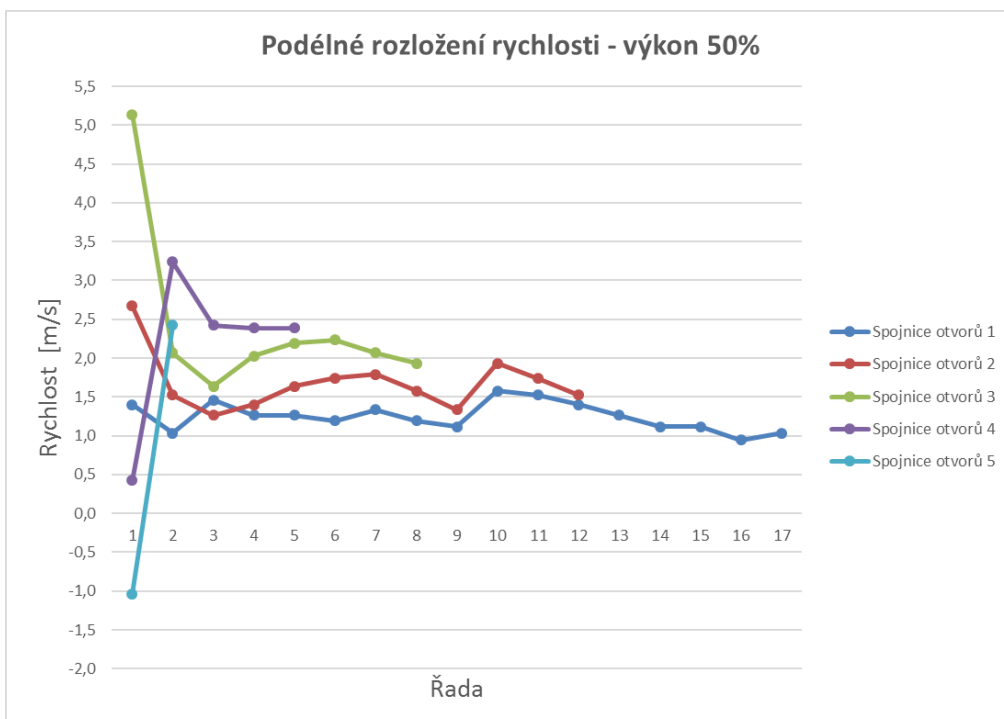
Obr. 98 Průběh rychlostí v kanálu – příčný řez, 75% výkon ventilátoru



Obr. 99 Průběh rychlostí v kanálu – podélný řez, 75% výkon ventilátoru



Obr. 100 Průběh rychlostí v kanálu – příčný řez, 50% výkon ventilátoru



Obr. 101 Průběh rychlostí v kanálu – podélný řez, 50% výkon ventilátoru

V Tab. 21 až Tab. 23 jsou uvedeny vypočtené hodnoty objemových průtoků vzduchu v jednotlivých řadách (příčných průřezech). Vycházelo se opět z průměrných rychlostí. Jelikož při tomto měření téměř nebyly měřeny záporné dynamické tlaky, výsledky jsou věrohodné, snad jen potenciálně s výjimkou 1. řady. Objemový průtok postupně v těchto řezech klesá, neboť vzduch je průběžně vháněn do prostoru pro cestující. Na Obr. 102 je pak vyobrazen

průběh objemových toků kanálem podél jeho délky. Na tomto grafu je opět viditelný skok v 10. řadě kvůli nevhodně uvažované symetrii.

Tab. 21 Tabulka objemových průtoků pro výkon 100 %

Řada	w [m/s]	Vzdálenost [mm]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Objemový průtok [m ³ /s]
1	1,803	380	178	1562	0,501
2	2,318	1120		1488	0,614
3	1,938	2120		1388	0,479
4	2,004	3120		1288	0,459
5	2,084	4120		1188	0,441
6	2,048	5120		1088	0,397
7	1,982	6120		988	0,349
8	1,865	7120		888	0,295
9	1,45	8120		788	0,203
10	2,022	9120		688	0,248
11	1,838	10120		588	0,192
12	1,66	11120		488	0,144
13	1,52	12120		388	0,105
14	1,334	13120		288	0,068
15	1,033	14120		188	0,035
16	0,943	15120		88	0,015
17	0,844	15860		14	0,002

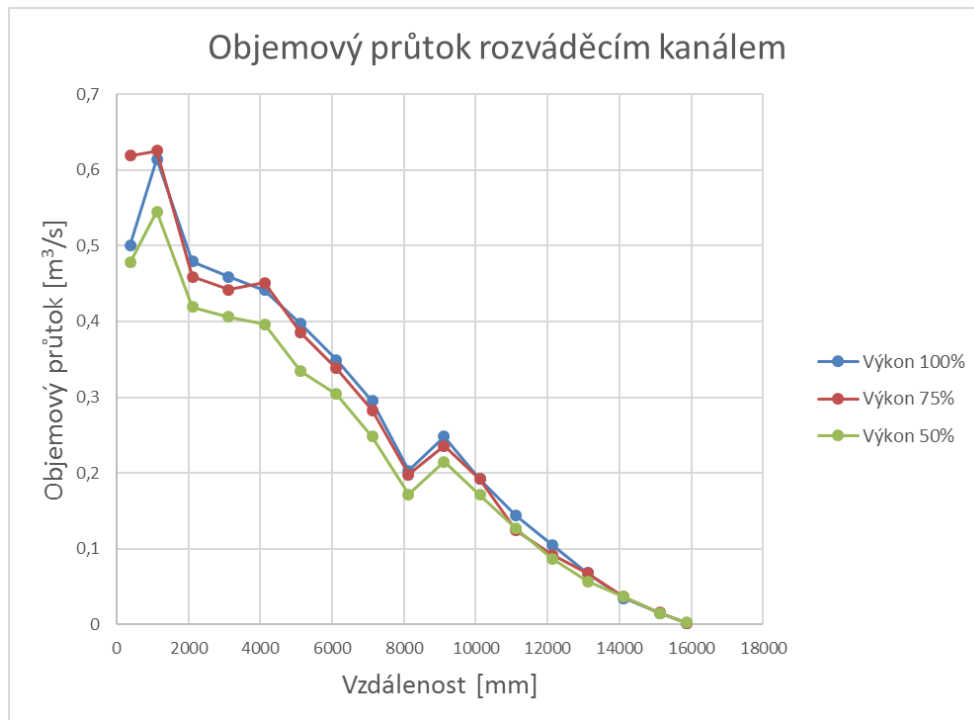
Tab. 22 Tabulka objemových průtoků pro výkon 75 %

Řada	w [m/s]	Vzdálenost [mm]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Objemový průtok [m ³ /s]
1	2,227	380	178	1562	0,619
2	2,362	1120		1488	0,625
3	1,859	2120		1388	0,459
4	1,929	3120		1288	0,442
5	2,134	4120		1188	0,451
6	1,988	5120		1088	0,385
7	1,92	6120		988	0,338
8	1,791	7120		888	0,283
9	1,413	8120		788	0,198
10	1,928	9120		688	0,236
11	1,833	10120		588	0,192

12	1,427	11120		488	0,124
13	1,334	12120		388	0,092
14	1,334	13120		288	0,068
15	1,116	14120		188	0,037
16	1,033	15120		88	0,016
17	0,844	15860		14	0,002

Tab. 23 Tabulka objemových průtoků pro výkon 50 %

Řada	w [m/s]	Vzdálenost [mm]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Objemový průtok [m ³ /s]
1	1,718	380	178	1562	0,478
2	2,058	1120		1488	0,545
3	1,697	2120		1388	0,419
4	1,77	3120		1288	0,406
5	1,871	4120		1188	0,396
6	1,723	5120		1088	0,334
7	1,731	6120		988	0,304
8	1,569	7120		888	0,248
9	1,225	8120		788	0,172
10	1,756	9120		688	0,215
11	1,631	10120		588	0,171
12	1,461	11120		488	0,127
13	1,266	12120		388	0,087
14	1,117	13120		288	0,057
15	1,117	14120		188	0,037
16	0,944	15120		88	0,015
17	1,034	15860		14	0,003



Obr. 102 Průběhy objemových průtoků v kanálu v závislosti na vzdálenosti od vstupu

7.1.7 Závěr měření tlaků a rychlostí ve ventilačním kanálu větraného vozu metra

Měření mělo za cíl stanovit průtočné množství vzduchu za ventilátorem, tlakovou ztrátu kolene a rozložení rychlostí a průtoků vzduchu uvnitř kanálu.

Průtočné množství vzduchu nebylo věrohodně stanoveno, vzhledem k přítomnosti velkého počtu míst s naměřeným záporným dynamickým tlakem, který sonda není z principu schopna správně měřit.

Na základě měření byla tlaková ztráta stanovena na 13,7 Pa pro 100% výkon, 5,4 Pa pro 75% výkon a 11,2 Pa pro 50% výkon.

Rozložení průtoků a rychlostí vzduchu uvnitř kanálu se podařilo stanovit, neboť se vycházelo z měřených dat, kde bylo přítomno jen minimum záporných dynamických tlaků (u všech výkonů jen v jednom, či dvou místech). Tato rozložení jsou nejpřehledněji zobrazena na Obr. 96 až Obr. 101 (rozložení rychlostí) a na Obr. 102 (rozložení průtoků). I zde je přítomna určitá nepřesnost, a sice že měřené hodnoty pocházejí ze dvou kanálů a jelikož rozložení se ukázalo jako nesymetrické, tak data na sebe hladce nenavazují (data nejsou chybná, jen popisují polovinu prvního kanálu a polovinu druhého kanálu).

Další měření by bylo vhodné provést s natáčecím zařízením pro Prandtlovu sondu. Rovněž by bylo vhodné měření provádět pro oba kanály samostatně, neboť asymetrie chování, ačkoliv je relativně malá, se zdá být nezanedbatelná.

7.2 Měření rychlostí a turbulencí v prostoru salonu vozu metra

Jelikož byl proměřovaný vagon určen hlavně k prvotnímu ověření konstrukce, nebyl zcela dokončen. Do rámu nebyla vložena skleněná okna, a byly namontovány pouze jedny dveře. Prázdné otvory pak byly vyplněny OSB deskami. Měření bylo prováděno při třech různých hladinách výkonu ventilátoru - 50 %, 75 % a 100 %. Výkon je pak ve skutečnosti měněn na základě obsazení vagonu – 100% výkon mírně převyšuje požadavek na větrání zcela zaplněného vagonu. Měření bylo však dle požadavku normy prováděno v prázdném vagonu.

Sondy byly umístěny do stojanu s nastavitelnou výškou v přísmce rovnoběžné se zemí, přičemž rozestup mezi sondami byl 0,65 m. Celková šířka vagonu je 2,6 m – sondy byly tedy umístěny v 1/4, 1/2 a 3/4 šířky vagonu, jak stanovuje norma. Měření bylo dle požadavků normy prováděno ve dvou výškových úrovních, konkrétně 1,1 m a 1,7 m.



Obr. 103 Stojan pro měření umístěný ve vagonu

7.2.1 Měřidla – Seznam měřidel a vybavení

- 3x anemometr Comfort Sense typ 54T33
- 54N90 Comfort Sense main frame s A/D převodníky
- Teleskopický stojan

7.2.2 Popis měřicí techniky

K měření rychlostí a turbulencí byla použita trojice anemometrů Comfort Sense typu 54T33 od firmy Dantec Dynamics. Jde o všesměrné sondy pro použití v klimatizačních a ventilačních systémech. Tyto sondy jsou schopny měřit současně rychlost, intenzitu turbulence a teplotu. Navíc jsou vhodné pro měření i nízkých hodnot rychlostí. Chyba v rozsahu rychlostí do 1 m/s je $\pm 2\%$ z měřené hodnoty a $\pm 0,02$ m/s. Vzorovací frekvence je 2 Hz. Výrobce poskytnuté údaje jsou shrnuty v Tab. 24.

Tab. 24 Údaje o anemometru typu 54T33 od firmy Dantec Dynamics

Velocity range	0,05 - 5 m/s, indicates up to 10 m/s
Accuracy	0 – 1 m/s; $\pm 2\%$ Of Reading $\pm 0,02$ ms 1 – 5 m/s; $\pm 5\%$ Of Reading 5 – 10 m/s; $\pm 10\%$ Of Reading
Time constant	<0,1 s
Frequency response (90 %)	2 Hz
Acceptance angle, relative to probe axis	0 – 1 m/s; $\pm 160^\circ$ 1 – 5 m/s; $+50^\circ$ to $+130^\circ$
Temperature reading range	-20 °C to 80 °C

Accuracy at velocities above 0,1 m/s, radiation excluded	0 °C to +45 °C; ±0,2 K -20 °C to +60 °C; ±0,3 K +60 °C to 80 °C; ±0,5 K
Storage Temperature	-30 °C to 80 °C
Overall probe length without cage	296 mm



Obr. 104 Fotografie stojanu s upevněnou trojicí sond

V průběhu měření byl stojan posouván podél osy vagonu s krokem o délce 1 m. Celkem byla měřena data v 9 polohách stojanu. Tím byla získána data pro jeden výkon ventilátoru a jednu výškovou hladinu pro 1/2 vagonu (druhá polovina nebyla měřena – byla předpokládána symetrie výsledků). Tato měření byla pak opakována pro druhou výškovou hladinu. Celkem tedy byly získány hodnoty rychlostí a turbulencí v 54 místech (9 míst každou sondou v jedné výškové hladině, 3 sondy a 2 výškové hladiny) rovnoměrně rozmístěných v prostoru 1/2 vagonu. Z těchto dat pak lze sestavit grafy průběhů veličin, jež dávají hrubou představu o průběhu rychlostí a intenzit turbulence ve vagonu.

V průběhu měření byla zaznamenávána data za dobu 60 sekund, přičemž pro vyhodnocení byly použity převážně průměrné hodnoty v čase. Po přesunutí stojanu do nové polohy, ještě před započítáním měření, bylo vyčkáno 120 s, se záměrem ustálit poruchy vyvolané manipulací.

7.2.3 Výsledky a vyhodnocení měření rychlostí a turbulencí

Časově průměrné hodnoty rychlostí se pohybovaly pro výkon 50 % v rozsahu přibližně od 0,1 m/s do 0,55 m/s, pro výkon 75 % v rozsahu přibližně od 0,09 m/s do 0,61 m/s a pro výkon 100 % v rozsahu přibližně od 0,13 m/s do 0,71 m/s. Časově průměrné rychlosti jsou shrnuty v Tab. 25 jsou pak pro úplnost uvedeny časově průměrné hodnoty intenzit turbulence. V těchto tabulkách jsou uvedeny měřené údaje při všech třech zmíněných hladinách výkonu ventilátoru – 50 %, 75 % a 100 %. V těchto tabulkách označení High značí vyšší výškovou hladinu (tedy 1,7 m výška), zatímco Low značí nižší výškovou hladinu (tedy 1,1 m výška). Číselný údaj doprovázející výškovou pozici udává vzdálenost od konce vagonu (rozměr je ve směru jízdy vagonu). „Příčná poloha“ udává vzdálenost v příčném směru od levé boční stěny vagonu, při pohledu ze středu vagonu směrem na jeho konec. Počátek souřadného systému je tedy levý spodní roh vagonu.

Tab. 25 Časově průměrné hodnoty rychlostí ve všech měřených místech vagonu

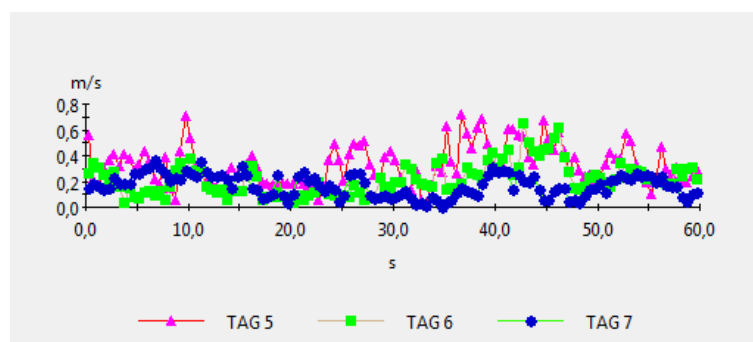
Výkon	50 %			75 %			100 %		
	0,65m	1,3m	1,95m	0,65m	1,3m	1,95m	0,65m	1,3m	1,95m
High 1m	0,15 m/s	0,15 m/s	0,14 m/s	0,23 m/s	0,21 m/s	0,15 m/s	0,33 m/s	0,22 m/s	0,17 m/s
High 2m	0,24 m/s	0,26 m/s	0,24 m/s	0,33 m/s	0,30 m/s	0,29 m/s	0,38 m/s	0,21 m/s	0,23 m/s
High 3m	0,21 m/s	0,43 m/s	0,53 m/s	0,31 m/s	0,41 m/s	0,61 m/s	0,28 m/s	0,51 m/s	0,63 m/s
High 4m	0,28 m/s	0,46 m/s	0,30 m/s	0,25 m/s	0,46 m/s	0,31 m/s	0,20 m/s	0,44 m/s	0,31 m/s
High 5m	0,30 m/s	0,45 m/s	0,27 m/s	0,19 m/s	0,48 m/s	0,28 m/s	0,16 m/s	0,53 m/s	0,28 m/s
High 6m	0,34 m/s	0,55 m/s	0,24 m/s	0,41 m/s	0,58 m/s	0,31 m/s	0,45 m/s	0,60 m/s	0,30 m/s
High 7m	0,47 m/s	0,54 m/s	0,24 m/s	0,55 m/s	0,61 m/s	0,30 m/s	0,62 m/s	0,71 m/s	0,30 m/s
High 8m	0,23 m/s	0,35 m/s	0,18 m/s	0,33 m/s	0,37 m/s	0,32 m/s	0,32 m/s	0,41 m/s	0,32 m/s
High 9m	0,31 m/s	0,53 m/s	0,24 m/s	0,34 m/s	0,46 m/s	0,47 m/s	0,38 m/s	0,54 m/s	0,41 m/s
Low 1m	0,12 m/s	0,15 m/s	0,10 m/s	0,10 m/s	0,14 m/s	0,09 m/s	0,14 m/s	0,18 m/s	0,13 m/s
Low 2m	0,18 m/s	0,19 m/s	0,13 m/s	0,22 m/s	0,17 m/s	0,18 m/s	0,31 m/s	0,19 m/s	0,23 m/s
Low 3m	0,19 m/s	0,46 m/s	0,34 m/s	0,24 m/s	0,36 m/s	0,41 m/s	0,26 m/s	0,43 m/s	0,38 m/s
Low 4m	0,27 m/s	0,39 m/s	0,28 m/s	0,25 m/s	0,42 m/s	0,47 m/s	0,34 m/s	0,38 m/s	0,39 m/s
Low 5m	0,29 m/s	0,35 m/s	0,20 m/s	0,37 m/s	0,43 m/s	0,20 m/s	0,35 m/s	0,43 m/s	0,22 m/s
Low 6m	0,37 m/s	0,28 m/s	0,25 m/s	0,29 m/s	0,46 m/s	0,26 m/s	0,35 m/s	0,35 m/s	0,36 m/s
Low 7m	0,35 m/s	0,15 m/s	0,26 m/s	0,42 m/s	0,40 m/s	0,23 m/s	0,40 m/s	0,60 m/s	0,24 m/s
Low 8m	0,30 m/s	0,43 m/s	0,19 m/s	0,17 m/s	0,42 m/s	0,43 m/s	0,31 m/s	0,37 m/s	0,62 m/s
Low 9m	0,21 m/s	0,25 m/s	0,27 m/s	0,32 m/s	0,19 m/s	0,45 m/s	0,39 m/s	0,18 m/s	0,49 m/s

Tab. 26 Časově průměrné hodnoty intenzit turbulence ve všech měřených místech vagonu

Výkon	50 %			75 %			100 %		
	0,65m	1,3m	1,95m	0,65m	1,3m	1,95m	0,65m	1,3m	1,95m
High 1m	76,20%	54,16%	46,08%	61,25%	51,04%	50,62%	53,82%	63,09%	54,74%
High 2m	59,96%	50,33%	44,91%	49,61%	53,25%	44,23%	57,92%	63,00%	43,91%
High 3m	57,88%	45,18%	41,94%	37,40%	55,22%	39,50%	47,46%	45,67%	43,96%
High 4m	41,75%	45,15%	55,65%	56,82%	47,66%	55,92%	58,52%	51,99%	60,93%
High 5m	64,20%	46,98%	31,16%	52,88%	49,66%	34,05%	67,73%	46,35%	38,85%
High 6m	54,53%	45,07%	25,29%	49,92%	45,65%	27,70%	50,48%	48,68%	29,47%
High 7m	47,97%	40,91%	30,67%	41,15%	46,32%	30,06%	46,69%	42,12%	41,72%
High 8m	40,80%	52,69%	46,79%	35,47%	38,38%	65,66%	36,46%	44,46%	63,66%
High 9m	25,80%	32,09%	54,32%	26,29%	27,63%	52,80%	27,39%	27,09%	56,00%
Low 1m	62,98%	62,82%	59,93%	76,58%	54,36%	71,60%	71,90%	47,45%	50,56%
Low 2m	60,84%	76,80%	45,73%	54,53%	66,47%	38,87%	59,70%	48,23%	40,38%
Low 3m	49,54%	40,73%	45,88%	45,01%	47,32%	48,18%	44,63%	44,29%	54,50%
Low 4m	41,91%	36,16%	49,71%	48,24%	35,75%	37,19%	34,59%	39,59%	53,66%
Low 5m	43,81%	53,05%	40,86%	35,77%	43,55%	50,41%	41,83%	50,93%	46,01%
Low 6m	35,52%	63,65%	37,91%	42,64%	48,10%	39,96%	38,62%	55,27%	32,54%
Low 7m	36,62%	64,97%	28,62%	32,57%	59,90%	49,95%	38,06%	45,36%	42,16%

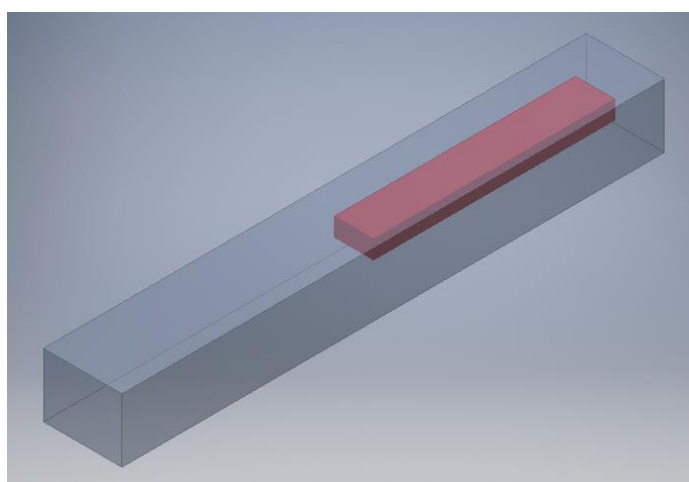
Low 8m	44,87%	47,24%	43,28%	50,96%	47,62%	56,97%	46,46%	33,68%	46,10%
Low 9m	53,15%	55,78%	60,01%	37,77%	49,45%	53,35%	33,97%	62,30%	54,73%

V rychlostech se objevuje značné kolísání hodnot, o čemž svědčí měřená intenzita turbulence, jež se v průměru (v čase i prostoru) pohybuje kolem 48 % a v některých místech dosahuje hodnot až téměř kolem 80 % (průměr v čase). Na změnách intenzity turbulence se podílejí nejen fluktuace rychlosti, ale i značné kolísání základní rychlosti. Z uvedených tabulek je patrné, že v místech o nejnižší základní rychlosti jsou nejvyšší intenzity turbulence. Na Obr. 105 je ukázka měřených hodnot rychlosti v jedné poloze stojanu (ze 3 sond). Pravá polovina diagramu naznačuje periodické poruchy proudění o frekvenci řádově 0,1 Hz. Tyto poruchy jsou pravděpodobně způsobeny pulzacemi tkaninového potrubí. Grafy pro všechna měřená místa jsou pak uvedeny v příloze.



Obr. 105 Ukázka průběhu rychlostí v první měřené poloze pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)

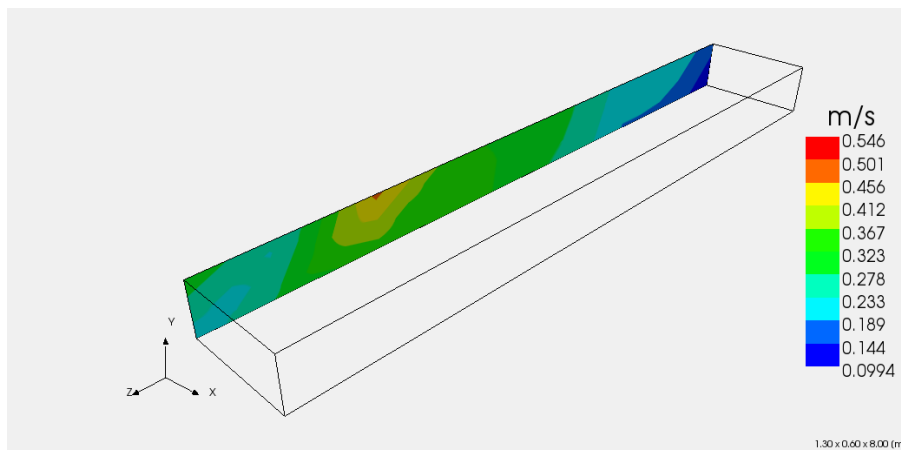
Pro vyhodnocení byly sestaveny izočárové grafy rychlostí a intenzit turbulence (konkrétně jsou z důvodu názornosti prostorem vedeny podélné řezy). Grafy nejsou stanoveny pro celý prostor vagonu, ale pouze pro prostor mezi krajními polohami sond – tzn. data byla interpolována, nikoliv extrapolována (vyhodnocovaná oblast se celá nachází pod otvory). Na Obr. 106 je vyznačeno, kde se v rámci vagonu nachází vyhodnocovaná oblast.



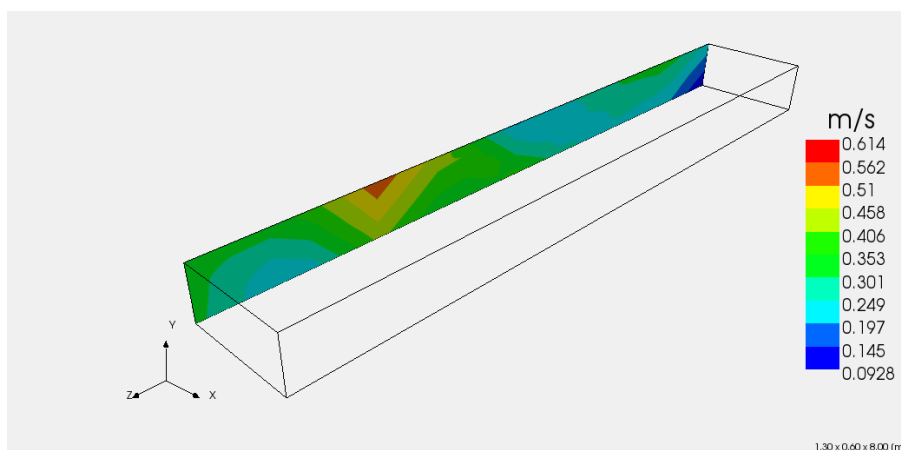
Obr. 106 Znázornění polohy vyhodnocované oblasti (červenou barvou)

Při porovnání mezi jednotlivými hodnotami výkonu (viz Obr. 107 až Obr. 115) je patrné, že mezi jednotlivými hladinami výkonu jde spíše o kvantitativní rozdíly než o rozdíly kvalitativní. Zhruba ve 2/3 podélného rozměru vyhodnocované oblasti (tzn. ve 2/6 a 4/6 vagonu), ve vyšší výškové hladině se nachází místo se zvýšenou rychlostí proudění vzduchu. Další takové místo se nachází zhruba v 1/3 vyhodnocované oblasti na kraji vagonu. Poblíž

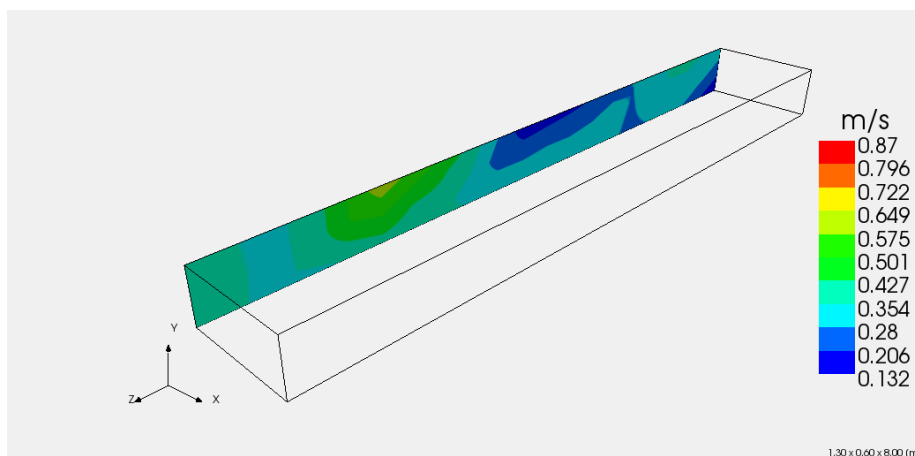
konce vagonu se pak nachází místo s nižší rychlostí proudění. Tyto nedostatky by bylo vhodné napravit například lokální změnou velikosti otvorů, případně jinou hustotou jejich rozmístění. Rovněž by je bylo možné odstranit vložení další vrstvy z prodyšného materiálu (tkaniny), čímž by se lokálně omezil prostup vzduchu do prostoru pro cestující. Takovýmito úpravami by se v daném místě pak snížila rychlost.



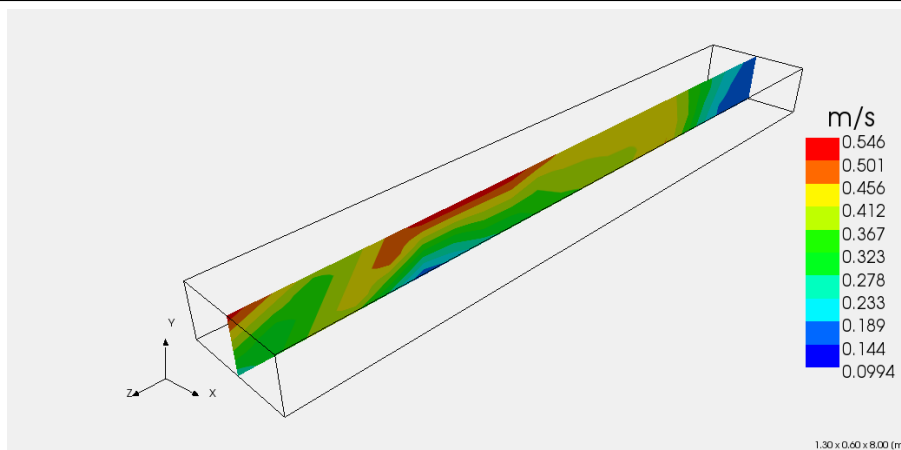
Obr. 107 Kontury rychlostí pro výkon 50 % - podélný řez 0,65 m



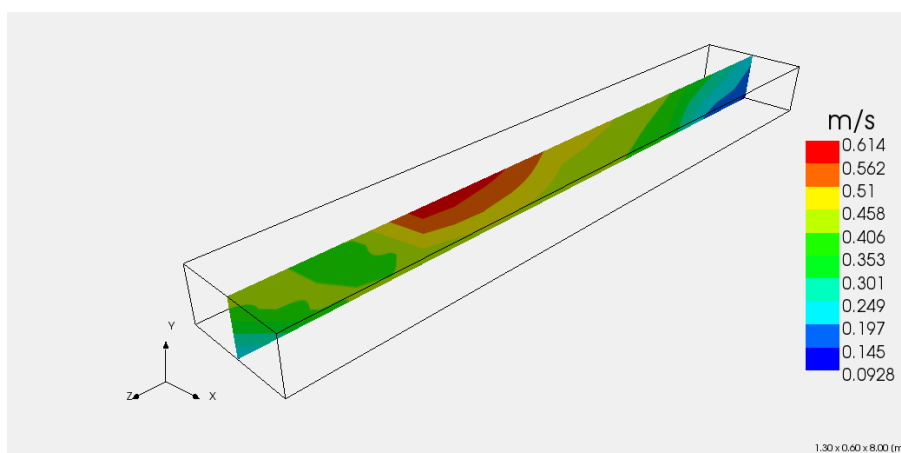
Obr. 108 Kontury rychlostí pro výkon 75 % - podélný řez 0,65 m



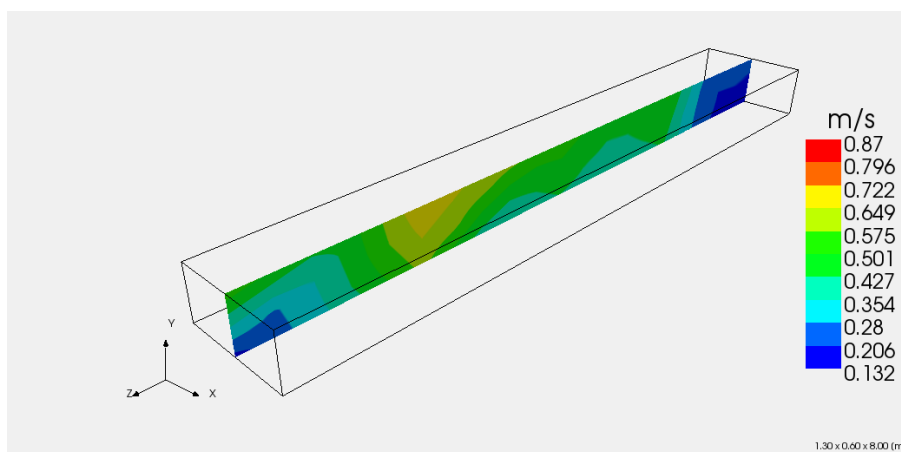
Obr. 109 Kontury rychlostí pro výkon 100 % - podélný řez 0,65 m



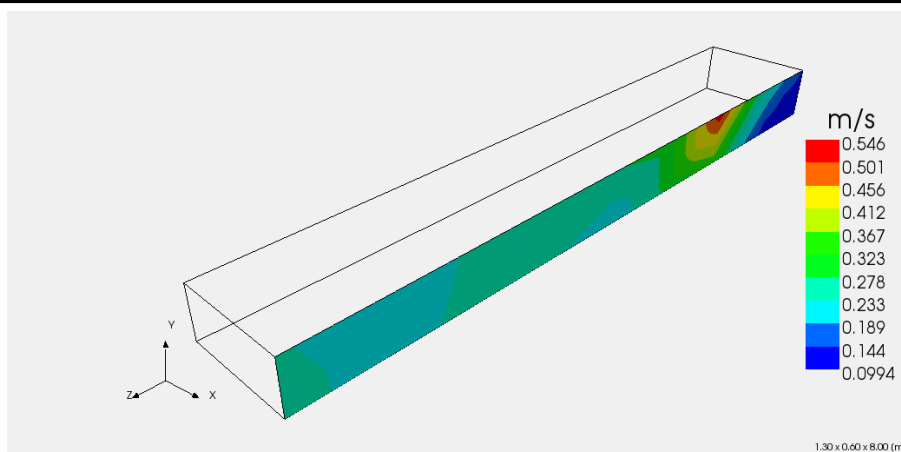
Obr. 110 Kontury rychlostí pro výkon 50 % - podélný řez 1,3 m



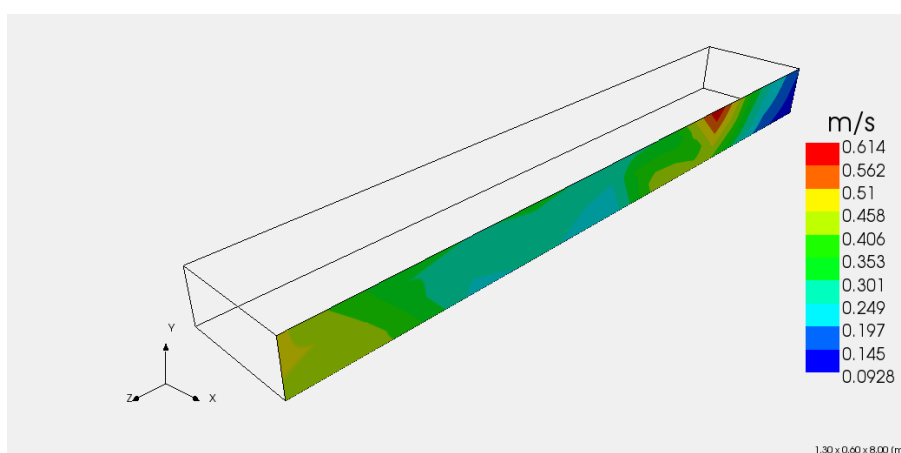
Obr. 111 Kontury rychlostí pro výkon 75 % - podélný řez 1,3 m



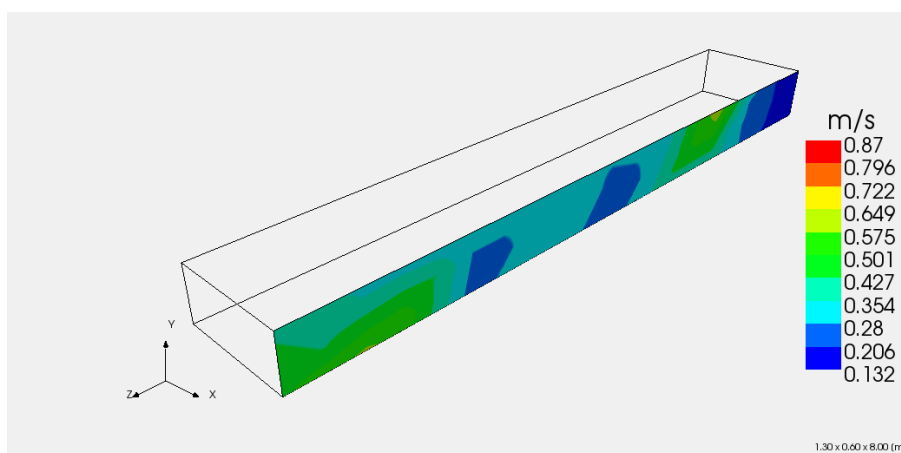
Obr. 112 Kontury rychlostí pro výkon 100 % - podélný řez 1,3 m



Obr. 113 Kontury rychlostí pro výkon 50 % - podélný řez 1,95 m



Obr. 114 Kontury rychlostí pro výkon 75 % - podélný řez 1,95 m



Obr. 115 Kontury rychlostí pro výkon 100 % - podélný řez 1,95 m

7.2.4 Uspořádání měření rychlostí a turbulencí – s podhledovou mříží

Měření bylo opět prováděno při třech různých hladinách výkonu ventilátoru – 50 %, 75 % a 100 %. Sondy byly upevněny stejným způsobem, jako v případě měření bez mříže. Měření bylo provedeno ve dvou výškových úrovních – 1,1 m a 1,7 m. Rozdíl je v tom, že se měřilo pouze ve dvou polohách stojanu – pouze v místech, kde byla přítomna mříž. Celkem tedy byly

získány hodnoty rychlostí a turbulencí ve 12 místech (2 místa každou sondou v jedné výškové hladině, 3 sondy a 2 výškové hladiny). Z těchto dat byly opět sestrojeny grafy průběhů veličin v prostoru vagonu.

Stejně jako v případě měření bez mříže byla zaznamenávána data po dobu 60 sekund, přičemž pro vyhodnocení byly použity převážně průměrné hodnoty v čase. Po přesunutí stojanu do nové polohy, ještě před započítáním měření, bylo vyčkáno rovněž 120 s.

7.2.5 Výsledky a vyhodnocení měření rychlostí a turbulencí – s podhledovou mříží

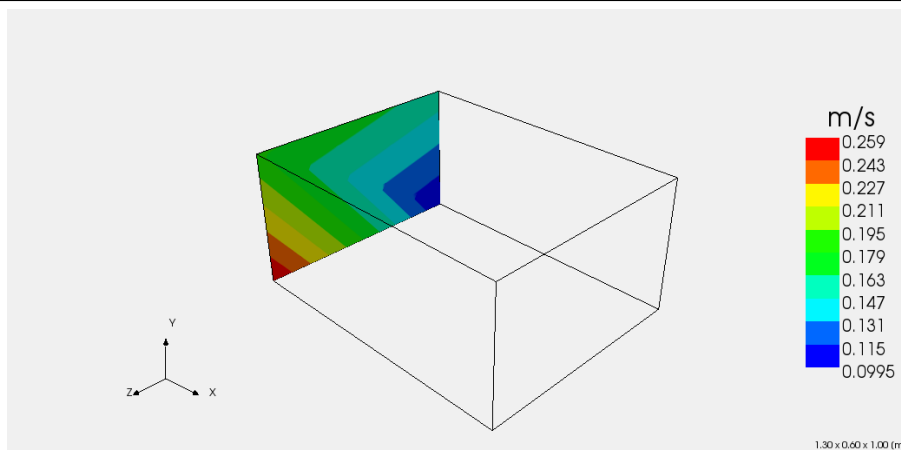
Časově průměrné hodnoty rychlostí se pohybovaly pro výkon 50 % v rozsahu přibližně od 0,1 m/s do 0,26 m/s, pro výkon 75 % v rozsahu přibližně od 0,11 m/s do 0,45 m/s a pro výkon 100 % v rozsahu přibližně od 0,20 m/s do 0,44 m/s. V Tab. 27 jsou pak pro úplnost uvedeny časově průměrné hodnoty intenzit turbulencí. V tabulkách nejsou uvedeny údaje pro výškovou hladinu 1,1 m při výkonu 100 %. Důvodem byl opakující se výpadek elektrického proudu při nejvyšším výkonu, jehož vlivem nebylo možné měření dokončit. Počátek souřadného systému je opět levý spodní roh vagonu (ovšem na opačném konci vagonu než v případě měření bez mříže).

Tab. 27 Časově průměrné hodnoty rychlostí ve všech měřených místech vagonu

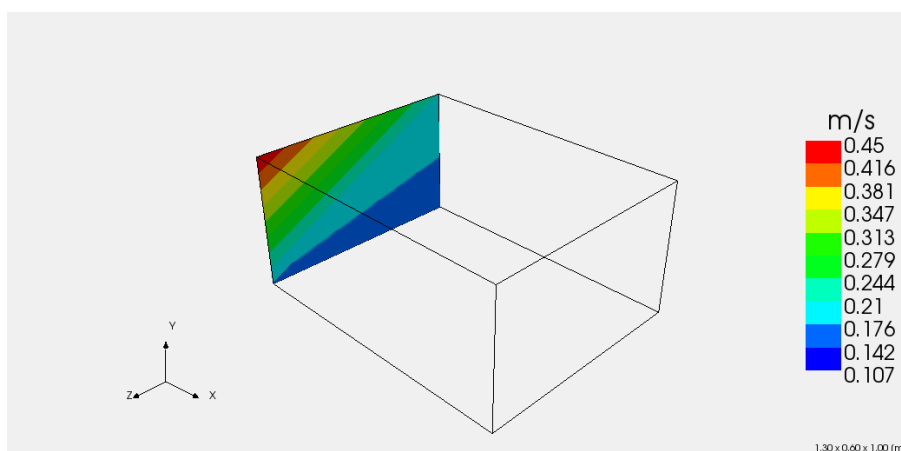
Výkon	50 %			75 %			100 %		
Příčná poloha	0,65m	1,3m	1,95m	0,65m	1,3m	1,95m	0,65m	1,3m	1,95m
High 1m	0,16 m/s	0,15 m/s	0,16 m/s	0,21 m/s	0,24 m/s	0,21 m/s	0,24 m/s	0,24 m/s	0,20 m/s
High 2m	0,18 m/s	0,14 m/s	0,25 m/s	0,45 m/s	0,21 m/s	0,38 m/s	0,44 m/s	0,23 m/s	0,38 m/s
Low 1m	0,10 m/s	0,13 m/s	0,14 m/s	0,15 m/s	0,15 m/s	0,14 m/s			
Low 2m	0,26 m/s	0,14 m/s	0,13 m/s	0,17 m/s	0,14 m/s	0,11 m/s			

Tab. 28 Časově průměrné hodnoty intenzit turbulencí ve všech měřených místech vagonu

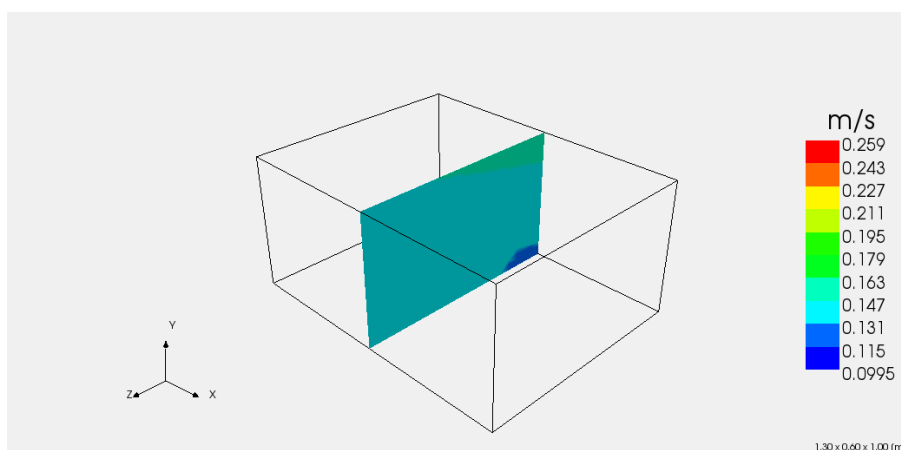
Výkon	50 %			75 %			100 %		
Příčná poloha	0,65m	1,3m	1,95m	0,65m	1,3m	1,95m	0,65m	1,3m	1,95m
High 1m	31,05%	31,68%	39,53%	35,46%	26,70%	38,79%	30,95%	32,06%	32,99%
High 2m	53,25%	57,42%	44,16%	40,28%	37,49%	41,63%	45,97%	31,19%	46,55%
Low 1m	74,20%	57,05%	41,53%	61,00%	55,45%	53,53%			
Low 2m	54,36%	66,67%	41,32%	61,01%	69,76%	68,37%			



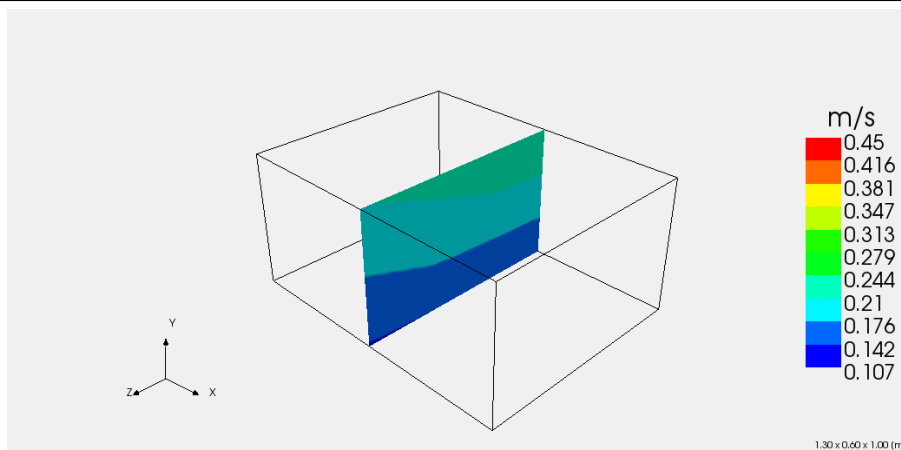
Obr. 116 Kontury rychlostí pro výkon 50 % s mříží – příčný řez 0,65 m



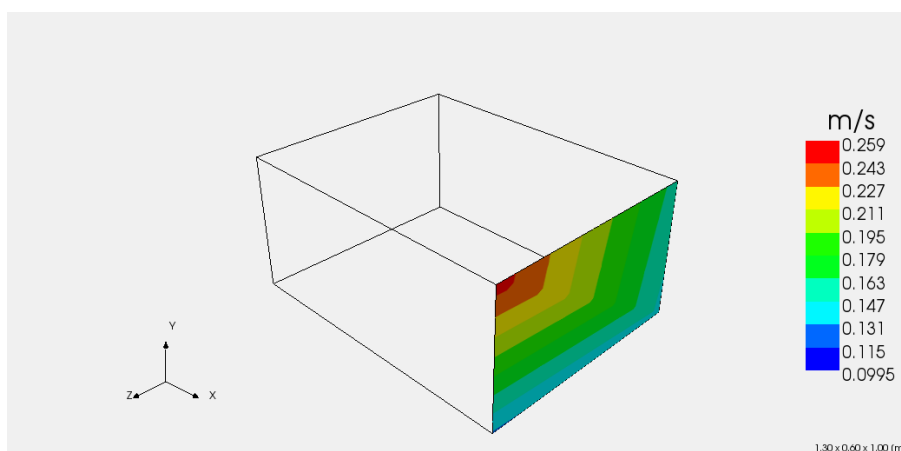
Obr. 117 Kontury rychlostí pro výkon 75 % s mříží – příčný řez 0,65 m



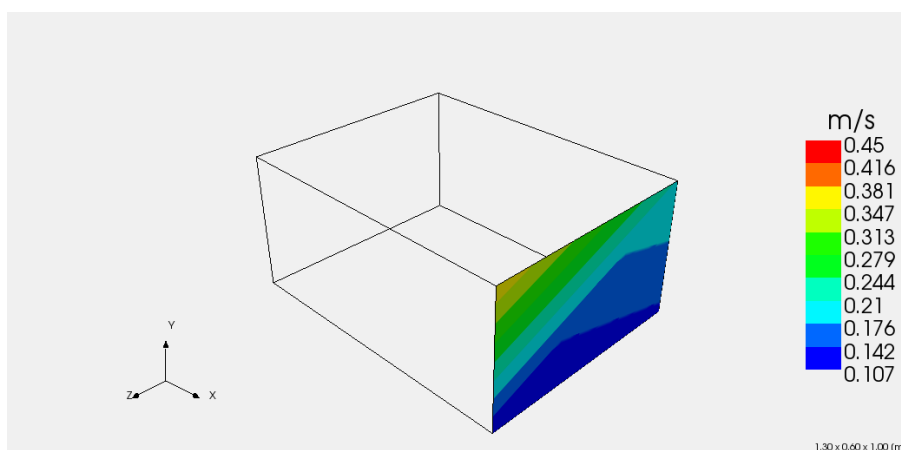
Obr. 118 Kontury rychlostí pro výkon 50 % s mříží – příčný řez 1,3 m



Obr. 119 Kontury rychlostí pro výkon 75 % s mříží – příčný řez 1,3 m



Obr. 120 Kontury rychlostí pro výkon 50 % s mříží – příčný řez 1,95 m



Obr. 121 Kontury rychlostí pro výkon 75 % s mříží – příčný řez 1,95 m

7.3 Experiment zvýraznění proudnic planárním laserem

7.3.1 Seznam měřidel

- Zelený planární laser
- Vyvíječ kouře Safex F2010 Plus
- Fotoaparát/kamera 18 Mpix, 5x optický zoom

7.3.2 Uspořádání experimentu zvýraznění proudnic planárním laserem

Pro zvýraznění proudnic byl použit zelený planární laser v kombinaci s vyvíječem kouře. Vyvíječ kouře byl umístěn přímo do prostoru skříně ventilátoru. Laser byl nasměrován ve směru podélného rozměru vagonu do osy jedné z řad děr v textilním potrubí. Zvýrazněné proudnice pak byly snímány pod úhlem z boku. Bylo provedeno měření jak pro případ potrubí s kapsičkami (předmětem zájmu), tak i bez kapsiček (pro porovnání).

7.3.3 Výsledky a vyhodnocení experimentu zvýraznění proudnic planárním laserem

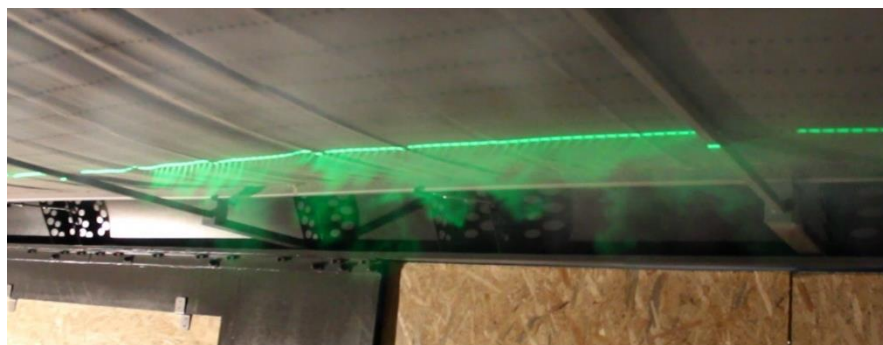
V případě potrubí s kapsičkami je vidět efekt narovnání směru proudu, ale rovněž shluknutí do jednoho většího proudu (Obr. 122) – pozn. vzduch v kanálu proudí zprava doleva. V případě bez kapsiček proud vystupující z děr nesměruje dolů, ale proudí pod úhlem (Obr. 123), což by vyvolávalo nežádoucí víření na rozhraní mezi trojúhelníkovými kanály. U provedení s kapsičkami se rovněž ukázalo, že kapsičky mají mírně nedostatečný efekt na narovnání proudu v blízkosti zaústění ventilátoru (viz červeně zakroužkovaný svazek proudů na Obr. 122).

Nedostatky provedení s kapsičkami by mohly potenciálně být řešeny lokálním snížením počtu otvorů připadajících na jednu kapsičku (nyní je opakující se skupina tvořena 10 otvory a 1 kapsičkou).

Zatím však nebylo provedeno zhodnocení vlivu mříže, což je zásadní pro stanovení chování proudění v dokončeném vagonu.



Obr. 122 Zvýrazněné proudnice pro výkon 100 % - varianta s kapsičkami (červeně vyznačený svazek proudů s patrnou nedostatečnou funkcí kapsičky)



Obr. 123 Zvýrazněné proudnice pro výkon 100 % - varianta bez kapsiček

7.3.4 Závěry experimentu zvýraznění proudnic planárním laserem

Měření rychlostí ve vozu ukázalo, že rozložení rychlostí není rovnoměrné tak, jak se očekávalo, přičemž nejvyšší rychlosti byly naměřeny cca v 2/6 délky vagonu (a 4/6, pokud by se uvažovala symetrie). Důvod není znám, nicméně potenciální náprava by spočívala v lokální změně velikosti otvorů, nebo hustotě jejich rozmístění.

Rovněž bylo provedeno zvýraznění proudnic zeleným planárním laserem. To odhalilo, že v blízkosti kapsičky je mírná nedostatečnost ve schopnosti narovnávat šikmé proudění z otvorů.

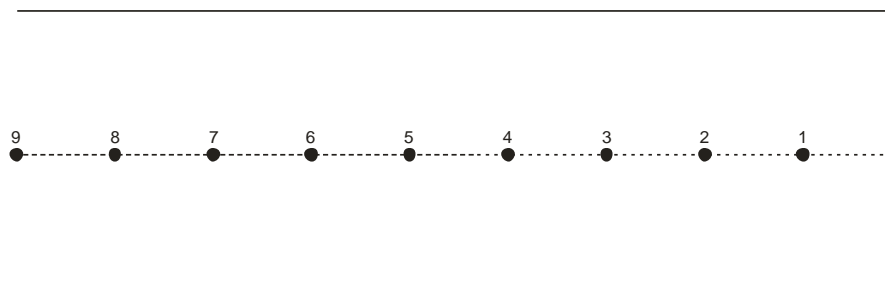
Nejjednodušší náprava tohoto nedostatku by spočívala v lokálním snížení poměru počtu otvorů vůči kapsičce.

7.4 Měření hluku ve funkčním vzorku hybridní skříně vozidla metra

7.4.1 Popis měření

Hluk byl měřen na třech výkonových hladinách chodu ventilátoru. Nejdříve byl změřen akustický tlak na nominálním výkonu ventilátoru, poté bylo měřeno na 75% výkonu a na závěr byl změřen hluk při 50% výkonu ventilátoru. Vzhledem k symetrii vozu bylo měřeno jen v jedné polovině vozu. Při současném chodu ventilátorů na obou koncích vozu bylo postupně měřeno v 9 měřících bodech vzdálených metr od sebe měřeno od čela vozu.

Pro měření byla použita sestava od firmy Brüel & Kjaer, která se skládá z měřicího modulu, citlivého (free field) mikrofону, počítače a stojanu.



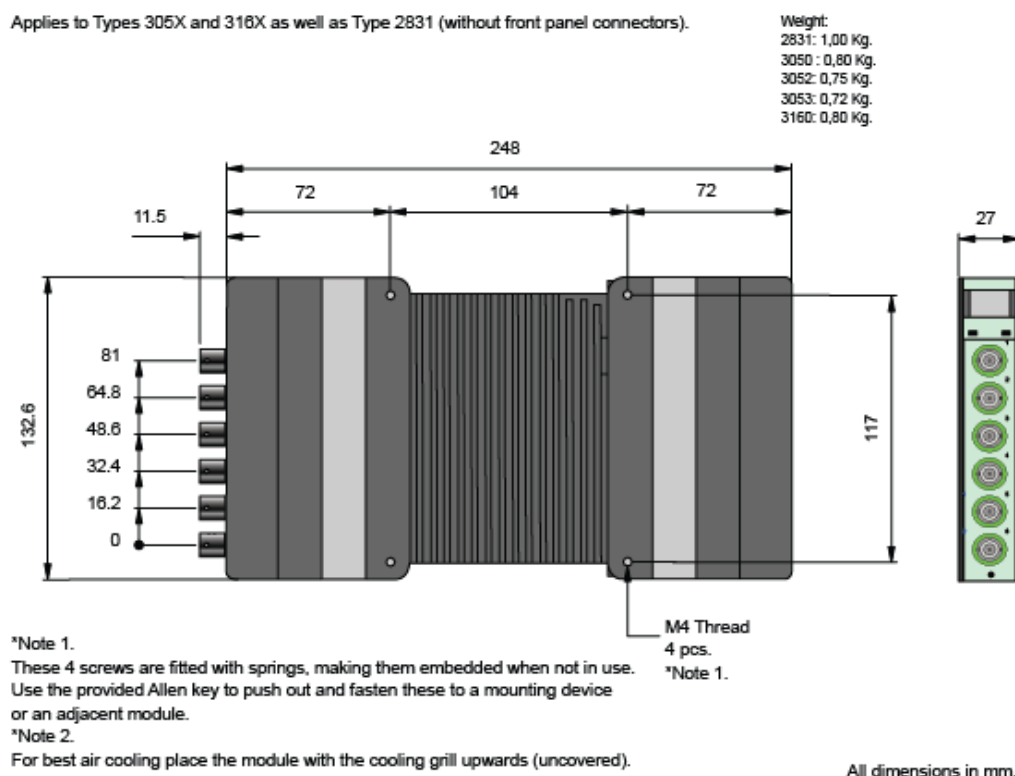
Obr. 124 Schéma měřících bodů ve vzdálenostech po 1 m od čela vozu a ve výšce 1300 mm

7.4.2 Použitá zařízení

Tab. 29 Názvy a kalibrační listy použitých zařízení

č.	Název	Kalibrační list
1	Pulse měřicí karta	3052 A 030
2	Mikrofon	4189 A 21 s.n.:2943132

Měření bylo provedeno měřícím systémem Pulse od firmy Brüel & Kjaer. Byl použit měřicí modul LAN-XI Typ 3052 pro připojení mikrofónu. Modul LAN-XI obsahuje bateriový modul. Může se připojit mnoho různých typů předních vstupních panelů pro připojení snímačů podle potřeby. Kolem každého konektoru je kruhová LED, která zobrazuje stav připojeného signálu. Klíčovou funkcí je technologie Dyn-X, která pomocí dvojitého A/D převodníků dosahuje efektivního dynamického rozsahu přesahujícího 160 dB. Typ 3052 má tři vstupní kanály s kmitočtovým rozsahem do 102,4 kHz. V kombinaci s dynamickým rozsahem 160 dB je zajištěno splnění náročných požadavků na měření hluku.



Obr. 125 Schéma modulu LAN-XI [21]

Záznam byl ukládán do PC. Pro měření hluku byl použit free field mikrofon ½“ typ 4189 - A- 021 s kmitočtovým pásmem 20 Hz - 20 kHz. Mikrofon byl umístěn na stativu ve výšce 1,5 m od podlahy vozu.



Obr. 126 Free field mikrofon [21]

Parametry mikrofonu:

Průměr v palcích: ½ Free field

Standard: B, I, L

Nominal Open – circuit Sensitivity mV/Pa: 50

Optimized Frequency Response ± 2 dB Hz: 6.3 to 20000

Dynamic Range with Preamplifier: 15.2 to 146

Inherent Noise dB (A) 28 <35 114.6

Capacitance pF: 13

Venting: Rear

Lower Limiting Frequency (-3 dB) Hz: 2 to 4

Operating Temperature Range $^{\circ}\text{C}$: -30 to $+150$

Temperature Coefficient dB/ $^{\circ}\text{C}$: -0.006

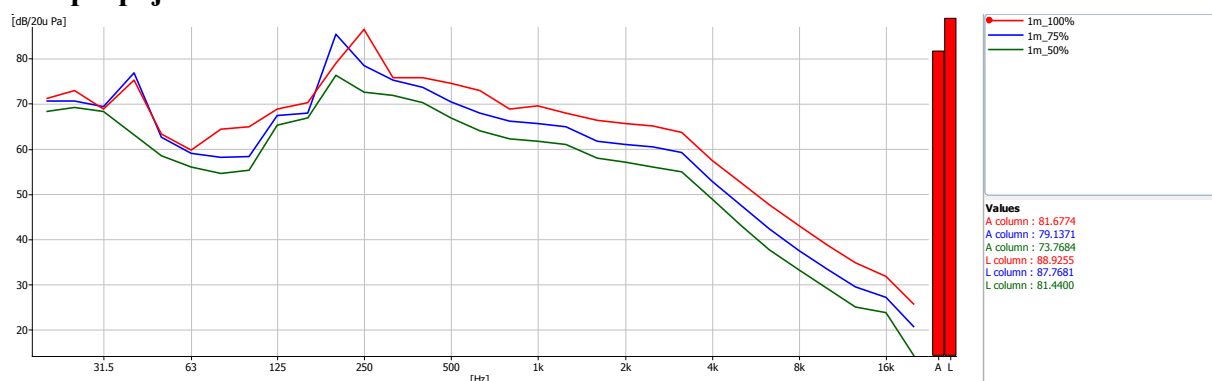
Pressure Coefficient dB/kPa: -0.01

7.4.3 Změřené hodnoty akustického tlaku pro případ nezaizolovaného propojovacího kanálu

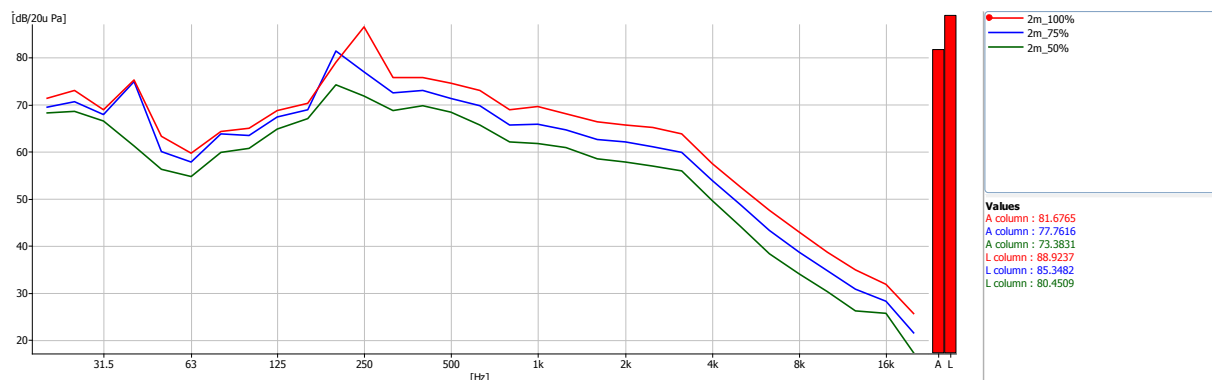
Tab. 30 Změřená hladina akustického tlaku

Výkonová hladina	Bod 1. L_p [dBA]	Bod 2. L_p [dBA]	Bod 3. L_p [dBA]	Bod 4. L_p [dBA]	Bod 5. L_p [dBA]	Bod 6. L_p [dBA]	Bod 7. L_p [dBA]	Bod 8. L_p [dBA]	Bod 9. L_p [dBA]
100%	81,67	81,67	81,41	80,02	79,17	79,27	78,33	77,97	77,97
75%	79,13	77,76	78,86	76,91	76,15	76,15	77,17	76,84	75,69
50%	73,76	73,38	73,09	73,09	73,11	72,36	72,67	71,78	71,19

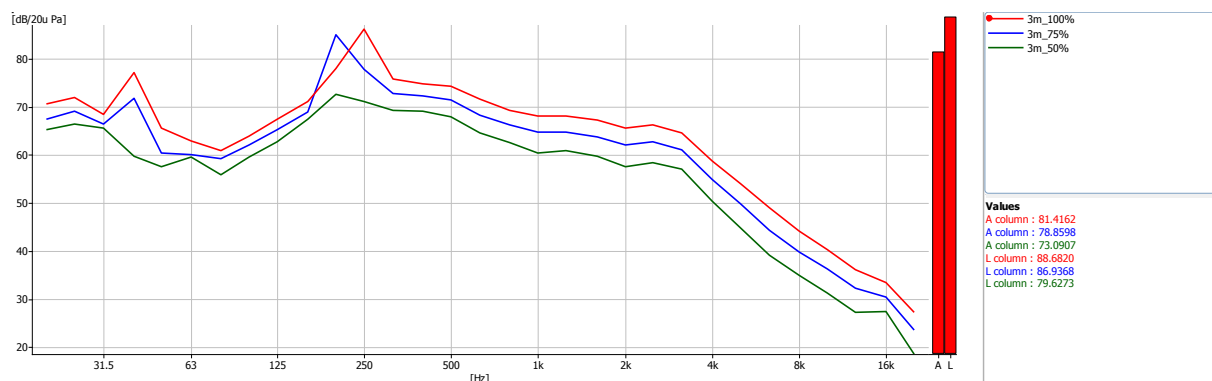
7.4.3.1 Třetino-oktávová spektra v měřících bodech pro případ nezaizolovaného propojovacího kanálu



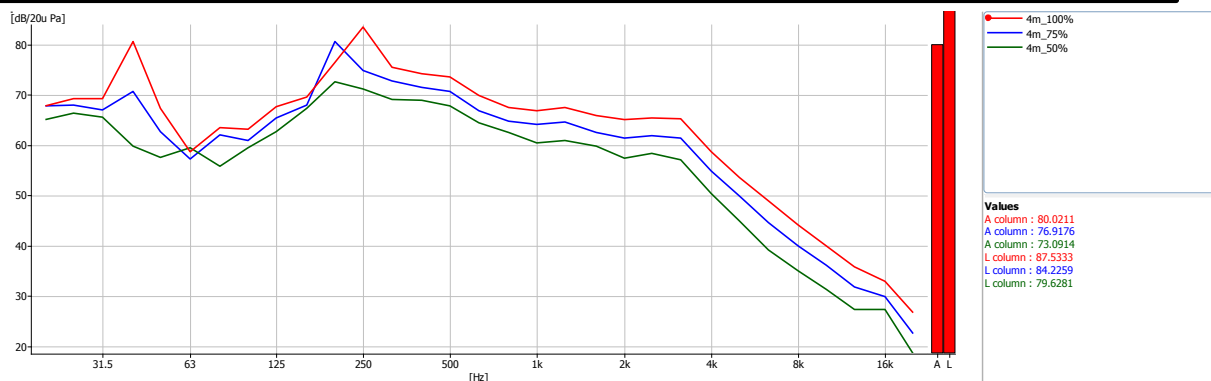
Obr. 127 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 1 m od čela vozu



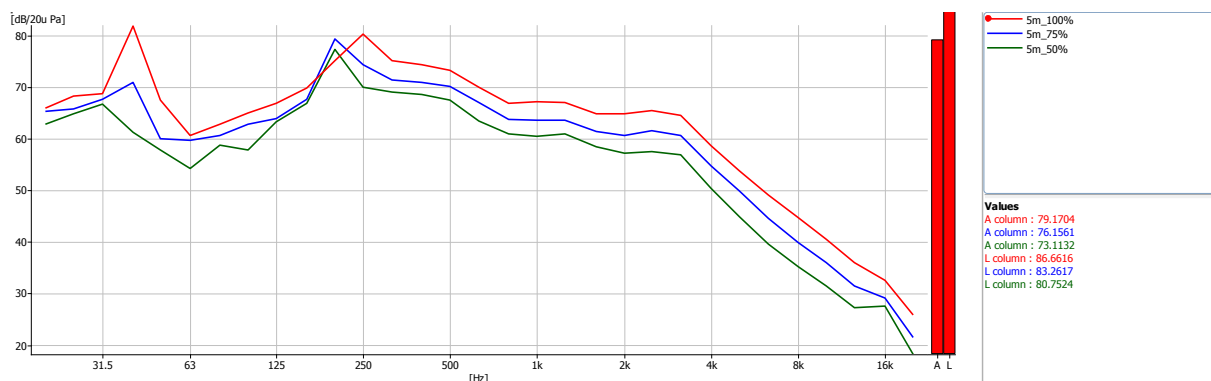
Obr. 128 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 2 m od čela vozu



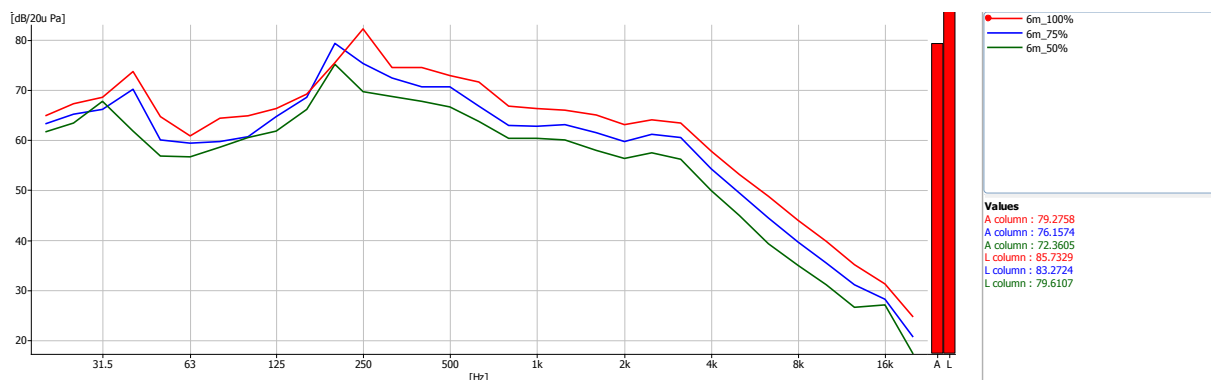
Obr. 129 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 3 m od čela vozu



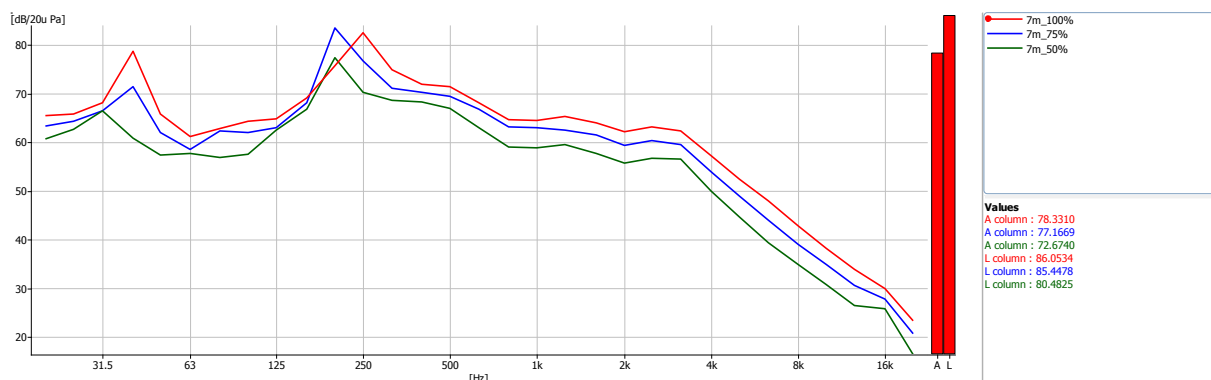
Obr. 130 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 4 m od čela vozu



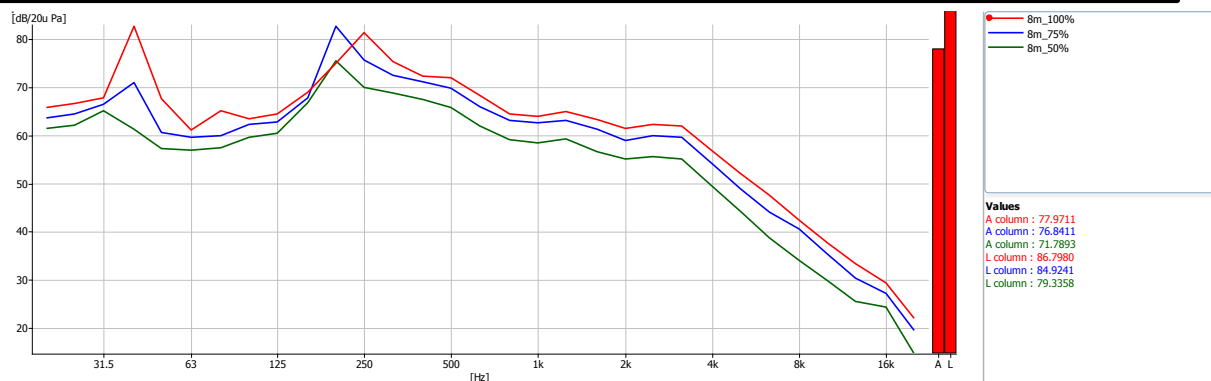
Obr. 131 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 5 m od čela vozu



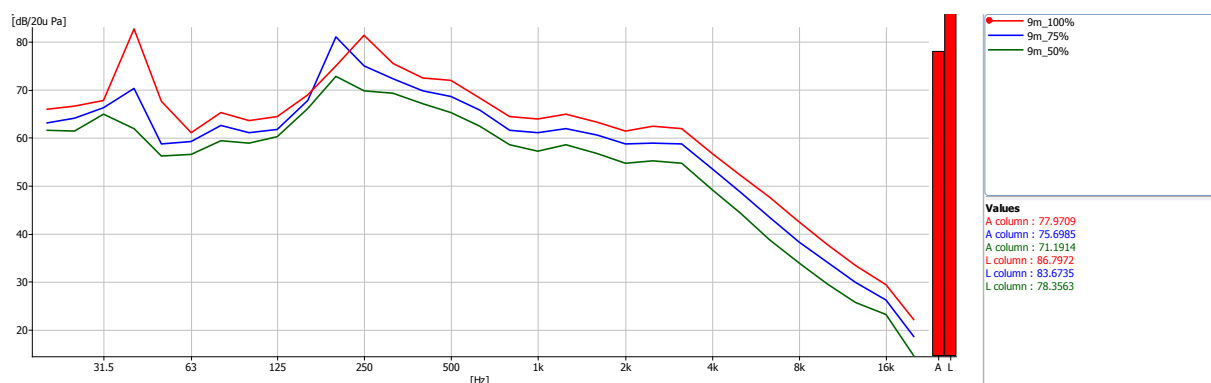
Obr. 132 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 6 m od čela vozu



Obr. 133 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 7 m od čela vozu



Obr. 134 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 8 m od čela vozu



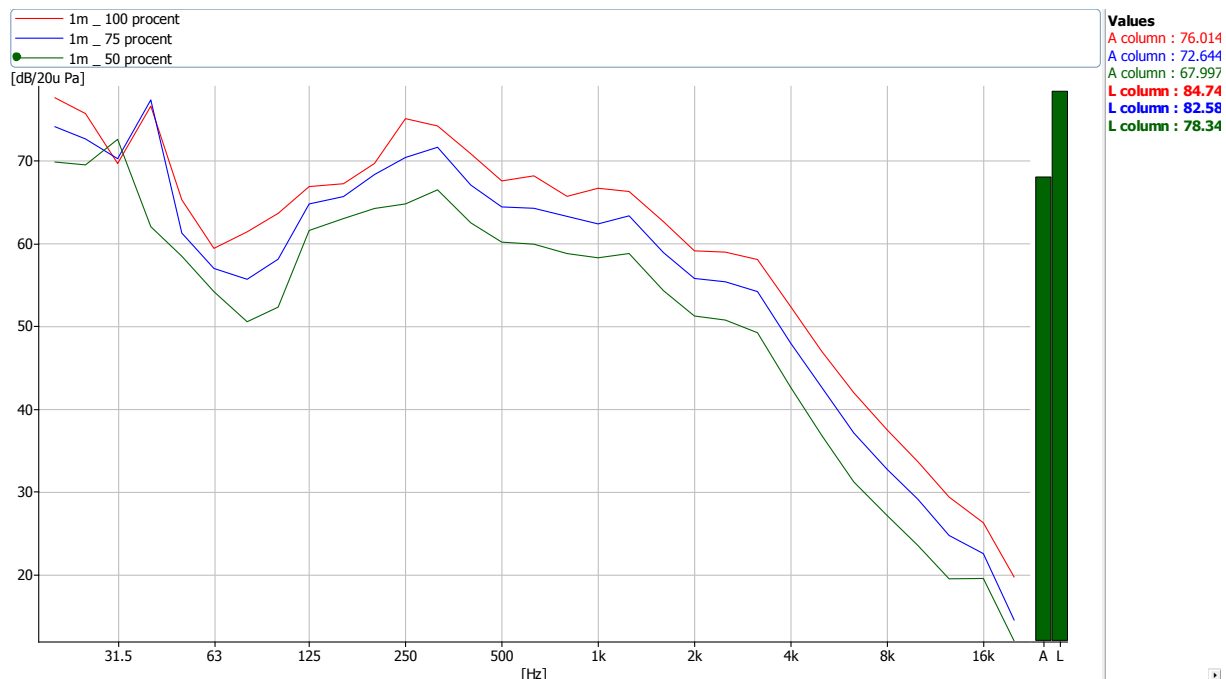
Obr. 135 Třetino-oktávová spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 9 m od čela vozu

7.4.4 Změřené hodnoty akustického tlaku pro případ zaizolovaného propojovacího kanálu

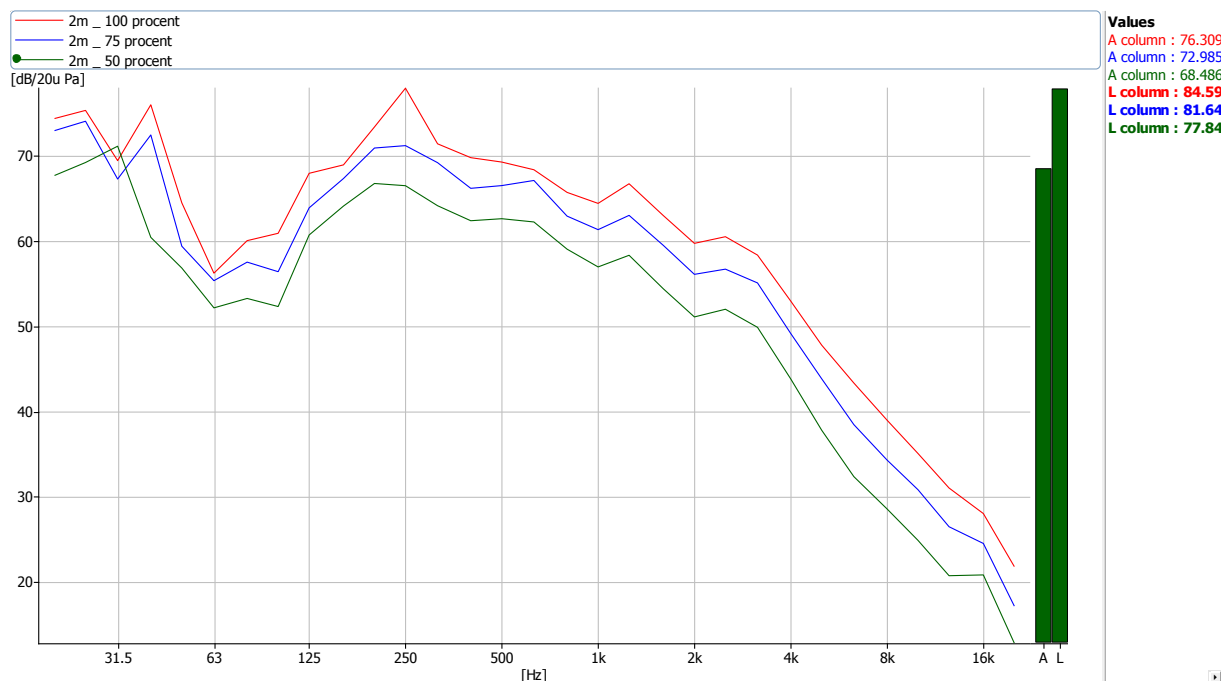
Tab. 31 Změřená hladina akustického tlaku zaizolovaného propojovacího kanálu

Výkonová hladina	Bod 1. L _p [dBA]	Bod 2. L _p [dBA]	Bod 3. L _p [dBA]	Bod 4. L _p [dBA]	Bod 5. L _p [dBA]	Bod 6. L _p [dBA]	Bod 7. L _p [dBA]	Bod 8. L _p [dBA]	Bod 9. L _p [dBA]
100 %	76,01	76,31	75,84	74,37	73,90	73,40	73,16	73,17	72,78
75 %	72,64	72,99	71,97	71,13	71,04	70,41	69,56	69,57	69,48
50 %	67,99	68,49	67,74	67,07	66,24	65,77	65,6	65,63	65,72

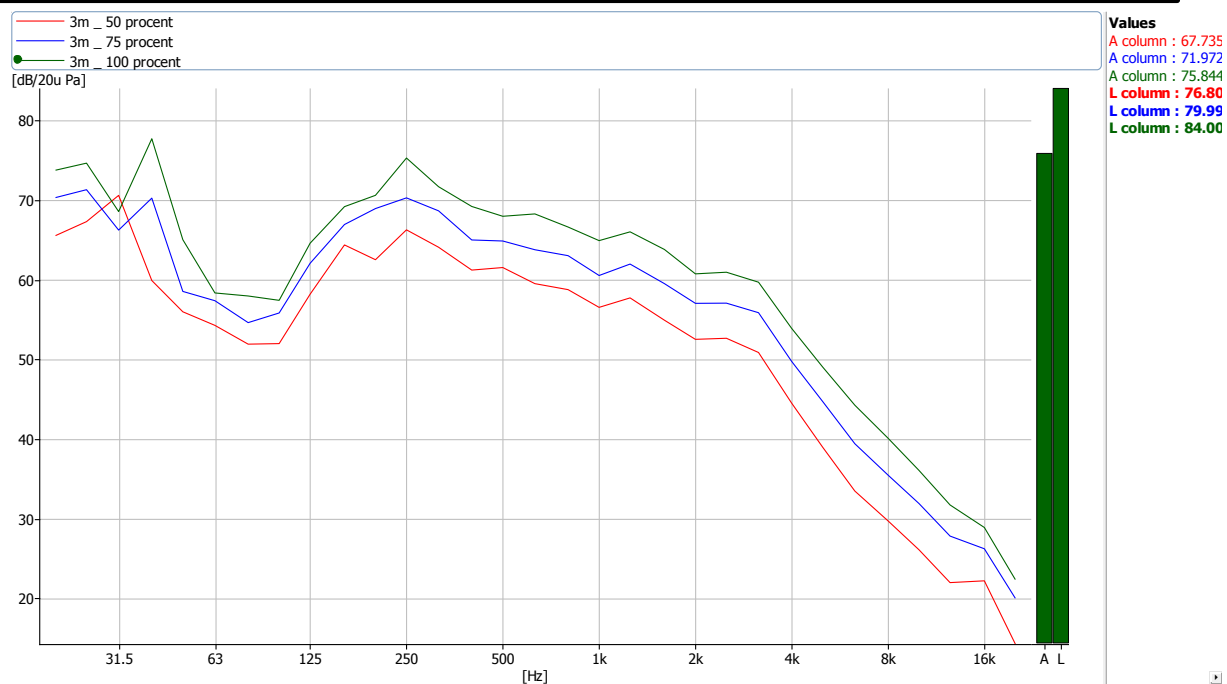
7.4.4.1 Třetino-oktávová spektra v měřících bodech pro případ zaizolovaného propojovacího kanálu



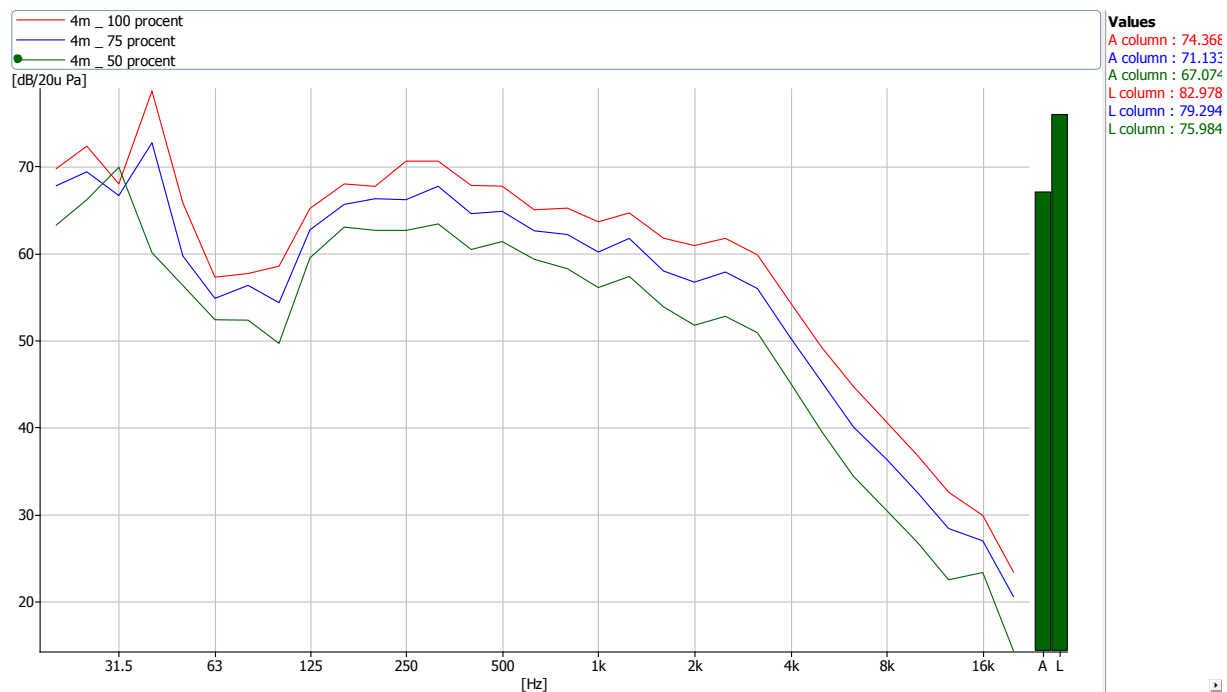
Obr. 136 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 1 m od čela vozu – s tlumícím rukávem



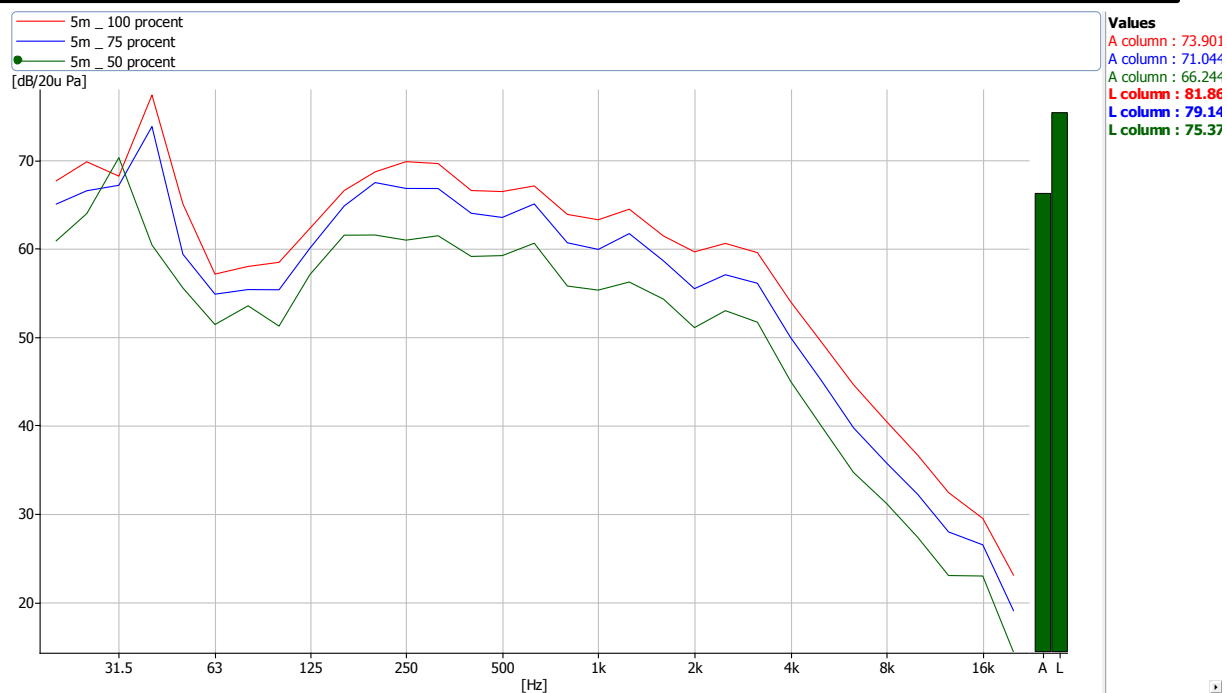
Obr. 137 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 2 m od čela vozu – s tlumícím rukávem



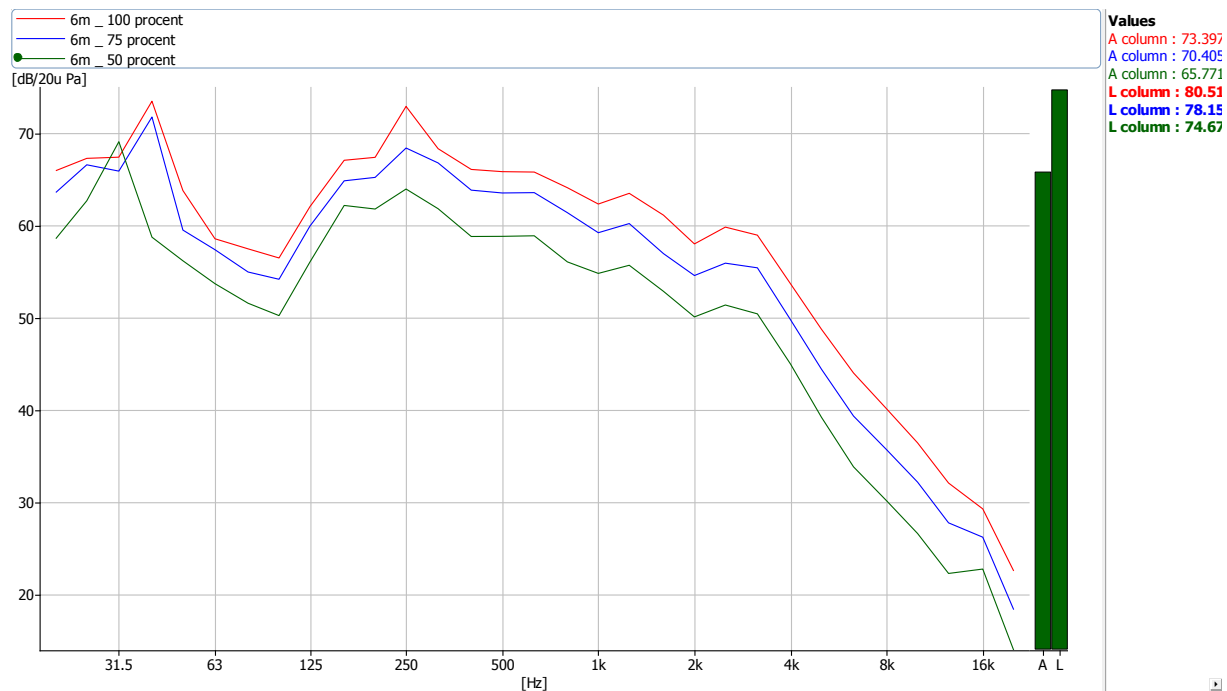
Obr. 138 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 3 m od čela vozu – s tlumícím rukávem



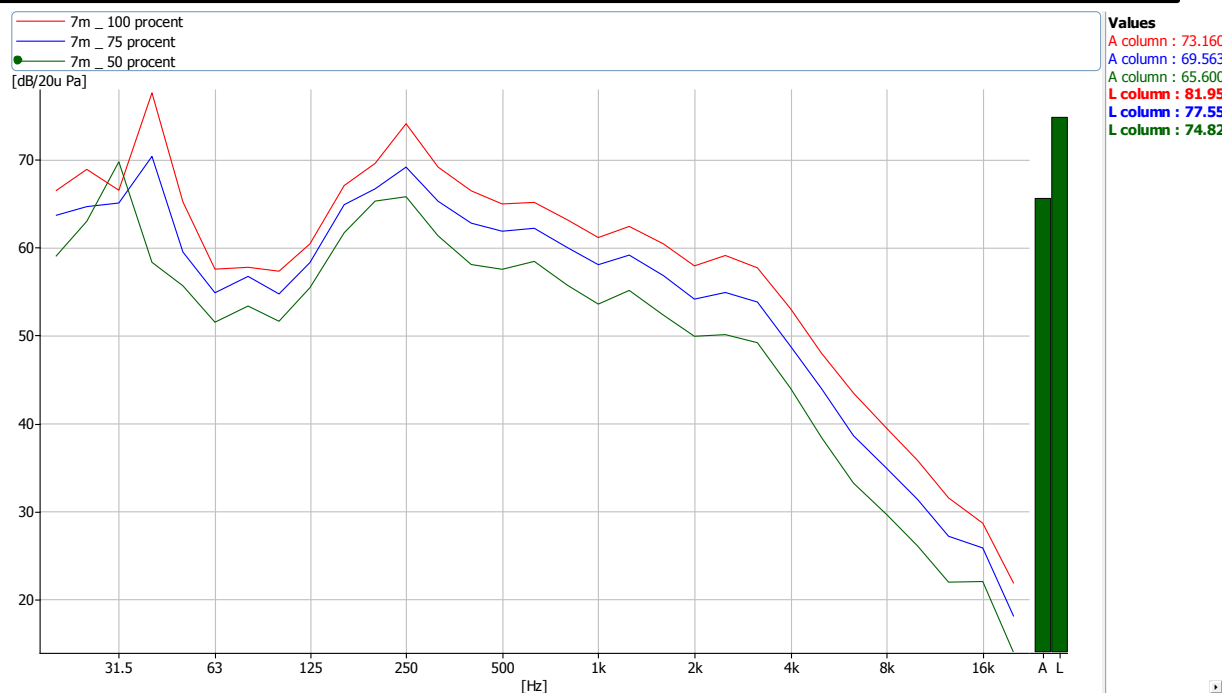
Obr. 139 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 4 m od čela vozu – s tlumícím rukávem



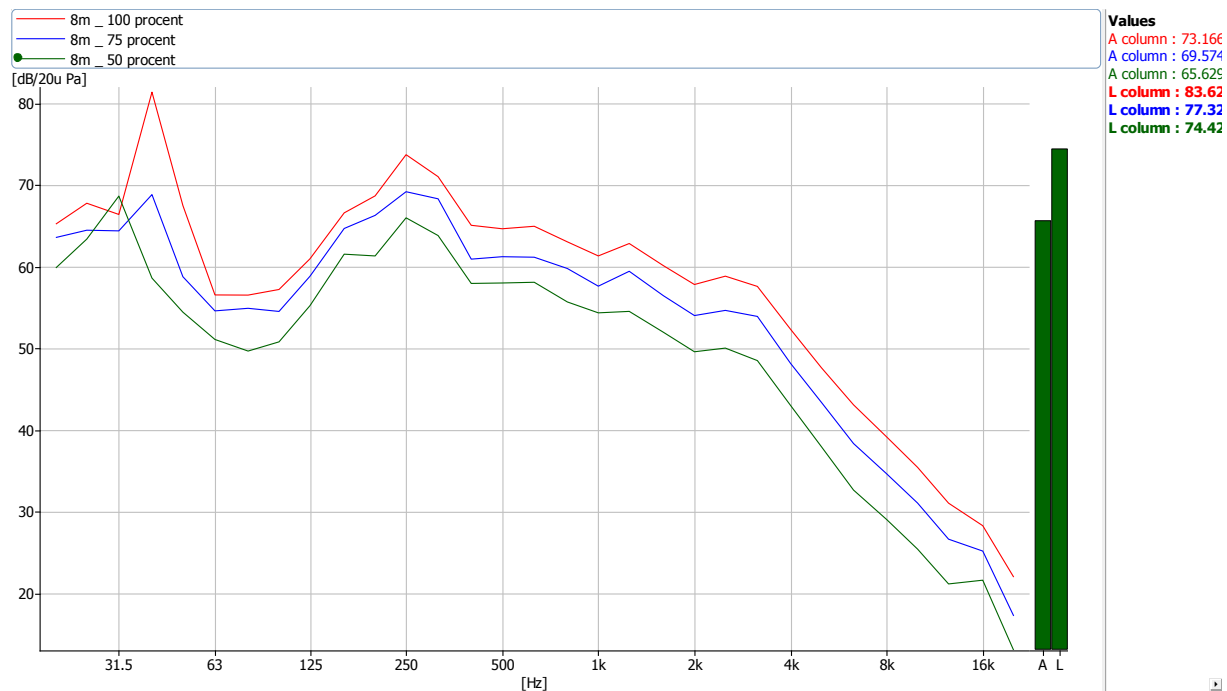
Obr. 140 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 5 m od čela vozu – s tlumícím rukávem



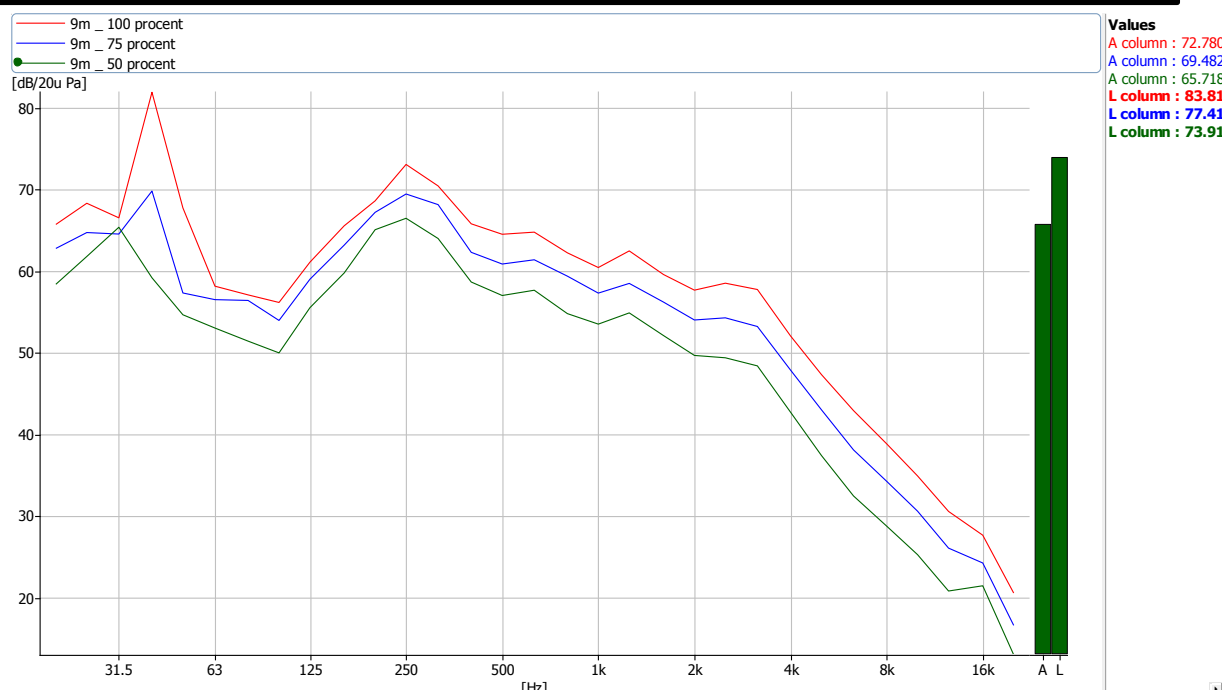
Obr. 141 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 6 m od čela vozu – s tlumícím rukávem



Obr. 142 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 7 m od čela vozu – s tlumícím rukávem



Obr. 143 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 8 m od čela vozu – s tlumícím rukávem



Obr. 144 1/3 spektra tří výkonových úrovní ve vzdálenosti 9 m od čela vozu – s tlumícím rukávem

7.4.5 Závěry měření hluku ve funkčním vzorku hybridní skříně vozidla metra

Na základě naměřených dat zobrazených v třetino-oktávových spektrech při různých výkonových úrovních v devíti bodech je znatelná nevyhovující špička v oblasti 250 Hz a 50 Hz. Řešením této špičky je útlum v oblasti napojení ventilátoru a větracího kanálu. Tuto oblast považujeme za možný zdroj hluku, který lze upravit všítm hmoty pohlcující hluk do textilního kanálu. Volíme materiál z minerální vlny, která je pro tento typ útlumu vhodná. Připojovací kanál je upraven zvětšením tloušťky stěny o 10 mm vrstvou minerální vlny.

Další snížení hluku v této oblasti dosáhneme úpravou rozměru napojení. Jedná se o zvětšení vstupního průřezu do kanálů vozidla. Tato úprava ale na funkčním vzorku není možná, z důvodu stavebních rozměrů na střeše vozu. Touto úpravou by se muselo zasáhnout do stavby hrubé skříně vozu. Tato případná úprava je podrobněji uvedena v závěrech disertační práce.

Při porovnání dvou měření hluku s variantou nezaizolovaných a zaizolovaných propojovacích větracích kanálů – kolen je zcela patrný útlum hluku v rámci tohoto přechodového prvku. Při použití zaizolované části kanálu došlo ke snížení hluku a vyhlazení špičky v třetino-oktávových spektrech v oblasti 250 Hz.

8 Zhodnocení a závěry řešeného uzlu střešní části vozidla metra v oblasti větrání

8.1 Zhodnocení z hlediska vlastní hmotnosti jednotlivých prvků větracího systému

Na výrobu funkčního vzorku větracího systému jsou použity materiály s nízkou vlastní hmotností. Pro výrobu vlastních kanálů při zachování funkce větrání mohou být použity certifikované tkaninové materiály dle normy ČSN EN 45545-2. Jedná se o kanály z tkaniny (POLYAIR – Classic fabric, POLYAIR STRONG – Extra strong, INSULATION – Non

Woven, GLASSAIR – Glass Fibres) s hmotností mezi 220 a 460 g/m². U vyústek z těchto materiálů stačí pouze 20 Pa statického tlaku k dobrému nafouknutí. Pro funkční vzorek větracího kanálu byl zvolen materiál POLYAIR – Classic fabric.

Z jednoduchého porovnání hmotnosti plechového vzduchového kanálu o stejném průřezu a tloušťce plechu 0,5 mm lze konstatovat úsporu hmotnosti cca 85 %. Při celkové délce vzduchového kanálu 15,2 m vychází úspora použitím tkaninového provedení cca 200 kg (hmotnost plechového kanálu 210 kg, tkaninového kanálu 10,7 kg). Další úspory vlastní hmotnosti lze konstatovat v oblasti uchycení a zavěšení kanálu.

8.2 Zhodnocení z hlediska funkce

Navržený větrací systém je funkční z hlediska požadované provětratelnosti vozu. Zkoušky v oblasti větrání prokázaly, že předpoklad funkce se potvrdil. Dva úhlopříčně proti sobě se zužující kanály se ukázaly jako funkční a distribuce vzduchu probíhá v celé délce vozu. Pro funkční vzorek byly porovnávány dvě základní varianty. Distribuce vzduchu pouze s perforací potvrdila, že provětratelnost vozu do středu prostoru není dostatečná. Proudění z distribuce vzduchu této varianty je odkloněno ve směru hlavního proudu vzduchu ve větracím kanálu. Pro použití textilní distribuce vzduchu je nutné použít prvky k usměrnění vzduchu do středu větraného vozu. V rámci pokusu byla použita varianta s usměrňujícími kapsami. Z hlediska šíření a útlumu hluku od větracího systému se zhodnocení věnuje následující kapitola. Koncepce funkčních vzorků obou variant distribuce vzduchu uvažuje s umístěním krycího podhledu.

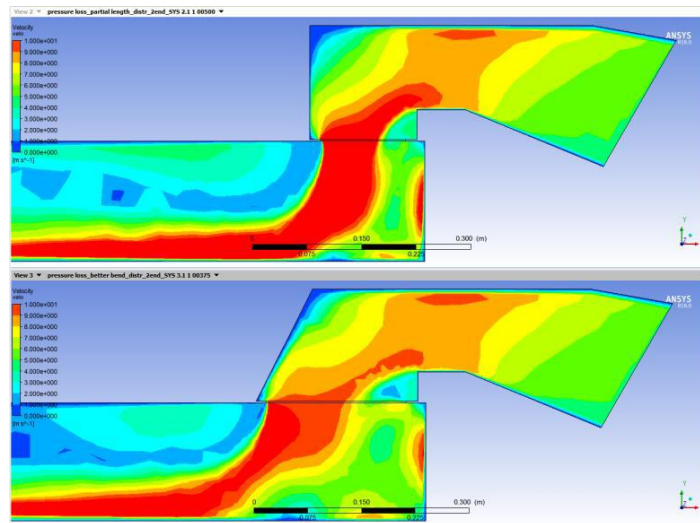


Obr. 145 Pohled do funkčního vzorku vozidla metra s ukázkou podhledového panelu – krytí textilního kanálu

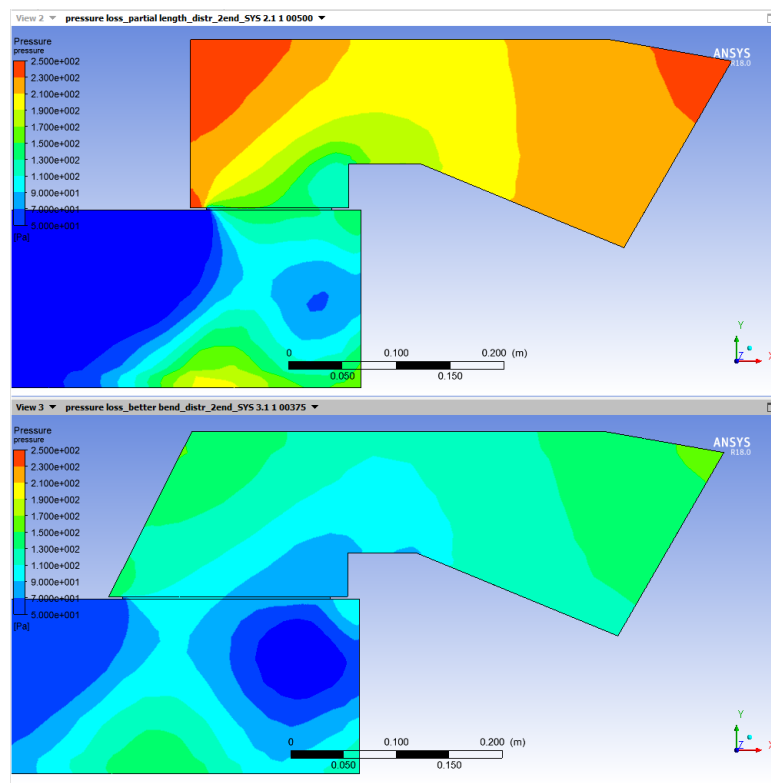
8.3 Zhodnocení z hlediska snižování hlučnosti

Na základě naměřených hodnot je nutné v rámci větracího systému hledat úspory v oblasti hlučnosti. U stojících vozidel nesmí v zóně pohodlí celková úroveň hluku vytvářeného klimatizačním (větracím) zařízením, během jakýchkoliv provozních podmínek (s výjimkou přípravy vozidla), překročit stanovené hodnoty. Tyto hodnoty jsou definovány Evropskou normou ČSN EN ISO 3381, která stanovuje podmínky pro získávání reprodukováných a porovnatelných výsledků měření. Pro zkoumanou kategorii vozidla je hluk limitován přísnou hodnotou 66 dB. Pro snížení hluku má pozitivní význam izolování lomeného kanálu. Pro další snižování hluku je nutné uvažovat i úpravu tvaru lomeného kanálu. Tato úprava v rámci tohoto funkčního vzorku, kvůli konstrukčním rozměrům hrubé stavby skříně, není možná. Na základě měření a stanovení závislosti aerodynamického hluku a tlakové ztráty lze konstatovat, že úpravou geometrie a snížením tlakové ztráty je reálná možnost i snížení hluku. Níže jsou uvedeny simulace, které porovnávají stávající stav funkčního vzorku a stav navrhované úpravy. Úprava spočívá ve zvětšení výstupního průřezu propojovacího kolene v podélné ose vozu o 75

mm. Tato drobná úprava má značný vliv na hodnotu tlakové ztráty a na hodnotu aerodynamického hluku. Tlaková ztráta původní geometrie je 170 Pa, tlaková ztráta po úpravě geometrie je 90 Pa.

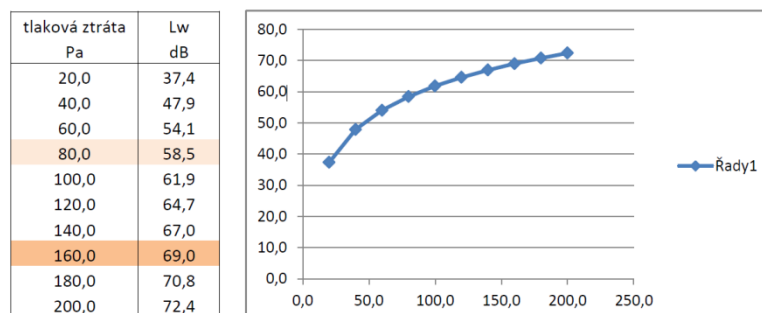


Obr. 146 Porovnání rychlostí v původní geometrii a v geometrii upravené v oblasti lomeného větracího kanálu



Obr. 147 Porovnání tlaků v původní a v upravené geometrii v oblasti lomeného větracího kanálu

Závislost hladiny akustického výkonu na tlakové ztrátě



Obr. 148 Závislost Tlakové ztráty v koleni a aerodynamického hluku

Pro další snížení hluku je nutné použít na koncepci hrubé stavby skříně vozu v oblasti rovné střechy takový materiál, který hluk nevede, ale tlumí. V současné době je na funkčním vzorku hybridní skříně v oblasti rovné střechy použit materiál sendvičového panelu prepregu jako potahů a jádra z aramidové voštiny.

Salon vozu a útlum hluku uvnitř ovlivňuje i vnitřní zástavba vozu. Sedadla a vnitřní výstroj způsobí útlum hluku.

Při návrhu větracího systému je nutné všechny výše zmíněné požadavky zakomponovat do celé konstrukce vozu, aby byla zajištěna vyhovující funkce systému s efektem nízké vlastní hmotnosti, jednoduchosti montáže, ekonomičnosti konstrukce a designu.



Obr. 149 Designová studie vnitřního interiéru vozu metra v rámci řešeného projektu TA04030774

8.4 Závěr

Hmotnostně úsporné prvky ve stavbě kolejových vozidel hrají podstatnou roli z několika různých hledisek: technického, ekonomického a ekologického. Všechna tato hlediska jsou vzájemně provázána. Úkolem této práce byl celkový náhled na funkci a požadavky na skříně kolejových vozidel pro kategorii P-III (vozidla metra) se zaměřením na oblast střechy vozu – větrání vozidla, kde bylo popsáno, že správnou funkci systému větrání podstatně ovlivňuje i

samotné okolí konstrukce (jednotlivé konstrukční prvky skříně vozidla). Systém větrání je tedy nutné řešit komplexně v rámci celkové stavby vozu. V této práci byl systém do vozidla metra navržen pomocí výpočetní techniky v CAD SW a CFD programech a byl postaven funkční vzorek s podporou projektu TA04030774 a na něm byla odzkoušena funkce větrání. Při zkouškách byly zjištěny odchylky od požadovaných norem, a to zejména v oblasti hlukových emisí. Dále byl proveden pokus s využitím vlastnosti pohltivosti hluku u tlumících materiálů. Jako tlumič nežádoucích hlukových emisí byl navržen propojovací lomený kanál v oblasti napojení větrací jednotky na větrací kanál. Z porovnání těchto variant plyne, že tento způsob snížení hluku má významný pozitivní vliv, v některých bodech měření až o 6 - 7 %. Touto úpravou došlo k vyhlazení nežádoucí špičky 250 Hz v naměřených hodnotách zobrazených v třetino-oktávných spektrech při různých výkonových úrovních. Na základě zjištěných poznatků a určení zdrojů hluku byla stanovena závislost tlakové ztráty a aerodynamického hluku. Tato závislost byla určena na základě experimentálních výsledků za pomoci firmy AirDIV s.r.o. Z této závislosti je patrné, že další snížení hlukových emisí by bylo možné docílit úpravou geometrie průřezů v oblasti lomeného kolene. Tato úprava popsaná v předešlé kapitole má zásadní vliv na snížení hodnoty tlakové ztráty. Ve funkčním vzorku skříně vozidla bohužel nemohla být vyzkoušena, kvůli odlišným geometrickým připojovacím rozměrům, které byly řešeny již v projektu FR-TI3/449.

Tento závěr je zároveň podmětem i pro další výzkum v oblasti stavby hmotnostně úsporných skříní kolejových vozidel. Při návrhu je nutné uvažovat nejen pevnostní hlediska konstrukce. Například hledisko průzvučnosti a vedení hluku v jednotlivých použitých panelech na hrubé stavbě hybridní skříně pomocí použití pohlcujících materiálů mezi salonem vozu (v oblasti rovné střechy) a zdrojem hluku (větrací jednotkou). Sdružení designového podhledu s perforací s možností vylepení podhledu z vnitřní strany materiálem pohlcující hluk. Tomuto návrhu by měl předcházet další rozsáhlý výzkum, který by se věnoval konkrétnímu řešení této problematiky. Tato oblast výzkumu se jeví jako vysoce perspektivní.

9 Použitá literatura

- [1] Mráz, P., Talácko, J.: *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*, Nakladatelství ČVUT, ISBN 80-01-03540-9, 2006.
- [2] Heller, P., Dostal, J.: *Kolejová vozidla II*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2009.
- [3] Heller, P., Dostal, J.: *Kolejová vozidla I*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2007.
- [4] Heller, P., Dostal, J.: *Kolejová vozidla III*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2011.
- [5] Kalinčák, D.: *Kolajové vozidlá*, skripta Žilinská univerzita v Žilině, ISBN 978-80-8070-864-1, 2008.
- [4] Lata, M.: *Konstrukce kolejových vozidel II*, Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004.
- [6] Tříška, L., Schuster, M.: *Větrací systém vozidla metra – oblast větrací jednotky*, Technolog 2016, ISSN1337-8996.

- [7] Kolektiv autorů: *The Research Requirements of the Transport Sectors to Facilitate an Increased Usage of Composite Materials, Part III – Composite Material Research Requirements of the Rail Industry*, report, project contract G4RT-CT-2001-05054, June 2004.
- [8] ASM Handbook: *Volume 21 Composites*. Ohio (OH): ASM International, 2001. 1201 s. ISBN 0-87170-703-9.
- [9] Linhart, J.: *Mechanika tekutin I*, skripta ZČU v Plzni, 2006, ISBN 80-7043-511-9.
- [10] Hirš, J., Gebauer, G.: *TZB – Vzduchotechnika: Hluk a chvění ve vzduchotechnice*, skripta VUT v Brně, Fakulta stavební, 2005.
- [11] Schuster, M.: *Simulace proudění pro větrací systém kolejového vozidla*, XXIII. konference Současné problémy v kolejových vozidlech, 2017.
- [12] Heller, P., Mašek, V., Kápl, F.: Autorské osvědčení č. 228 645 k vynálezu *Samonosná stěna vozidla*, 1986.
- [13] Malkovský, Z.: *Současný stav pasivní bezpečnosti kolejových vozidel a trendy do budoucna*, Přednáška na konferenci Czech Raildays v Ostravě 7/2008.
- [14] Růžička: *Porovnávací zkouška lepeného spoje v tahu*, ČVUT v Praze, zpráva číslo TZP/CLKV/5/2011, 2011.
- [15] Heller, P., Tříška, L., Kořínek, J.: *Spojení sendvičové konstrukce vozidla s kovovým podélníkem*, ZČU v Plzni, 2011, č.: PUV2011-25040.
- [16] Heller, P., Tříška, L. Kořínek, J.: *Analýza konstrukčních variant skříně kolejového vozidla*, ZČU v Plzni, 2011, č.: Z-1/2011.
- [17] Heller, P., Tříška, L. Kořínek, J.: *Výběr optimální varianty spojů kompozitních částí s ocelovou konstrukcí skříně kolejového vozidla*, ZČU v Plzni, 2011, č.: Z-1/2012.
- [18] Heller, P., Tříška, L. Kořínek, J.: *Analýza kovových materiálů pro stavbu skříně kolejového vozidla*, ZČU v Plzni, 2011, č.: Z-2/2011.
- [19] Průcha, P.: *Analýza kompozitních materiálů pro stavbu skříně kolejového vozidla*, LA Composite, 2011, č.: L-2/2011.
- [20] Kříž, A., Barták, J., Beneš, P.: *Zkoušky lepených spojů*, ZČU v Plzni, č.: H1-03/2009, 2009.
- [21] Tříška, L., Sika, J.: *Hluk v prostoru salonu vozu metra*, ZČU v Plzni, 2017, č.: RTI-VZ-2017-9.
- [22] Tříška, L., Linhart, J., Pavlíček, P.: *Aerodynamika v oblasti napojení větracích kanálů a větracích kanálů*, ZČU v Plzni, 2017, č.: RTI-VZ-2017-10.

- [23] Tříška, L., Linhart, J., Pavlíček, P.: *Parametr pohodlí – provětratelnost salonu vozu*, ZČU v Plzni, 2017, č.: RTI-VZ-2017-11.
- [24] Culek, M.: *Návrh hrubé stavby skříňové lokomotivy – analýza pevnosti a tuhosti*, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2016.
- [25] Prospekt firmy WELDYX *profesionál*.
- [26] Prospekty a podklady firmy AirDIV s.r.o.
- [27] *Sciverse* [online]. 6. 7. 2007 [cit. 2011-11-07]. Science direct. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822305003302>>.
- [28] Dostupné z: <http://www.5m.cz/userfiles/file/Vostiny%20a%20sendvice%20pro%20letectvi.pdf>, (poslední revize 16. 5. 2012).
- [29] Dostupné z: <http://www.5m.cz/cz/kolejova-vozidla/> (poslední revize 16. 5. 2012).
- [30] Dostupné z: <http://www.jecomposites.com/news/composites-news/hybrid-composite-carbody-korean-tilting-train> (poslední revize 20. 6. 2013).
- [31] Dostupné z: <http://www.5mslovakia.sk/sendviove-panely> (poslední revize 20. 6. 2012).
- [32] Dostupné z: <http://www.paroc.cz/knowhow/zvuk> (poslední revize 19. 5. 2017).
- [33] ČSN EN 15 227.
- [34] ČSN EN 12663-1.
- [35] ČSN EN 14750-1: Železniční aplikace – Klimatizace pro městská a příměstská kolejová vozidla – Část 1: Parametry pohodlí.
- [36] ČSN EN 14750-2: Železniční aplikace – Klimatizace pro městská a příměstská kolejová vozidla – Část 2: Typové zkoušky.
- [37] ČSN EN 13129-1: Železniční aplikace – Klimatizace pro kolejová vozidla hlavních tratí – Část 1: Parametry pohodlí.
- [38] ČSN EN 13129-2: Železniční aplikace – Klimatizace pro kolejová vozidla hlavních tratí – Část 2: Typové zkoušky.
- [39] ČSN EN 14813-1: Železniční aplikace – Klimatizace pro stanoviště strojvedoucího/řidiče– Část 1: Parametry pohodlí.
- [40] ČSN EN 14813-1: Železniční aplikace – Klimatizace pro stanoviště strojvedoucího/řidiče– Část 2: Typové zkoušky.

10 Přílohy

Příloha č. 1: Statické pevnostní požadavky na skříně kolejových vozidel

Skříně kolejových vozidel musí odolat maximálnímu zatížení stanovenému provozními požadavky a splnit požadovanou provozní životnost za běžných provozních podmínek s přiměřenou pravděpodobností zbytkové životnosti.

Schopnost skříně kolejového vozidla odolat trvalým deformacím nebo trhlinám musí být prokázána výpočtem a/nebo zkouškami. Vyhodnocení musí vycházet z následujících kritérií:

- I. Výjimečné zatížení, jemuž odpovídá maximální namáhání, kterému musí odolat a být zároveň v plně provozuschopném stavu.
- II. Dostatečná bezpečnost, která vyloučí katastrofickou trhlinu nebo destrukci, a to i v případě překročení výjimečného zatížení.
- III. Taková tuhost, aby deformace pod zatížením a při vlastní frekvenci kmitání skříně, vyhověly hodnotám stanoveným provozními požadavky.
- IV. Odolnost vůči provoznímu nebo cyklickému zatížení po stanovenou dobu životnosti bez snížení konstrukční bezpečnosti.

Podélné statické zatížení skříně

Tab. 32 Tlaková síla v úrovni nárazníků [kN]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
2000	2000	1200	2000	1500	800	400	200

Tab. 33 Tlaková síla 50 mm pod úrovní nárazníků [kN]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
-	1500	900	-	-	-	-	-

Tab. 34 Tlaková síla působící úhlopříčně v úrovni nárazníků [kN]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
500 ^{a)}	400	400	500 ^{a)}	500 ^{a)}	-	-	-

^{a)} Toto zatížení platí pouze pro nárazníky zařazené do normálního provozu.

Tab. 35 Tahová síla v prostoru spřáhla [kN]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
1000 ^{a)}	1500 ^{b)} 1000 ^{d)}	1500 ^{c)} 1000 ^{d)}	1000 ^{a)}	1000	600 ^{b)}	300 ^{b)}	150 ^{b)}

^{a)} Větší síla (např. 1500 kN) může být nutná pro určité druhy spřáhel.

^{b)} Tahová síla musí být odsouhlasena provozovatelem a výrobcem tak, aby odpovídala provozu.

^{c)} Tahová síla 1500 kN působící na dorazy táhlového ústrojí „a“, pokud jsou dorazy táhlového ústrojí použity (viz EN 12663-2).

^{d)} Tahová síla 1000 kN působící na dorazy táhlového ústrojí „b“, pokud jsou dorazy táhlového ústrojí použity, a pro jiné typy uchycení spřáhla (viz EN 12663-2).

Tab. 36 Tlaková síla u hlavového vozidla působící 150 mm nad podlahou [kN]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
400 ^{a)}	-	-	400	400	-	-	-

^{a)} Platí pouze pro čelní kabiny.

Tab. 37 Tlaková síla v úrovni dolního okraje okenních otvorů (spodní rám) [kN]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
300 ^{a) b)}	-	-	300 ^{b)}	300 ^{b)}	300 ^{b)}	-	-

^{a)} Platí pouze pro čelní kabiny.

^{b)} U kabiny strojvedoucího musí toto zatížení působit pod okenním otvorem.

Tab. 38 Tlaková síla v úrovni vaznice (hrany střechy) [kN]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
-	-	-	300	300	300	-	-

Svislé statické zatížení skříně vozidla

Tab. 39 Maximální provozní zatížení [N]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
1,3g m ₁	1,3g(m ₁ +m ₃) _{a)}	1,3g(m ₁ +m ₃) _{a)}	1,3g(m ₁ +m ₄)			1,2g(m ₁ +m ₂)	

a) Jestliže při používání dochází k většímu meznímu zatížení (např. v důsledku dynamických vlivů nebo stavu ložení), musí se použít vyšší hodnota definovaná ve specifikaci.

Tab. 40 Zvedání jednoho konce vozidla ve stanovených zvedacích místech [N]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
1,1g(m ₁ +m ₃)	1,0g(m ₁ +m ₂ +m ₃)		1,1g(m ₁ +m ₃)				

Tab. 41 Zvedání celého vozidla ve stanovených zvedacích místech [N]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
1,1g(m ₁ +2m ₂)	1,1g(m ₁ +2m ₂ +m ₃)		1,1g(m ₁ +2m ₂)				

Kombinace případů statického zatížení skříně vozidla

K prokázání dostatečné statické pevnosti musí výrobce respektovat kombinace případů statického zatížení podle Tab. 42.

Tab. 42 Kombinace případů statického zatížení skříně vozidla [N]

Kombinace případů zatížení	Lokomotivy	Nákladní vozy	Vozidla osobní dopravy
	Kategorie L	Kategorie	Kategorie
		F-I, F-II	P-I, P-II, P-III, P-IV, P-V
Tlaková síla a svislé zatížení	-	Tab. 32 a g(m ₁ +m ₃)	Tab. 32 a g(m ₁ +m ₄)
		Tab. 33 a g(m ₁ +m ₃)	
Tahová síla a svislé zatížení	-	Tab. 35 a g(m ₁ +m ₃)	Tab. 35 a g(m ₁ +m ₄)

Případy statického zatížení pro upevnění zařízení

Ve vozidlech se nachází zařízení (ve strojovnách, v oddílech pro cestující), jejichž upevňovací elementy jsou tímto zařízením zatěžovány. Síly vycházející z účinků zrychlení těchto zařízení se vypočtou násobením hmotnosti těchto zařízení a zrychlení podle Tab. 43, Tab. 44 a Tab. 45.

Spojení skříně s podvozkem musí odolat zatížením, nezávisle na maximálním zatížení, pocházejícím od:

- I. maximálního zrychlení podvozku ve směru x podle Tab. 43,
- II. maximálního bočního zrychlení ve směru y podle Tab. 44,
- III. svislého zatížení plynoucího z požadavku zvedání skříně s podvozkem podle Tab. 45.

Tab. 43 Zrychlení ve směru x [m/s²]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
±3g	± 5g		± 5g	±3g	±3g	±2g	±2g

Tab. 44 Zrychlení ve směru y [m/s²]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
±1g							

Tab. 45 Zrychlení ve směru z [m/s²]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
(1 ± c)g ^{a)}							

^{a)} $c = 2$ na konci vozidla, snižuje se lineárně až na 0,5 ve středu vozidla

Hlavní případy únavového zatížení skříně vozidla

Je důležité, aby byly identifikovány zdroje kmitavého zatížení, které mohou způsobit únavové poškození. Následující specifická zatížení musí být zvážena pro odhad únavového poškození konstrukce vozidla.

Spektrum užitečného zatížení

U vozidel, kde dochází k významným změnám užitečného zatížení, se musí stanovit procentuální doba v každé úrovni a tyto údaje ve vhodném tvaru použít pro výpočtové účely. Změny užitečného zatížení jsou významné zejména v nákladní a rychlé městské dopravě. Pro jiné typy kolejových vozidel je obvykle dostatečné předpokládat konstantní užitečné zatížení po celou dobu provozu. Úroveň užitečného zatížení by měla být vyjádřena jako poměrná část hmotnosti maximálního užitečného zatížení m_2 .

Zatěžovací a odlehčovací cykly

Únavové poškození plynoucí ze zatěžovacích a odlehčovacích cyklů je významné u vozidel s vysokým poměrem užitečného zatížení ku hmotnosti prázdného vozidla nebo pokud dochází k častým změnám zatížení. Tyto údaje musí být vhodným způsobem použity pro výpočet.

Zatížení vyvolané trati

Zatížení vyvolané svislými, bočními a torzními účinky od nepravidelností trati se určí z dynamického modelování (z údajů vztažených ke geometrii trati a nerovnostem) naměřených údajů na stanovené nebo podobné trati, nebo vyjádřených empirickými údaji (zrychlení, posuvy atd.).

Povaha údajů k prokázání únavové pevnosti se bude lišit podle užití metody kumulace poškození nebo metody meze únavy.

Tab. 46, Tab. 47 a Tab. 48 udávají empirické hodnoty pro metodu meze únavy za obvyklých evropských provozních podmínek, pokud nejsou k dispozici přesnější údaje.

Tab. 46 Zrychlení ve směru x [m/s²]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
± 0,15g	± 0,3g ^{b)}		± 0,15g			± 0,15g ^{a)}	± 0,2g

^{a)} V případě, že vozidla mají přecházet z pouličního provozu, musí být navržena pro ± 0,2g.

^{b)} Platí pouze pro úchyty vybavení.

Tab. 47 Zrychlení ve směru y [m/s²]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
± 0,2g	± 0,2g ± 0,4g ^{a)}		± 0,15g				

^{a)} Platí pro úchyty vybavení, ale pro podvozková vozidla a dvounápravové vozy se zdokonaleným vypružením může být nižší.

Tab. 48 Zrychlení ve směru z [m/s²]

Lokomotivy	Nákladní vozy		Vozidla osobní dopravy				
Kategorie L	Kategorie F-I	Kategorie F-II	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V
(1± 0,25)g	(1± 0,3)g ^{b)}		(1± 0,15)g ^{b)}			(1± 0,15)g ^{a)}	

^{a)} (1± 0,18)g pro provoz na žlábkových kolejnicích.

^{b)} Pro nákladní vůz s dvoustupňovým vypružením (1± 0,25)g. Jestliže provoz vykazuje vyšší činitel dynamického zatížení (například vlivem dynamických účinků nebo stavu ložení), musí se použít vyšší hodnota definovaná ve specifikaci.

Únavové zatížení ve stanovených místech

Výrobce musí zabezpečit, aby všechna význačná zatížení plynoucí z vlivu stanovených částí vozidla na skříň byla zpracována. Nejdůležitější jsou následující:

- *Spojení skříňe a podvozku.* Hlavní únavové zatížení vzniká z trakčních, brzdících a vzájemně působících dynamických účinků vozidla.
- *Upevnění zařízení na vozidle* musí odolat nejen zatížením ze zrychlení vyplývajícího z dynamiky vozidla, ale i přídavným zatížením plynoucím z vlastního upevnění těchto zařízení v provozu.

Vibrace

Vlastní frekvence kmitání plně vyzbrojené skříňe vozidla musí být dostatečně odděleny od frekvence pojezdu, případně musí být jejich vazba potlačena, aby bylo při každé rychlosti vozidla zabráněno nežádoucí rezonanci.

Prokázání statické pevnosti a stability konstrukce

Výpočtem nebo zkouškou musí být prokázáno, že popsané případy zatížení nezpůsobí trvalé deformace nebo porušení konstrukce jako celku. Požadavek musí být splnitelný před dosažením meze pružnosti nebo kluzu.

Při porovnávání vypočítaného nebo změřeného napětí s napětím přípustným musí být využití prvku rovno nejvýše 1 podle následující rovnice:

$$U = \frac{R_d \cdot S}{R_L} \leq 1$$

U – využití prvku,

R_d – hodnota stanovená výpočtem nebo zkouškou,

S – konstrukční bezpečnostní součinitel,

R_L – přípustná nebo mezní hodnota.

Mezní poruchy

Je nutné zajistit rezervu bezpečnosti mezi výjimečným konstrukčním zatížením a zatížením, při kterém dojde k porušení konstrukce. Rezervu lze zajistit zavedením takového bezpečnostního součinitele S_2 , aby využití bylo rovno nejvýše 1.

$$U = \frac{\sigma_c \cdot S_2}{R_m} \leq 1$$

U – využití prvku,

S_2 – bezpečnostní součinitel pro mezní poruchu,

R_m – mezní zatížení materiálu [MPa],

σ_c – vypočtené napětí při výjimečném zatížení [MPa].

Obvykle se $S_2 = 1,5$, ale v případě, že se konstrukční zatížení mají ověřovat zkouškou, nebo když je korelace mezi zkouškou a výpočtem dostatečně potvrzena, lze použít hodnotu $S_2 = 1,3$. V případech, kdy existují alternativní cesty šíření zatížení, a tyto cesty splňují bezpečnostní součinitel $S_2 = 1,3$, lze bezpečnostní součinitel S_2 zmenšit. Kritérium pro mezní poruchu neplatí pro ty konstrukční části, které jsou úmyslně navrženy jako zničitelné řízeným způsobem (např. podle EN 15227).

Nestabilita

Pro místní nestability ve formě pružné deformace je přípustné zajistit alternativní cesty šíření daného zatížení, splňující kritéria pro mez pružnosti nebo mez kluzu. Konstrukce vozidla musí mít rezervu bezpečnosti proti nestabilitě vedoucí k celkovému poškození konstrukce při výjimečném zatížení.

$$U = \frac{\sigma_c \cdot S_3}{\sigma_{cb}} \leq 1 \text{ nebo } U = \frac{L_c \cdot S_3}{L_{cb}} \leq 1$$

U – využití prvku,

S_3 – bezpečnostní součinitel pro nestabilitu,

σ_{cb} – kritické deformační napětí [MPa],

σ_c – vypočtené napětí [MPa],

L_{cb} – kritické deformační zatížení [N],

L_c – vypočítané zatížení [N].

Bezpečnostní součinitel se musí volit $S_3 = 1,5$. Kritérium nestability se používá pro konstrukční součásti, které jsou úmyslně navrženy jako zničitelné řízeným způsobem (např. podle požadavků EN 15227).

Prokázání tuhosti

Požadovaná tuhost může být stanovena jako přípustná deformace při předepsaném zatížení nebo jako minimální frekvence vlastních kmitů skříně.

Prokázání únavové pevnosti

Skříně kolejových vozidel jsou během své provozní životnosti vystavovány velkému počtu dynamických zatížení proměnlivé velikosti. Vlivy těchto zatížení se nejvíce projevují v kritických prvcích konstrukce skříně vozidla.

Příklady těchto prvků jsou:

- působiště zatížení (včetně úchytů vybavení),
- spoje mezi konstrukčními díly a celky, např. svary a šroubové spoje,
- tvarové přechody vedoucí ke koncentraci napětí, např. rohy dveří a oken.

Důležitá je identifikace těchto kritických prvků. Nezbytným může být podrobné zkoumání jednotlivých prvků.

Únavovou pevnost lze prokázat dvěma metodami:

- **Metoda mezní trvalé pevnosti.** Tuto metodu lze použít pro všechny oblasti, kde se dynamické napětí při všech cyklech nachází pod mezní hodnotou trvalé pevnosti materiálu. Požadovaná únavová pevnost je prokázána tím, že napětí vyvolaná účinky všech přípustných kombinací únavových zatěžovacích stavů jsou nižší než mezní hodnota trvalé pevnosti.

- **Metoda kumulativního poškození.** Metoda je alternativní k metodě mezní trvalé pevnosti. Reprezentativní časový průběh druhů zatížení od každého zdroje zatížení se popisuje velikostí zatížení a počtem cyklů. Musí se brát v úvahu kombinace všech zatížení působících současně. Požadovaná únavová pevnost je prokázána, pokud je výsledné poškození kteréhokoli kritického prvku vlivem všech příslušných kombinací druhů únavových zatížení menší než jedna.

Odolnost kolejových vozidel proti nárazu

Zcela nový požadavek vyvstává u nově konstruovaných lokomotiv a osobních kolejových vozidel. Předmětem požadavků na pasivní bezpečnost popsanych v normě ČSN EN 15227 je

snížení důsledků kolize kolejového vozidla s jiným kolejovým vozidlem, s jiným dopravním prostředkem nebo s jiným předmětem. Tyto požadavky zajišťují takovou úroveň odolnosti proti nárazu, která sníží následky nehody v případě, že opatření aktivní bezpečnosti nebyla dostatečná.

Následující tabulka ukazuje konstrukční kategorie odolnosti proti nárazu u kolejových vozidel, kdy norma ČSN EN 15227 dělí vozidla na 4 kategorie, které jsou uvedené v Tab. 49.

Tab. 49 Konstrukční kategorie odolnosti proti nárazu u kolejových vozidel

Kategorie	Definice	Příklady typů vozidel
C-I	Vozidla určená k provozu na tratích transevropské sítě, na mezinárodních, národních a regionálních tratích (s úrovněnými přejezdy)	Lokomotivy, osobní vozy a ucelené vlakové jednotky
C-II	Městská vozidla určená k provozu pouze na vyhrazené železniční infrastruktuře, bez vazby na silniční dopravu	Vozidla metra
C-III	Lehká železniční vozidla, určená k provozu v městské, popř. regionální síti, v provozu sdílených tratí a s vazbou na silniční dopravu	Tramvajové soupravy, předměstská tramvaj
C-IV	Lehká železniční vozidla, určená k provozu ve vyhrazených městských sítích s vazbou na silniční dopravu	Tramvajová vozidla

Z textu normy i z Tab. 49 vyplývá, že se tato norma vztahuje na všechna vozidla mimo nákladních vozů.

Konstrukční scénáře srážky

Norma požaduje zajistit ochranu cestujících na takové úrovni, která odpovídá běžným nebezpečím srážek. Konstrukční scénáře představují nejtypičtější kolizní situace a současně i situace, při nichž dochází k největšímu počtu smrtelných zranění. Scénáře srážky a překážky působící srážku jsou uvedeny v Tab. 50.

Tab. 50 Scénáře srážky a překážky působící srážku

Konstrukční scénář srážky	Překážka působící srážku	Charakteristika provozu, na který se vztahuje požadavek	Rychlost nárazu – km/h				Narážející vozidlo a podmínky
			C-1	C-II	C-3	C-4	
1	Totožná vlaková jednotka	Všechny systémy	36	25	25	15	Totožná vlaková jednotka

Pasivní bezpečnost konstrukce

Norma stanovuje, jaká opatření musí být přijata, aby v případě srážky byla zajištěna ochrana cestujících:

- snížení nebezpečí šplhání,
- pohlcení kolizní energie kontrolovatelným způsobem,
- zachování prostoru pro přežití a konstrukční celistvost obsazených prostorů,
- snížení zpomalení,
- snížení nebezpečí vykolejení a omezení následků srážky s překážkou na trati.

Příloha č. 2: Tabulka možných technologických postupů výroby kompozitů

Technologie	Výhody	Nevýhody
Kontaktní laminace	- Široké spektrum výztuže i pojiv s možností kombinace libovolných typů suché výztuže s vybraným pojivem	- Velký rozptyl mechanických vlastností i hmotností výrobků. Toto je dáno procesem, kdy jsou tyto vlastnosti zcela závislé na daném pracovníkovi.
	- Jednoduchá technologie vyžadující minimální investici do výrobních zařízení a prostor	- Nízká teplota skelného přechodu vytvrzeného materiálu. Dáno vytvrzováním pojiva při nízkých teplotách a nutnost dotvrzování v případě zvyšování Tg.
	- Možnost použití gelcoatu pro dosažení finální barevné úpravy dílů bez lakování.	- Nízká efektivita výroby, protože materiál je nutné řezat ručně a jednotlivé vrstvy je nutné prosycovat.
	- Nízké náklady na materiál i výrobní zařízení. Celkově takzvaná "lowcost" technologie	- Hygienicky závadné pracovní prostředí, pracovníci jsou vystaveni výparům a nevytvrzenému pojivu při prosycování výztuže.
Vakuová infuze	- Široké spektrum výztuže i pojiv s možností kombinace libovolných typů suché výztuže s vybraným pojivem	- Vyšší hmotnost v případě sendvičových dílů. To je dáno nutností zajištění toku pojiva z obou stran jádra čehož je dosaženo tím, že v jádru jsou otvory nebo drážky, které jsou při výrobě zality pojivem a je tak zvyšována hmotnost dílu.
	- Poměrně malá investice do výrobních zařízení a prostor	- Výrobní proces je poměrně složitý. Je nutné odladit výrobní procesy, aby nedocházelo při výrobě ke vzniku typických vad, jako je porozita a neprosycená místa.

	<ul style="list-style-type: none"> - Možnost použití gelcoatu pro dosažení finální barevné úpravy dílů bez lakování. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nízká teplota skelného přechodu vytvrzeného materiálu. Dáno vytvrzováním pojiva při NT. Možno zvýšit dotvrzením dílu v peci, ale jen v omezené míře.
	<ul style="list-style-type: none"> - Nízké náklady na materiál i výrobní zařízení. Celkově tzv. "lowcost" technologie 	<ul style="list-style-type: none"> - Pracnější pokládání výztuže do tvarově složitých forem, protože je nutné dodatečnými prostředky fixovat výztuž na správném místě.
	<ul style="list-style-type: none"> - Efektivní technologie, protože je do formy pokládána pouze výztuž a sycení je provedeno až následovně bez přímé účasti pracovníků. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nemožnost použití voštiny jako sendvičového jádra.
RTM (Resin Transfer Moulding)	<ul style="list-style-type: none"> - Široké spektrum výztuže i pojiv s možností kombinace libovolných typů suché výztuže s vybraným pojivem 	<ul style="list-style-type: none"> - Nízký objemový poměr výztuže v laminátu
	<ul style="list-style-type: none"> - Efektivní technologie, protože je do formy pokládána pouze výztuž a sycení je provedeno až následovně bez přímé účasti pracovníků. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vysoké náklady na přípravky. Přípravky jsou kolem celého dílu, často jsou tedy nutné mnohadílné formy se složitou dělicí rovinou, aby bylo možné díl vyjmout. Přípravky musí být hodně tuhé, aby odolaly přetlaku pojiva při sycení.
	<ul style="list-style-type: none"> - Možnost přesných tvarů daných formou u všech vnějších rozměrů dílu. 	<ul style="list-style-type: none"> - Obtížná použitelnost jader pro sendvičové konstrukce. Je obtížné zajistit jejich přesnou polohu ve formě.
	<ul style="list-style-type: none"> - Vysoká opakovatelnost a automatizace procesu sycení výztuže pojivem 	<ul style="list-style-type: none"> - Pracnější pokládání výztuže do tvarově složitých forem, protože je nutné dodatečnými prostředky fixovat výztuž na správném místě.
RFI (Resin Film Infusion)	<ul style="list-style-type: none"> - Široké spektrum použitelné výztuže. Jeden typ pojiva možno použít pro libovolné varianty výztuží 	<ul style="list-style-type: none"> - Nutnost řezat výztuž a foliové pojivo zvlášť nebo nalepit foliové pojivo na výztuž před lepením.

	-Vysoká teplota skelného přechodu	- Nižší efektivita při pokládání vrstev výztuže a pojiva při skladbě.
	- Pracovníci nejsou vystaveni nevytvrzenému pojivu v tekutém stavu či jeho výparům	- Jednotlivé vrstvy výztuže a pojiva se navzájem volně posunují, což komplikuje pokládání vrstev na šikmém plochy formy a jejich fixování.
	- Přesné dávkování poměru výztuže a pojiva. Možnost dosažení vysokého objemového poměru výztuže a pojiva. Možnost dosáhnout požadovaného objemového poměru výztuže a pojiva.	- Omezená dostupnost foliových pojiv. Vyrábí jen omezené množství výrobců. V Evropě jsou 2 výrobci.
Prepregy	- Přesná plošná hmotnost výztuže i pojiva. Přesně daný objemový poměr výztuže a pojiva.	- Relativně vysoké materiálové náklady – prepregy i technologické materiály.
	-Vysoká teplota skelného přechodu	- Vysoké pořizovací i provozní náklady na výrobní zařízení.
	- Pracovníci nejsou vystaveni nevytvrzenému pojivu v tekutém stavu ani jeho výparům	- Omezený výběr výztuží a pojiv. Nemí doporučeno kombinovat materiály od různých výrobců.
	- Materiál je možné řezat velmi dobře na CNC řezacím stroji (přesné tvary nástřihů a pokaždé stejné tvary). Vysoká opakovatelnost výroby	- Náročnější logistika materiálu vzhledem k omezené životnosti materiálu při normální teplotě i v mrazicím boxu. Je obtížnější dostupnost materiálu. Výrobci nemají téměř žádné skladové zásoby (vyrábí se na objednávku).
	- Povrch prepregového polotovaru je lepivý, proto je možné nástřihy umístit s vysokou přesností. Díky lepivosti povrchu je po umístění nástřihů do formy nemožné jejich samovolné posunutí či posunutí neopatrností pracovníka.	- Krátká životnost materiálu i v mrazicím boxu (běžně 1 rok), mimo mrazicí box (běžně 10 až 30 dnů). Způsobuje komplikace se skladováním materiálu a sledováním jeho životnosti při normální teplotě i v mrazicím boxu.

	<p>- Vysoká efektivita výroby díky nařezání nástřihů na stroji a snadnému pokládání výztuže již prosycené pojivem. Možnost využití laserových projektorů pro přesné ukládání nástřihů nařezaných na CNC stroji.</p>	<p>- Formy pro vytvrzování musí být schopny opakovanému vystavení vysokým teplotám a tlaku při vytvrzování dílů.</p>
--	---	--

Příloha č. 3: Tabulka pevnostních požadavků na skříně kolejových vozidel dle normy ČSN EN 663-1, kategorie P III a porovnání naměřených hodnot zkoušek

Podélné statické zatížení skříně	Požadavky dané normou ČSN EN 12 663-1	Vyhovění funkčního vzorku skříně dle ČSN EN 12 663-1
Tlaková síla v úrovni nárazníků [kN]	800	ANO
Tlaková síla 50 mm pod úrovní nárazníků [kN]	-	-
Tlaková síla působící úhlopříčně v úrovni nárazníků (pro vozidla s nárazníky) [kN]	-	-
Tahová síla v prostoru spřáhla [kN]	600	ANO
Tlakové síla u hlavového vozidla působící 150 mm nad podlahou [kN]	-	-
Tlaková síla v úrovni dolního okraje okenních otvorů (spodní rám) [kN]	300	NE
Tlaková síla v úrovni vaznice (hrany střechy) [kN]	300	NE
Svislé statické zatížení skříně vozidla	Požadavky dané normou ČSN EN 12 663-1	Vyhovění funkčního vzorku skříně dle ČSN EN 12 663-1
Maximální provozní zatížení [N]	$1,3g(m_1+m_4)$	ANO
Zvedání jednoho konce vozidla ve stanovených zvedacích místech [N]	$1,1g(m_1+m_3)$	ANO
Zvedání celého vozidla ve stanovených zvedacích místech [N]	$1,1g(m_1+2m_2)$	ANO

Příloha č. 4: Produktový list použitého ventilátoru větrací jednotky

R3G310-RR12-P1

EC centrifugal fan - RadiCal®

backward curved, single inlet
for railway applications



ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG

Bachmühle 2 · D-74673 Mulfingen

Phone +49 7938 81-0

Fax +49 7938 81-110

info1@de.ebmpapst.com

www.ebmpapst.com

Limited partnership · Headquarters Mulfingen

County court Stuttgart · HRA 590344

General partner Elektrobau Mulfingen GmbH · Headquarters Mulfingen

County court Stuttgart · HRB 590142



Nominal data

Type	R3G310-RR12-P1	
Motor	M3G084-DF	
Nominal voltage	V	110
Type of data definition		ml
State		prelim.
Speed	min ⁻¹	2260
Power input	W	465
Current draw	A	4.2
Min. ambient temperature	°C	-40
Max. ambient temperature	°C	60

ml = Max. load · me = Max. efficiency · fa = Running at free air · os = Customer specs · cu = Customer unit
Subject to alterations

Data according to ErP directive

Installation category	A
Efficiency category	Static
Variable speed drive	Yes
Specific ratio*	1.00

* Specific ratio = $1 + p_{fs} / 100\,000\text{ Pa}$

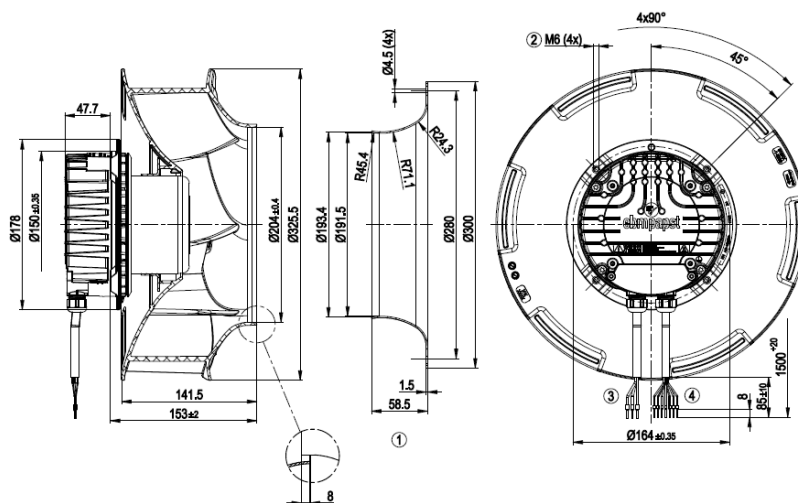
		Actual	Request 2013	Request 2015
Overall efficiency η_{es}	%	65.9	44	48
Efficiency grade N		79.9	58	62
Power input P_e	kW	0.46		
Air flow q_v	m ³ /h	2105		
Pressure increase p_{fs}	Pa	472		
Speed n	min ⁻¹	2260		

Data definition with optimum efficiency. LU-160428
The ErP data is determined using a motor-impeller combination in a standardised measurement configuration.

Technical features

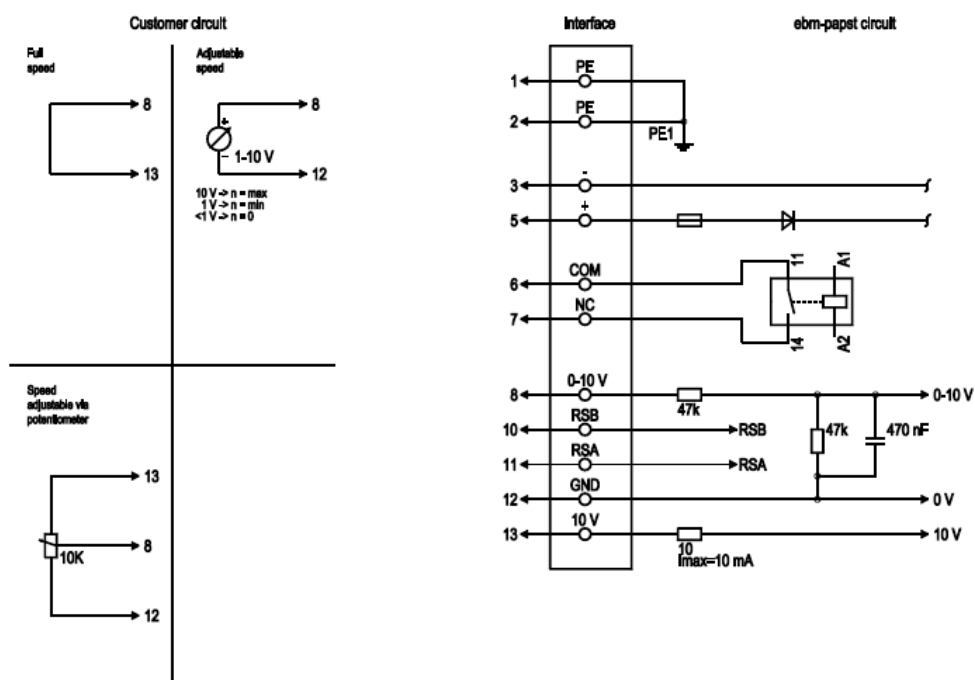
Mass	4.6 kg
Size	310 mm
Surface of rotor	Coated in black
Material of electronics housing	Die-cast aluminium
Material of impeller	PA plastic
Number of blades	6
Direction of rotation	Clockwise, seen on rotor
Type of protection	IP 54
Insulation class	"F"
Humidity class	F3-1
Max. permissible ambient motor temp. (transp./ storage)	+80 °C
Min. permissible ambient motor temp. (transp./storage)	-40 °C
Mounting position	Shaft horizontal or rotor on top; rotor on bottom on request
Condensate discharge holes	Rotor-side
Operation mode	S1
Motor bearing	Ball bearing; (sealed)
Technical features	<ul style="list-style-type: none"> - Output 10 VDC, max. 10 mA - Operation and alarm display - Alarm relay - Integrated PID controller - Run monitoring - Output limit - Motor current limit - RS485 MODBUS RTU - Soft start - Maximum EEPROM write cycles 100,000 - Control input 0-10 VDC / PWM - Control interface with SELV potential safely disconnected from the mains - Overvoltage detection - Over-temperature protected electronics / motor - Line undervoltage detection
Motor protection	Thermal overload protector (TOP) wired internally
Cable exit	Variable
Protection class	I (if protective earth is connected by customer)
Product conforming to standard	EN 15085-1, CPC3: 2007; EN 45545-2, HL3: 2013; EN 50155: 2008; EN 61373, Cat. 1B: 2010
Approval	EAC
Remark	If voltage (e.g. 230 VAC) is passed through the alarm relay, the SELV signal wires lose their property of reinforced insulation, meaning they only have basic insulation

Product drawing



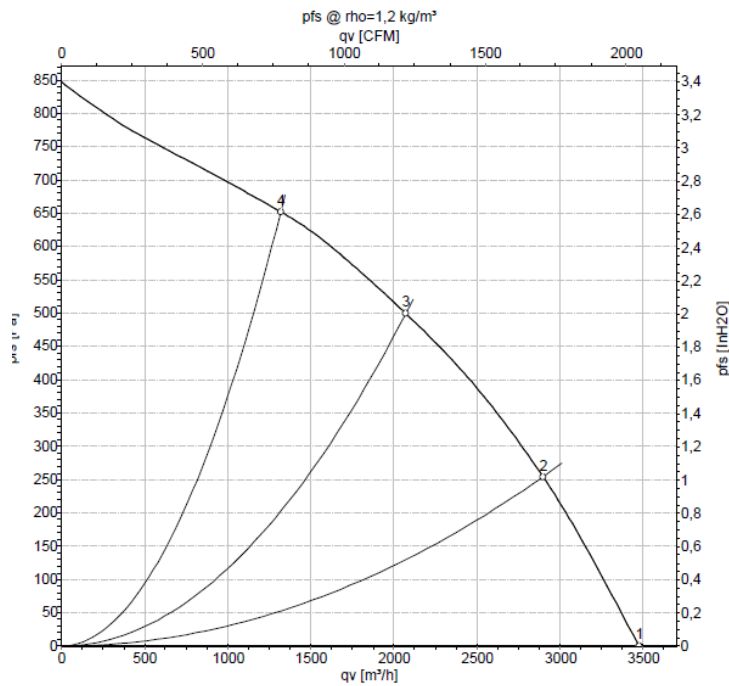
- 1 Accessory part: Inlet nozzle 31000-2-4013 not included in scope of delivery
- 2 Thread reach max. 16 mm
- 3 Connection line halogen-free, BETAtrans® 3 GKW flex, 3G 1.5 mm², 3x crimped core-end sleeves
- 4 Connection line halogen-free, BETAtrans® 3 GKW flex, 7x0.5 mm², 7x crimped core-end sleeves

Connection screen



No.	Conn.	Designation	Colour	Function / assignment
1	1, 2	PE		Protective earth
1	3	-	black	Power supply, GND, see type plate for voltage range
1	5	+	brown	Power supply, see type plate for voltage range
2	6	COM	grey	Status relay, floating status contact, break for failure, Contact rating 250 VAC / max. 2 A (AC1) / min. 1 mA / 5 V, basic insulation on mains side and on control interface
2	7	NC	orange	Status relay, floating status contact, common connection, Contact rating 250 VAC / max. 2 A (AC1) / min. 1 mA / 5 V, basic insulation on mains side and on control interface
2	8	0-10 V		Analogue input 1, set value: 0-10 V, Ri= 100 kΩ, parametrisable curve; SELV
2	10	RSB		RS-485 interface for MODBUS, RSB; SELV
2	11	RSA		RS-485 interface for MODBUS, RSA; SELV
2	12	GND		Reference earth for control interface; SELV
2	13	+10 V		Fixed voltage output 10 VDC, +10 V ±3%, max. 10 mA, short-circuit-proof, power supply for external devices (e.g. potentiometers); SELV

Charts: Air flow



Measurement: LU-160428

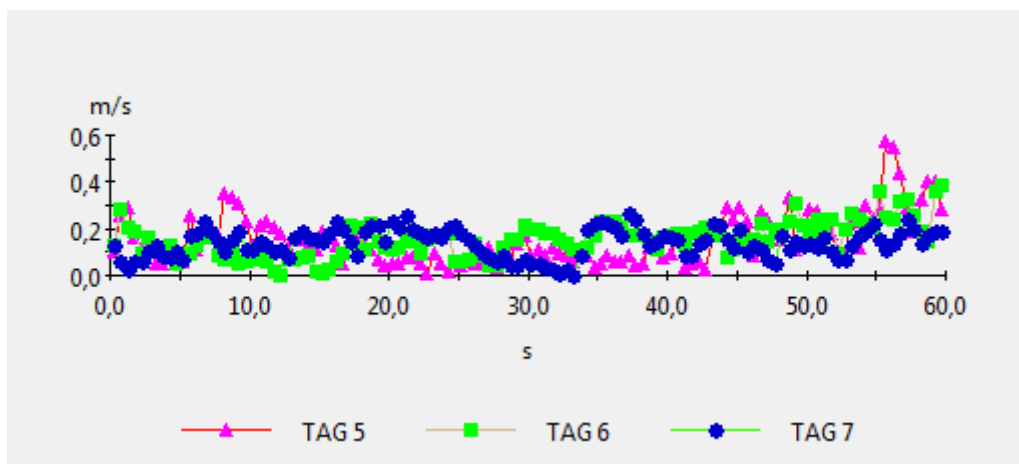
Air performance measured as per ISO 5801 Installation category A. For detailed information on the measuring set-up, please contact ebm-papst. Suction-side noise levels: LwA measured as per ISO 13347 / LpA measured with 1m distance to fan axis. The values given are valid under the measuring conditions mentioned above and may vary according to the actual installation situation. With any deviation from the standard set-up, the specific values have to be checked and reviewed with the unit installed.

Measured values

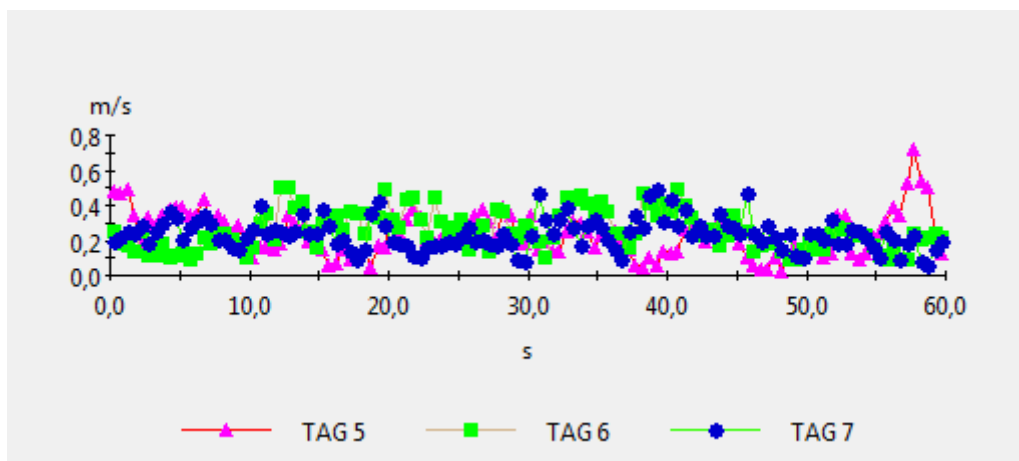
	Conn.	U	n	P _{ed}	I	LpA _{in}	LwA _{in}	qv	p _{fs}
		V	min ⁻¹	W	A	dB(A)	dB(A)	m ³ /h	Pa
1	Y	110	2355	356	3.24	73	80	3475	0
2	Y	110	2290	436	3.96	68	75	2895	250
3	Y	110	2260	465	4.20	62	68	2070	500
4	Y	110	2300	441	4.00	65	72	1320	650

Conn. = Connection · U = Supply voltage · n = Speed · P_{ed} = Power input · I = Current draw · LpA_{in} = Sound pressure level inlet side · LwA_{in} = Sound power level inlet side · qv = Air flow
 p_{fs} = Pressure increase

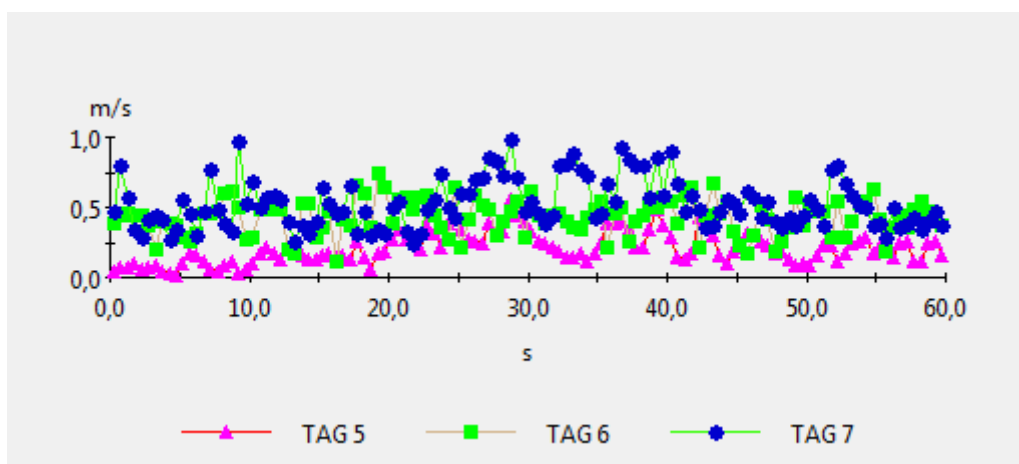
Příloha č. 5: Naměřené průběhy rychlostí v salonu vozu pro jednotlivé výkony ventilátoru



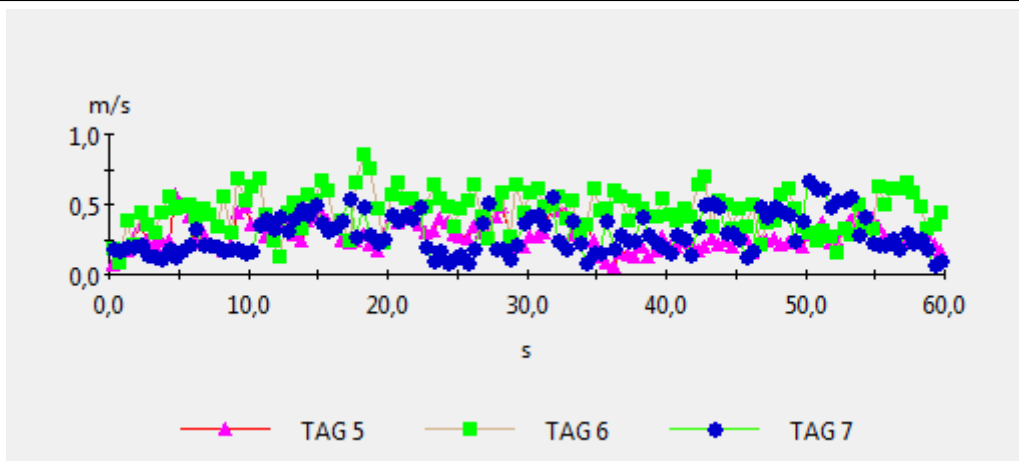
Obr. 150 Průběh rychlostí v poloze High 1 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



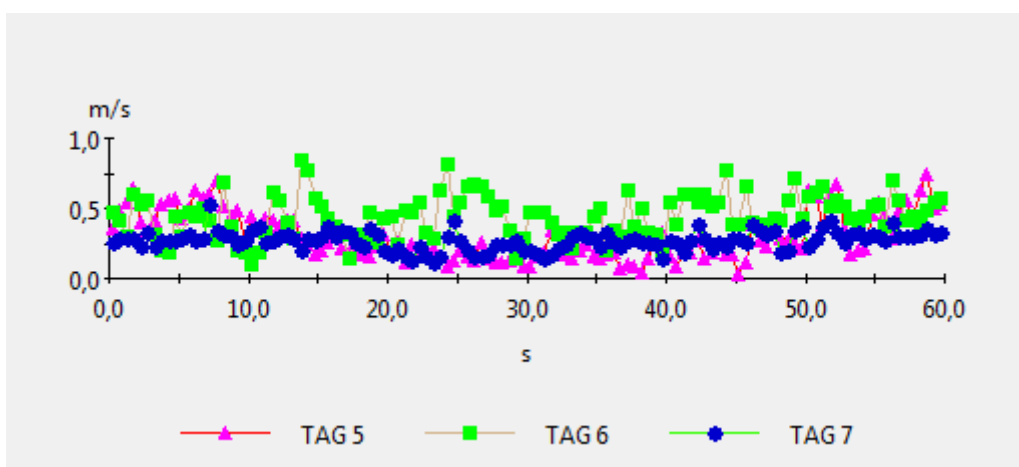
Obr. 151 Průběh rychlostí v poloze High 2 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



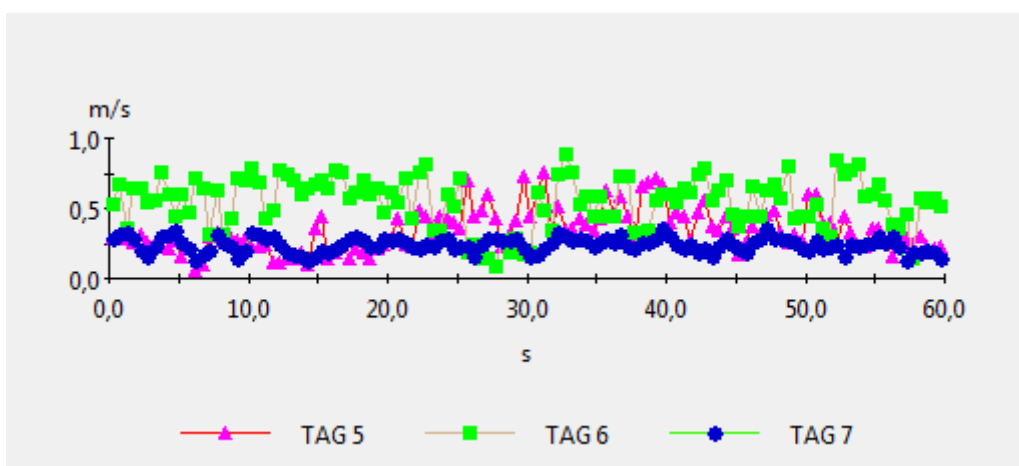
Obr. 152 Průběh rychlostí v poloze High 3 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



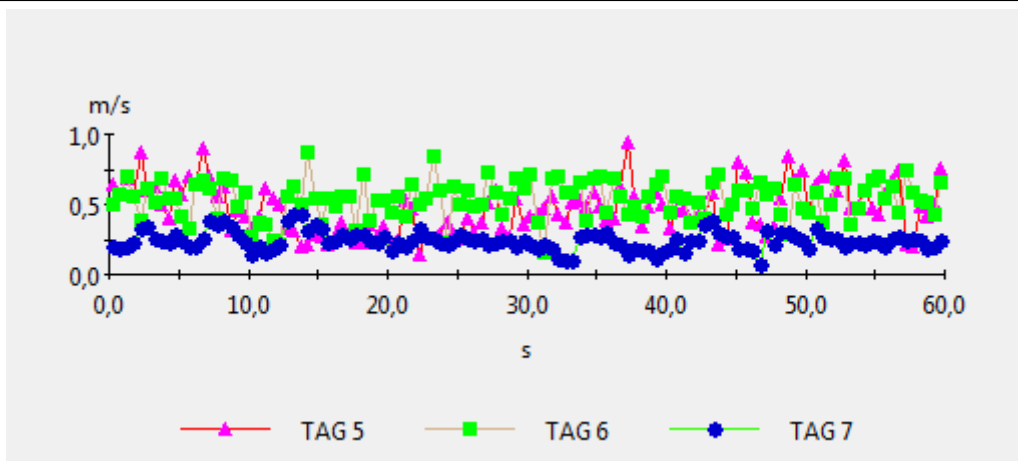
Obr. 153 Průběh rychlostí v poloze High 4 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



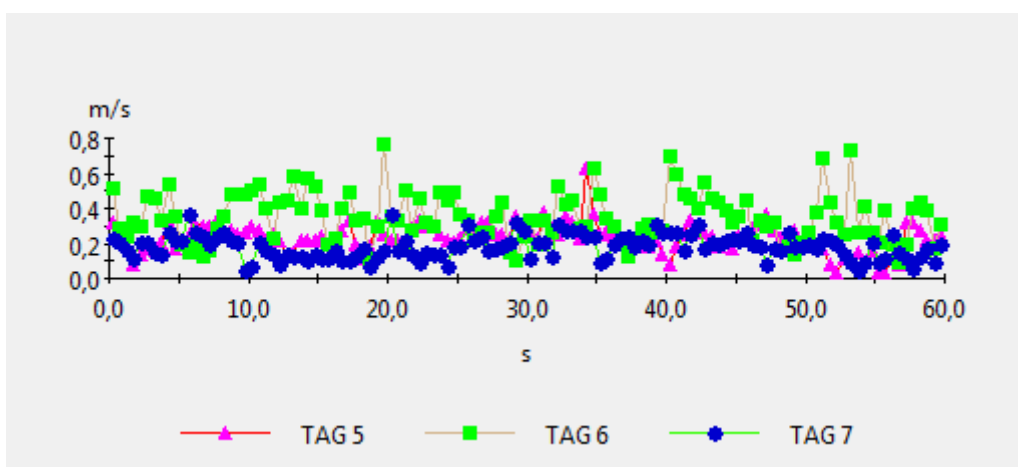
Obr. 154 Průběh rychlostí v poloze High 5 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



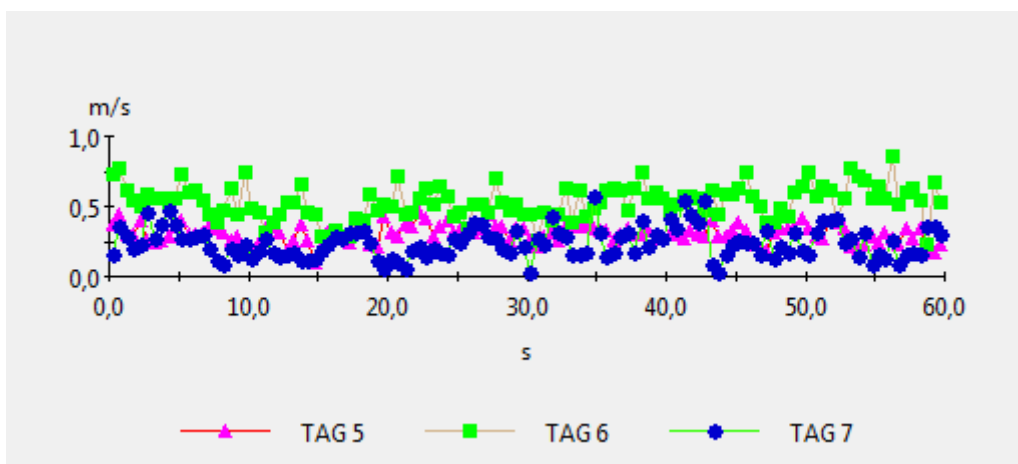
Obr. 155 Průběh rychlostí v poloze High 6 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



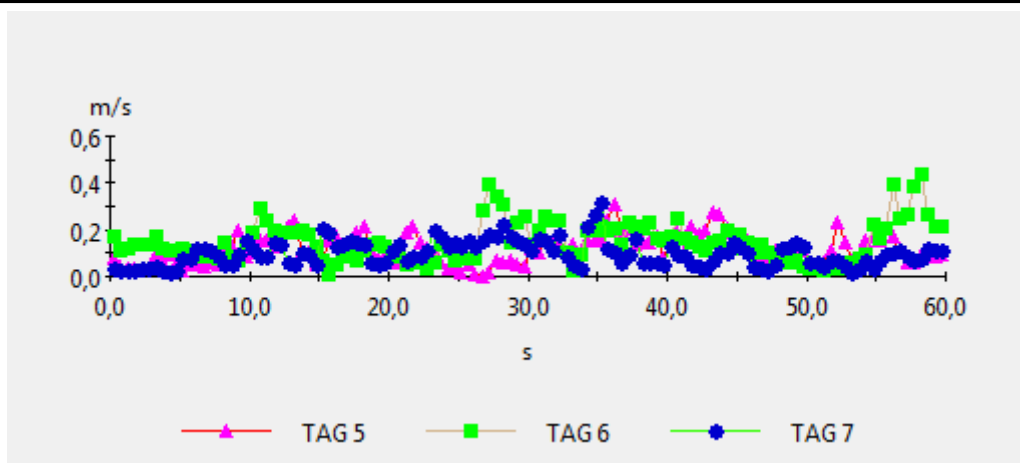
Obr. 156 Průběh rychlostí v poloze High 7 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



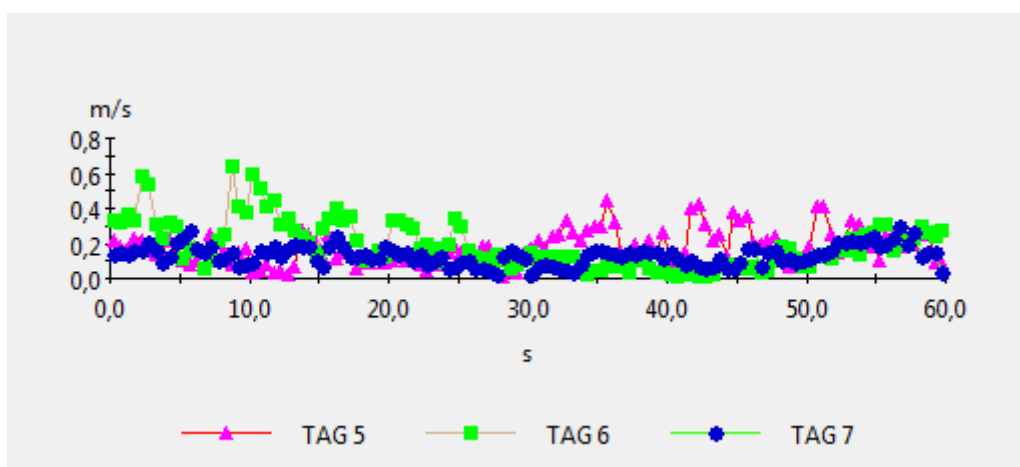
Obr. 157 Průběh rychlostí v poloze High 8 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



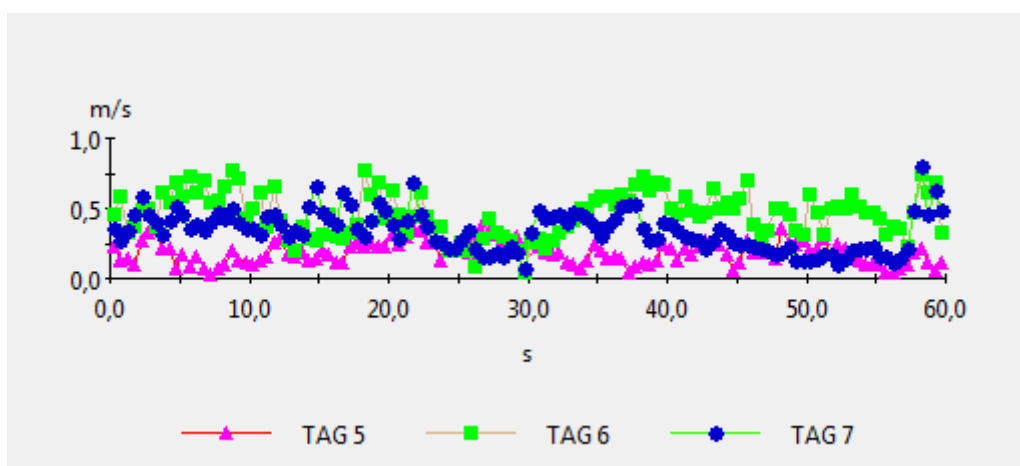
Obr. 158 Průběh rychlostí v poloze High 9 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



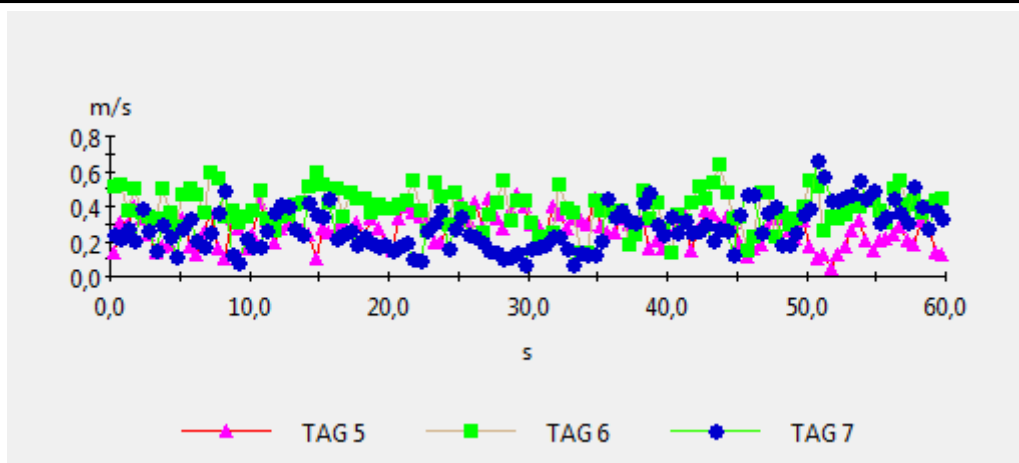
Obr. 159 Průběh rychlostí v poloze Low 1 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



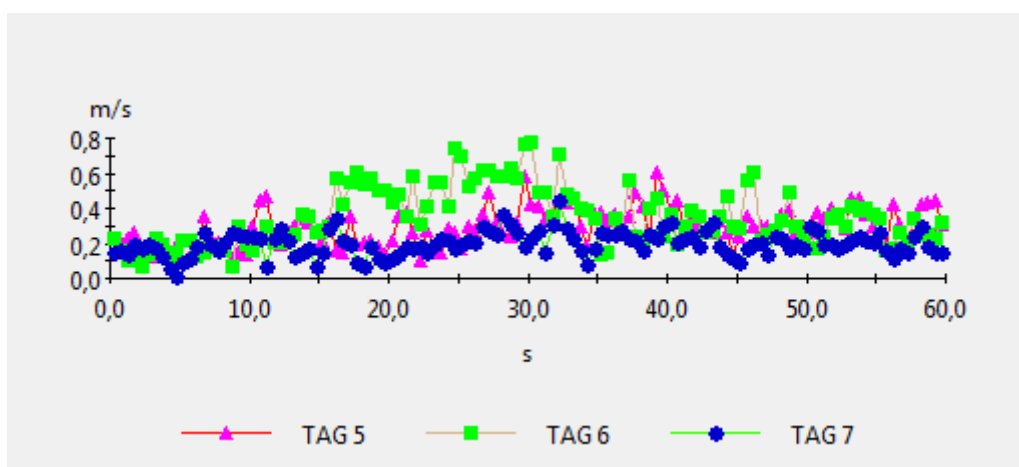
Obr. 160 Průběh rychlostí v poloze Low 2 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



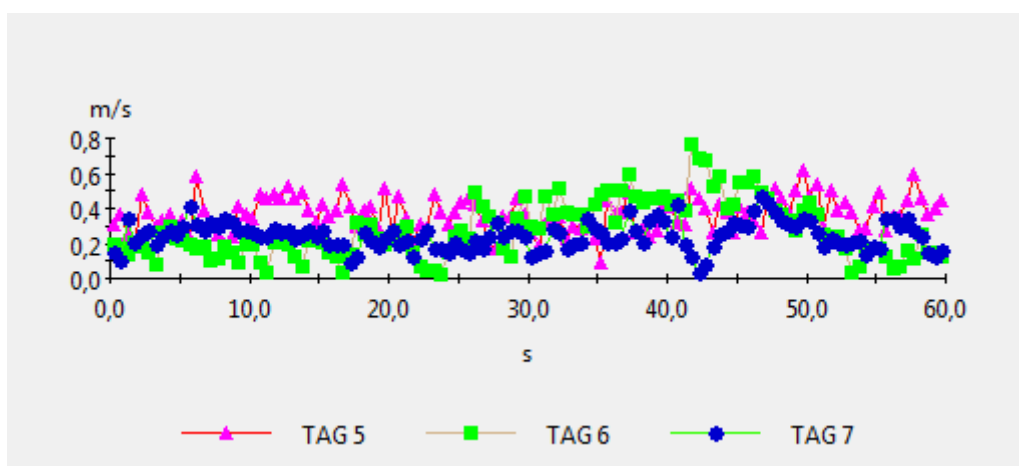
Obr. 161 Průběh rychlostí v poloze Low 3 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



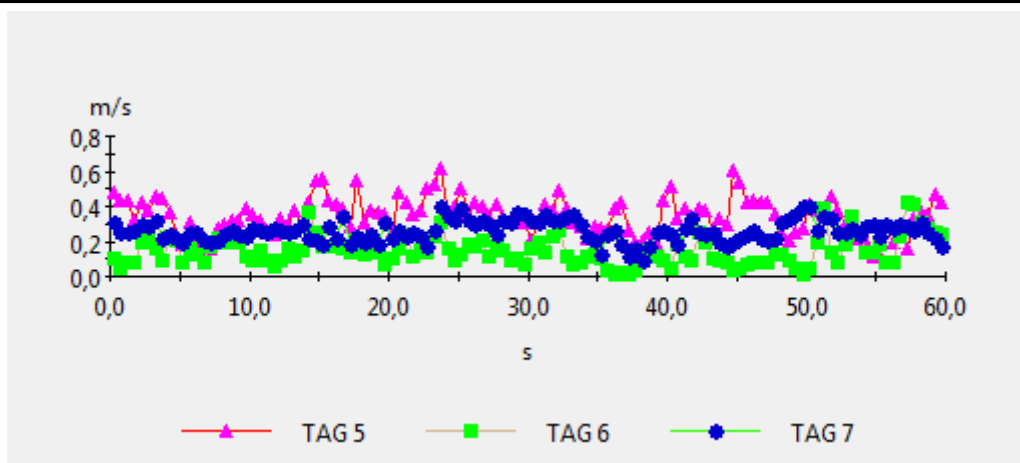
Obr. 162 Průběh rychlostí v poloze Low 4 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



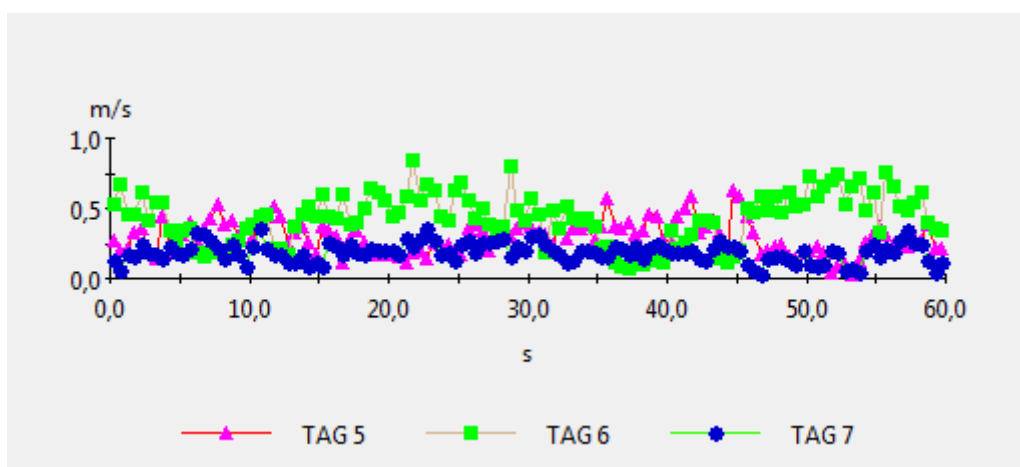
Obr. 163 Průběh rychlostí v poloze Low 5 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



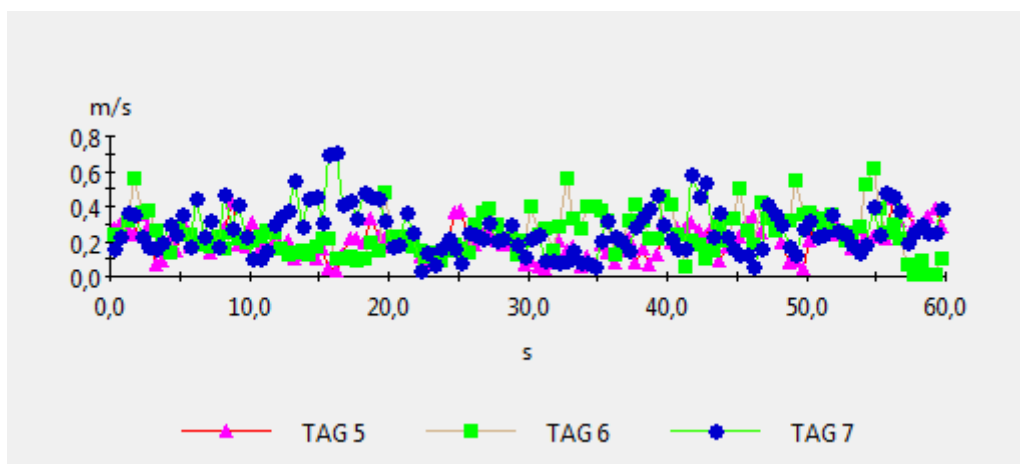
Obr. 164 Průběh rychlostí v poloze Low 6 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



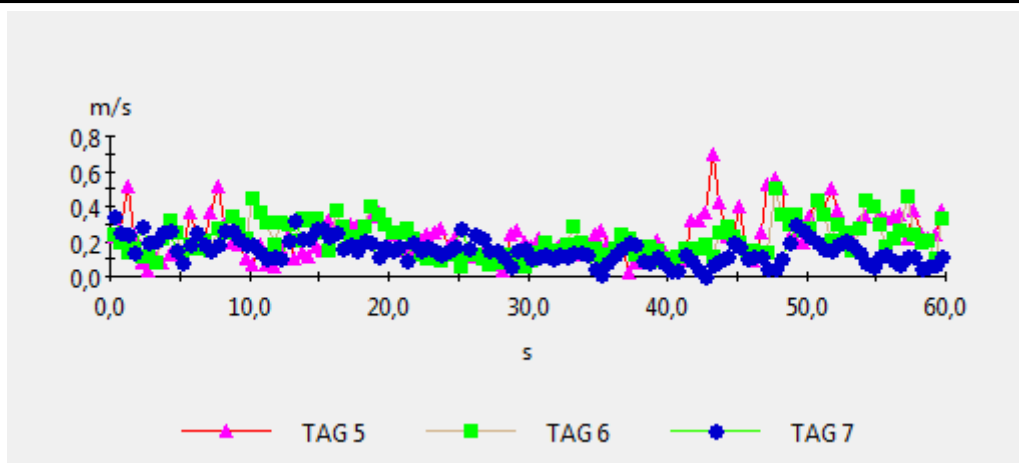
Obr. 165 Průběh rychlostí v poloze Low 7 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



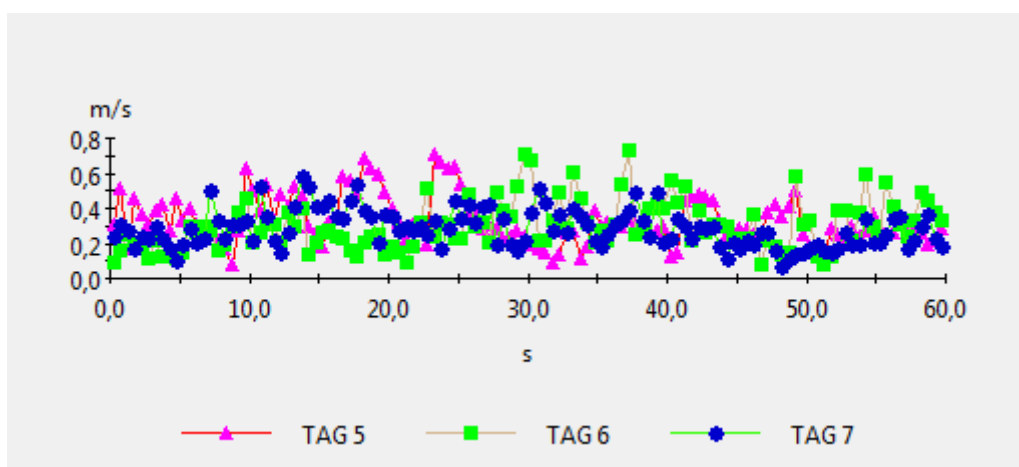
Obr. 166 Průběh rychlostí v poloze Low 8 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



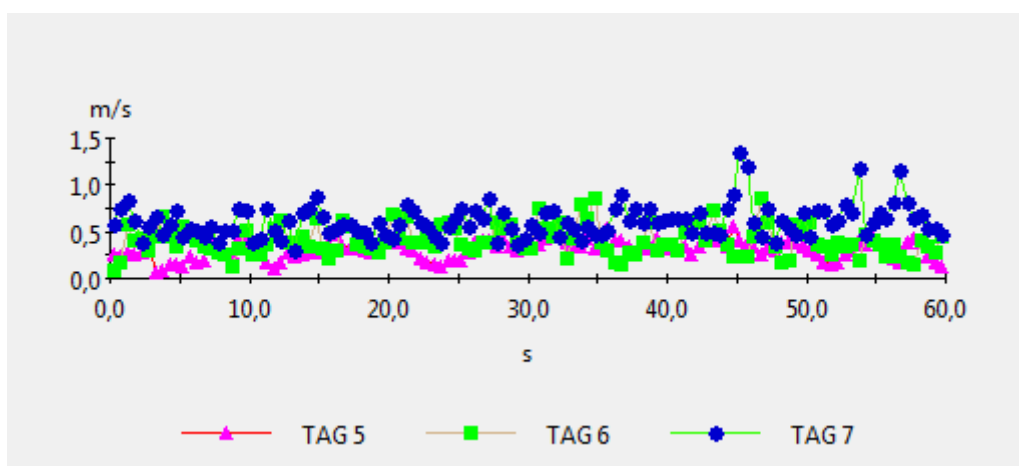
Obr. 167 Průběh rychlostí v poloze Low 9 m pro výkon ventilátoru 50 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



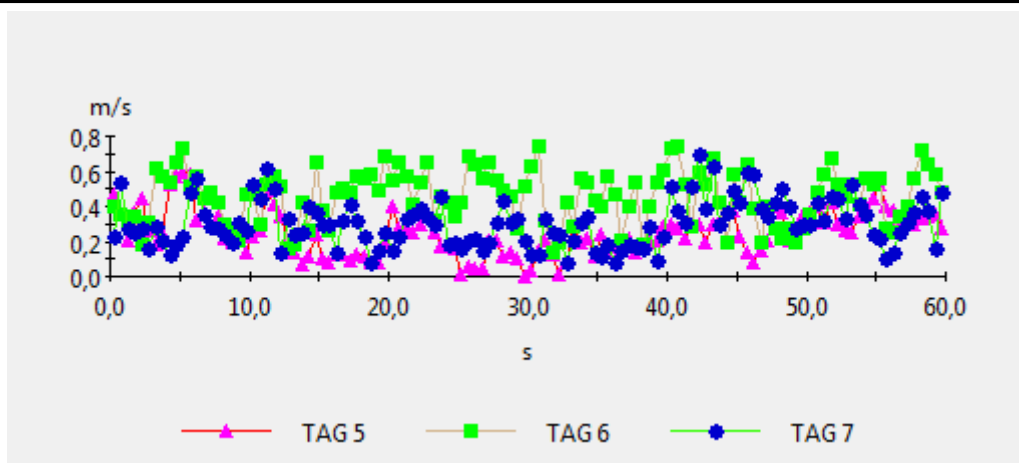
Obr. 168 Průběh rychlostí v poloze High 1 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



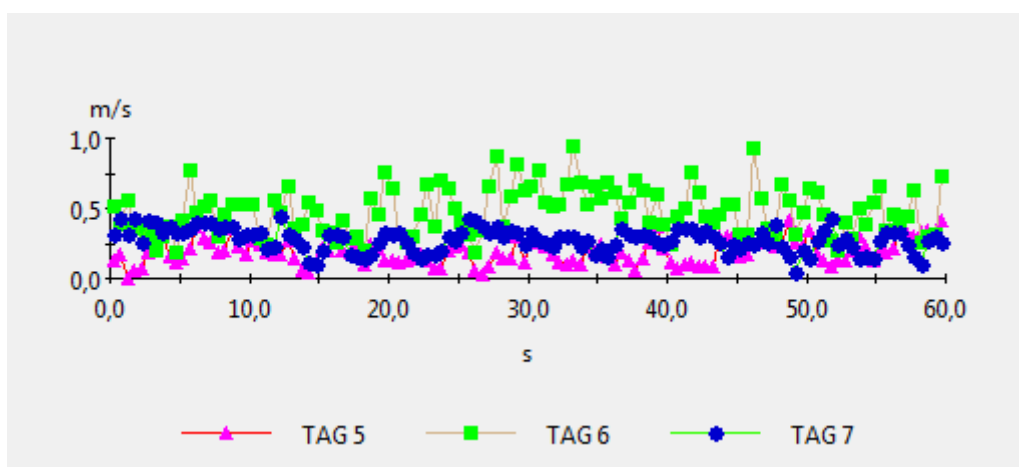
Obr. 169 Průběh rychlostí v poloze High 2 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



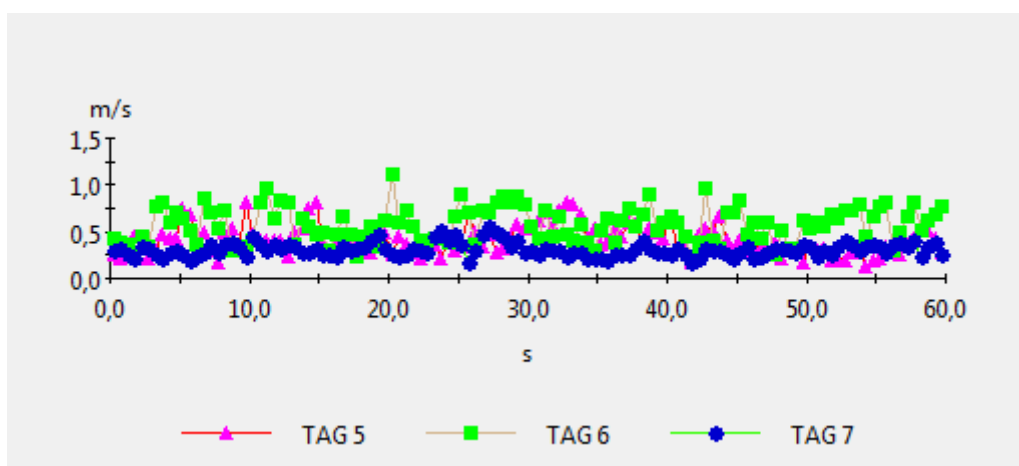
Obr. 170 Průběh rychlostí v poloze High 3 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



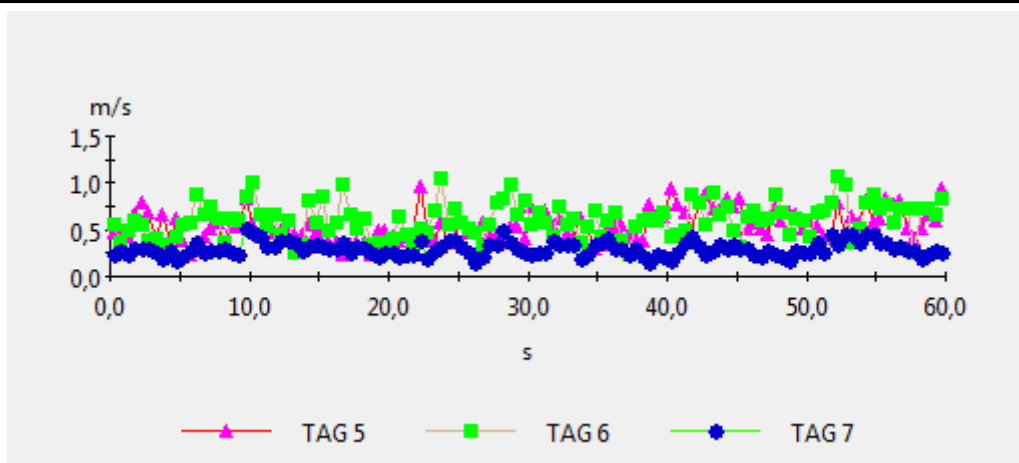
Obr. 171 Průběh rychlostí v poloze High 4 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



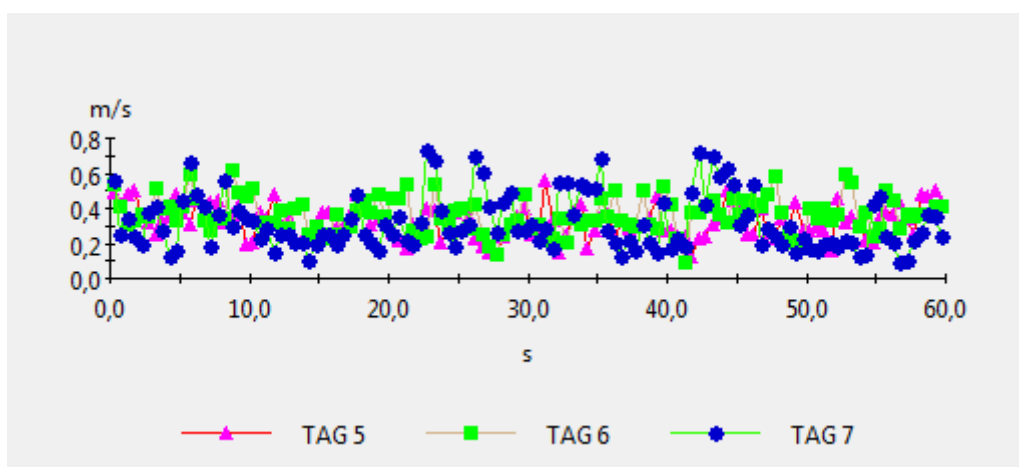
Obr. 172 Průběh rychlostí v poloze High 5 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



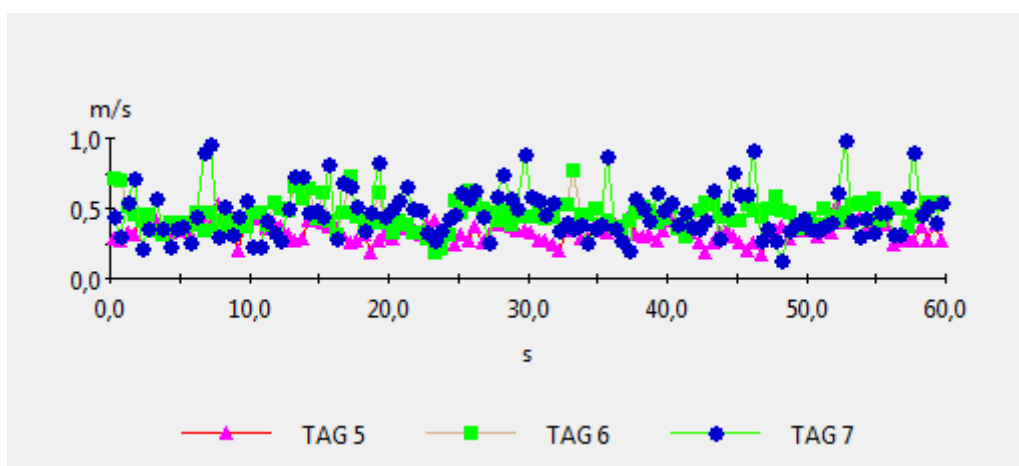
Obr. 173 Průběh rychlostí v poloze High 6 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



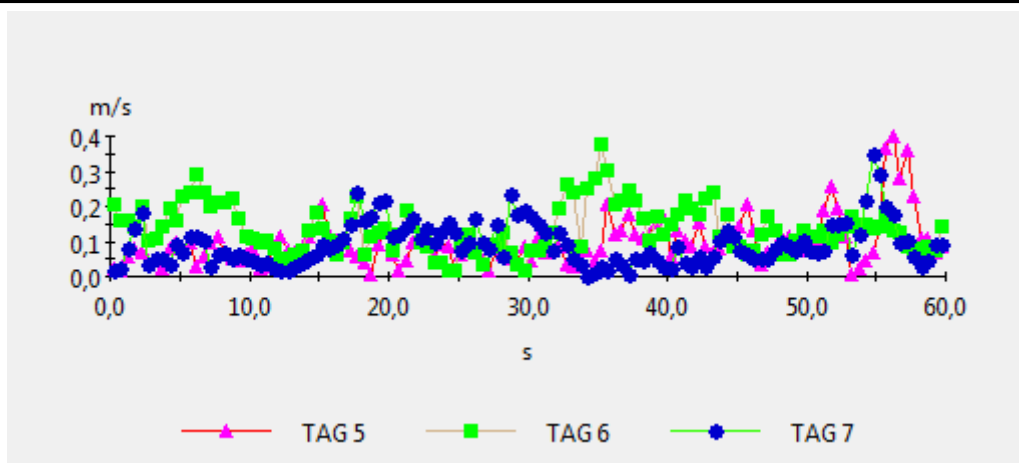
Obr. 174 Průběh rychlostí v poloze High 7 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



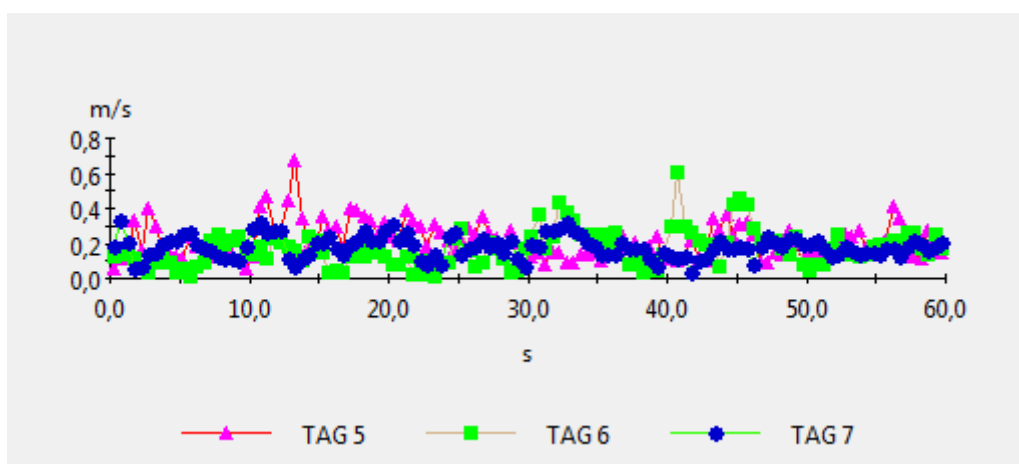
Obr. 175 Průběh rychlostí v poloze High 8 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



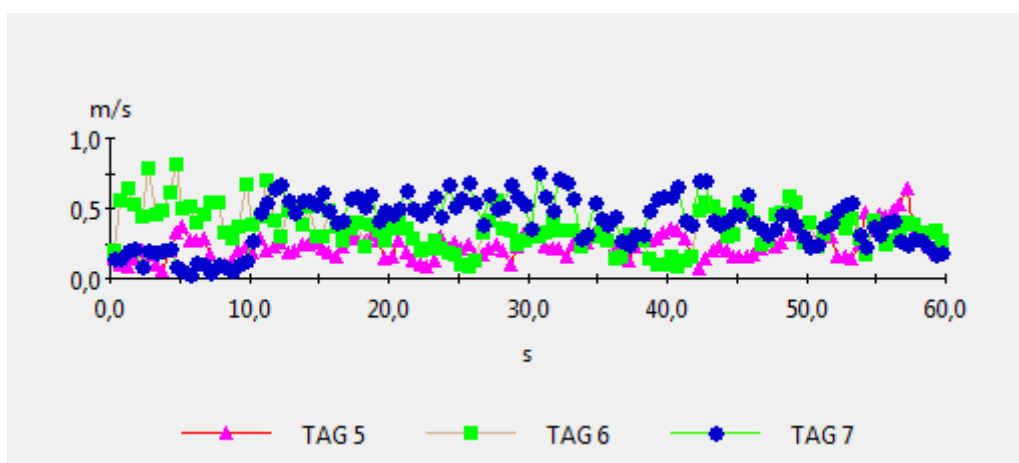
Obr. 176 Průběh rychlostí v poloze High 9 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



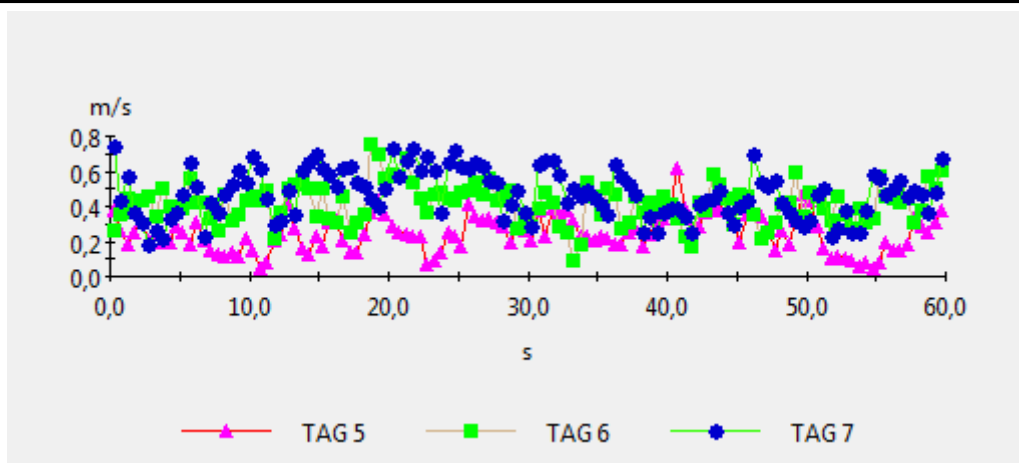
Obr. 177 Průběh rychlostí v poloze Low 1 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



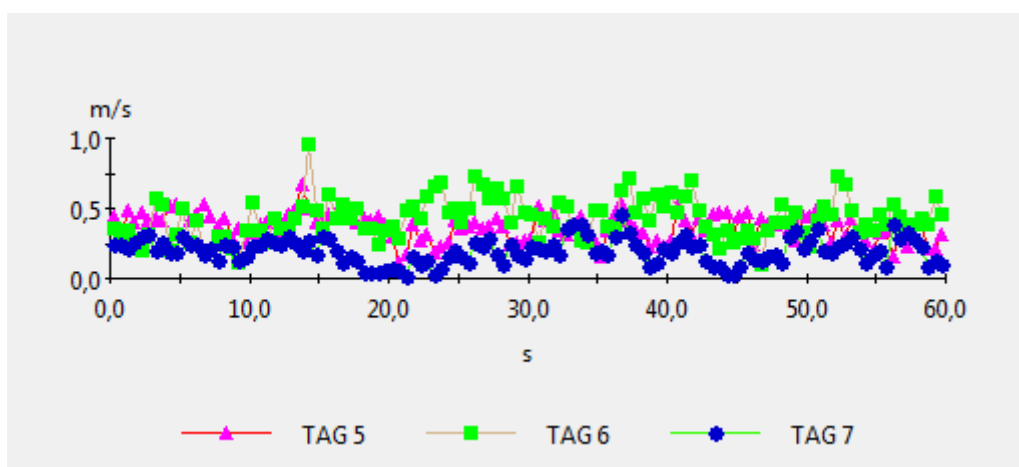
Obr. 178 Průběh rychlostí v poloze Low 2 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



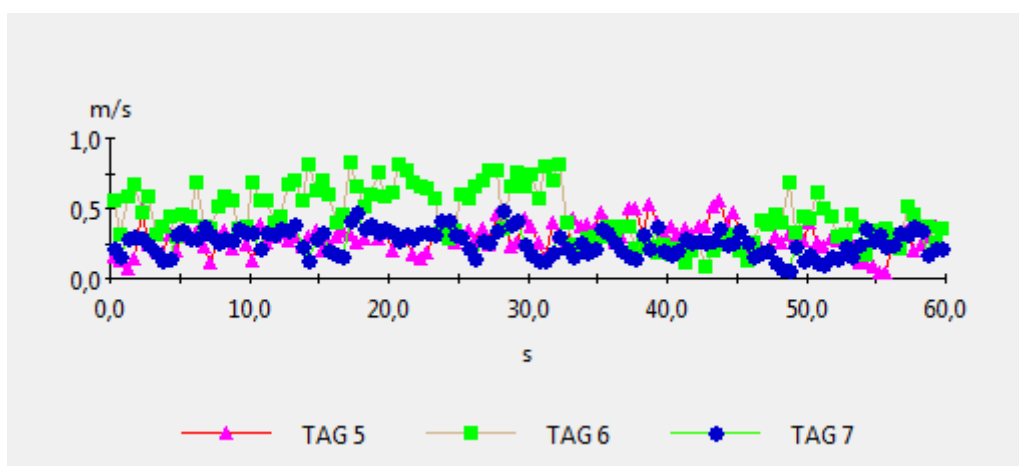
Obr. 179 Průběh rychlostí v poloze Low 3 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



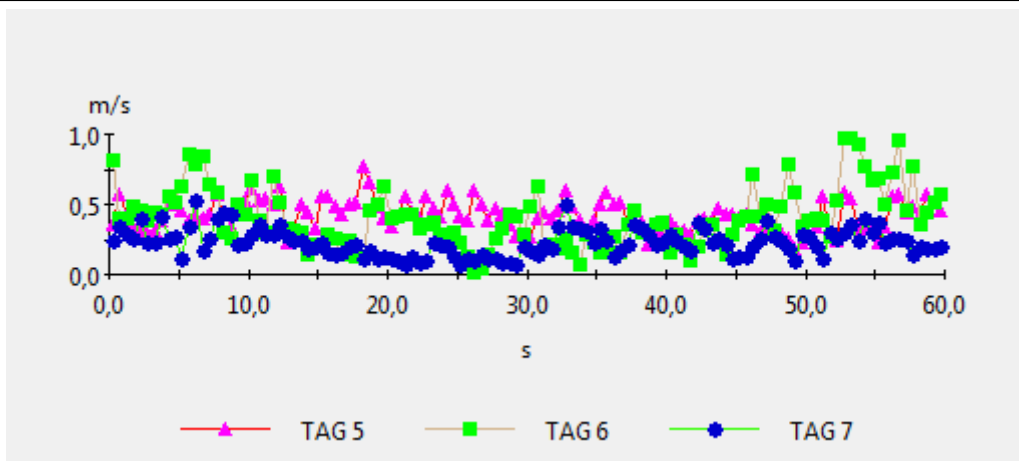
Obr. 180 Průběh rychlostí v poloze Low 4 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



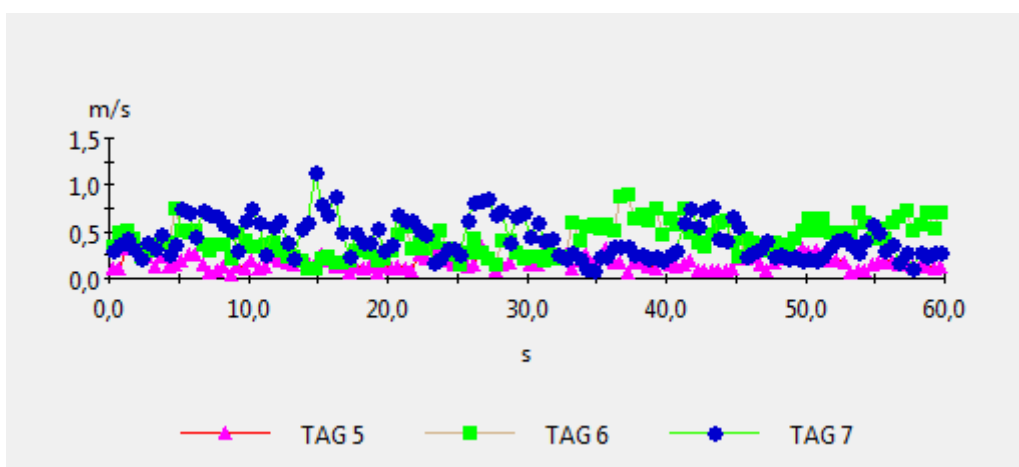
Obr. 181 Průběh rychlostí v poloze Low 5 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



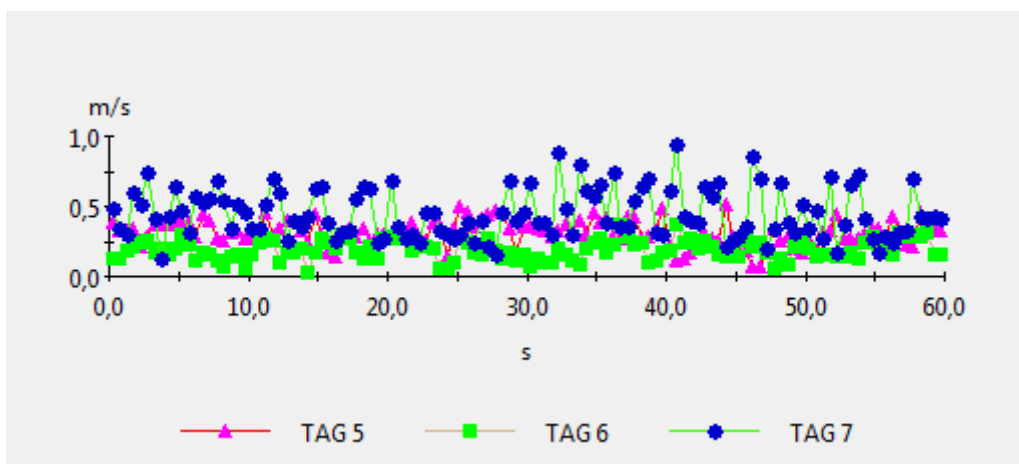
Obr. 182 Průběh rychlostí v poloze Low 6 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



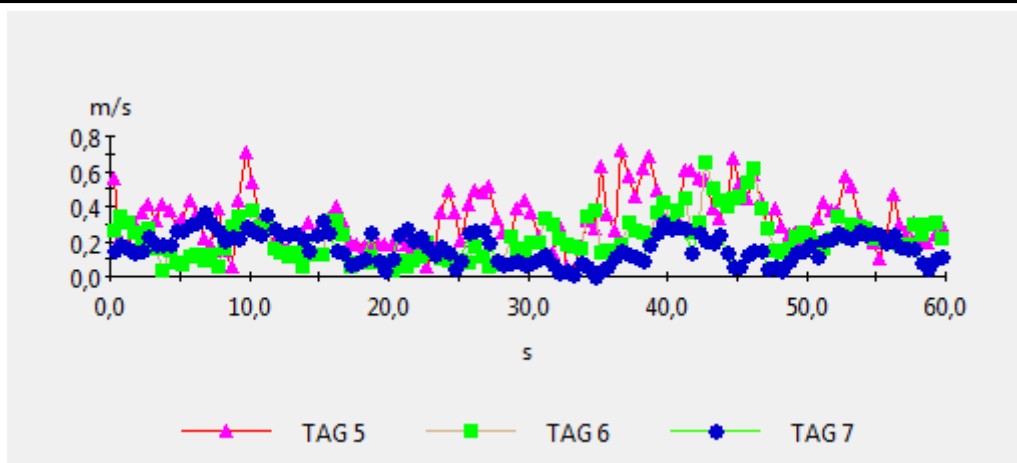
Obr. 183 Průběh rychlostí v poloze Low 7 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



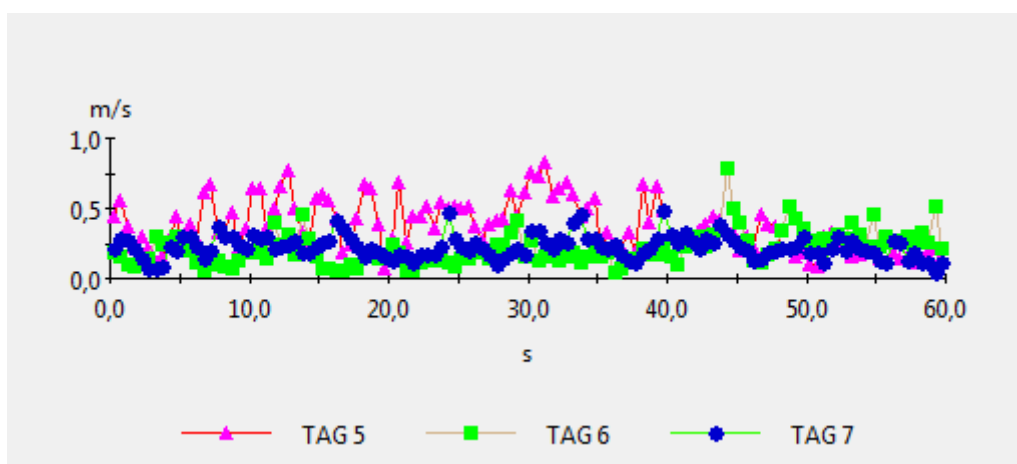
Obr. 184 Průběh rychlostí v poloze Low 8 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



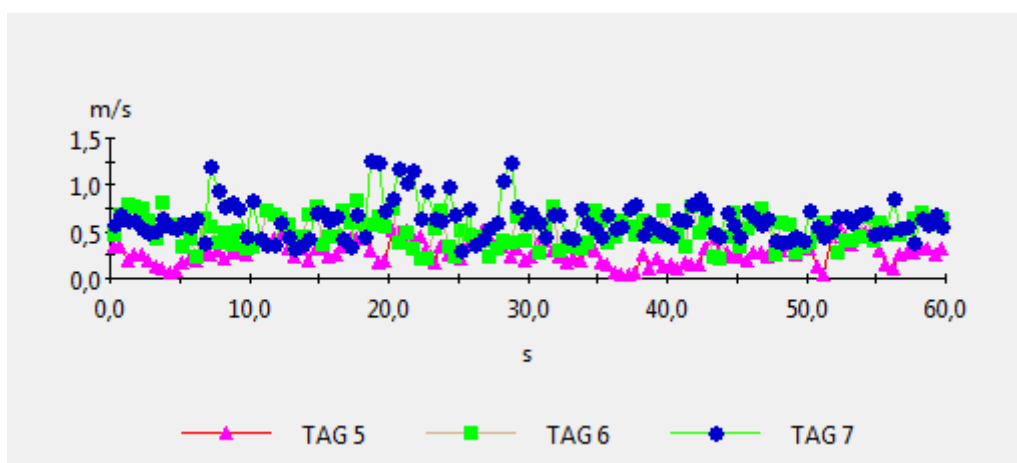
Obr. 185 Průběh rychlostí v poloze Low 9 m pro výkon ventilátoru 75 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



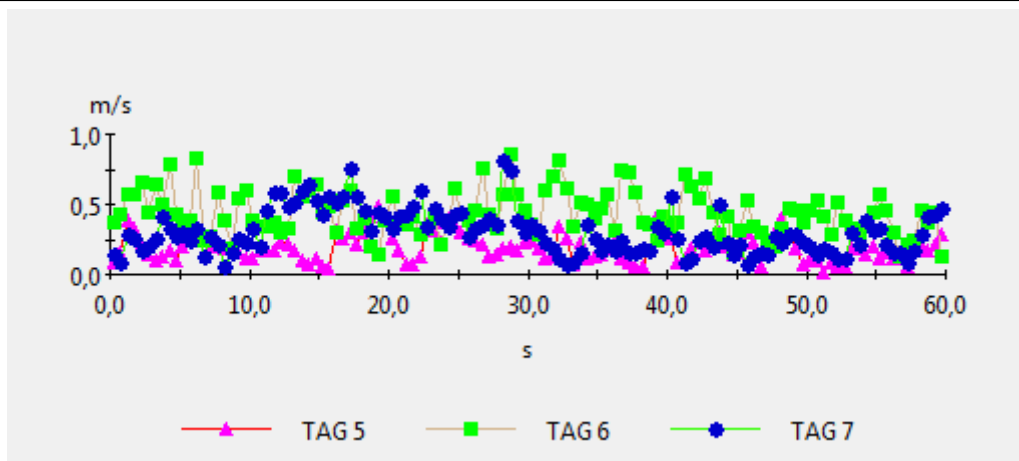
Obr. 186 Průběh rychlostí v poloze High 1 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



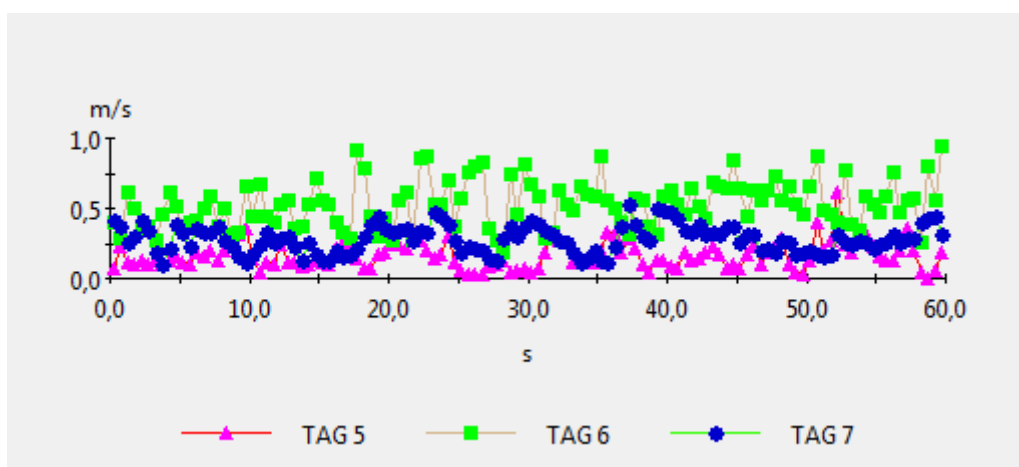
Obr. 187 Průběh rychlostí v poloze High 2 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



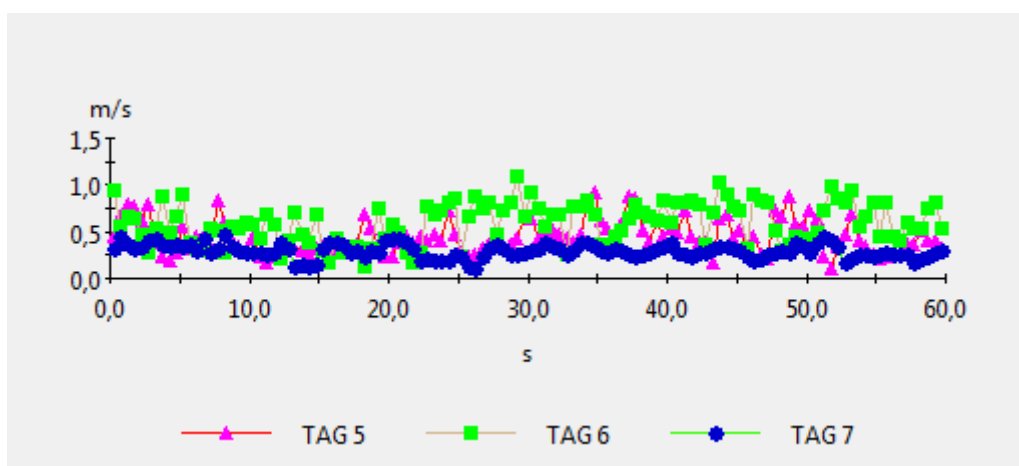
Obr. 188 Průběh rychlostí v poloze High 3 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



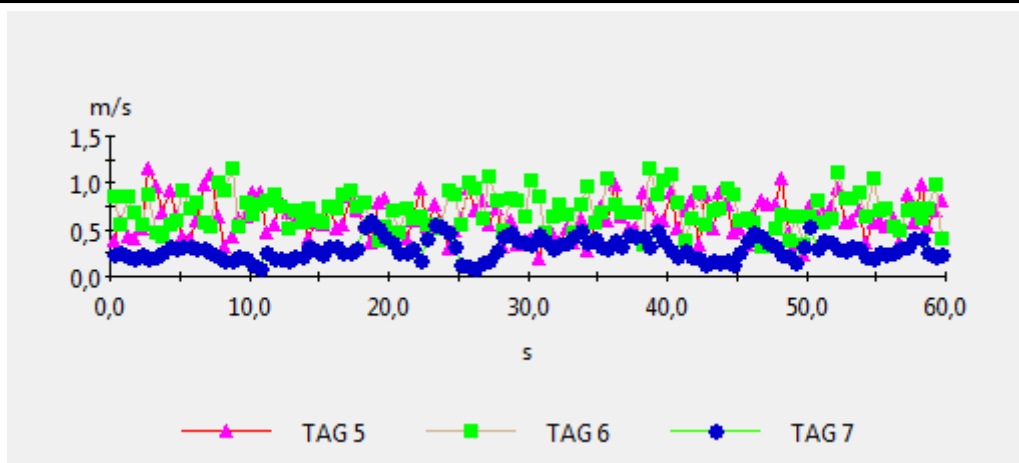
Obr. 189 Průběh rychlostí v poloze High 4 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



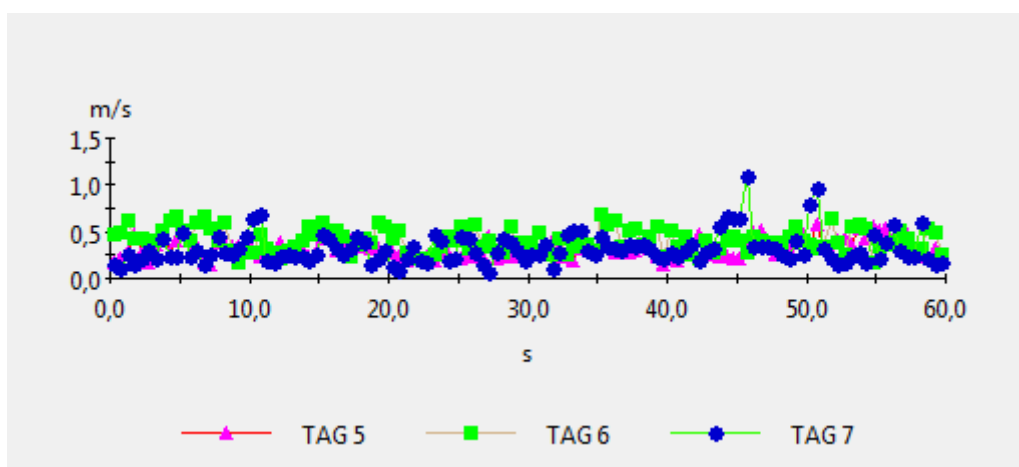
Obr. 190 Průběh rychlostí v poloze High 5 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



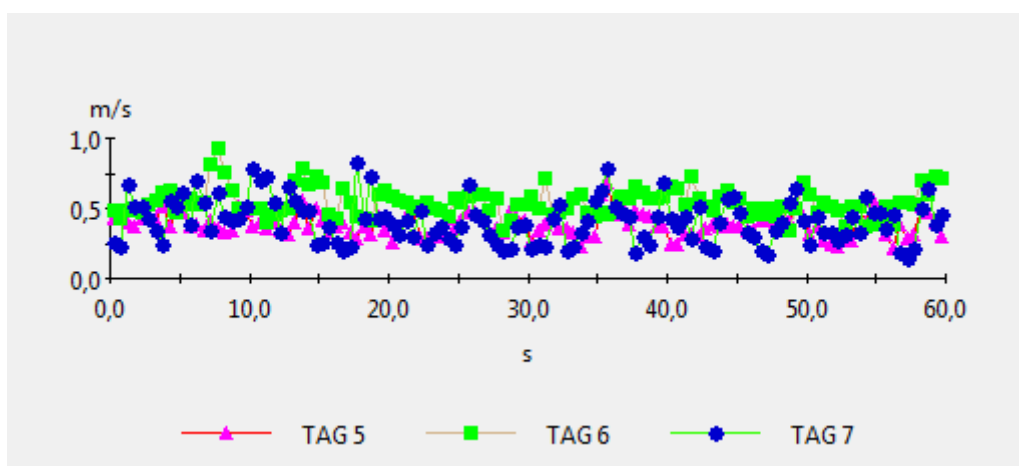
Obr. 191 Průběh rychlostí v poloze High 6 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



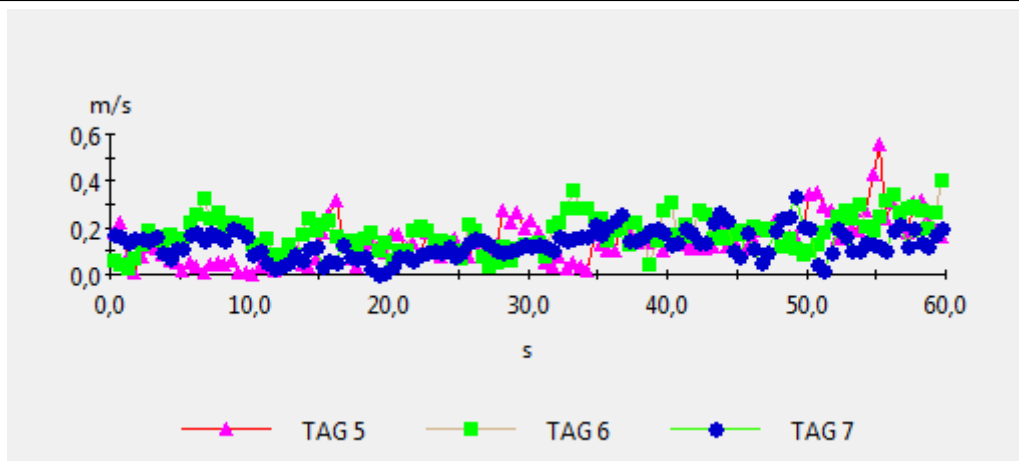
Obr. 192 Průběh rychlostí v poloze High 7 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



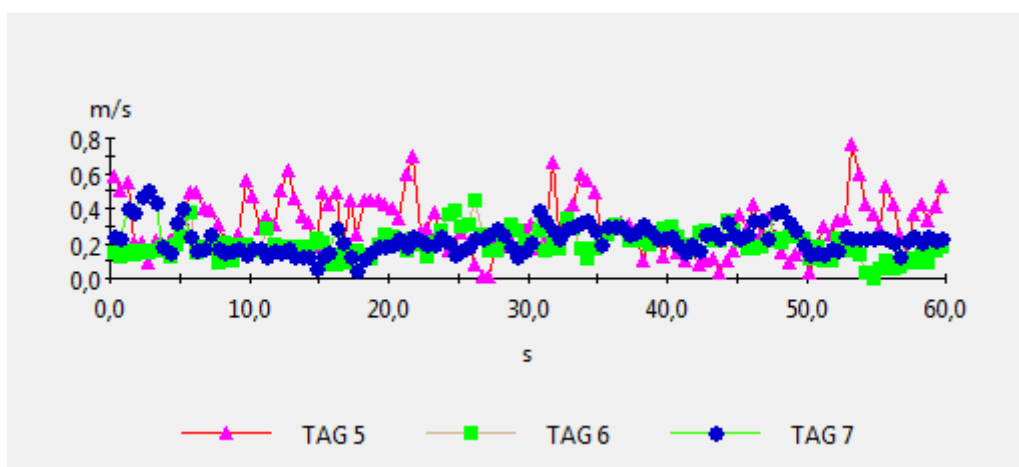
Obr. 193 Průběh rychlostí v poloze High 8 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



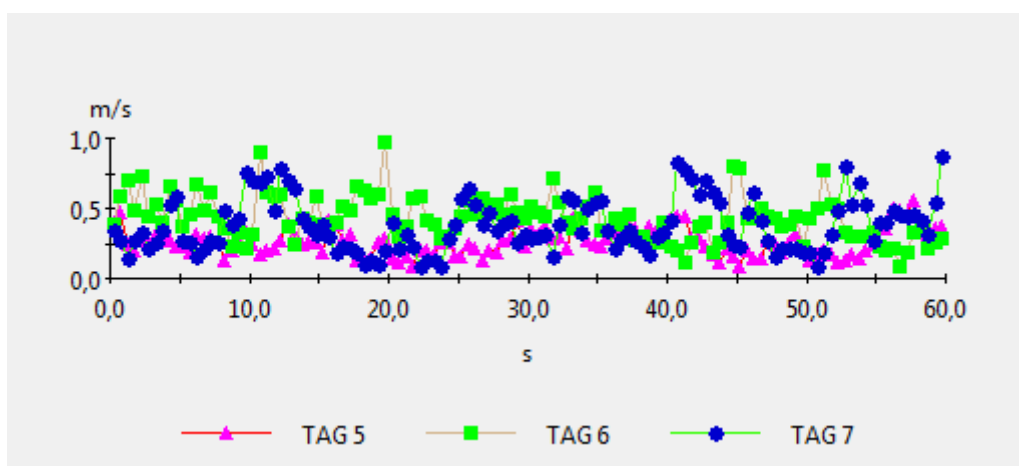
Obr. 194 Průběh rychlostí v poloze High 9 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



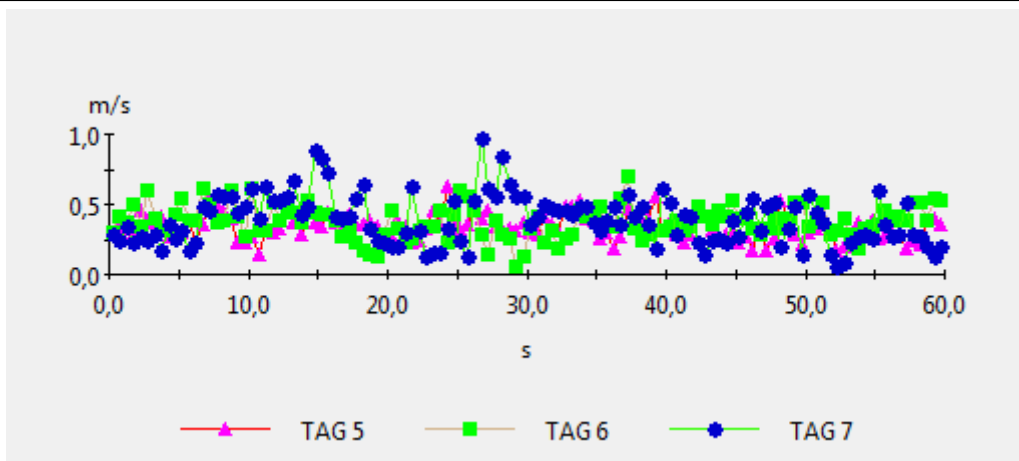
Obr. 195 Průběh rychlostí v poloze Low 1 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



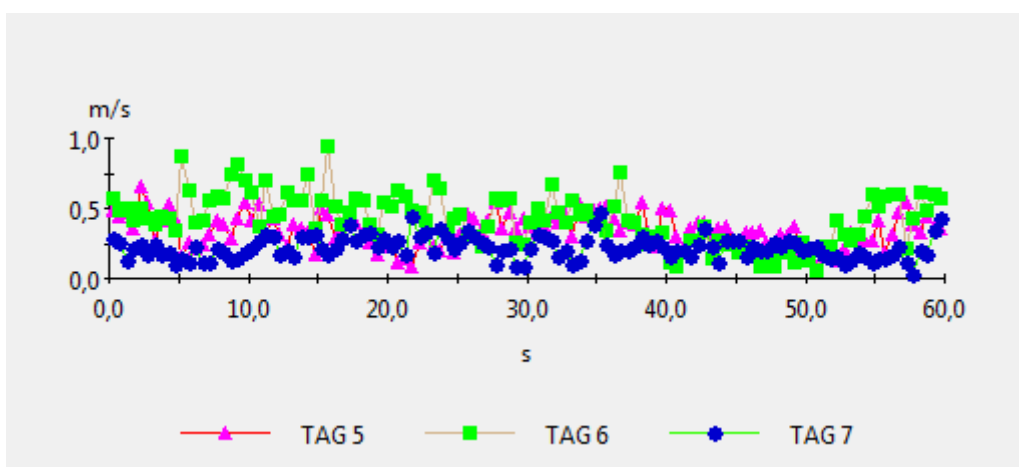
Obr. 196 Průběh rychlostí v poloze Low 2 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



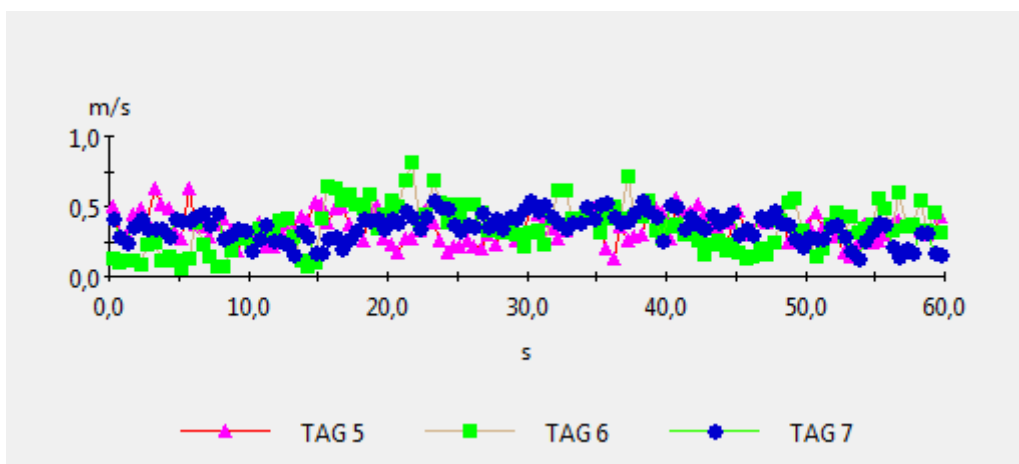
Obr. 197 Průběh rychlostí v poloze Low 3 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



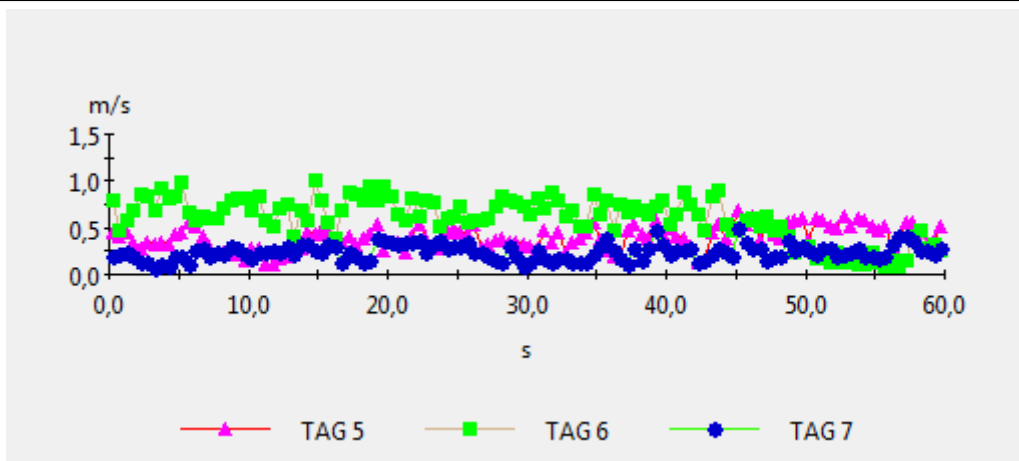
Obr. 198 Průběh rychlostí v poloze Low 4 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



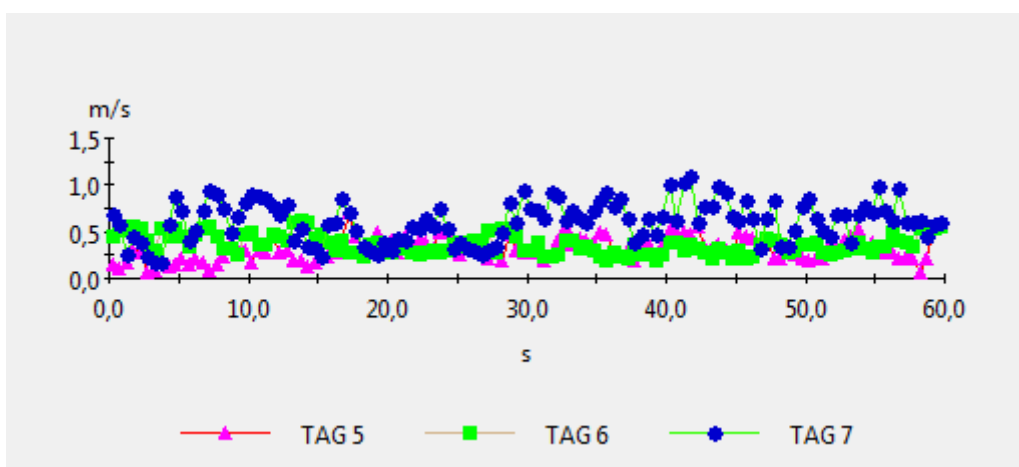
Obr. 199 Průběh rychlostí v poloze Low 5 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



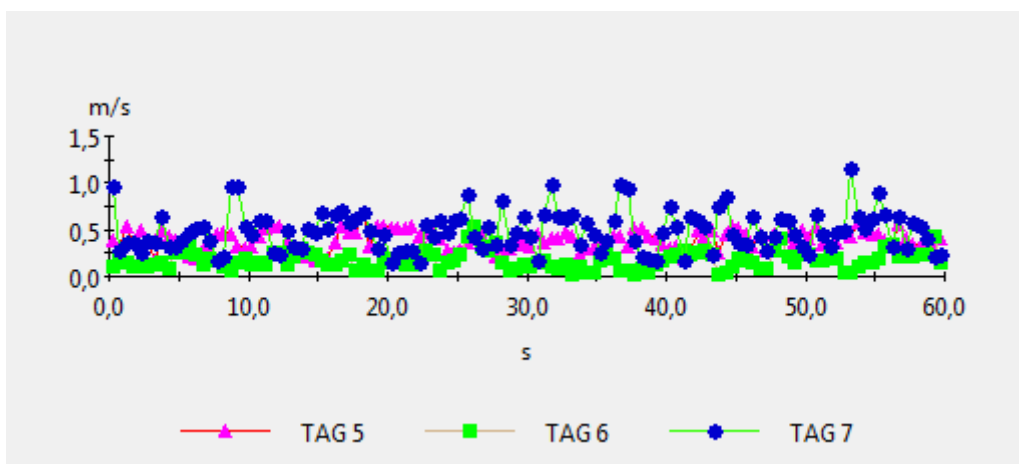
Obr. 200 Průběh rychlostí v poloze Low 6 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



Obr. 201 Průběh rychlostí v poloze Low 7 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



Obr. 202 Průběh rychlostí v poloze Low 8 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)



Obr. 203 Průběh rychlostí v poloze Low 9 m pro výkon ventilátoru 100 % (TAG5 = levá sonda, TAG6 = prostřední sonda, TAG7 = pravá sonda)

Příloha č. 6: Fotodokumentace z průběhu stavby hybridní skříň vozu metra



Obr. 204 Pohled do hrubé stavby skříň vozu



Obr. 205 Modul kompozitního čela vozu metra

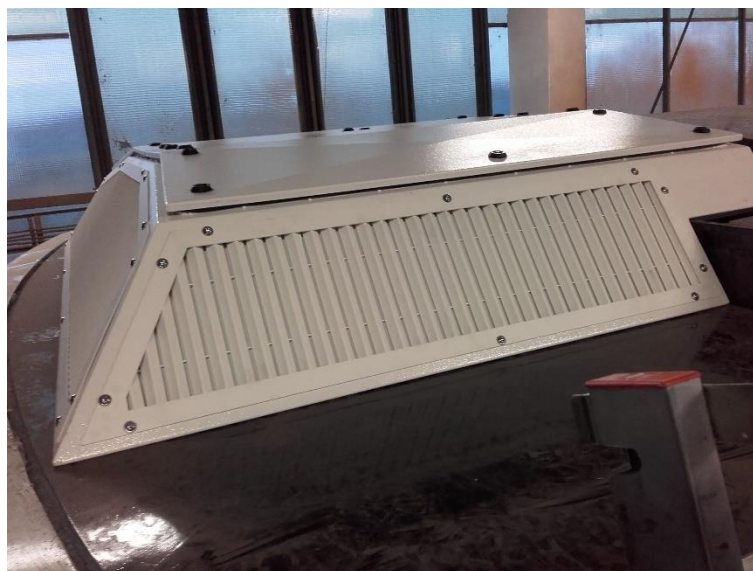


Obr. 206 Průběh montáže střechy vozu metra

Příloha č. 7: Fotodokumentace větracího systému v průběhu výzkumu



Obr. 207 Pohled na funkční vzorek hrubé stavby hybridní skříně s osazenými větracími jednotkami



Obr. 208 Detail větrací jednotky osazené na střeše vozu



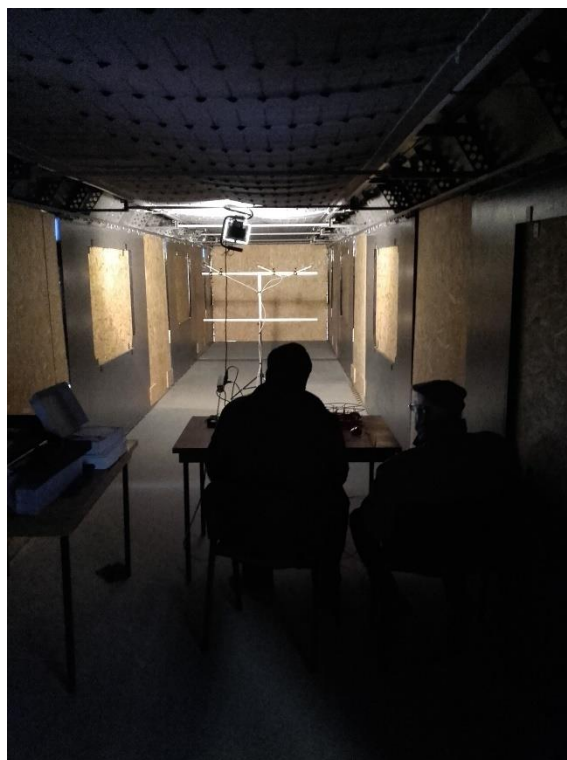
Obr. 209 Příprava vozu pro měření provětratelnosti – zaslepení okenních a dveřních otvorů



Obr. 210 Pohled do větrací jednotky na nezaizolované lomené kanály



Obr. 211 Pohled do větrací jednotky na zaizolované lomené větrací kanály



Obr. 212 Průběh měření provětratelnosti vozu metra všesměrovými sondami



Obr. 213 Průběh zkoušky planárním laserem – varianta perforace + usměrňující kapsy



Obr. 214 Průběh zkoušky planárním laserem – varianta perforace



Obr. 215 Zkouška hlučnosti v oblasti lomeného kanálu větrací jednotky