



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU POD VOZIDLEM

DEVICE FOR MEASUREMENT THE AIR FLOW UNDER THE VEHICLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JOSEF ŠILAR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN VANČURA, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Josef Šilar

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Zařízení pro měření proudění vzduchu pod vozidlem

v anglickém jazyce:

Device for measurement the air flow under the vehicle

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vytvoření traverzovacího systému pro měření proudění pod vozidlem. Navržené zařízení by mělo být použitelné pro měření v aerodynamickém tunelu s minimálním ovlivněním proudového pole. Těžiště práce leží jak v samotném konstrukčním návrhu zařízení tak i v CFD analýze vlivu přítomnosti tohoto zařízení na proudové pole pod vozidlem.

Cíle diplomové práce:

1. Proved'te konstrukční návrh zařízení pro měření proudění pod vozidlem v aerodynamickém tunelu.
2. Proved'te návrh zařízení pro měření proudění pod vozidlem za jízdy.
3. Proved'te CFD analýzu ovlivnění proudového pole pod vozidlem přítomností vlastního zařízení.

Seznam odborné literatury:

- [1] HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road Vehicles. 4 ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998, 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.
[2] REIMPELL, Jornsens. The Automotive Chassiss. 2nd edition. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0 7506 5054 0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Vančura, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 27.10.2014

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan



ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je konstrukčním návrh zařízení pro měření proudění pod vozidlem. Pro pochopení dané problematiky je popsána nejdříve teorie jízdnic odporů, proudění a aerodynamiky, a poté celá konstrukční část. Dále se věnuje sestavení CFD modelu pro zjištění ovlivnění proudového pole pod vozidlem přítomností tohoto zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika, proudění, konstrukce, zařízení, sonda, CFD, simulace

ABSTRACT

The target of this thesis is construction design of a device for measuring flow bellow a vehicle. To deep dive into the problem first there is theory of driving resistance, flow and aerodynamics followed by the practical part. Also it solves completion of CFD model to detect flow field bellow vehicle while using this device.

KEYWORDS

aerodynamics, flow, design, device, probe, CFD, simulation



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠILAR, J. *Zařízení pro měření proudění vzduchu pod vozidlem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vančury, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2015

.....

Josef Šilar



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Janu Vančurovi, Ph.D. za pomoc a odborné vedení při tvorbě této diplomové práce. Obzvláště si vážím jeho ochoty, času, trpělivosti a především cenných rad, které mi věnoval.



OBSAH

Úvod	11
1 Jízdní odpory	12
1.1 Odpor valivý	12
1.1.1 Statický poloměr kola	13
1.1.2 Kinematický poloměr kola (poloměr valení).....	14
1.1.3 Dynamický poloměr kola	14
1.1.4 Součinitel valivého odporu	14
1.1.5 Celkový valivý odpor	16
1.2 Odpor stoupání.....	17
1.3 Odpor zrychlení	17
1.3.1 Součinitel vlivů rotačních částí.....	19
1.4 Odpor přivěsu	20
1.5 Odpor aerodynamický.....	20
1.5.1 Vliv na valivý odpor	21
1.5.2 Vliv na maximální rychlost	21
1.5.3 Vliv na zrychlení	21
1.5.4 Vliv na spotřebu paliva.....	22
1.6 Celkový jízdní odpor	22
2 Aerodynamika	24
2.1 Vlastnosti tekutin	24
2.1.1 Měrná hmotnost vzduchu	24
2.1.2 Viskozita tekutin.....	24
2.1.3 Bernoulliho rovnice	25
2.2 Obtékání těles	25
2.2.1 Proudnice	26
2.2.2 Reynoldsovo číslo	26
2.2.3 Odpor těles.....	27
2.2.4 Mezní vrstva	29
3 Aerodynamika vozidel.....	31
3.1 Soustava aerodynamických sil a momentů	31
3.2 Vznik aerodynamického odporu vozidel	33
3.2.1 Tvarový odpor	33
3.2.2 Indukovaný odpor.....	33
3.2.3 Interferenční odpor	34
3.2.4 Odpor rotujících kol	34



3.2.5	Odpor průchodem vozidla	35
3.3	Proudění pod vozidlem	35
3.3.1	Přední část karoserie	37
3.3.2	Podvozek	38
3.3.3	Zadní difuzor	40
4	Konstrukce traverzovacího zařízení	42
4.1	Nakupované dílce	42
4.1.1	Polohovací jednotka	42
4.1.2	Motory	44
4.1.3	Spojka	47
4.1.4	Energetický kabelový řetěz	48
4.1.5	Sonda	49
4.1.6	Mikrospínače	50
4.2	Popis konstrukce	51
4.2.1	Uchycení motoru k polohovací jednotce	52
4.2.2	Uchycení traverzovacího zařízení k vozidlu	52
4.2.3	Uchycení motoru k vozíku	53
4.2.4	Uchycení sondy	53
4.2.5	Vedení kabelového řetězu	54
4.2.6	Umístění mikrospínačů	54
5	CFD simulace	56
5.1	Tvorba modelu	56
5.1.1	Model vozidla	57
5.1.2	Model traverzovacího zařízení	57
5.2	Import modelu	58
5.3	Tvorba potrubí a rozdělení ploch	58
5.4	Nastavení fyzikálního modelu	59
5.5	Stanovení okrajových podmínek	59
5.6	Tvorba sítě	60
5.7	Vytvoření vyhodnocovacích rovin	62
5.8	Podmínky ukončení výpočtu	62
5.9	Model vozidla se zařízením	63
6	Výsledky CFD simulací	66
	Závěr	79
	Seznam použitých zkratk a symbolů	83
	Seznam příloh	86



ÚVOD

Aerodynamika je specializovaný obor fyziky, který zkoumá silové působení na obtékané těleso. Tento obor je pro vozidla velice důležitý, jelikož aerodynamický odpor je jedním z jízdnicích odporů vozidel. Tyto odpory působí proti jedoucímu vozidlu a spotřebovávají část jeho energie. Je třeba si uvědomit, že samotný motor o spotřebě a výkonu nerozhoduje. Vždy se musí hodnotit spojení daného motoru s konkrétním automobilem.

Pokud by byly porovnávány dvě vozidla se stejným motorem, přičemž jedno z nich by mělo menší hmotnost, ale větší součinitelem aerodynamického odporu, lze předpokládat větší výkonové nároky motoru na vozidlo těžším. Ale tato úvaha zanedbává vliv aerodynamiky. Při ustálené jízdě, kde vozidla musejí překonávat valivý odpor pneumatik a aerodynamický odpor, bude mít nejprve výhodu vozidlo lehčí, ale pouze do určité rychlosti, poté se začne projevovat vhodný aerodynamický tvar těžšího vozidla. Obecně se dá tedy říci, že v městském provozu a na kratších cestách bude lehčí automobil potřebovat méně výkonu a méně paliva. Při dálničním provozu je však výhodnější automobil s nižším součinitelem odporu i přesto, že je těžší.

Zjišťování aerodynamických vlastností nejen vozidel, ale i letadel, vlaků apod. nejčastěji probíhá v aerodynamických tunelech nebo pomocí simulací CFD (Computational Fluid Dynamics), jelikož v reálných podmínkách je to velice obtížné a v některých případech i nemožné. Měření v aerodynamických tunelech bývá ve srovnání s CFD simulacemi velice náročné a to jak časově, tak i z ekonomického hlediska, protože zde nejsou žádné investice na výstavbu a samotný provoz tunelu. V praxi se většinou tyto dva přístupy kombinují, a poté se srovnávají.



1 JÍZDNÍ ODPORY

Jízdní odpory jsou všechny síly působící proti pohybu vozidla, z nichž některé působí vždy a některé pouze za určitých podmínek. Tyto odpory musí být překonány hnací silou vozidla na kolech.

Odpory působící vždy:

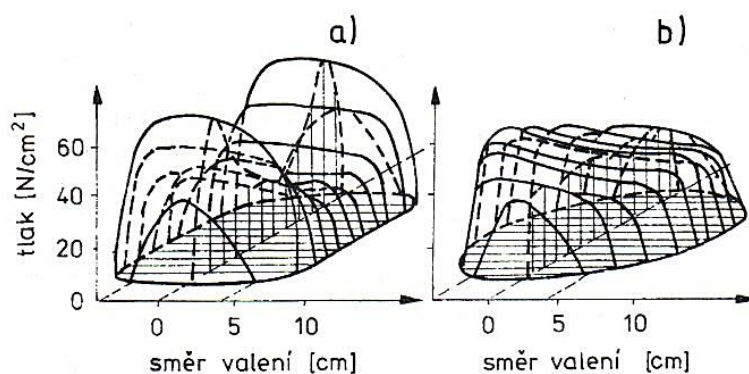
- Odpor valivý O_f
- Odpor aerodynamický O_v

Odpory působící za určitých podmínek:

- Odpor stoupání O_s
- Odpor zrychlení O_z
- Odpor přívěsu O_p

1.1 ODPOR VALIVÝ

Jedná se o odpor, který vzniká deformací pneumatiky a vozovky. Plocha, na které se stýká pneumatika s vozovkou, se nazývá stopa pneumatiky. V přední části stopy dochází vlivem váhy vozidla ke stlačování obvodu pneumatiky. V zadní části se obvod opět vyrovnává do původního kruhovitěho tvaru. Rozložení měrných tlaků ve stopě pneumatiky je zobrazena na obr. 1. Při deformačním procesu dochází ke ztrátám, které se uvolňují z pneumatiky ve formě tepla. Síly potřebné pro stlačení pneumatiky jsou větší než síly, jimiž působí pneumatika na vozovku při navrácení do kruhovitěho tvaru (tzv. hystereze).

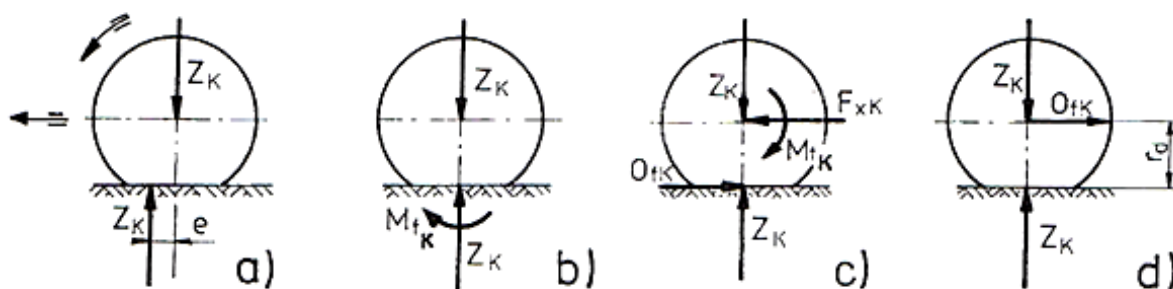


Obr. 1 Rozložení měrných tlaků ve stopě a) diagonální b) radiální pneumatiky [4]

V přední části stopy pneumatiky jsou tedy větší měrné tlaky než v části zadní, a proto dochází k posunutí výslednice elementárních sil (radiální reakce vozovky Z_K) ve stopě pneumatiky o hodnotu e . Tato výslednice je posunuta před svíslou osu kola (obr. 2a). Reakce vozovky Z_K je stejně velká jako zatížení kola, proto vzniká silová dvojice neboli moment M_{fK} působící proti otáčení kola (obr. 2b). Moment M_{fK} vyvolá vodorovnou reakci O_{fK} , působící proti



pohybu kola, a v jeho středu působí F_{xK} ($F_{xK} = O_{fK}$), aby vznikla opět silová dvojice (obr. 2c). Vodorovná reakce O_{fK} se nazývá valivý odpor kola (obr. 2d).



Obr. 2 Vznik valivého odporu [4]

Platí:

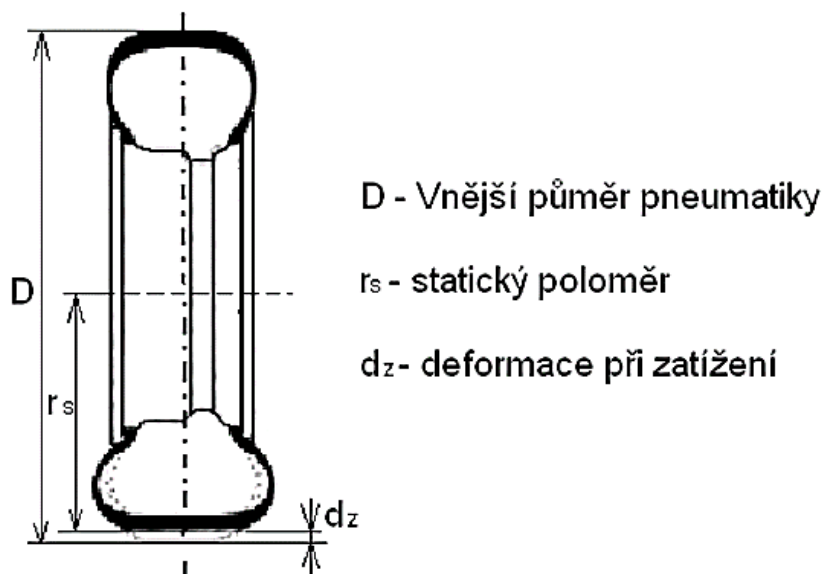
$$M_{fK} = O_{fK} \cdot r_d = Z_K \cdot e, \quad (1)$$

$$O_{fK} = Z_K \cdot \frac{e}{r_d} = Z_K \cdot f_K, \quad (2)$$

kde r_d je dynamický poloměr kola, f_K je součinitel valivého odporu, e je posun radiální reakce vozovky. [4]

1.1.1 STATICKÝ POLOMĚR KOLA

Je vzdálenost od středu neotáčejícího se kola k rovině, na které kolo stojí, zatíženo radiální silou.



Obr. 3 Statický poloměr kola [11]

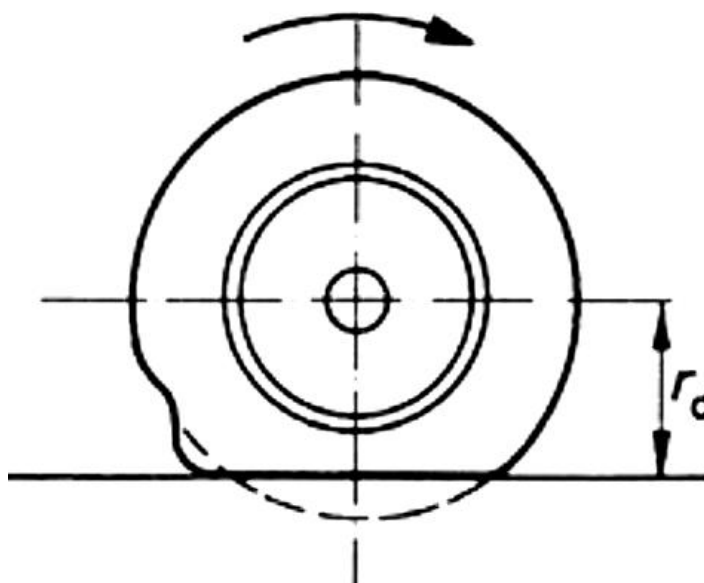


1.1.2 KINEMATICKÝ POLOMĚR KOLA (POLOMĚR VALENÍ)

Je teoretický (výpočtový) poloměr kola, který stanovuje pomocí analýzy kinematiku dotyku kola s podložkou. Je to tzv. fiktivní poloměr kola, které by se valilo bez skluzu stejnou posuvnou rychlostí jako kolo zatížené.

1.1.3 DYNAMICKÝ POLOMĚR KOLA

Je vzdálenost středu radiálně zatíženého otáčejícího se kola s rovinou vozovky v místě dotyku rovnoběžné s osou rotace za předepsaných podmínek, jako jsou zatížení kola, tlak nahuštění pneumatiky, rychlost jízdy apod. [11]



Obr. 4 Kinematický a dynamický poloměr kola [11]

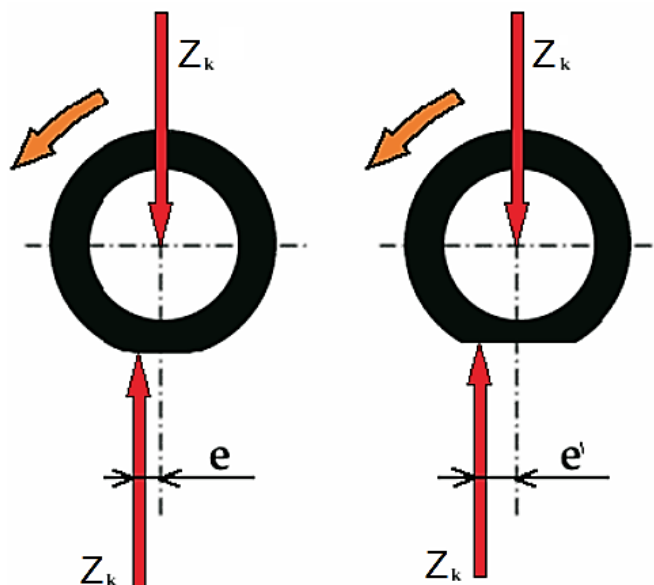
1.1.4 SOUČINITEL VALIVÉHO ODPORU

Závisí na povrchu vozovky, rychlosti odvalujícího se kola, deformaci (vliv huštění) a směrové úchlce pneumatiky.

HUŠTĚNÍ PNEUMATIKY

Velikost deformace je ovlivněna tlakem v pneumatice, jelikož se snižujícím se tlakem narůstá velikost deformace a dochází ke zvětšení posunu e . To je způsobeno zvětšením stykové plochy mezi pneumatikou a vozovkou (obr. 5). Také vysoká rychlost otáčení kola způsobuje výrazné posunutí (zvětšení) e , jelikož v náběžné části stopy pneumatiky se nestačí účinky deformace s rychlostí vyrovnat a dochází ke snížení přitlaku mezi kolem a vozovkou v úběžné části. Z toho vyplývá vztah součinitele valivého odporu:

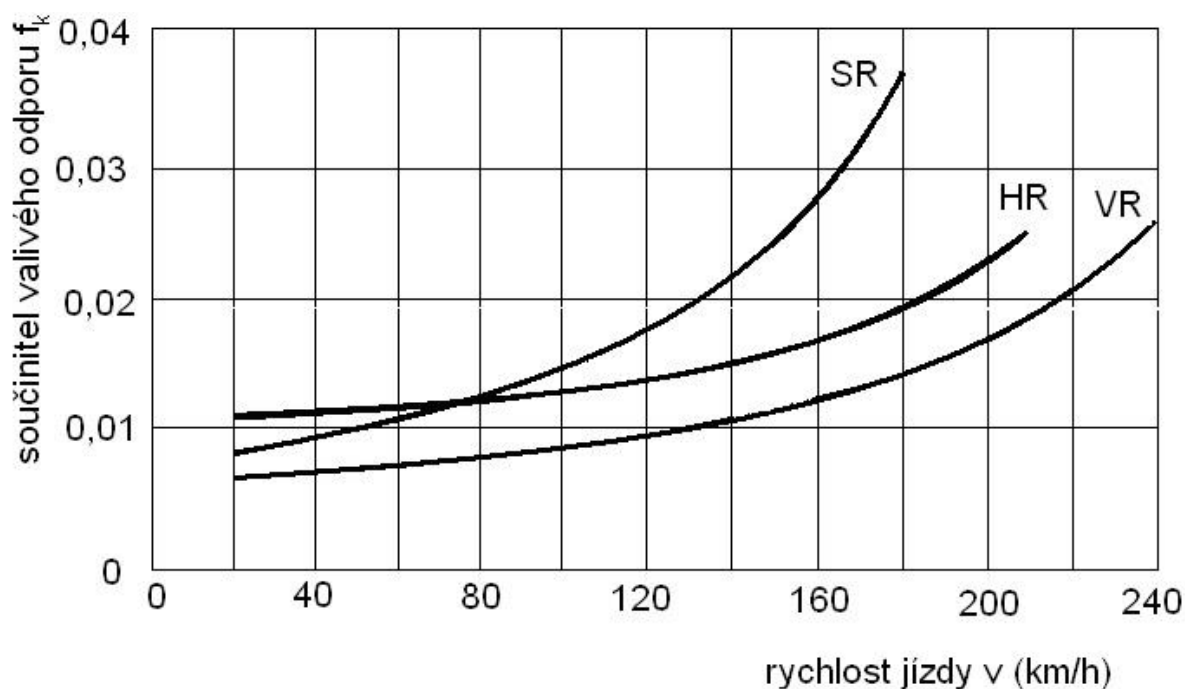
$$f_K = \frac{e}{r_d}. \quad (3)$$



Obr. 5 Změna působíště síly Z_k při změně tlaku v pneumatice [10]

RYCHLOST VOZIDLA

Závislost součinitele na rychlosti vozidla je uvedena na obr. 6. Z toho lze vyčíst, že do určité mezní rychlosti je koeficient konstantní. U osobních vozidel je to do rychlosti kolem 80 km/h, pro nákladní kolem 50 km/h. Pro rychlosti menší než mezní lze použít hodnoty z tab. 1, kde jsou uvedeny hodnoty koeficientu pro různé povrchy. Pro rychlosti vyšší než mezní začíná součinitel výrazně růst. Tento růst lze ovlivnit typem pneumatiky.



Obr. 6 Závislost součinitele valivého odporu na rychlosti jízdy pro různé typy pneumatik [4]



POVRCH VOZOVKY

Závislost součinitele na povrchu vozovky je uvedena v *tab. 1*.

Tab. 1 Hodnoty součinitele valivého odporu pro různé povrchy vozovky [4]

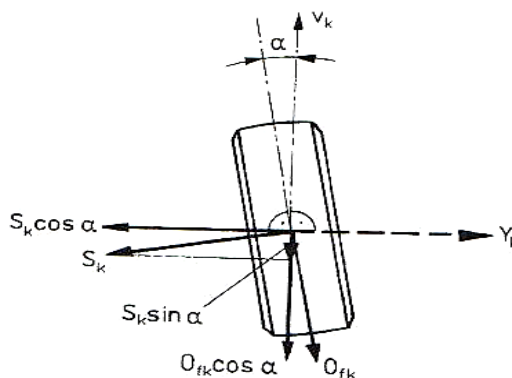
Povrch	f_k	Povrch	f_k
Asfalt	0,01 – 0,02	Travnatý terén	0,08 – 0,15
Beton	0,015 – 0,025	Hluboký písek	0,15 – 0,30
Dlažba	0,02 – 0,03	Čerstvý sníh	0,20 – 0,30
Makadam	0,03 – 0,04	Bahnitá půda	0,20 – 0,40
Polní cesta – suchá	0,04 – 0,15	Náledí	0,01 – 0,025
Polní cesta - mokrá	0,08 – 0,20		

SMĚROVÁ ÚCHYLKA PNEUMATIKY (ZATÁČENÍ)

Vliv směrové úchytky na součinitel je silně progresivní. Kolo se odvaluje se směrovou úchytkou, přičemž ve směru rychlosti vzniká valivý odpor, pro který platí:

$$O_{fK} \cos \alpha + S_K \sin \alpha, \tag{4}$$

kde S_K je boční vodící síla pneumatiky.



Obr. 7 Vznik přidavné složky valivého odporu při zatáčení (vlivem směrové úchytky)[4]

1.1.5 CELKOVÝ VALIVÝ ODPOR

Je dán součtem valivých odporů jednotlivých kol.

$$O_f = \sum O_{fKi} = \sum Z_{Ki} \cdot f_{Ki} = f \cdot \sum Z_{Ki} = f \cdot G \tag{5}$$



1.2 ODPOR STOUPÁNÍ

Jedná se o odpor, který působí v těžišti vozidla (obr. 8) a je určen tíhovou složkou vozidla rovnoběžnou s povrchem vozovky.

$$O_s = \pm G \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

kde G je celková tíha vozidla, α je úhel stoupání mezi povrchem vozovky a vodorovnou rovinou, znaménko $+$ platí pro vozidlo jedoucí do svahu (působí proti pohybu vozidla) a znaménko $-$ pro vozidlo jedoucí ze svahu (pohání vozidlo).

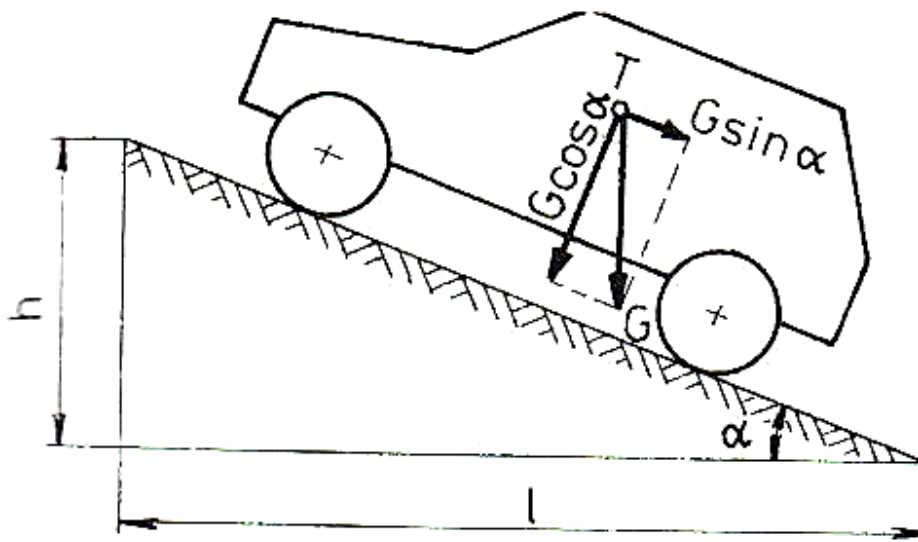
Pro malé úhly stoupání (kde $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha$) platí vztah:

$$O_s = \pm G \cdot s, \quad (7)$$

kde s je stoupání a vypočte se ze vztahu:

$$s = \frac{l}{h} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (8)$$

tento vztah lze použít pro stoupání α do 17° , což odpovídá stoupání do 30 % ($s = 0,3$). Maximální hodnoty stoupání silnice jsou kolem 10 - 12 %, dálnice kolem 6 %. Vyšší stoupání mají zpravidla pouze vysokohorské silnice či místní terénní podmínky.



Obr. 8 Působení odporu stoupání [4]

1.3 ODPOR ZRYCHLENÍ

Při změně rychlosti automobilu působí proti jeho směru zrychlení setrvačná síla (odpor), která se nazývá odpor zrychlení. Velikost tohoto odporu je dána vztahem:



$$O_z = O_{zp} + O_{zr}, \quad (9)$$

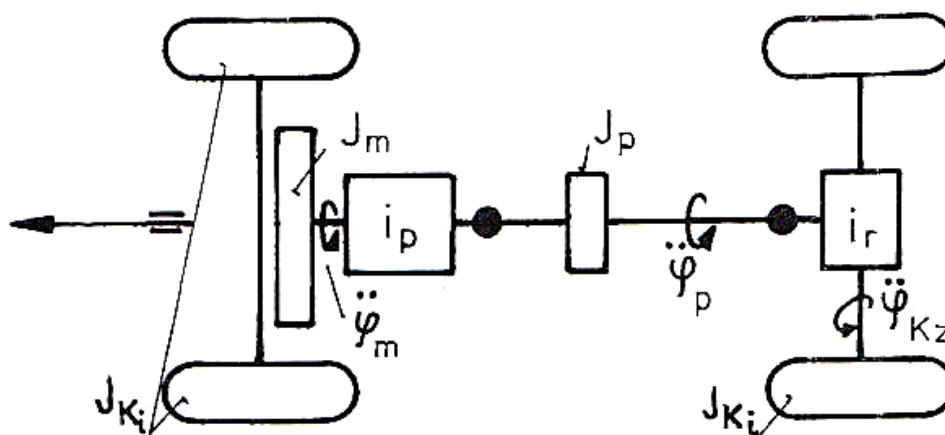
kde O_{zp} je odpor zrychlení posuvné části, O_{zr} je odpor zrychlení otáčejících se částí.

$$O_{zp} = m \cdot a, \quad (10)$$

kde m je hmotnost vozidla, a je zrychlení vozidla.

$$O_{zr} = \sum \frac{J_{Ki}}{r_{di} \cdot r_{Ki}} \cdot a, \quad (11)$$

kde J_{Ki} je hmotnostní moment setrvačnosti kola.



Obr. 9 Schéma odporů zrychlení vozidla [4]

Pro překonání odporu rotačních částí musí být na hnací kola vozidla přiveden moment:

$$M_r = O_{zr} \cdot r_d = M_{rm} + M_{rp} + M_{rK}, \quad (12)$$

kde M_{rm} je moment potřebný pro zrychlení rotujících částí motoru, M_{rp} je moment potřebný pro zrychlení rotujících částí převodového ústrojí, M_{rK} je moment potřebný pro zrychlení kol vozidla:

$$M_{rm} = J_m \cdot \varepsilon_m \cdot i_c \cdot \eta, \quad (13)$$

$$M_{rp} = J_p \cdot \varepsilon_p \cdot i_r \cdot \eta, \quad (14)$$

$$M_{rK} = \sum J_{Ki} \cdot \varepsilon_{Ki}, \quad (15)$$

kde J_m je hmotnostní moment setrvačnosti rotujících částí motoru, ε_m je úhlové zrychlení rotujících částí motoru, ε_p je úhlové zrychlení spojovacího hřídele, i_c je celkový převod mezi motorem a hnacími koly, η je mechanická účinnost.



$$\varepsilon_m = \frac{d^2\varphi_m}{dt^2}, \quad (16)$$

kde φ_m je úhlová dráha rotujících částí motoru.

$$i_c = i_p \cdot i_r, \quad (17)$$

kde i_p je převod převodky, i_r je převod rozvodovky.

Pro úhlové zrychlení kol ε_k platí tyto vztahy:

$$\varepsilon_k = \frac{\varepsilon_m}{i_c \cdot i_r} = \frac{\varepsilon_p}{i_r} = \frac{a}{r_k}. \quad (18)$$

Dosažením výše uvedených vztahů do základního vzorce pro odpor zrychlení a za předpokladu, že $r_k=r_d$, lze výsledný odpor zrychlení vyjádřit ve tvaru:

$$O_z = \left[1 + \frac{(J_m \cdot i_c^2 + J_p \cdot i_r^2) \cdot \eta + \sum_i J_{ki}}{m \cdot r_d^2} \right] \cdot m \cdot a = \vartheta \cdot m \cdot a, \quad (19)$$

kde výraz v závorce můžeme označit jako součinitel vlivu rotačních částí ϑ .

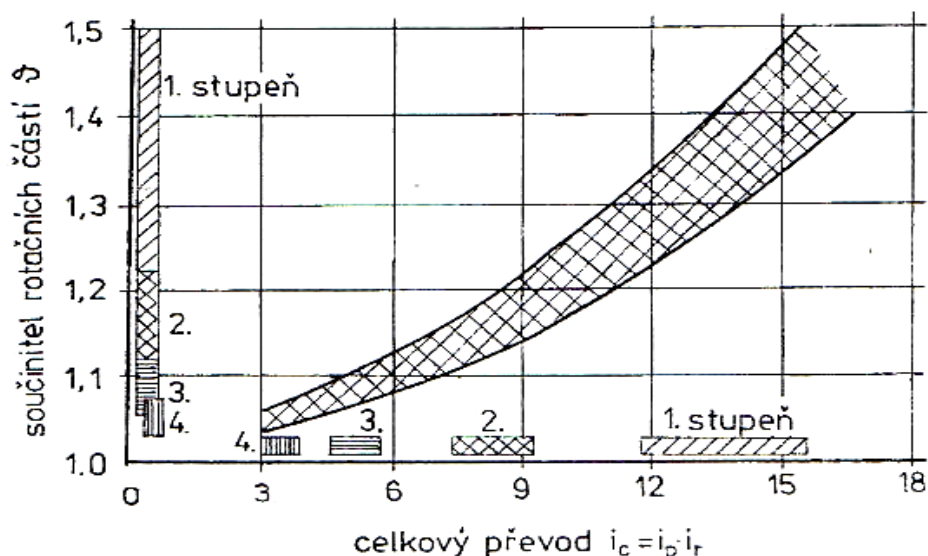
1.3.1 SOUČINITEL VLIVŮ ROTAČNÍCH ČÁSTÍ

Součinitel závisí na mnohých parametrech, z nichž některé lze složitě určit. Pro zjednodušení při výpočtech lze použít orientační hodnoty součinitele (tab. 2).

Tab. 2 Průměrné hodnoty součinitele rotačních částí pro osobní a nákladní automobily [4]

Povrch	Součinitel rotačních částí	
	Nejvyšší rychlostní stupeň	Nejnižší rychlostní stupeň
Osobní	1,04 – 1,07	1,2 – 1,8
Nákladní silniční	1,06 – 1,1	1,4 – 3
Nákladní terénní	1,08 – 1,25	5 – 8

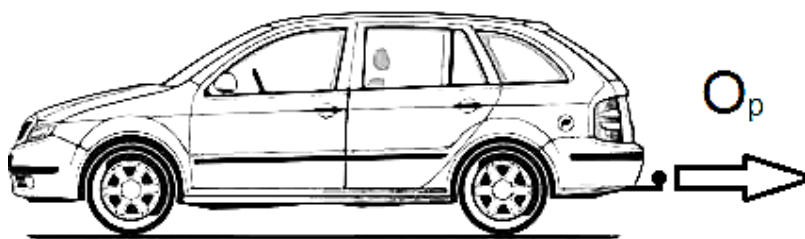
Celkový převodový poměr ($i_c = i_p \cdot i_r$) závisí při stálém převodu rozvodovky i_r na zařazeném rychlostním stupni v převodovce i_p , proto i součinitel rotačních částí je velmi ovlivňovaný okamžitým převodem i_p (obr. 10). Při přímém záběru ($i_p = 1$) rotační součásti osobního vozidla zvyšují sílu potřebnou pro zrychlení přibližně o 7 %. V prvním převodovém stupni (osobní vozidla $i_p = 4$, nákladní vozidla $i_p = 8$) vzrůstá síla u osobních automobilů asi o 70 %, u nákladních asi o 270 %.



Obr. 10 Závislost součinitele rotačních částí na celkovém převodu [4]

1.4 ODPOR PŘIVĚSU

Jedná se o odpor, který vzniká při tahu přívěsu v ose spojovacího mechanismu mezi vozidlem a taženým přívěsem. Tento odpor výrazně zvyšuje potřebnou hnací sílu vozidla. Výpočet jízdnicích odporů přívěsu se stanovuje stejně jako pro vozidlo. Jediným rozdílem je odpor aerodynamický. Ten se neurčuje zvlášť pro vozidlo a přívěs, ale řeší se pro celou jízdnicí soupravu dohromady. [4]



Obr. 11 Zobrazení působení odporu přívěsu [27]

1.5 ODPOR AERODYNAMICKÝ

Jedná se o odporovou sílu, která vzniká tím, jak vozidlo proniká atmosférou. Část vzduchu musí vozidlo protlačit nad, pod a také skrz karoserii (chladicí a větrací systémy). Tato síla působí proti směru pohybu vozidla. Celkový aerodynamický odpor se určí ze vztahu [4]:

$$O_v = F_x = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot S_x , \tag{20}$$

kde c_x je součinitel aerodynamického odporu, v_r je výsledná rychlost proudění, S_x je čelní plocha vozidla.



Aerodynamický odpor má vliv na výkon (kap. 1.6), valivý odpor, maximální rychlost, zrychlení (akceleraci) a na spotřebu paliva

1.5.1 VLIV NA VALIVÝ ODPOR

Jestliže budeme uvažovat silovou složku vztlaku, pak se to projeví na valivém odporu následovně:

$$O_f = f \cdot G, \quad (21)$$

$$O_f = f \cdot (G - F_z), \quad (22)$$

kde F_z je aerodynamický vztlak.

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že valivý odpor a tedy i celkový jízdní odpor se při uvažování silové složky vztlaku projeví snížením celkového jízdního odporu vozidla.

1.5.2 VLIV NA MAXIMÁLNÍ RYCHLOST

Za předpokladů, že vozidlo se pohybuje konstantní rychlostí ($a = 0$), bez stoupání ($s = 0$) a uvažování vztlaku, je potřebná hnací síla:

$$F_K = f \cdot (G - A) + c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S_x \cdot v_r^2, \quad (23)$$

$$v_{max} = \sqrt{\frac{F_K - f \cdot G}{\frac{\rho}{2} \cdot S_x \cdot (c_x - c_z \cdot f)}}, \quad (24)$$

kde c_z je součinitel aerodynamického vztlaku.

Maximální rychlost vozidla nezávisí pouze na koeficientu odporu, ale i vztlaku. Nižší součinitel aerodynamického odporu zvyšuje maximální rychlost vozidla. Součinitel aerodynamického vztlaku je složitější, poněvadž podle rovnice pro rychlost vede ke zvýšení maximální rychlosti a snížení jízdního odporu, ale zároveň vztlak snižuje adhezní sílu vozidla.

1.5.3 VLIV NA ZRYCHLENÍ

Jestliže budeme uvažovat silovou složku vztlaku, pak se to projeví na zrychlení následovně:

$$O_z = \vartheta \cdot m \cdot a, \quad (25)$$

$$a = \frac{O_z}{\vartheta \cdot m} = \frac{1}{\vartheta \cdot m} \cdot \left(\frac{P_m \cdot \eta}{v} - F_x - (G - F_z) \cdot f \right), \quad (26)$$

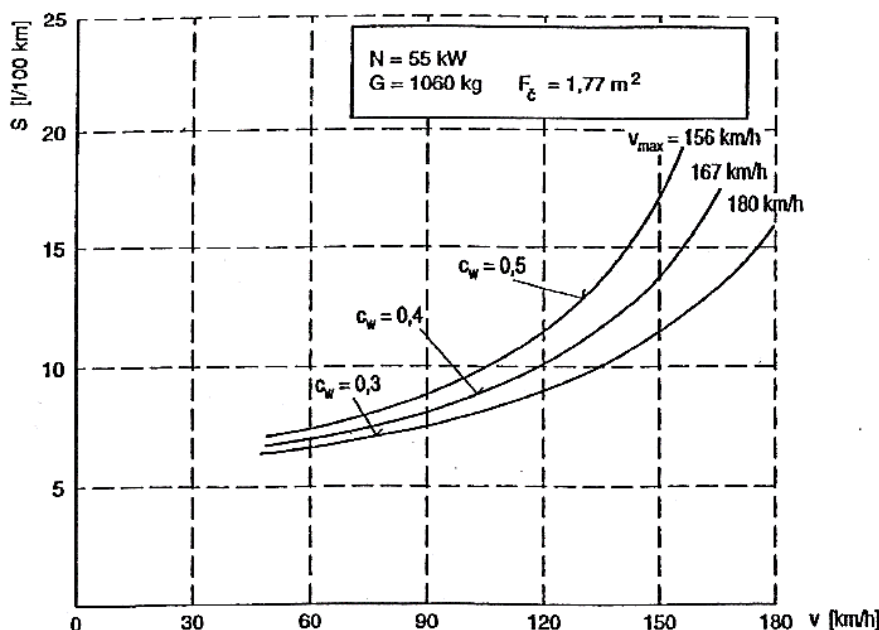
kde P_m je výkon motoru vozidla.

Zrychlení vozidla se zvyšujícím se vztlakem klesá.



1.5.4 VLIV NA SPOTŘEBU PALIVA

Okamžitá spotřeba paliva je dána součinem požadovaného výkonu a měrné spotřeby paliva. Aerodynamický odpor má přímý vliv na spotřebu paliva. [3, 4]



Obr. 12 Závislost spotřeby paliva na rychlosti pro různé součinitele odporu c_x [3]

1.6 CELKOVÝ JÍZDNÍ ODPOR

Celkový odpor je dán součtem jednotlivých jízdních odporů působících na vozidlo.

$$F_K = O_f + O_v + O_s + O_z + O_p, \quad (27)$$

kde F_K je potřebná hnací síla vozidla na kolech.

Dosazením za jednotlivé odpory a za předpokladu, že vozidlo netáhne přívěs ($O_p = 0$) je výsledná hnací síla dána vztahem:

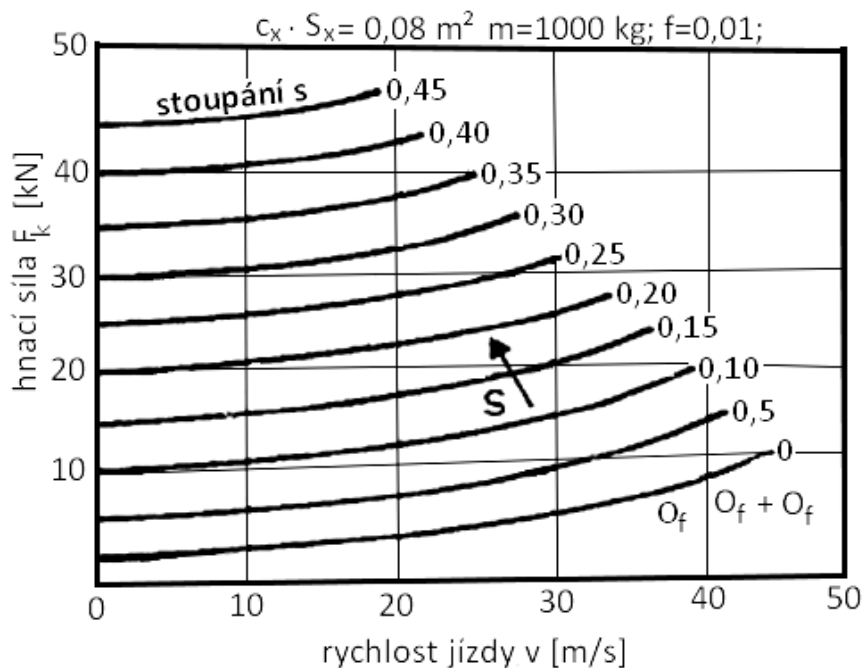
$$F_K = f \cdot G + c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S_x \cdot v_r^2 + G \cdot \left(s + \vartheta \cdot \frac{a}{g} \right). \quad (28)$$

Grafická vyjádření potřebné hnací síly a výkonu (obr. 13), které je bráno za předpokladů, že vozidlo se pohybuje konstantní rychlostí ($a = 0$) a pro vzdušný odpor budeme uvažovat bezvětří ($v_r = v$).

Výkon, který musí být přiváděn na kola vozidla k překonání jízdních odporů, se vypočte ze vztahu

$$P_K = F_K \cdot v = \frac{M_K}{r_d} \cdot v, \quad (29)$$

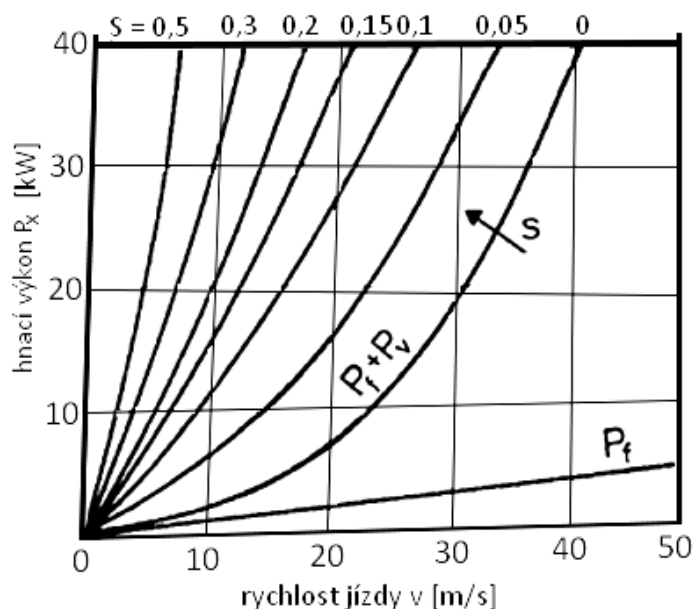
kde M_K je kroutící moment motoru.



Obr. 13 Potřebná hnací síla k překonání jízdních odporů [4]

Dosažení hnací síly a za předpokladů, že vozidlo netáhne přívěs a je bezvětrí ($O_p = 0, v_r = v$) dostaneme vztah:

$$P_K = f \cdot G \cdot v + c_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S_x \cdot v^3 + G \cdot v \cdot \left(s + \vartheta \cdot \frac{a}{g} \right). \tag{30}$$



Obr. 14 Potřebný hnací výkon k překonání jízdních odporů [4]

Z výše uvedených grafů vyplývá, že potřebná hnací síla a výkon pro překonání jízdních odporů rostou s rychlostí jízdy v . Za předpokladu bezvětrí, roste hnací výkon s třetí mocninou rychlosti. [4]



2 AERODYNAMIKA

Aerodynamika je obor fyziky, konkrétně mechaniky tekutin, který se zabývá problémy spojenými s pohybem těles obtékaných proudem vzduchu. Aerodynamika má velký význam především v letectví, automobilismu, architektuře, ale také u lopatkových strojů pracujících se vzdušinami (ventilátory, turbodmýchadla, turbokompresory, apod.). Proudění vzduchu je relativní tzn., že uvažovaný objekt je v klidu a vzduch kolem něj proudí nebo naopak. Také existuje třetí možnost, kdy se pohybuje objekt současně se vzduchem (lopatkové stroje).

2.1 VLASTNOSTI TEKUTIN

V této kapitole budou popsány základní vlastnosti tekutin týkajících se aerodynamiky. Jestliže je proudící tekutina plyn, pak hovoříme o aerodynamice. Chování tekutiny (kapaliny) a plynů se výrazně liší od pevných těles. Rozdělení látek na pevné hmoty a tekutiny je dáno jejich rozdílnou odezvou na účinky síly, snažící se změnit původní tvar a objem hmotného elementu. Pevné látky generují značný odpor proti změnám objemu a tvaru vznikem vnitřních napětí, která jsou úměrná způsobeným deformacím (Hookův zákon). Naopak tekutiny deformacím podléhají (bez ohledu na velikost působící síly). Vnitřní napětí vyvolaná v tekutině jsou úměrná gradientu rychlosti (Newtonovy rovnice). Kapaliny kladou vůči změnám tvaru malý odpor, na rozdíl od změn objemu, kde je odpor velký, jelikož kapaliny jsou téměř nestlačitelné. Plyn podléhá celkem snadno změnám objemu i tvaru. Tyto rozdílné vlastnosti pevných látek, kapalin a plynů jsou dány rozdílnými velikostmi mezimolekulárních sil. [6]

2.1.1 MĚRNÁ HMOTNOST VZDUCHU

Závisí na teplotě, tlaku, vlhkosti a nadmořské výšce. Obecně hustota kapalin klesá s teplotou a roste s tlakem. Je to způsobeno tím, že při zahřívání kapaliny vzroste její objem (vlivem tepelné roztažnosti) a nepřímo úměrně se zmenší hustota. Naopak při nárůstu tlaku se objem kapaliny zmenšuje (vlivem stlačitelnosti kapalin) a tím roste hustota.

Určí se ze vztahu:

$$\rho = \frac{354 p}{(t + 273)}, \quad (31)$$

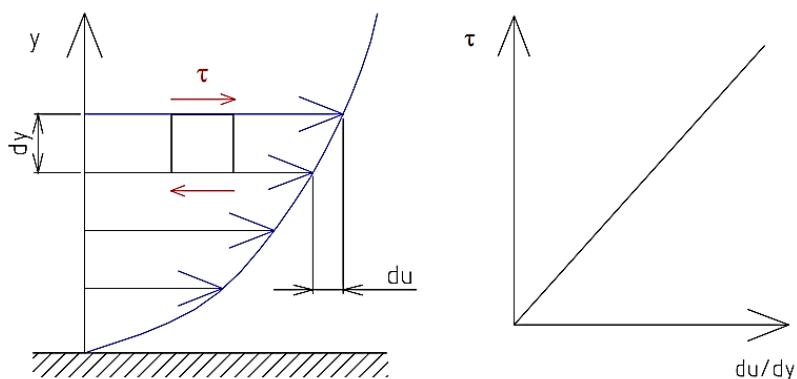
kde p je tlak vzduchu, t je teplota vzduchu. [4]

2.1.2 VISKOZITA TEKUTIN

Viskozitu tekutin, lze definovat jako míru odolnosti vůči pohybu neboli míru vnitřního tření kapalin. Při pohybu vrstev kapaliny, mezi nimi vzniká tečné napětí τ , které je dle Newtonova zákona lineárně úměrné gradientu rychlosti v kolmém směru na pohyb kapaliny.

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy}, \quad (32)$$

kde τ je tečné napětí, du/dy je gradient rychlosti a η je dynamická viskozita.



Obr. 15 Rychlostní profil (vlevo) a závislost tečného napětí τ na rychlostním gradientu (vpravo) [6]

Pro newtonské kapaliny v oblasti laminárního proudění platí, že viskozita je při daném tlaku a teplotě konstantní. Toto neplatí pro neneutronské kapaliny. Z Newtonova zákona vyplývá vztah pro dynamickou viskozitu:

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (33)$$

Kinematická viskozita byla zavedena pro výpočet podílu dynamické viskozity η a hustoty kapaliny ρ .

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (34)$$

kde ν je kinematická viskozita.

Viskozita je závislá na teplotě. Se zvyšující se teplotou viskozita klesá a kapalina klade menší odpor proti proudění. [6]

2.1.3 BERNOULLIHO ROVNICE

Jedná se o základní rovnici mechaniky tekutin, která říká, že součet statického a dynamického tlaku v každém bodě na povrchu tělesa je konstantní a rovný součtu statického a dynamického tlaku v nerušeném proudu vzduchu.

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = konst., \quad (35)$$

kde p je statický tlak a $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$ je dynamický tlak. ρ je hustota, V je rychlost proudění. [3]

2.2 OBTÉKÁNÍ TĚLES

Tato kapitola se zabývá problematikou proudící tekutiny působící na pevné těleso vystavené dynamickému působení tekutin. Obtékání těles je v praktických i technických aplikacích velmi důležité. Často se řeší obtékání profilů raket, automobilů, budov, v letectví apod.



Obtékání těles lze řešit pro proudění ideální nestlačitelné tekutiny, nestlačitelné vazké tekutiny, ideální stlačitelné tekutiny, stlačitelné vazké tekutiny.

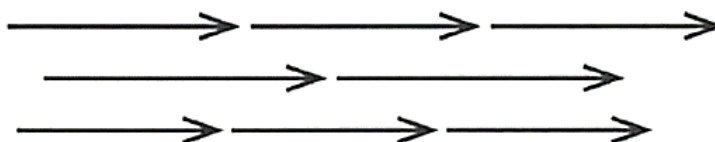
2.2.1 PROUDNICE

Jestliže se částice vzduchu pohybuje po určité trajektorii obtékaného tělesa, nazýváme ji proudnice. Při konstantní rychlosti se další částice procházející stejným bodem bude pohybovat po stejné trajektorii jako předcházející.

Soubor proudnic se spojuje do tzv. proudových svazků. Podle tvaru se proudnice dělí:

Laminární – jedná se o ustálené proudění viskózní tekutiny. Částice vzduchu se po své trajektorii pouze posouvají (nerotují) a jejich dráhy se vzájemně nekříží. Tyto proudnice jsou přibližně rovnoběžné.

Turbulentní – jedná se o vířivé proudění viskózní tekutiny. Částice vzduchu se po své trajektorii nejenom posouvají, ale konají i pohyb obecný. Tyto částice se vlivem prostředí roztácejí a následně protínají a jejich proudnice se navzájem kříží.



Obr. 16 Laminární proudění [2]



Obr. 17 Turbulentní proudění [2]

Proudění, opisující tvar tělesa, se nazývá přilnuté. Naopak proudění, které tento tvar neopisuje, se nazývá odtržené. K odtrženému proudění dochází nejčastěji v místě, kde dochází k odtržení mezní vrstvy. [15, 2]

2.2.2 REYNOLDSOVO ČÍSLO

Jedná se o bezrozměrné číslo, které popisuje vliv setrvačných a třecích sil při proudění a tedy účinky proudění na obtékané těleso. Toto číslo je také hlavním parametrem pro posuzování stavu proudění. Jakmile Reynoldsovo číslo přesáhne určitou kritickou hodnotu, začíná se měnit charakter proudění, a tak dochází k proudění turbulentnímu. Vznik tohoto proudění je způsoben porušením rovnováhy mezi silami tření uvnitř tekutiny, které se snaží stabilizovat proud do spořádaných vrstev (laminární proudění). Může nastat stav, kdy proudění má

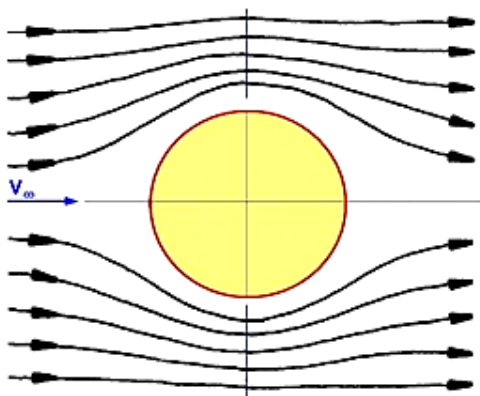


charakter jak laminární, tak i turbulentní. Tento stav se nazývá přechodný. Vztah pro Reynoldsovo číslo je následující [2]:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\nu} \quad (36)$$

2.2.3 ODPOR TĚLES

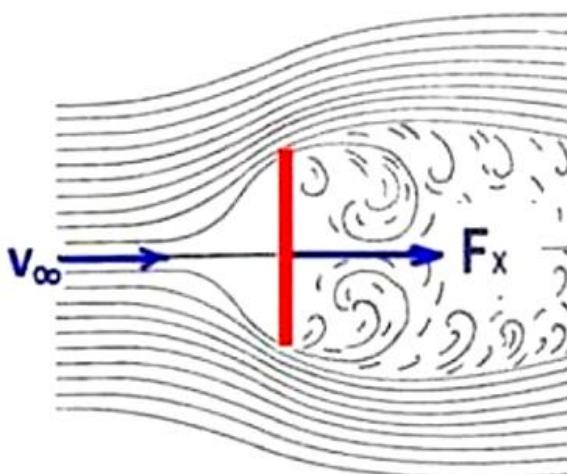
Při obtékání tělesa ideální tekutinou (viskozita je nulová), proudnice kopírují tvar obtékaného tělesa a je-li proudové pole symetrické okolo svislé i vodorovné osy, pak je odpor nulový.



Obr. 18 Obtékání tělesa ideální tekutinou [6]

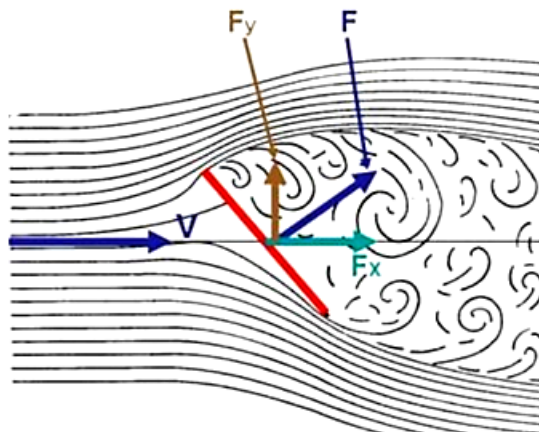
Při obtékání tělesa skutečnou tekutinou vzniká tvarový odpor, který se dělí na odpor třecí (vliv viskozity) a odpor tlakový, jenž je vyvolaný nesymetrickým rozložením tlaku na povrchu tělesa.

Je-li obtékáno symetrické těleso a směr proudění leží v jeho ose, pak výsledná aerodynamická síla leží v této ose.



Obr. 19 Obtékání symetrického tělesa [6]

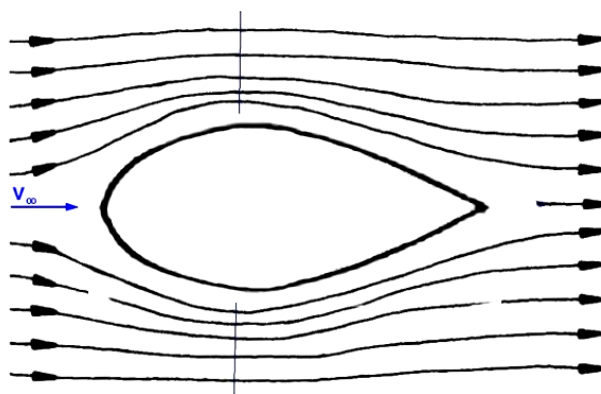
Je-li obtékáno těleso nesymetrické nebo symetrické šikmo postavené vůči vektoru nabíhajícího proudu, pak se výsledná síla rozkládá na dvě složky. Těmito složkami jsou vztlak, který působí kolmo a odpor, jenž působí rovnoběžně na směr nabíhajícího proudu. [6]



Obr. 20 Obtékání šikmé desky [6]

TVAROVÝ ODPOR TLAKOVÝ

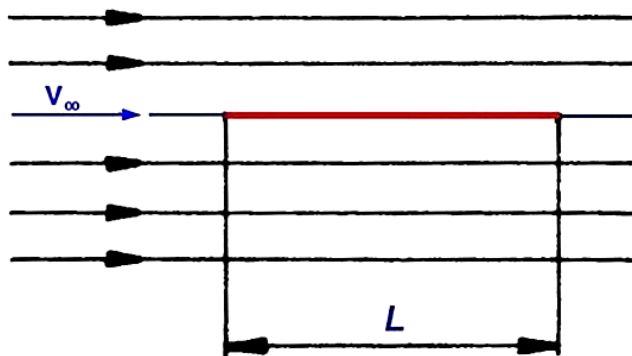
Tlakový odpor lze nejjednodušeji vysvětlit na obtékání desky umístěné kolmo na směr proudu (obr. 19). Ve skutečném prostředí vzduch naráží (tlačí) na přední stranu desky, a tím rozděljuje proud na dvě strany. Jelikož proudění nestačí kopírovat tvar desky, dochází k odtrženému proudění, čímž dochází k vytváření vírů za deskou. V přední části desky tedy vzniká pozitivní tlak (přetlak), způsobený ztrátou rychlostí proudění. Za deskou vzniká negativní tlak (podtlak), který je způsoben velkou rychlostí vířivého proudění. Z tohoto důvodu se konstruktéři, letadel, vozidel apod., snaží zamezit ztrátě rychlosti proudění vpředu vozidla, odtržení proudu vzduchu a vytváření turbulentního proudění v zadní části. Ideální tvar pro obtékání je tzv. kapkovitý profil.



Obr. 21 Kapkovitý profil [6]

TVAROVÝ ODPOR TŘECÍ

Je-li obtékána tenká deska rovnoběžná na směr proudu vzduchu, tak nebude docházet k výrazným změnám proudnic. I přesto by byl naměřen určitý odpor způsobený třením (třecí odpor). I na tento odpor má vliv mezní vrstva. [3, 6]



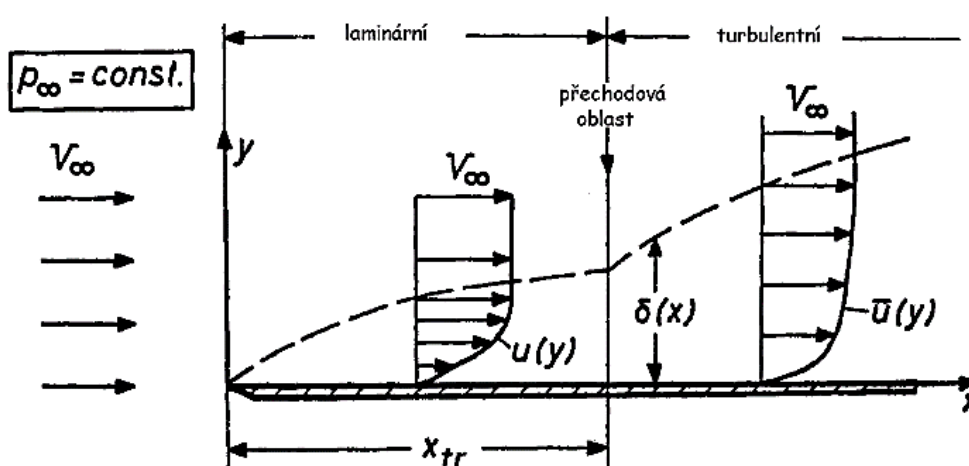
Obr. 22 Obtékání tenké desky [6]

2.2.4 MEZNÍ VRSTVA

Je to oblast ovlivněná viskozitou vzduchu, která se projevuje těsně blízkosti obtékaného tělesa. Rychlost proudu na povrchu tělesa je nulová, ale mění se v závislosti na normálové vzdálenosti od povrchu. Proto existuje tzv. rychlostní gradient, který je spojen se vznikem odporové síly. Ta vzniká třením vrstev tekutin o různé rychlosti a působí proti pohybu tělesa.

Mezní vrstva se mění ve směru tělesa. Mění se její tloušťka a také její neuspořádané proudění, které mezní vrstvu dělí na:

- Laminární - uspořádaný pohyb tekutiny, dochází pouze k malé výměně energií a hmot mezi vrstvami, vrstvy jsou několikanásobně menší než turbulentní.
- Turbulentní - náhodný pohyb tekutiny spojený s velkou výměnou energie a hmoty ve vertikálním směru mezi vrstvami. [14]



Obr. 23 Laminární a turbulentní mezní vrstva [1]

Při obtékání rovinné desky nedochází ke změně statického tlaku, jelikož tlak podél desky (ve směru osy x) je konstantní (tlakový gradient $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$). Toto neplatí pro obtékání zaoblených



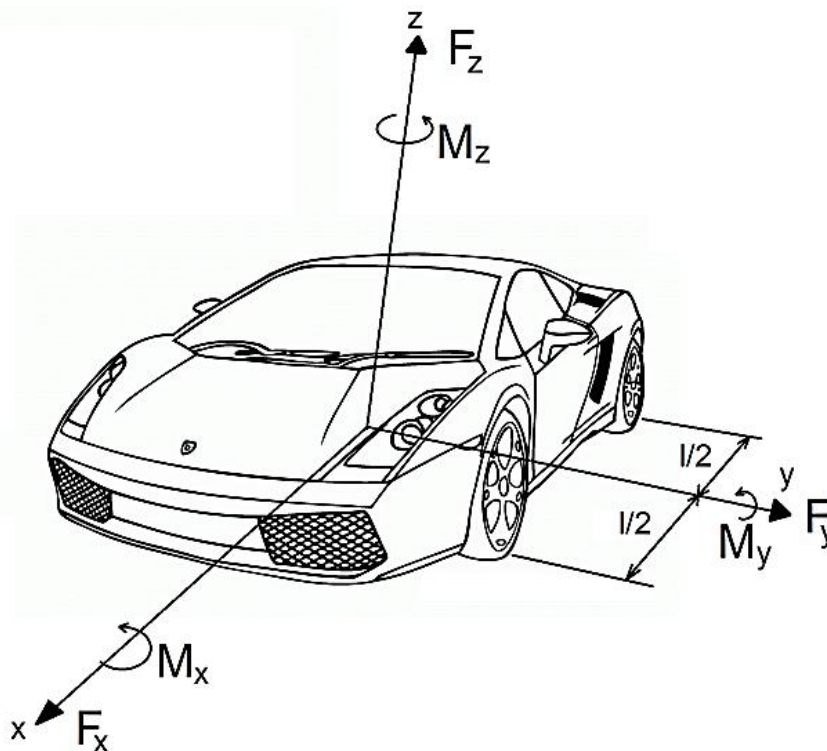
3 AERODYNAMIKA VOZIDEL

Aerodynamika byla zpočátku důležitá především u závodních vozidel, kde se konstruktéři snažili navrhnout ideální tvar pro dosažení co nejmenšího odporu a naopak co největší rychlosti, stability a ovladatelnosti vozu. U osobních automobilů dostala aerodynamika svoji důležitost s příchodem stále se zvyšujících nároků na snížení emisí osobních vozidel. Aerodynamika má také výrazný vliv na spotřebu paliva a celkový design vozidla. V souvislosti s tím má v současné době téměř každá automobilka ve svém výrobním programu tzv. ekologickou verzi.

3.1 SOUSTAVA AERODYNAMICKÝCH SIL A MOMENTŮ

Tato kapitola se zaměřuje na celkovou aerodynamickou sílu, která má obecný směr a velikost. Pro analýzu vlivu této síly na zatížení vozidla ji rozkládáme do tří směrů os souřadného systému vozidla. Střed souřadného systému leží v rovině symetrie vozidla, v polovině rozvoru a v rovině vozovky. Výsledné síly se musí následně přepočítat do těžiště vozidla. Celková aerodynamická síla se tedy dělí do šesti složek a to tří silových a tří momentových. Střed tlakových sil obvykle neleží v počátku souřadného systému vozidla, a tím jsou vyvolány právě složky momentové. Jednotlivé složky jsou [2, 3]:

- V ose x – odpor a moment klopení,
- v ose y – boční síla a moment klonění,
- v ose z – vztlak a moment stáčení.



Obr. 26 Soustava aerodynamických sil a momentů [28]



Aerodynamický odpor – směr síly je rovnoběžný se směrem pohybu vozidla.

$$F_x = -\frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot S_x \quad (37)$$

Aerodynamická boční síla – směr síly je normálový vzhledem ke směru pohybu vozidla.

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot c_y \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot S_x \quad (38)$$

Aerodynamický vztlak – směr vztlakové síly je nahoru normálově vzhledem k vozovce.

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot c_z \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot S_x \quad (39)$$

Moment klopení

$$M_x = \frac{1}{2} \cdot c_{Mx} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot S_x \cdot r \quad (40)$$

Moment klonění

$$M_y = \frac{1}{2} \cdot c_{My} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot S_x \cdot l \quad (41)$$

Moment stáčení

$$M_z = \frac{1}{2} \cdot c_{Mz} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot S_x \cdot l, \quad (42)$$

kde l je rozvor kol, r je rozchod kol

Každá složka aerodynamické síly má svůj součinitel a jsou definovány takto:

Součinitel odporu:

$$c_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A} \quad (43)$$

Součinitel boční síly:

$$c_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A} \quad (44)$$

Součinitel vztlaku:

$$c_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A} \quad (45)$$



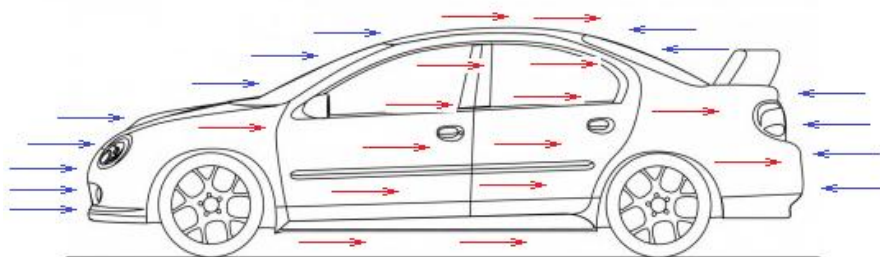
3.2 VZNIK AERODYNAMICKÉHO ODPORU VOZIDEL

Největší část aerodynamického odporu tvoří odpor tlakový, který je vyvolán rozdílem tlaků před a za vozidlem. Celkový odpor je však tvořen více činiteli. Podle vzniku se dělí následovně:

- Tvarový odpor - tlakový 50 až 80 %, třecí 5 až 10 %,
- indukovaný odpor – 3 až 10 %,
- interferenční odpor – 10 až 20 %,
- odpor rotujících kol – 5 %,
- odpor průchodem vozidla – 10 až 20 %.

3.2.1 TVAROVÝ ODPOR

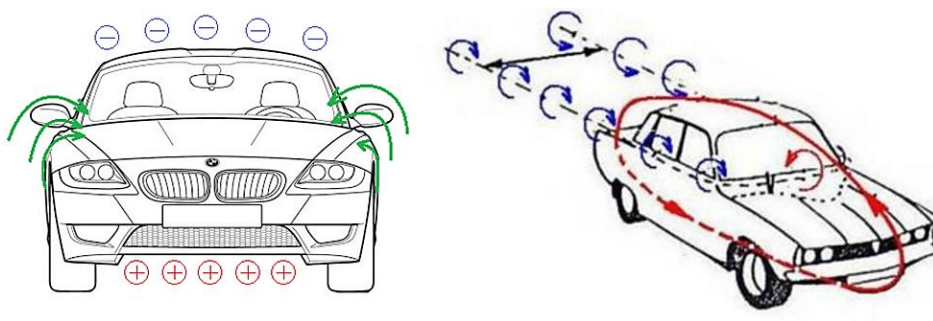
Vznik tvarového odporu byl již popsán (*kap. 2.2.3*). Působení tlakových a třecích sil na karoserii vozidla je zobrazen na *obr. 27*. [3]



Obr. 27 Vznik tvarového odporu vozidla z tlakových sil (modré šipky) a třecích sil (červené šipky) [29]

3.2.2 INDUKOVANÝ ODPOR

Při pohybu vozidla se vytváří indukovaný odpor. Příčinou vzniku tohoto odporu je rozložení statických tlaků na povrchu karoserie, vycházející z Bernoulliho rovnice. Pod vozidlem vzniká přetlak a nad vozidlem podtlak, přičemž částice vzduchu v oblasti vyšších tlaků mají tendenci se přemísťovat do oblastí nižších tlaků. Tím dochází k vytváření vírů na bočních stěnách. Velikost a intenzita těchto vírů je závislá na velikosti rozdílu tlaků, která je přímo úměrná rychlosti vozidla, tvaru karoserie a křivce středního profilu. Rozdílnost tlaků také určuje velikost aerodynamického vztlaku. Víry jsou postupně vstřebávány úplavem za vozidlem. [3, 6]



Obr. 28 Vznik indukovaného odporu [30, 6]

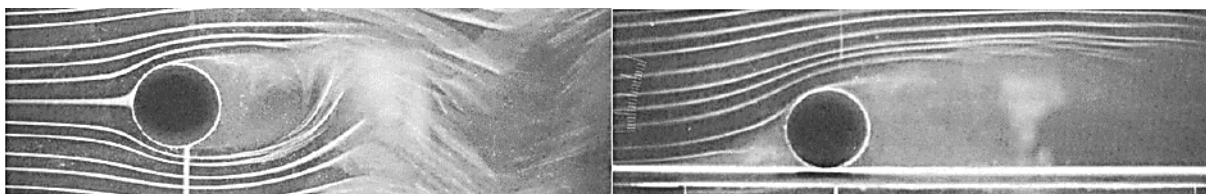


3.2.3 INTERFERENCEČNÍ ODPOR

Tento odpor vzniká při použití některého přídavného zařízení či prvku k základnímu tvaru karoserie vozidla, který narušuje proudění okolo vozidla a říká, že celkový aerodynamický odpor bude menší nežli součet odporů jednotlivých zařízení. Např. při měření odporu zpětného zrcátka a karoserie zvlášť, jejich součet bude větší než odpor spojeného zrcátka s karoserií. Dalším příkladem může být předový spoiler, který má sám o sobě velký aerodynamický odpor, ale příznivě ovlivňuje proudění pod vozidlem, tudíž celkový aerodynamický odpor vozidla bude menší. [3, 12]

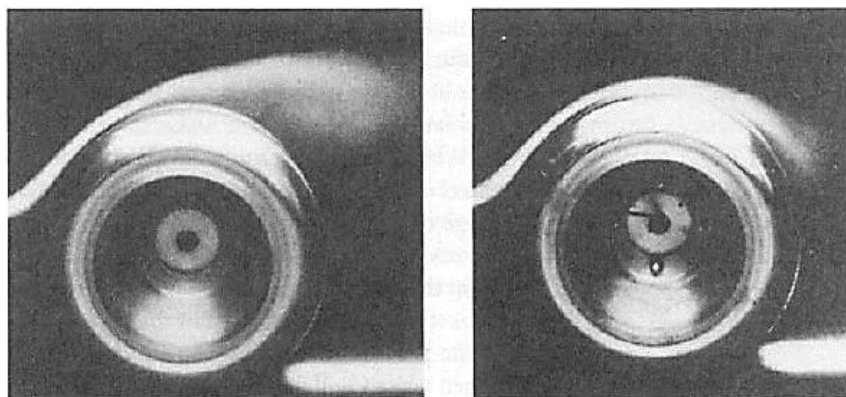
3.2.4 ODPOR ROTUJÍCÍCH KOL

Velice důležitým prvkem ovlivňující aerodynamiku vozidla jsou kola, jelikož jsou vystavena proudu vzduchu a vytvářejí víry a turbulentní proudění. Obtékání kol si lze představit jako obtékání válce a vozovku jako rovnou desku. Na obrázku je ukázán rozdíl proudění válce ve volném prostoru a na rovné desce, což má vliv především na rozdílné rozložení tlaku na povrchu pneumatiky.



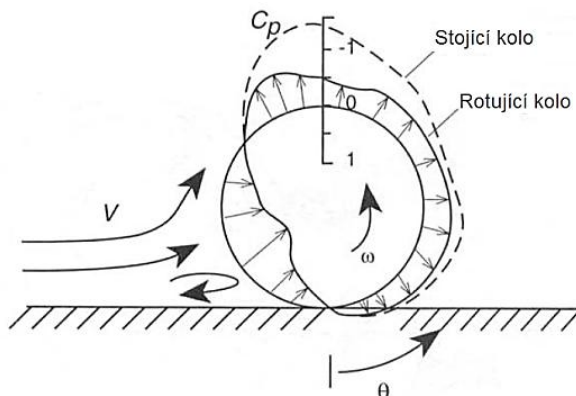
Obr. 29 Obtékání válce ve volném prostoru (vpravo) a na rovné desce (vlevo) [2]

Obtékání kol se také výrazně liší, jestliže je kolo ve stacionární poloze nebo rotuje. Ovlivňuje to především koeficient tlaku na povrchu kola, a tedy i koeficient vztlaku a odporu, jelikož místo odtržení přilnutého proudění se liší. U stojícího kola dochází k odtržení proudu v úhlu $\theta \sim 160^\circ$, zatímco u rotujícího kola dochází k odtržení dříve (úhel $\theta > 160^\circ$). Rozdílný bod odtržení má vliv na celkové rozložení tlaku na pneumatice.



Obr. 30 Odtržení proudu vzduchu u rotujícího kola (vlevo) a stacionárního kola (vpravo) [2]

Záporný koeficient tlaku na horní straně stojícího kola tvoří vztlak a na zadní straně zvyšuje odpor. U rotujícího kola je koeficient tlaku na horní straně kladný a dosahuje menších hodnot. Tento jev, kdy rotující kolo způsobuje vztlak či přítlak se nazývá Magnusův jev. [2]



Obr. 31 Působení tlaku na stojící a rotující kolo [2]

KOEFICIENT TLAKU

Koeficient tlaku popisuje, jak se proudění projeví na povrchu obtékaného tělesa. Každý bod tlakového pole má svůj specifický koeficient tlaku. Jestliže je koeficient rovný jedné, jedná se o statický tlak a je-li roven nule, pak se jedná o nízkotlakovou oblast, kde je pravděpodobné, že dojde k odtržení proudu.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \frac{p - p_\infty}{\text{dynamický tlak}}, \quad (46)$$

kde p_∞ je statický tlak ve volném proudu, p je tlak v určitém bodě. [8]

3.2.5 ODPOR PRŮCHODEM VOZIDLA

Při jízdě musí být část vzduchu, potřebná pro systémy chlazení, klimatizace, sání, brzd apod., protlačena skrz vozidlo. Tím vzniká další odpor, jenž se projeví na celkovém aerodynamickém odporu vozidla. [2]

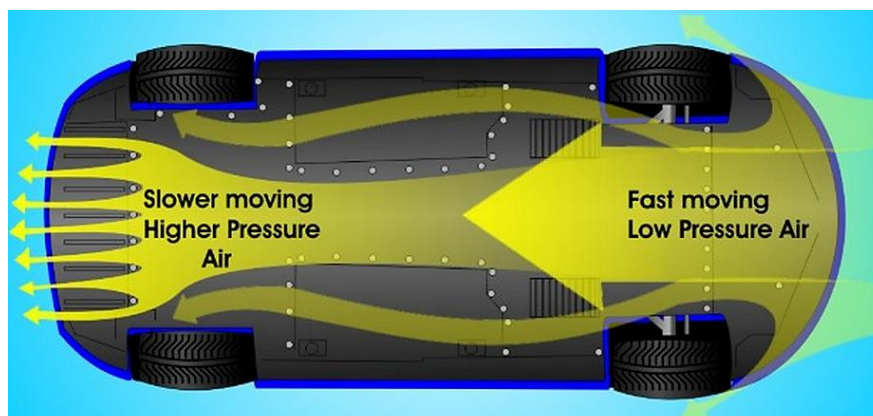
3.3 PROUDĚNÍ POD VOZIDLEM

Vliv blízkosti povrchu na pohybující se těleso byl nejdříve zpozorován u letadel. Jakmile se letadlo přiblíží k povrchu (např. hladině oceánu, přistávací plošině), dojde k výraznému nárůstu vztlaku generovaného křídly a k poklesu odporu prostředí. Z tohoto efektu vycházejí konstruktéři vozidel. Použitím obráceného profilu křídla lze totiž získat potřebný přítlak. Tento jev, kdy je vozidlo přitlačováno k zemi, se nazývá ground effect (přísavný efekt). Při obtékání vozidla v ideálních podmínkách tedy dochází ke zrychlení proudění a vytváření žádaného negativního statického tlaku (i negativního vztlaku) mezi karoserií a vozovkou. Ve skutečných podmínkách, vlivem viskozity a mezní vrstvy, se charakter proudění mění.

Na začátku mezery mezi podvozkem a vozovkou dochází ke zrychlení proudění a snížení tlaku, jež vede k relativnímu pohybu proudu vzduchu proti pohybu vozidla a vytvoření

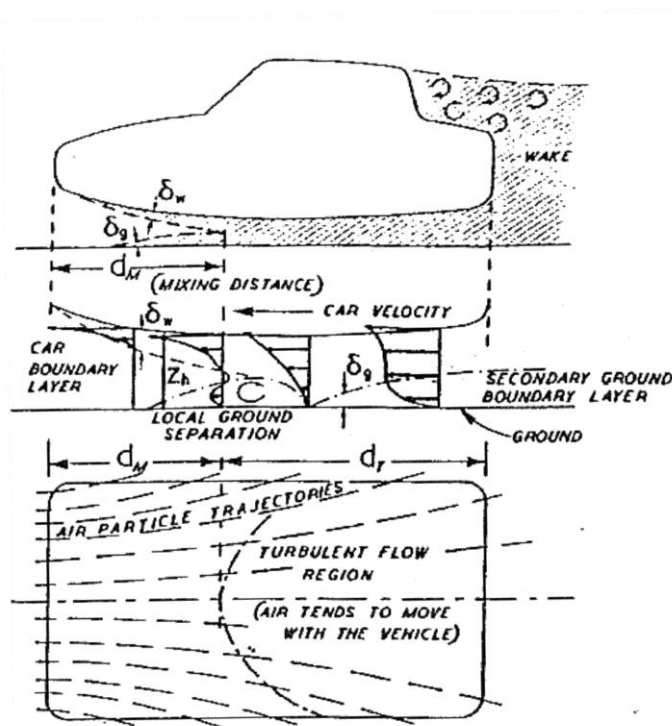


negativní vztlakové síly. V další části je vzduch strháván ve směru pohybu vozidla, dochází ke zvýšení tlaku a ke zpomalení proudu vzduchu.



Obr. 32 Změna rychlosti proudění a tlaku pod vozidlem [18]

Mezní vrstva je závislá na světlé výšce vozidla, která se v určité vzdálenosti od náběžné hrany dotkne země a splyne s úplavem za vozidlem. Vzduchový objem mezi vozidlem a vozovkou je strháván vozidlem, což vede k dalšímu relativnímu pohybu vůči vozovce a k vytvoření sekundární mezní vrstvy. Nerovnosti spodního povrchu vozidla přispívají k tvorbě mezní vrstvy a turbulencí, které také snižují rychlost proudění pod vozidlem a zvyšují aerodynamický vztlak. Obecně platí, že utěsnění mezery mezi karoserií a vozovkou v přední části vozidla vede ke snížení statického tlaku pod vozidlem, a tím ke vzniku negativního aerodynamického vztlaku. Naopak utěsnění mezery v zadní části karoserie vede k vysokým statickým tlakům a ke vzniku kladného vztlaku.



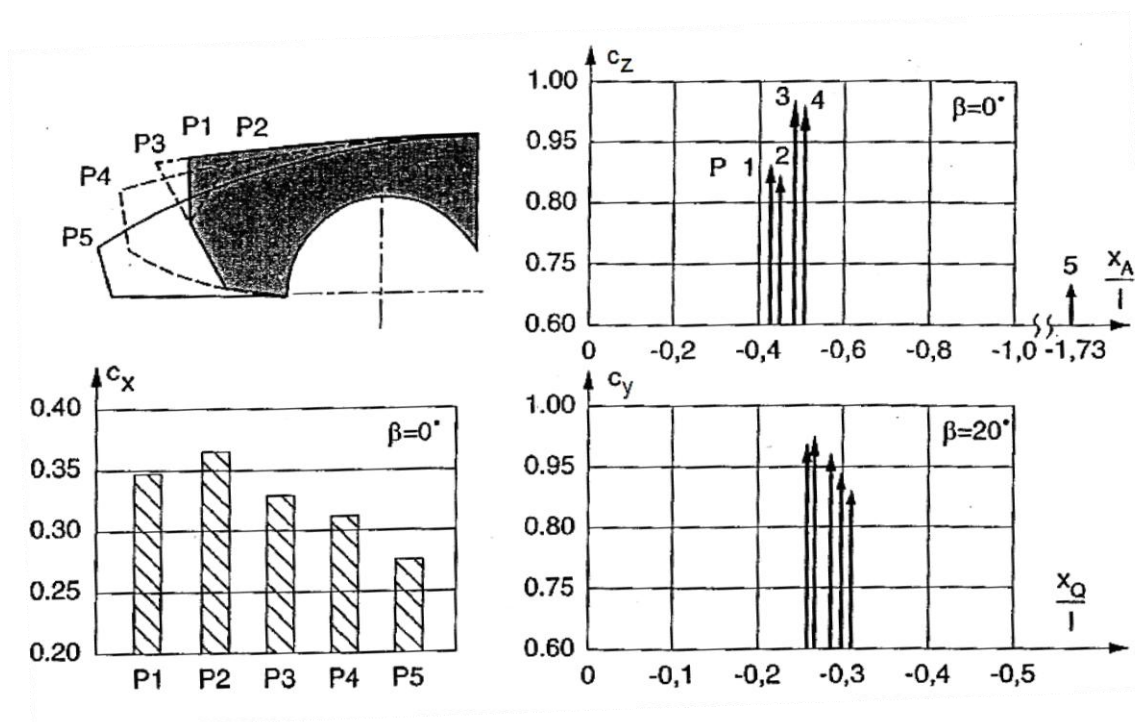
Obr. 33 Proudění vzduchu pod vozidlem [3]



Tyto poznatky jsou využívány při použití aerodynamických konstrukčních prvků (spoilerů) a úprav, ovlivňujících proudění pod vozidlem. Z počátku měla mnohá z nich důležitost především u závodních a sportovních verzí vozidel, ale v poslední době dostávají svoji důležitost i u vozidel osobních. [2, 3]

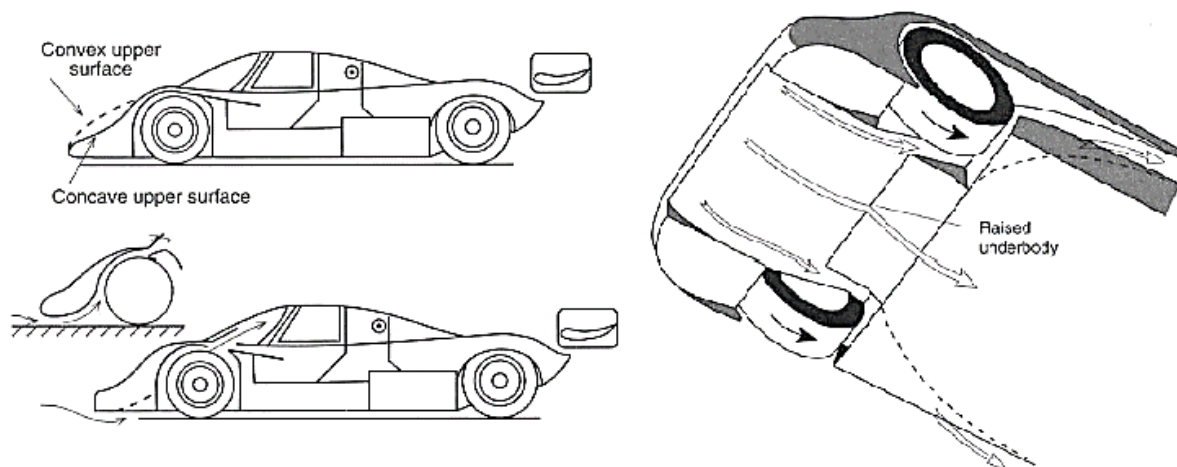
3.3.1 PŘEDNÍ ČÁST KAROSERIE

Tato část je velice důležitá pro proudění pod vozidlem, jelikož náběžná hrana vozidla rozděluje proud na horní a spodní větev, což ovlivňuje rychlost proudu vzduchu pod vozidlem, a tím i výslednou vztlakovou sílu. Vyšší náběžná hrana posouvá neutrální čáru, rozdělující proud směrem nahoru a může docházet k urychlování proudění pod vozidlem, a tedy zmenšení vztlakové síly. Na druhé straně nižší náběžná hrana umožňuje vytvoření ploché, dopředu se sklánějící přední kapoty, jenž přispívá k potlačení negativních tlaků, a tudíž ke snížení vztlaku. [3]



Obr. 34 Vliv tvaru přední části karoserie na aerodynamické součinitele [3]

Při konstrukci je volba výšky a tvaru přední kapoty ovlivněna mnoha faktory. U osobních automobilů nejsou kladeny tak velké nároky na přítlak, jelikož by to mělo výrazný dopad na aerodynamický odpor, a tím na spotřebu paliva. Také musí být touto částí zajištěna doprava vzduchu do chladících, větracích systémů apod. Naopak u závodních vozidel mají konstruktéři mnohem větší možnosti. Základní požadavek na přední část vozidla je, již zmiňované, generování přítlaku. Nosy závodních vozidel mají logicky konkávní tvary, protože generují mnohem větší hodnoty přítlaku než tvary konvexní. Spodní plocha kapoty je tvarována obdobně jako profil křídla, a také může mít různě tvarované tunely a prolisy, pro lepší charakter proudění pod karoserií. Nejčastější provedení přední kapoty jsou zobrazena na (obr. 35). [2]



Obr. 35 Příklady provedení přední části závodního vozidla [2]

3.3.2 PODVOZEK

Tvar podvozku je velice důležitý pro celkovou aerodynamiku vozidla. Hlavním požadavkem na podvozek z hlediska aerodynamiky je, aby co nejméně součástí přicházelo ke styku s proudem vzduchu. Jestliže k tomu dojde, generují se neuspořádané víry, které výrazně narušují proudění. Proto se konstruktéři snaží o zakrytování co nejvíce částí. Příklad provedení zakrytování podvozku osobního vozidla je zobrazeno na obr. 36.



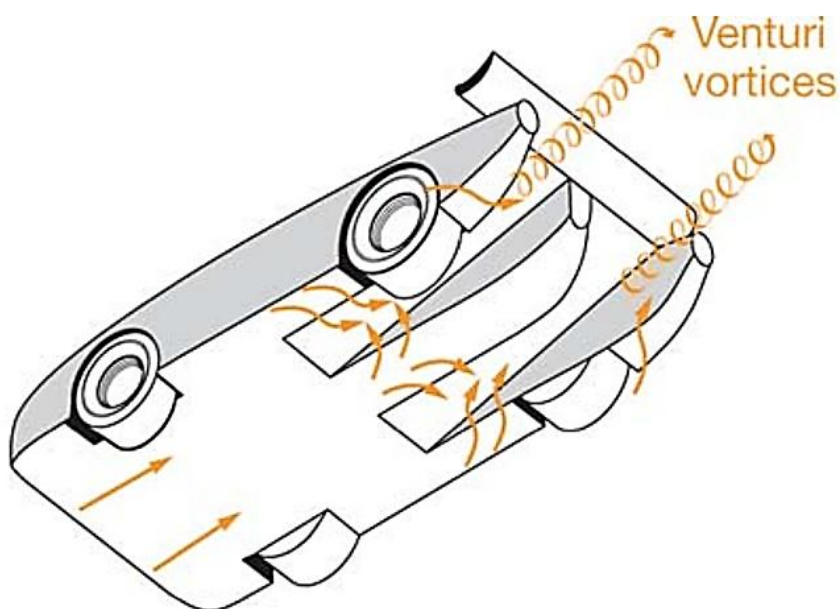
Obr. 36 Zakrytování podvozku vozidla Mercedes CLA [17]

Některé části být zakryté nemůžou. Kupříkladu horké výfukové potrubí, jež se musí proudem vzduchu chladit. To lze řešit prolisováním spodní plochy podvozku pro výfukovou soustavu, stejně jako je tomu na obr. 37.



Obr. 37 Provedení podvozku pro výfukové potrubí vozidla Mercedes CLA [17]

U vozidel závodních je využíváno především ground effectu, proto se používají tvarované podvozkové tunely (kanály). Tyto tunely strhávají vzduch ze stran automobilu a uvnitř nich se generují silné koncentrované víry (Venturi vortices), které stabilizují proudění vzduchu pod vozidlem. Z těchto důvodů je zapotřebí, aby hrany tunelů (především vnější) byly ostré, a tím podporovaly vznik vírů.

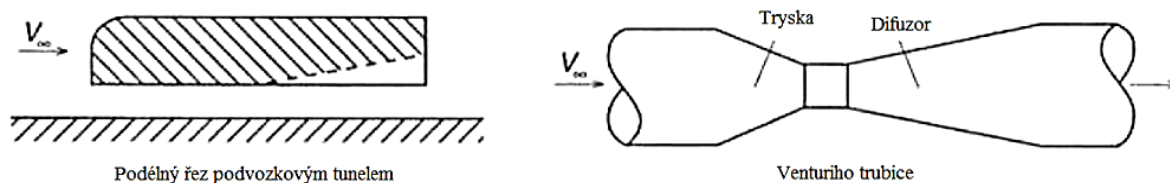


Obr. 38 Proudění pod karoserií závodního vozidla skupiny C (z roku 1992) [2]

Proudění ve výše uvedených tunelech se mimo jiné nazývá Venturiho proudění. Tento název pochází z podobnosti tvaru tunelu s Venturiho trubicí, akorát v otevřeném prostoru. Pokud bychom trubicí vedli řez v jeho příčné rovině, dostali bychom podobný tvar, jako má tunel ve



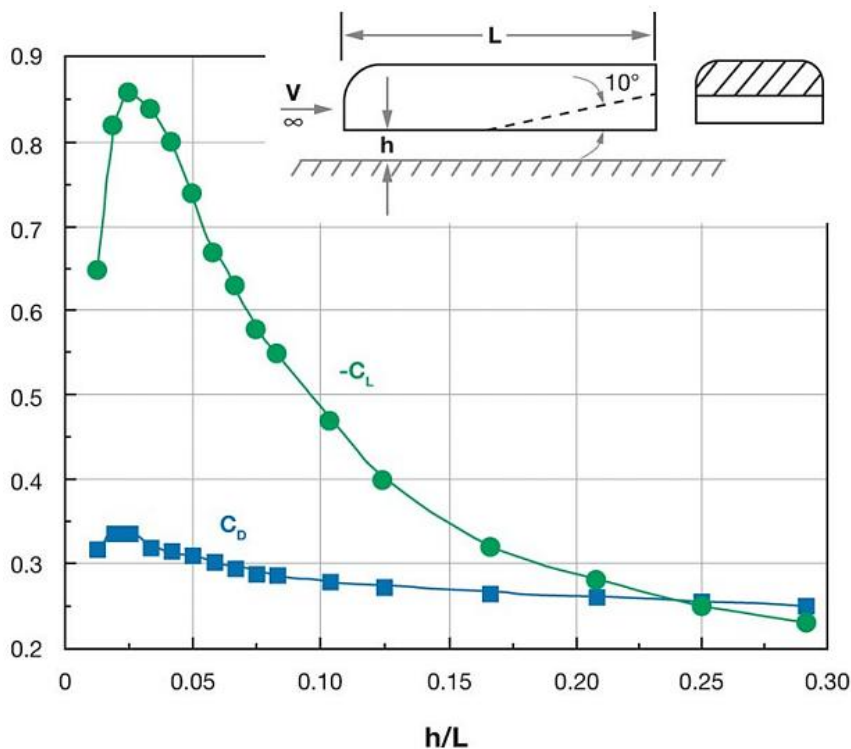
spojení s vozovkou (obr. 39). Tyto tunely se v motorsportu používají ve spojení s dalšími konstrukčními prvky (např. s křídly).



Obr. 39 Podobnost tvaru podvozkového tunelu s Venturiho trubicí [2]

3.3.3 ZADNÍ DIFUZOR

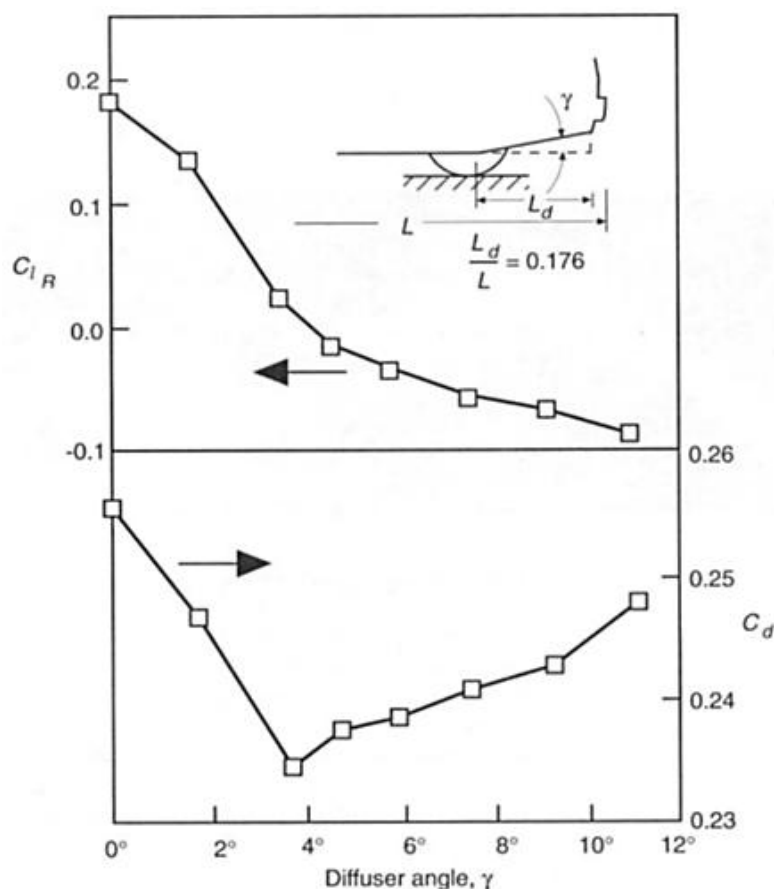
Difuzory také fungují na principu vycházejícího z Venturiho trubice. Díky svému výškovému rozšíření (od podlahy směrem vzhůru) dochází ke zpomalování proudu vzduchu, a tím se zvyšuje tlak, v tomto případě přítlak. Dalo by se říci, že difuzor je široký podvozkový tunel, který je uzavřen bočnicemi pouze z vnějších stran vozidla. U závodních vozidel je difuzor umístěn co nejlíže k povrchu vozovky, aby mohl co nejvíce využít ground effect. Na obr. 40 je zjednodušený tvar přední části vozidla a difuzoru. Z grafu lze vyčíst, že je dosaženo značného přítlaku i bez použití bočních spoilerů, doléhajících až k zemi (čehož je využíváno především u osobních vozidel). Také zmenšením poměru vzdálenosti karoserie od vozovky k délce modelu dochází ke zvýšení přítlaku. Kritické místo, kde dochází k výraznému poklesu přítlaku, se pohybuje kolem hodnoty $0,025 h/L$, což je způsobeno vlivem mezní vrstvy mezi vozovkou a karoserií (popsáno již v úvodu proudění pod vozidlem).



Obr. 40 Vliv přítlaku na poměru vzdálenosti difuzoru od povrchu k délce modelu (zelená křivka znázorňuje koeficient přítlaku, modrá aerodynamického odporu) [7]



Dalším důležitým parametrem difuzoru, ovlivňujícím velikost přtlaku, je jeho úhel sklonu. Na obr. 41 je ukázána grafická závislost úhlu sklonu difuzoru na koeficientu vztlaku (horní část grafu) a aerodynamického odporu (spodní část grafu), z čehož vyplývá, že s nárůstem úhlu sklonu dochází ke snížení vztlaku pod vozidlem. To neplatí pro příliš velké úhly. Existuje hraniční hodnota tohoto úhlu, kdy při jejím překročení dochází k výraznému nárůstu vztlaku a přtlaku již nelze dosáhnout. Toto je způsobeno opět mezní vrstvou, jež se začne při velké vzdálenosti podvozku od vozovky odtrhávat a vytvářet nepříznivé víření v části difuzoru. Přesná hodnota této hranice není stanovena, jelikož to záleží na rozměrech a tvaru každého difuzoru. Aerodynamický odpor je snižován do úhlu sklonu 4° , poté opět narůstá. To je pravděpodobně způsobeno působením bočních vířů.



Obr. 41 Závislost součinitelů vztlaku a odporu na úhlu sklonu difuzoru [2]

Největšího podtlaku je dosaženo v místě vstupu proudícího vzduchu do difuzoru. Díky tomuto poznatku lze snadno ovlivnit polohu působíště aerodynamických sil (kap. 3.1). Pro lepší stabilitu vozidla je vhodné, aby se působíště aerodynamických sil nacházelo až za těžištěm vozidla. Při nevhodné poloze působíště by při přejezdu nerovností mohlo docházet ke změnám velikosti přtlaku, a tedy i ke zhoršení stability, ovladatelnosti a zatížení předních pneumatik. Pokud je tedy působíště aerodynamických sil umístěno až za těžištěm vozidla, pak ho nazýváme aerodynamicky stabilním. [2, 7]



4 KONSTRUKCE TRAVERZOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Cílem této diplomové práce je konstrukční návrh dvou zařízení. Jedno z nich má být určeno pro měření proudění v aerodynamickém tunelu, a to druhé pro měření za jízdy. Traverzovací zařízení bylo navrženo tak, aby splňovalo obě tyto podmínky. To znamená, že je určeno pro měření proudového pole pod vozidlem jak za jízdy, tak i v aerodynamickém tunelu. Měřicí sonda, která toto proudění bude snímat, musí být schopná pohybovat se jak po celé šířce vozidla, tak i v různých normálových vzdálenostech od vozovky, jelikož charakter proudění se spolu se změnou této vzdálenosti výrazně mění (*kap. 3.3*). Zařízení musí být univerzální pro různě široká vozidla, to znamená, že musí být vyřešeno nastavitelné zavěšení celého zařízení k vozidlu. Dalším požadavkem na toto zařízení je, aby co nejméně narušovalo proudové pole pod vozidlem, a tedy bylo co nejmenší.

4.1 NAKUPOVANÉ DÍLCE

Mezi nakupované dílce patří polohovací jednotka, motory, spojka, energetický kabelový řetěz, mikrosplínače a sonda.

4.1.1 POLOHOVACÍ JEDNOTKA

Dalším z kladených požadavků na traverzovací zařízení je nízká hmotnost, a to především z manipulačních důvodů, jelikož zařízení by mělo být přenosné. Proto byla zvolena již kompletní polohovací jednotka, která nabízí mnoho výhod. Před samotným vybráním polohovací osy je důležité zjistit, jaké varianty se na trhu nabízejí. Při průzkumu byl brán zřetel na to, aby vybraná jednotka měla pouze vlastnosti vhodné pro danou aplikaci. Pokud by tomu tak nebylo, celá jednotka by mohla mít nadbytečné vlastnosti, které by nebyly využity, a navíc by to bylo vykoupeno vyšší cenou. S ohledem na tyto fakta je vybráno několik polohovacích jednotek, které nejlépe vyhovují jak svými rozměry, tak i parametry.

Hlavní výhody polohovacích os jsou:


- Kompaktnost,
- tuhost,
- velké zdvihy,
- malá hmotnost,
- jednoduchost montáže přídatných komponent.

POLOHOVACÍ JEDNOTKA ELT

Tato lineární jednotka se skládá z hliníkového profilu a paralelních vodících tyčí z kalené oceli. Vozík je osazen stavitelným rolničkovým vedením. Trapézový šroub zajišťuje lineární pohyb matice, která je spojena s vozíkem. Vrchní slot je překryt nerezovým páskem, jenž chrání jednotku před vnikem nečistot. [26]




Tab. 3 Parametry polohovací jednotky ELT [26]

	Výrobce	Raveo
	Model	ELT 30
	Typ vedení	Kluzné (rolničkové)
	Přenos pohybu	Trap. šroub (Tr 10x3)
	Max. délka	3000 mm
	Přesnost	±0,1 mm
	Rozměry	70 x 47 mm

POLOHOVACÍ JEDNOTKA NL

Lineární osa se šroubem typu NL byla vyvinuta k manipulaci s lehčími břemeny a při nízkých rychlostech. Systém je kompaktní. Šrouby se pohybují uvnitř profilu a jsou chráněny nerezovou ocelovou páskou, která je upevněná na koncích Al-profilu. Lineární osa se šroubem se dodává v provedení s kuličkovým nebo trapézovým šroubem. Vedení se skládá z vodících tyčí z kalené oceli a ze stavitelných rolen. [23]

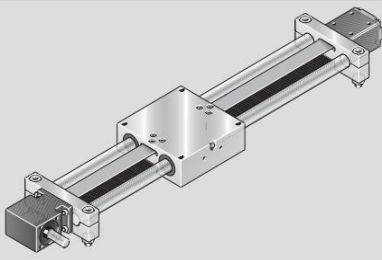
Tab. 4 Parametry polohovací jednotky NL [23]

	Výrobce	T.E.A. Technik s.r.o.
	Model	NL106TR
	Typ vedení	Kluzné (rolničkové)
	Přenos pohybu	Trap. šroub (Tr 16x4)
	Max. délka	2000 mm
	Přesnost	±0,1 mm
	Rozměry	110 x 69 mm

POLOHOVACÍ JEDNOTKA STAR

Tato lineární jednotka se skládá z hliníkového vozíku a ze dvou vodících tyčí z kalené oceli (tzv. pohybové saně). Vozík je polohován zaintegrovaným ozubeným řemenem. Řemenice na jedné straně je osazena po obou bocích spojkami. Na opačné straně jednotky je umístěna deska obsahující napínací element pro řemen. [24]

Tab. 5 Parametry polohovací jednotky STAR [24]

	Výrobce	Mannesmann
	Model	STAR SGR
	Typ vedení	Kluzné
	Přenos pohybu	Ozubený řemen
	Max. délka	3000 mm
	Přesnost	±0,05 mm
	Rozměry	160 x 53 mm



VÝBĚR POLOHOVACÍ JEDNOTKY

Před samotným konstrukčním návrhem je důležité vybrat správnou jednotku. Všechny zmíněné osy se jeví jako vhodné řešení, ale použít lze jen jedna. Pro konstrukční návrh byla zvolena polohovací jednotka ELT od firmy Raveo, a to především díky zástavbovým rozměrům, které měla tato jednotka nejmenší. Dalším důvodem byl Al - profil této jednotky, jenž nabízí jednoduchou montáž pro další přídatná zařízení.

4.1.2 MOTORY

Pro volbu motoru polohovací jednotky je nejdříve nutné znát sílu, jakou bude vozík polohovací osy zatížen. Sonda se bude otáčet pomocí elektromotoru, jenž bude uchycen k vozíku, proto je důležité zvolit nejdříve tento motor.

Pro pohon byly vybrány krokové motory se zpětnou vazbou. Výhodou těchto motorů oproti servomotorům je cena a také to, že se dále v klidovém stavu nechvějí. Tyto krokové motory jsou vhodným řešením pro polohovací aplikace. Jde prakticky o spojení krokového motoru s optickým enkodérem a řídicí elektronikou. Toto spojení umožňuje přesné řízení bez ztráty kroku při vysokých výstupních rychlostech. Oproti konvenčním krokovým motorům dosahují tyto krokové motory až dvojnásobný přídržný moment. Lze je řídit frekvenčně, interní pozicí tabulkou nebo pomocí komunikace. Lze volit mezi externími i interními drivery, které mohou obsahovat i vnitřní PLC. [13]

Motor byl zvolen od firmy Ezi-Servo, která nabízí motory s těmito vlastnostmi:

- krokový motor s inkrementálním optickým snímačem a inteligentním řízením,
- enkodér (10000 až 32000 pulzů/otáčku) zaručuje přesné polohování bez ztráty kroku,
- pokročilé funkce polohování,
- plynulý rotační pohyb už od 0,2 ot/min,
- vysoké rozběhové momenty,
- bezpečnostní funkce (pokročilé funkce řízení),
- možnost vytvoření sítě pohonů,
- integrovaný kontrolér (vnitřní logika),
- intuitivní a jednoduchý SW,
- cenově zajímavé řešení,
- výstupní moment 0,12 až 12 Nm. [26]



Obr. 42 Krokový motor se zpětnou vazbou a externím driverem firmy Ezi-Servo [26]



VOLBA MOTORU PRO POHON SONDY

Zvolené parametry:

Požadovaná doba rozběhu: $t_{r1} = 1 \text{ s}$

Otáčky motoru: $n_1 = 500 \cdot \text{min}^{-1} = 8,33 \cdot \text{s}^{-1}$

Kroutící moment je zde určený z dynamických poměrů. Momenty setrvačnosti jednotlivých dílů jsou určeny z fyzikálních vlastností CAD modelu.

Moment setrvačnosti sondy:

$$I_s = 184\,216,93 \text{ g} \cdot \text{mm}^2 \quad (47)$$

Moment setrvačnosti upínací tyče:

$$I_T = 3051,94 \text{ g} \cdot \text{mm}^2 \quad (48)$$

Moment setrvačnosti rotoru motoru:

$$I_R = 1800 \text{ g} \cdot \text{mm}^2 \quad (49)$$

Redukovaný moment setrvačnosti:

$$I_{Red} = I_s + I_T + I_R = 189\,068,87 \text{ g} \cdot \text{mm}^2 = 1,8906887 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (50)$$

Úhlové zrychlení:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t_{r1}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{t_{r1}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,33}{1} = 52,34 \cdot \text{s}^{-2} = 328,86 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (51)$$

Potřebný moment motoru:

$$M_m = I_{RED} \cdot \varepsilon = 1,8906887 \cdot 10^{-4} \cdot 328,86 = 0,062 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (52)$$

Tab. 6 Základní parametry zvoleného motoru

Typ (označení)	EzM – 28L
Moment motoru	0,11 Nm
Hmotnost	200 g
Délka	52 mm
Moment setrvačnosti rotoru	18 g·cm ²
Rozměry	28 x 28 mm



VOLBA MOTORU PRO POLOHOVACÍ JEDNOTKU

Zvolené parametry:

Požadovaná doba rozběhu: $t_{r2} = 1 \text{ s}$

Zatížení vozíku: $m = 516 \text{ g} = 0,516 \text{ kg}$

Otáčky motoru: $n_2 = 1000 \cdot \text{min}^{-1} = 16,67 \cdot \text{s}^{-1}$

Parametry polohovací jednotky:

Stoupání pohybového šroubu: $P = 3 \text{ mm} = 0,003 \text{ m}$

Účinnost pohybového šroubu: $\mu = 0,375$

Moment nezatížené jednotky: $M_n = 0,3 \text{ N} \cdot \text{m}$

Bezpečnost: $S_i = 1,2 \div 2 \rightarrow \text{zvoleno } S_i = 1,6$

Rychlost pohybového šroubu:

$$v = n_2 \cdot P = 16,67 \cdot 0,003 = 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (53)$$

Dráha rozběhu:

$$v = \frac{s_r}{t_{r2}} \rightarrow s_r = v \cdot t_{r2} = 0,05 \cdot 1 = 0,05 \text{ m} \quad (54)$$

Zrychlení pohybového šroubu:

$$a = \frac{v}{t_{r2}} = \frac{0,05}{1} = 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (55)$$

Zatěžující síla:

$$F = m \cdot a = 0,516 \cdot 0,05 = 0,0258 \text{ N} \quad (56)$$

Potřebný moment motoru:

$$M_a = \frac{F \cdot P \cdot S_i}{2000 \cdot \pi \cdot \mu} + M_n = \frac{0,0258 \cdot 3 \cdot 1,6}{2000 \cdot \pi \cdot 0,375} + 0,3 = 0,3 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (57)$$



Tab. 7 Základní parametry zvoleného motoru [26]

Typ (označení)	EzM – 60M
Moment motoru	1,28 Nm
Hmotnost	900 g
Délka	56 mm
Moment setrvačnosti rotoru	320 g·cm ²
Rozměry	60 x 60 mm

4.1.3 SPOJKA

Pro spojení hřídelů elektromotoru a polohovací jednotky byla použita pružná spojka, jelikož se tyto spojky používají nejčastěji pro polohovací jednotky. Firma Bahr Modultechnik nabízí k těmto jednotkám bezvůlové spojky se speciálním plastovým pružným elementem. Tyto spojky se skládají ze dvou kovových nábojů a pružného elementu ve tvaru hvězdice. Při přenosu jsou tlumeny rázy a torzní kmitání.

Vlastnosti těchto spojek:

- Přenos kroutícího momentu bez vůle v širokém rozsahu,
- tlumení vibrací od hřídele motoru (až do 80 %),
- nízká elektrická a tepelná vodivost,
- jednoduchá montáž,
- malé rozměry, nízký moment setrvačnosti,
- možnost použití ve výbušném prostředí podle EG Richtlinie 94/9/EC. [19]



Obr. 43 Bezvůlová spojka s pružným elementem [19]

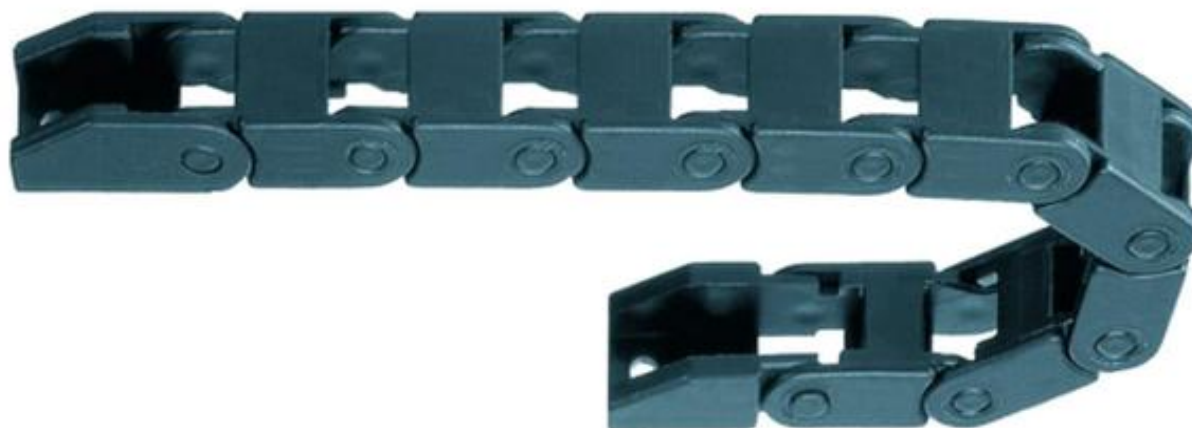


Tab. 8 Parametry zvolené spojky [26]

	Výrobce	Bahr Modultechnik
	Typ (označení)	01401-9
	Max. moment	6 Nm
	Průměr A/B (min/max)	5/12 mm
	C/D/E/F	10/20/30/DIN-key

4.1.4 ENERGETICKÝ KABELOVÝ ŘETĚZ

K motoru, pohánějícího sondu, musí být přivedeny kabely, které by při přejezdu vozíku do hraničních poloh mohly překážet, nebo by mohlo dojít k jejich poškození, protože traverzovací zařízení musí být použitelné i za jízdy. Tato problematika je vyřešena použitím kabelového řetězu, kterých lze na trhu najít velké množství. Pro tuto jednotku byl použit řetěz E2 MICRO od firmy Hennlich. Tyto řetězy jsou velmi malé, jednodílné, a s nízkou hmotností, vhodné pro vysoce dynamické aplikace.



Obr. 44 Energetický kabelový řetěz E2 MICRO [21]

Tab. 9 Parametry zvoleného řetězu [21]

	Výrobce	Hennlich
	Typ (označení)	E2 MICRO
	Bi/Ba	10/15 mm
	Poloměr ohybu	15 mm
	Články na metr	60
	Rozteč článků	16,7 mm
	Pojezd	2000 mm

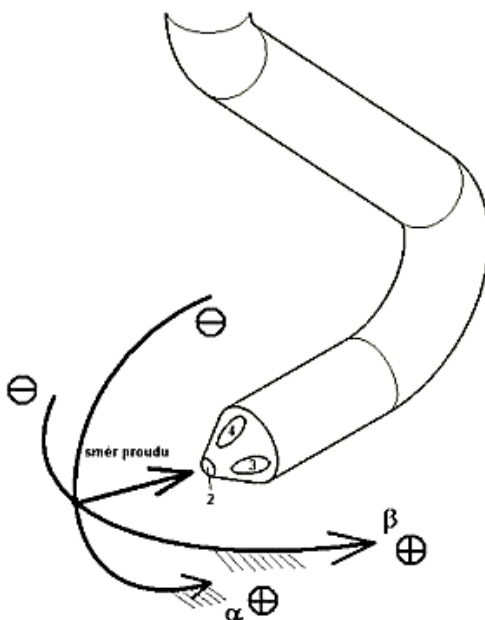


4.1.5 SONDA

Pro měření proudových polí se používají směrové, více otvorové sondy. Umožňují měřit rychlost a směr proudu nabíhající tekutiny, pokud tento směr není mimo oblast požadované směrové citlivosti sondy. Konstrukce směrové sondy se liší podle účelů, ke kterým bude sonda používána, a také podle toho, jaké informace chceme z měření získat.

Konstrukční provedení směrových sond:

- Počet měřících otvorů
 - Dvou otvorové – pro měření rychlosti (Pitotova trubice).
 - Tři otvorové – pro měření nabíhajícího proudu tekutiny v jedné rovině s celkovým tlakem.
 - Čtyř otvorové - pro měření nabíhajícího proudu tekutiny ve dvou rovinách.
 - Pětí otvorové pro měření nabíhajícího proudu tekutiny ve dvou rovinách s celkovým tlakem.
 - Sedmi, dvanácti, osmnácti otvorové – pro přesnější měření nabíhajícího proudu tekutiny ve dvou rovinách.
- Tvar těla
 - Přímé.
 - Do L.
 - Typ kobra. [9]




Obr. 45 Pětí otvorová sonda typu kobra [9]

Pro měření proudového pole pod vozidlem byla zvolena čtyř otvorová sonda Cobra Probe od Firmy TurbulentFlow.



Tab. 10 Parametry zvolené sondy [20]

	Výrobce	TurbulentFlow
	Typ (označení)	Cobra Probe
	Počet otvorů	4
	Tvar těla	Kobra
	Max. šířka hlavy	2,6 mm
	Průměr těla	14 mm
	Rozteč článků	16,7 mm
	Délka	155 mm
	Rychlosti proudění	2 ÷ 100 m/s
	Úhel náběhu proudu	± 45 °

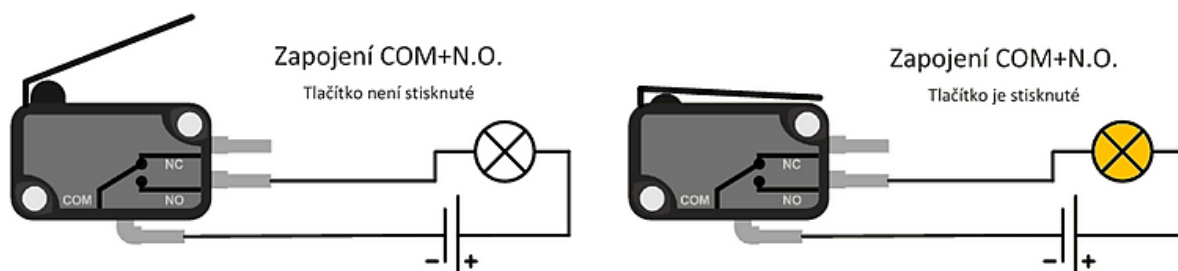
4.1.6 MIKROSPÍNAČE

Při přejezdu vozíku polohovací jednotky do hraničních poloh musí být zajištěno přerušení obvodu, aby nedošlo k nárazu. Tato problematika byla vyřešena použitím mikropsínačů. Mikropsínače jsou spínací zařízení s mechanickým ovládním. Tlačítko spínače má v sobě zabudovanou pružinu, která se po stisku a následném uvolnění opět vrátí do výchozí polohy. Tyto spínače mají většinou tři kontakty:

- Konektor NO (Normally Open) – obvod je rozpojen (obvodem neprotéká proud) dokud se nestiskne tlačítko.
- Konektor NC (Normally Closed) – obvod je spojen (obvodem protéká proud) dokud se nestiskne tlačítko.
- Konektor C (Com) – tento konektor slouží pro společné uzemnění obvodu.

Kontakty NO a NC určují, v jakém stavu se obvod nachází (v jakém stavu se nachází spínací pružina). Zapojení konektorů se provádí na základě požadovaného řízení spínače. V základním nastavení jsou tlačítka ve stavu, kdy je obvod přerušen. Možné zapojení konektorů je tedy následovné:

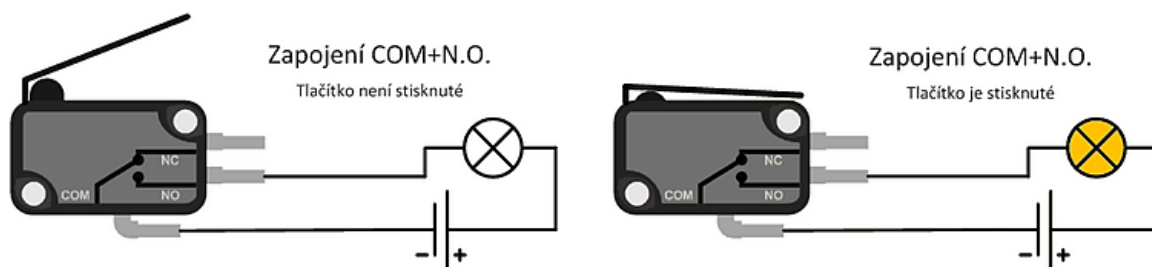
Propojení kontaktů C a NO – Pokud není stisknuté tlačítko, pak je obvod přerušen (obvodem neprotéká proud).



Obr. 46 Přerušovaný obvod (vlevo) a vodivé spojení (vpravo) [22]



Propojení kontaktů C a NC – Pokud není stisknuté tlačítko, pak je spojení vodivé (obvodem protéká proud). [22]



Obr. 47 Vodivé spojení (vlevo) a přerušný obvod (vpravo) [22]

Mikrospínače lineární jednotky budou řízeny pomocí PC, proto je použito první řešení zapojení kontaktů (C a NO). Při přejezdu do hraniční polohy je nutné obvod přepnout z logické 0 na logickou 1, aby vozík změnil směr svého pohybu. Na trhu se jich nachází velké množství různých typů a velikostí. Pro zařízení byly zvoleny spínače od firmy ZIPPY.

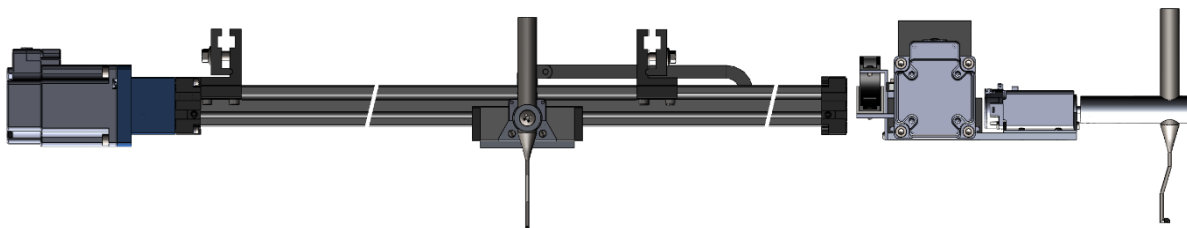
Tab. 11 Parametry zvolených mikrospínačů [25]

	Výrobce	ZIPPY
	Typ (označení)	SM-05L-02D0-Z
	Mechanické provedení	S páčkou
	Délka páčky (hmatníku)	18,7 mm
	Jmenovité napětí	125/250 V
	Jmenovitý proud	5 A
	Přechodový odpor	300 mΩ

4.2 POPIS KONSTRUKCE



Obr. 48 Traverzovací zařízení

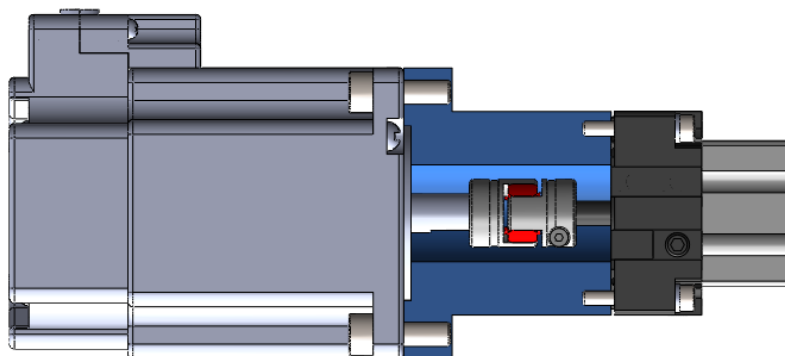


Obr. 49 Konstrukční návrh traverzovacího zařízení

Na obrázcích (obr. 48, 49) lze vidět již kompletní návrh traverzovacího zařízení. Hlavní částí je polohovací jednotka, která zajišťuje pohyb měřicí sondy pod vozidlem, a zároveň slouží jako rám celého zařízení. Toto zařízení lze použít pro vozidla široká až 2000 mm. Použitá měřicí sonda má délku přibližně 150 mm, ale některá vozidla mají světlou výšku mnohdy menší. Z tohoto důvodu je sonda řízena pomocí krokového motoru s enkodérem, jenž zajišťuje otáčení sondy pouze v určitém rozmezí tak, aby se vždy pod měřené vozidlo vešla. Pro většinu navržených dílců traverzovacího zařízení jsou použity materiály hliníkových slitin, a to především z důvodu požadované nízké hmotnosti celého zařízení. Svěrky jsou z oceli, protože zajišťují uchycení celého zařízení k vozidlu. Při konstrukci bylo nutné vyřešit několik hlavních konstrukčních oblastí.

4.2.1 UCHYCENÍ MOTORU K POLOHOVACÍ JEDNOTCE

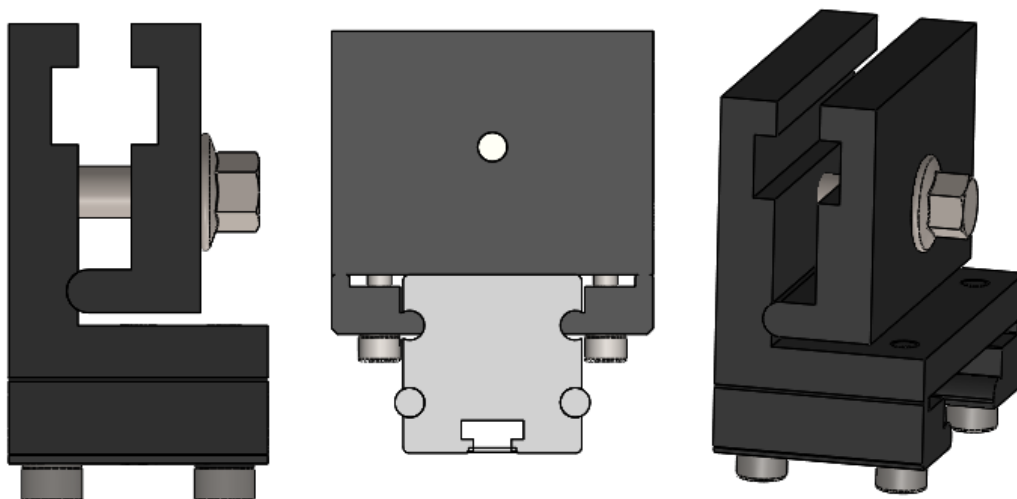
Spojení motoru s polohovací jednotkou zajišťuje příruba (modře zobrazena na obr. 50), která zároveň slouží pro zakrytí pružné spojky. Tato příruba je spojena jak s motorem, tak s polohovací jednotkou pomocí čtyř šroubů s vnitřním šestihranem.



Obr. 50 Uchycení motoru k polohovací jednotce pomocí příruby

4.2.2 UCHYCENÍ TRAVERZOVACÍHO ZAŘÍZENÍ K VOZIDLU

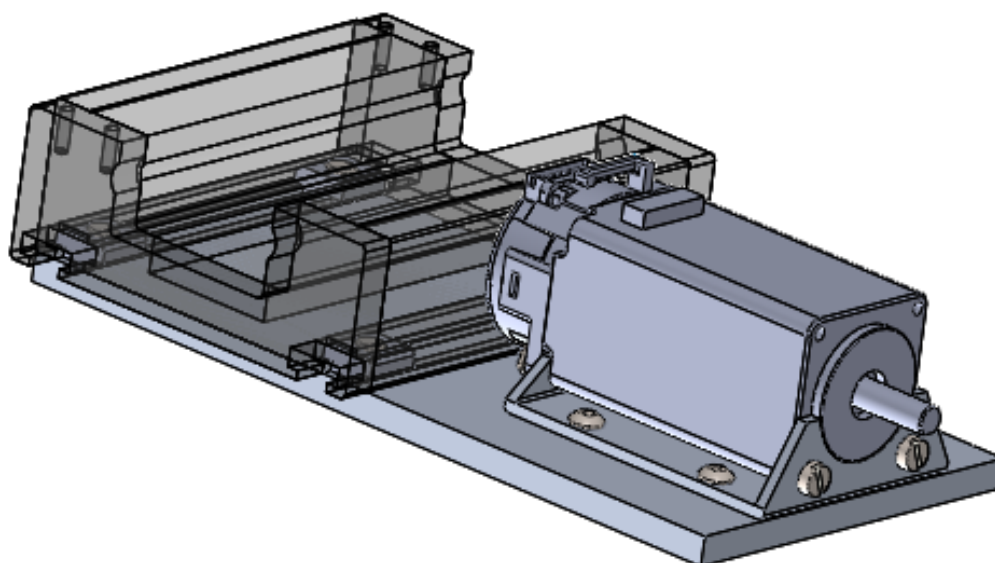
Traverzovací zařízení bude celé zavěšeno za prahové lemy vozidla a to pomocí svěrek, které jsou utahovány šroubem M6. Hliníkový rám polohovací osy je opatřen dvěma kruhovými drážkami na každé straně. Jedna z nich slouží pro uložení vodící tyče, a druhá byla využita právě pro uložení, a zároveň vedení svěrek. Tímto je docílena univerzálnost zavěšení celého zařízení pro různě široká vozidla.



Obr. 51 Svěrky traverzovacího zařízení

4.2.3 UCHYCENÍ MOTORU K VOZÍKU

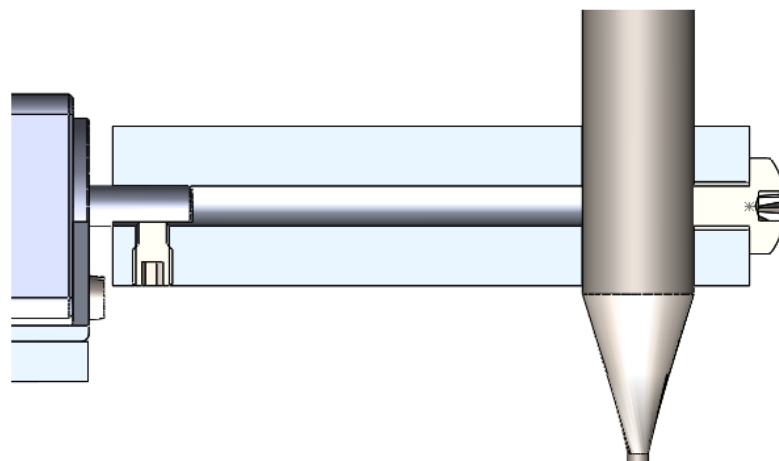
Vozík polohovací jednotky je opatřen upínacími drážkami, ke kterým je připevněna základní deska. To je provedeno pomocí čtyř zápusťných šroubů a čtyř T matic (ořechů). Základní deska slouží pro uložení motoru. Motor je k ní přišroubován pomocí ohýbaného plechu.



Obr. 52 Uchycení motoru k vozíku polohovací jednotky

4.2.4 UCHYCENÍ SONDY

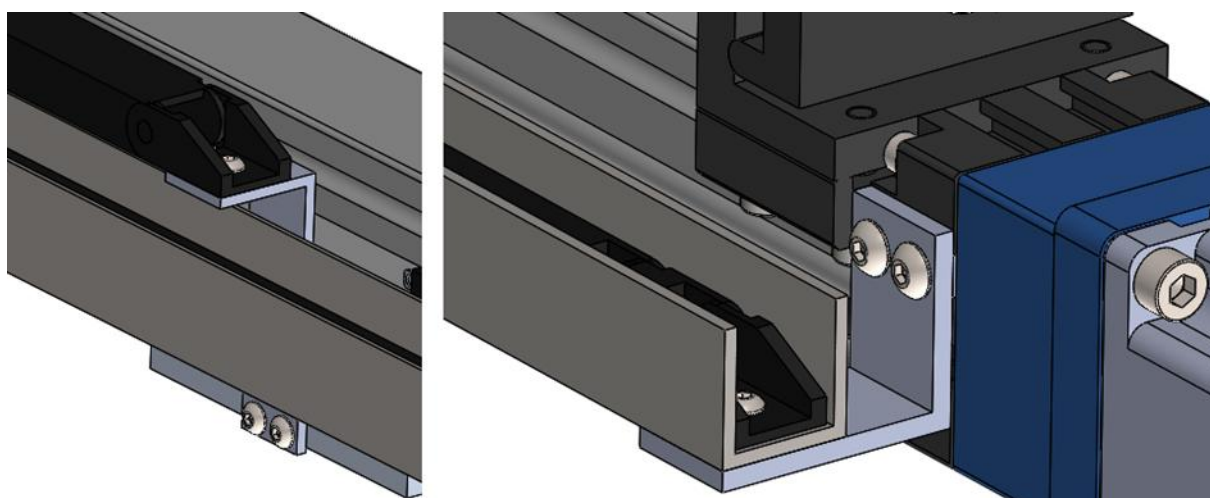
Pro uchycení měřicí sondy s motorem byla použita hliníková tyč, která je na skrz provrtaná otvorem o průměru 5 mm. Na jedné straně této tyče je otvor se závitem, sloužící pro stavěcí šroub, kterým je zajištěna upínací tyč ke hřídeli elektromotoru. Na druhé straně je otvor, který slouží pro uložení sondy. Sonda je zajištěna proti posunutí šroubem M6.



Obr. 53 Uchycení sondy pomocí hliníkové upínací tyče

4.2.5 VEDENÍ KABELOVÉHO ŘETĚZU

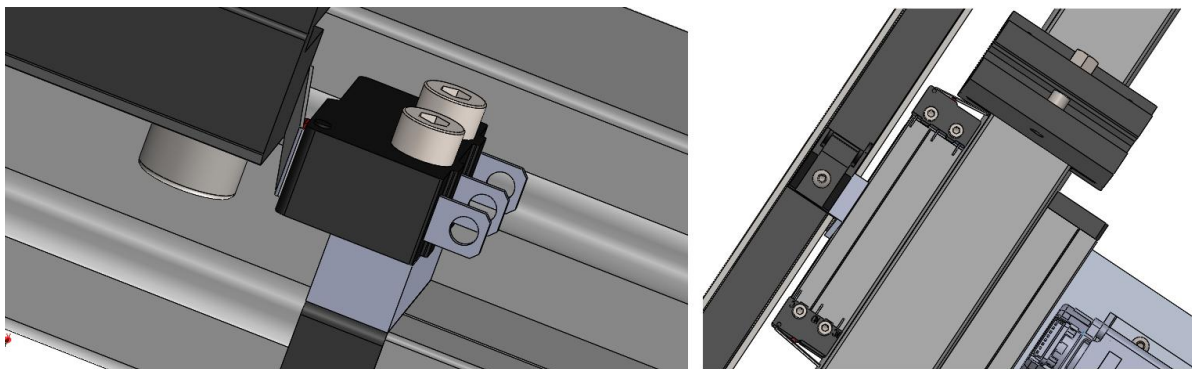
Pro vedení energetického kabelového řetězu byl použit hliníkový U profil o rozměrech 20x20x2. Toto vedení je pomocí dvou L profilů přišroubováno k polohovací jednotce. Jeden konec kabelového řetězu je spojen s vedením na pevně (šroub M3). Druhý konec je spojen, pomocí dalšího L profilu, s vozíkem polohovací jednotky (šroub M3).



Obr. 54 Spojení kabelového řetězu s vozíkem (vlevo) a s vedením (vpravo)

4.2.6 UMÍSTĚNÍ MIKROSPÍNAČŮ

Jelikož polohovací zařízení je díky svěrkám univerzální, muselo být vyřešeno umístění mikrospínačů tak, aby zbytečně sonda nepřejížděla až do hraničních poloh polohovací jednotky. Kdyby tomu tak nebylo, sonda by mohla měřit proudové pole již v nežádoucích místech vedle vozidla. Proto byly mikrospínače umístěny na vozík polohovací jednotky tak, aby se tlačítko spínalo při kontaktu se svěrkami. Dalším důvodem tohoto umístění bylo využití kabelového řetězu pro vedení kabelů od mikrospínačů. Spínače jsou k vozíku přišroubovány pomocí dvou šroubů a vymezovací kostky, která zajišťuje kontakt spínače se svěrkami.



Obr. 55 Detail kontaktu tlačítka mikrospínače se svěrkou (vlevo), umístění spínačů (vpravo)



5 CFD SIMULACE

Proudění ovlivňuje mnoho výrobních a provozních parametrů (tlakové ztráty, hluk, spotřeba, apod.). Z tohoto důvodu je nutné znát, jaký je tento vliv a jaký má dopad v konkrétních případech. Díky znalostem charakteru proudění tekutin je možné maximálně využít vlivy pozitivní a naopak odstranit, popřípadě minimalizovat vlivy negativní. Obecně lze říci, že existují dva přístupy vyšetřování proudění. Jedním z nich je zjišťování charakteru proudění experimentálně, což může být často jak finančně, tak i časově náročné. Dalším přístupem jsou právě CFD simulace neboli matematicko – fyzikální numerické řešení proudění tekutin, umožňující řešit problematiku proudění v mnohem kratším časovém intervalu a při nižších nákladech. V praxi se často oba přístupy kombinují.

Tyto numerické simulace vycházejí z fyzikálního popisu pohybu, jenž je dán třemi základními zákony:

- Zákon zachování hmoty.
- Zákon zachování hybnosti.
- Zákon zachování energie.

Matematicky se tyto zákony vyjadřují pomocí rovnic kontinuity, přenosu hybnosti a přenosu energie. Rovnice hybnosti a energie se nazývají Navier – Stokesovy rovnice (N – S rovnice). Tímto vzniká soustava nelineárních parciálních diferenciálních rovnic, která je ještě doplněna o konstituční vztahy, jenž popisuje termodynamické vlastnosti proudící tekutiny. V případě turbulentního proudění se jednotlivé členy rozdělují na střední hodnotu a okamžitou flukтуаční složku. Tím vznikají v soustavě rovnic další neznámé (korelace fluktuací tlaku a rychlosti). Tyto rovnice se označují jako RANS rovnice (Reynolds – Average Navier – Stokesovy rovnice). Stejný problém nastane, jestliže začnou působit další fyzikální jevy (spojené např. se spalováním). [16]

Nástroje simulačních softwarů jsou vybaveny celou řadou matematických modelů pro popis různých fyzikálních jevů, které lze mezi sebou kombinovat. Veškeré simulace v této diplomové práci jsou zpracovávány v CFD softwaru Star CCM+ z produktu společnosti Adapco.

5.1 TVORBA MODELU

Pro analýzu v CFD programech je nejdříve nutné vytvořit model, který lze získat několika způsoby. Jedním z nich je vytvoření modelu prostřednictvím CAD softwarů. Pokud se provádí simulace reálného vozidla (popř. zařízení), které je nutné simulovat, pak lze model získat pomocí 3D skenerů. Data získaná skenováním se poté opět převádí do CAD programů, ve kterých musí být data následně upravena.

Cílem této práce je zjištění vlivu traverzovacího zařízení na proudové pole pod vozidlem. Z tohoto důvodu bylo nutné nejprve analyzovat proudové pole pod vozidlem bez přítomnosti traverzovacího zařízení, a poté znovu se zařízením. Aby toto bylo možné, musel být vytvořen objemový model vozidla a zařízení. K tvorbě modelů byl použit 3D CAD software SolidWorks.



5.1.1 MODEL VOZIDLA

Pro CFD simulace byl použit již vytvořený 3D CAD model vozidla *DrivAer* (obr. 56), což je obecný model automobilu vyvinutý na Technische Universität München (TUM) v Německu. *DrivAer* je volně dostupný v různých formátech (STEP, IGES apod.) a slouží pro vyšetřování aerodynamiky vozidla. Lze jej sestavit až v 18 různých konfiguracích. Zvolené a základní parametry modelu jsou zobrazeny v tab. 12. Aby bylo možné provést CFD analýzu, musel být tento model nejdříve v programu upraven.



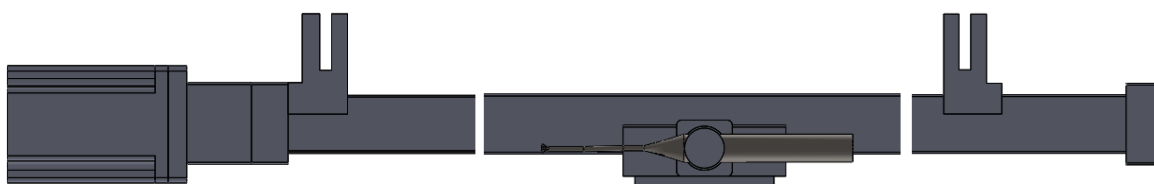
Obr. 56 Objemový model vozidla

Tab. 12 Parametry modelu

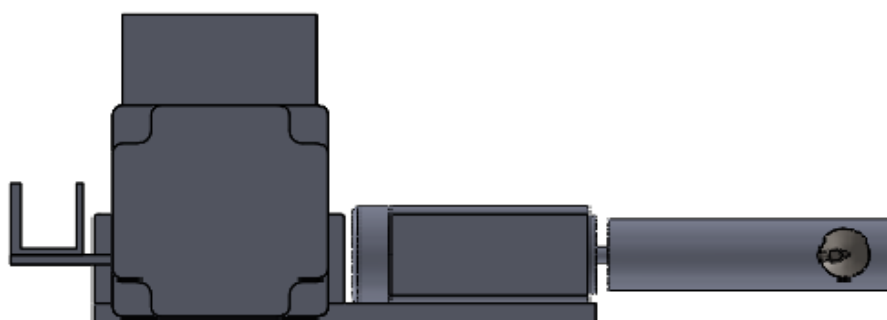
Veličina	Parametr
Typ karoserie	Body/Fastback
Typ podvozku	Smooth
Celková délka	4613 mm
Celková šířka	1820 mm
Celková výška	1418 mm
Rozvor kol	2786 mm
Rozchod předních kol	1520 mm
Rozchod zadních kol	1527 mm

5.1.2 MODEL TRAVERZOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Model zařízení pro CFD analýzu musel být oproti konstrukčnímu modelu zjednodušen, protože součásti jako jsou šrouby, články kabelového řetězu a další, by byli zbytečně náročné jak na generování sítě, tak na celkový výpočet. Z tohoto důvodu byly také použity obecnější tvary celého zařízení. Kompletní model traverzovacího zařízení připravený pro CFD analýzu je zobrazen na obr. 57, 58.



Obr. 57 Přední pohled (narys) zjednodušeného modelu traverzovacího zařízení



Obr. 58 Boční pohled (bokorys) zjednodušeného modelu traverzovacího zařízení

5.2 IMPORT MODELU

Načtení geometrie objemového modelu do výpočtového programu bylo provedeno z již předem uloženého formátu IGES (*.igs), který je tímto CFD programem podporován. V okně pro nastavení importu byla zvolena možnost *One boundary for all faces* (všechny plochy jsou hraniční a všechny objemy jsou zahrnuty do jednoho). Počátek souřadného systému je umístěn v ose kol přední nápravy a rovině symetrie vozidla.

5.3 TVORBA POTRUBÍ A ROZDĚLENÍ PLOCH

Poté, co byly načteny plochy z objemového modelu vozidla, musel být vytvořen tunel tvořící potrubí pro proudící médium. Tunel byl umístěn tak, aby překrýval části poloměrů kol. Toto překrytí představuje styk pneumatiky s vozovkou (stopu pneumatiky). Základní rozměry tunelu byly voleny s ohledem na celkový počet buněk:

- Délka: 23 m
- Šířka: 8 m
- Výška: 4,3 m

Tunel je umístěn vůči počátku souřadného systému načteného modelu vozidla tak, že z celkové délky 23 m je 7 m před vozidlem a 16 m za ním. Poté byl odečten objem vozidla od objemu tunelu, aby vznikl pouze jeden uzavřený objem.



Dále byly rozděleny plochy modelu do jednotlivých oblastí (*Boundaries*) tak, aby bylo možné definovat jejich okrajové podmínky a konkrétní velikosti elementů sítě.

5.4 NASTAVENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU

Nastavení fyzikálního modelu určuje vlastnosti proudícího média a udává podmínky pro výpočet. V tomto případě je proudícím médiem vzduch. Jednotlivá nastavení fyzikálního modelu jsou uvedena v *tab. 13*.

Tab. 13 Parametry modelu

Veličina	Volba
Space	Three Dimensional
Motion	Stationary
Time	Steady
Material	Gas
Flow	Segregated Flow
Equation of State	Constant Density
Viscous Regime	Turbulent
Reynolds – Averaged Turbulence	K-Epsilon Turbulence

5.5 STANOVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Nejdůležitější oblasti, u kterých byly stanoveny okrajové podmínky, jsou uvedeny v *tab. 14*. Všechny ostatní oblasti zůstaly ve výchozím nastavení *Wall*, což znázorňuje nepropustnou hmotu.

Tab. 14 Parametry modelu

Oblast	Okrajová podmínka	Hodnota
Tunel vstup	Velocity Inlet	140 km·h ⁻¹
Tunel výstup	Pressure Outlet	0 Pa
Stěny a strop tunelu	Symmetry Plane	-

Vstupní podmínka *Velocity Inlet* simuluje zkoušku vozidla v aerodynamickém tunel. Tím je míněno, že vozidlo při zkoušce stojí a je obtékáno proudem vzduchu s rychlostí, jakou by se vozidlo pohybovalo po dráze. Na opačné straně tunelu je zadána podmínka *Pressure Outlet*, která říká, že veškerý vzduch, co do tunelu vstupuje, z něj také musí odejít. Boční stěny a strop tunelu jsou definovány okrajovou podmínkou *Symmetry plane*, jejíž význam je, že na vybraných stěnách není uvažováno žádné tření.



5.6 TVORBA SÍTĚ

Generovaná síť ovlivňuje výslednou přesnost a rychlost výpočtu, proto je její správné nastavení velice důležité. Nejdříve byly vybrány modely síťování. Pro povrchovou síť byl použit model *Surface Remesher*, který na povrchu vytváří trojúhelníkové elementy.

Pro objemovou síť se nabízejí tři různé modely sítě:

- Tetrahedral Mesher – tvoří síť složenou z trojbokých jehlanů.
- Polyhedral Mesher – tvoří síť složenou z tzv. „kopacích míčů“.
- Trimmed Mesher – tvoří síť hexahedrální.

Jako nejlepším řešením se nabízí modely *Polyhedral Mesher* a zvolený *Trimmed Mesher*, které vytvářejí podobný počet elementů. Polyhedrální síťová struktura oproti hexahedrální získává o něco přesnější výsledky, ale s podstatně vyšším výpočetním časem a s vyššími nároky na paměť počítače.

Posledním nastaveným modelem síťování byl *Prism layer mesher*, který rozděluje buňky objemové sítě v okolí hraničních ploch do několika prizmatických vrstev.

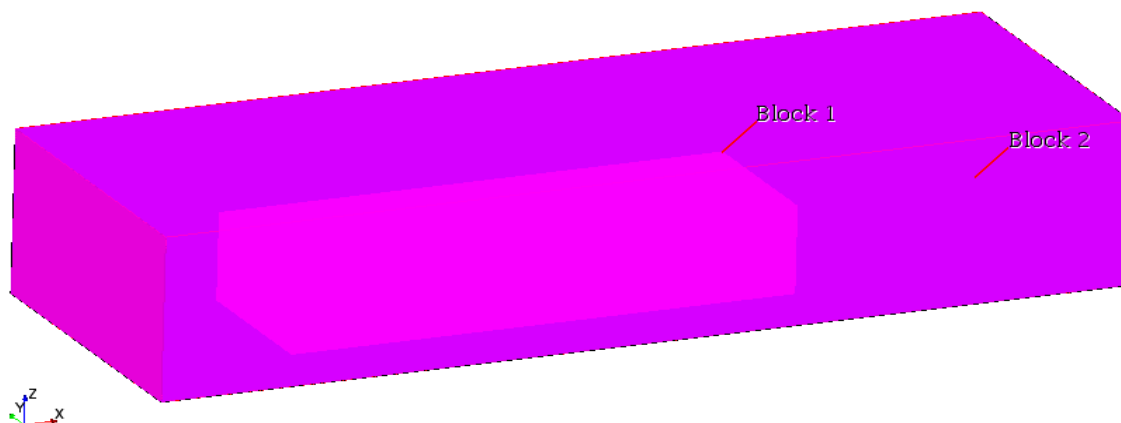
Poté musela být zvolena základní velikost buněk (*Base size*) pro celý model. Tato hodnota byla nastavena jako relativní. Dále byla zvolena cílená (*Target Surface size*) a minimální velikost (*Minimum Surface size*) buněk opět pro celý model. V některých místech je potřebná další korekce hustoty sítě, aby byla zvýšena tvarová a výpočtová přesnost. Naopak v místech, kde přesnost není tak důležitá, je nutné počet elementů sítě zředit. Zředění bylo provedeno pomocí separovaných objemů (*Volumetric Control*). Nastavení sítě, velikosti elementů separovaných ploch a velikosti elementů v jednotlivých oblastech, je zobrazeno v následujících tabulkách.

Tab. 15 Parametry modelu

Veličina	Popis	Hodnota
Number of Prism Layers	Počet prizmatických vrstev	5
Surface Growth Rate	Nárůst prizmatických vrstev	1,3
Base Size	Základní velikost buňky	0,1 m
Minimum Surface Size	Minimální velikost buněk	0,002 m
Target Surface Size	Cílená velikost buněk	0,02 m

Tab. 16 Velikost buněk v separovaných objemech

Block	Corner 1 [m]			Corner 2 [m]			Relative Size [m]
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	-3	-2	-0,3	9	2	2	0,08
2	-7	-4	-0,3	10	4	4	0,16

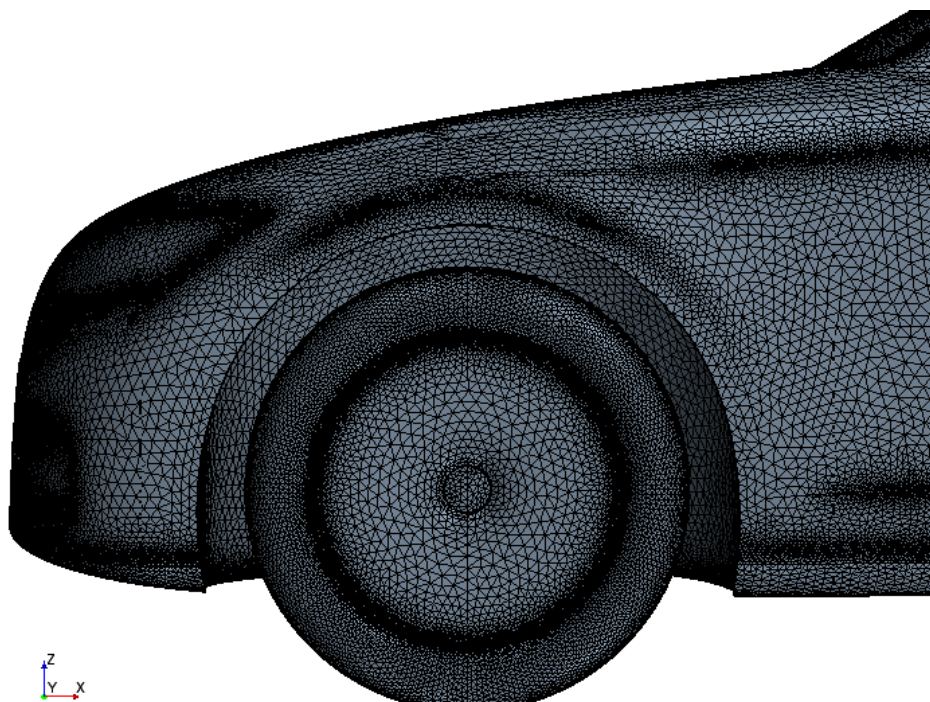


Obr. 59 Rozdělení tunelu na separované objemy

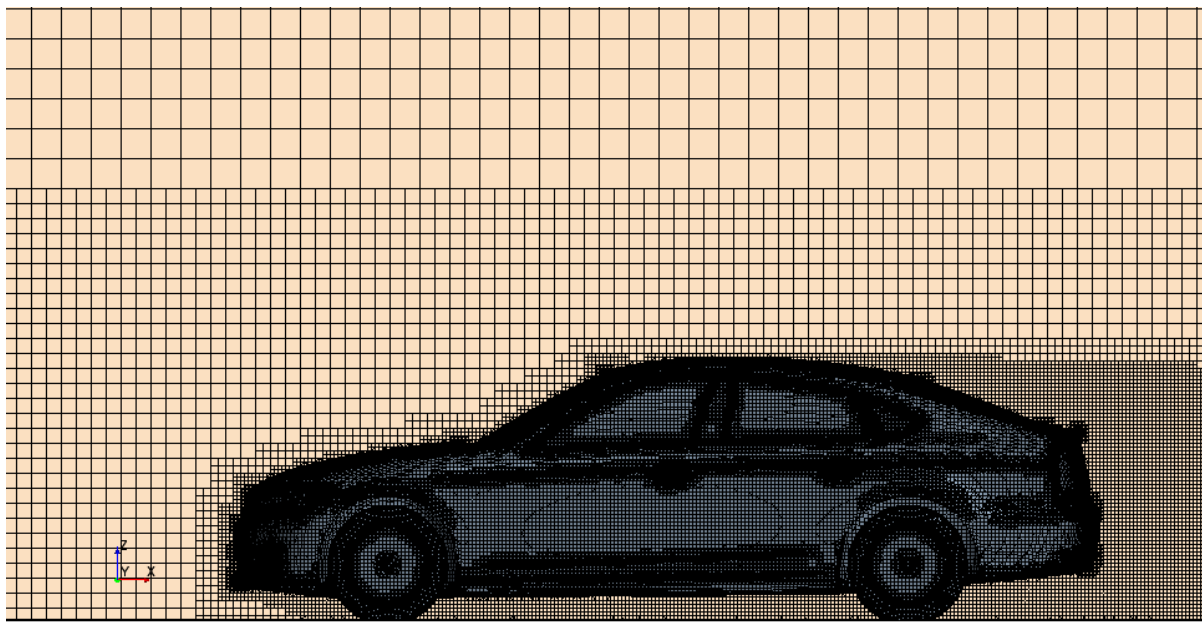
Tab. 17 Velikost buněk jednotlivých oblastí

Oblast	Veličina	Hodnota [m]
Tunel	Target Surface Size	0,16
Vozidlo	Trimmer Wake Refinement	0,02

Při procesu síťování se nejdříve vytváří povrchová síť, která se musí vizuálně zkontrolovat. Síť musí kopírovat tvar modelu a elementy sítě musí být správně zhuštěny nebo naopak zředěny v požadovaných místech. Pokud je povrchová síť v pořádku, může být spuštěno generování sítě objemové.



Obr. 60 Vytvořená povrchová síť na CFD modelu vozidla



Obr. 61 Nařaděná objemová síť v rovině symetrie vozidla

5.7 VYTVOŘENÍ VYHODNOCOVACÍCH ROVIN

Nejdůležitějšími sledovanými veličinami v této problematice jsou rychlost a tlak působící na vozidlo především v oblasti mezi podvozkem a vozovkou. Pro zobrazení tlaku se vytváří skalární scéna a pro zobrazení rychlosti se vytváří scéna skalární nebo vektorová. Skalární scéna zobrazuje pouze velikost rychlosti. Vektorová zobrazuje velikost i směr rychlosti. Nejvhodnějším umístěním první vyhodnocovací roviny je v ose symetrie vozidla. Druhá rovina byla umístěna v ose sondy tak, aby bylo možné analyzovat vliv zařízení na proudové pole pod vozidlem.

Tab. 18 Souřadnice vyhodnocovacích rovin

Rovina	Normal [m]			Origin [m]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	-0,221

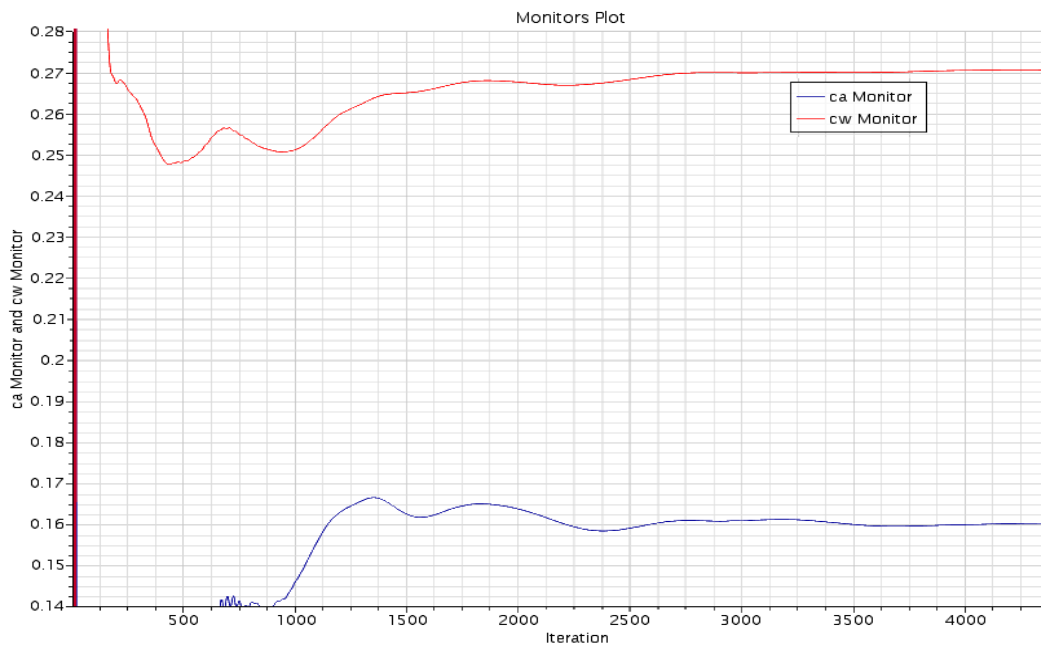
5.8 PODMÍNKY UKONČENÍ VÝPOČTU

Pro možnost ukončení výpočtu musely být splněny následující podmínky:

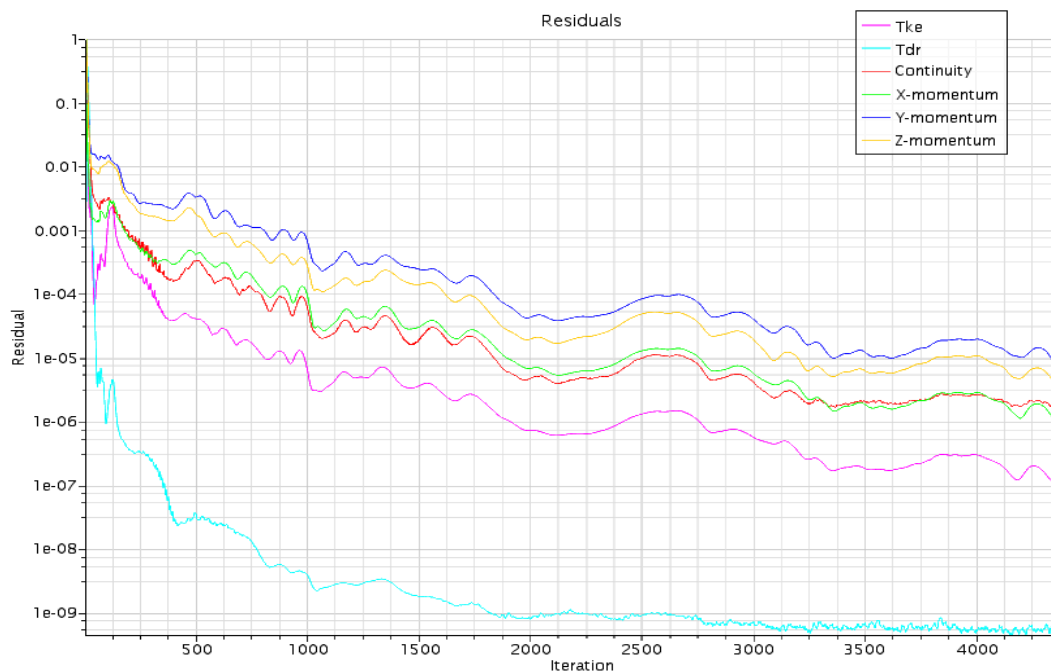
- **Ustálení koeficientů aerodynamického odporu a vztlaku** – nejdůležitější.
- **Pokles residuí** – určuje přesnost simulace. Čím menší je jejich hodnota, tím přesnější výsledky jsou. Jejich hodnota musela klesnout pod hodnotu 10^{-3} .



Pro ustálení sledovaných veličin je vždy potřebný dostatečný počet iterací. Pokud k tomuto ustálení dojde, lze výpočet považovat za zkonvergovaný. Z následujících grafů lze vidět, že po 2500 iteracích se koeficienty odporu a vztlaku již ustalují a hodnota residuí klesla pod hodnotu 10^{-3} .



Obr. 62 Ustálení koeficientu odporu a vztlaku



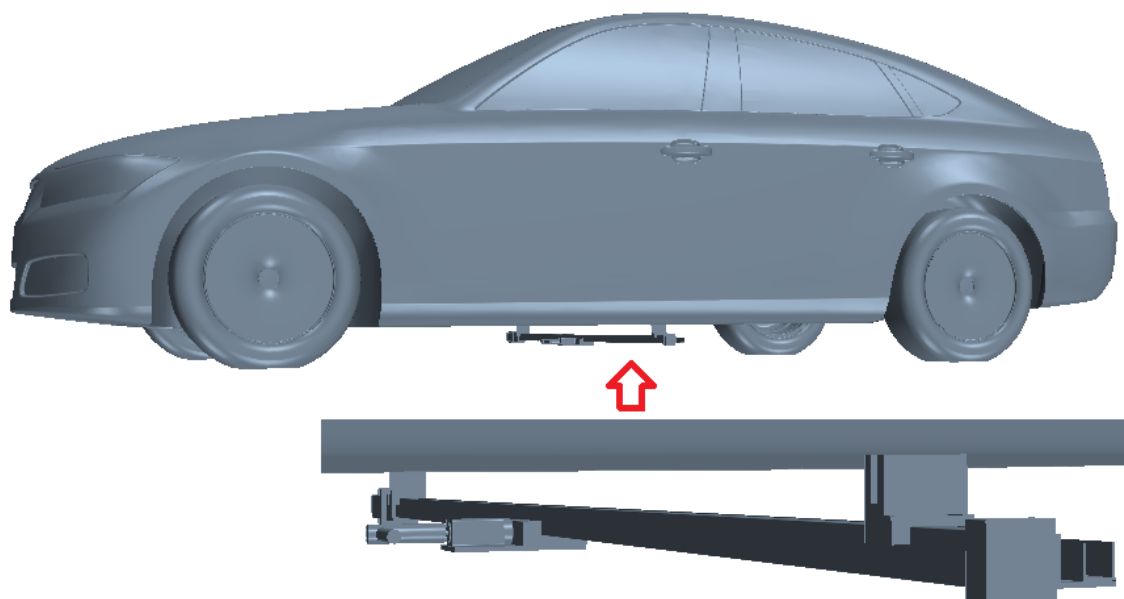
Obr. 63 Znázornění průběhu residuí

5.9 MODEL VOZIDLA SE ZAŘÍZENÍM

Pro výpočet objemového modelu vozidla se zařízením, bylo nutné provést některé nové konfigurace v CFD programu.

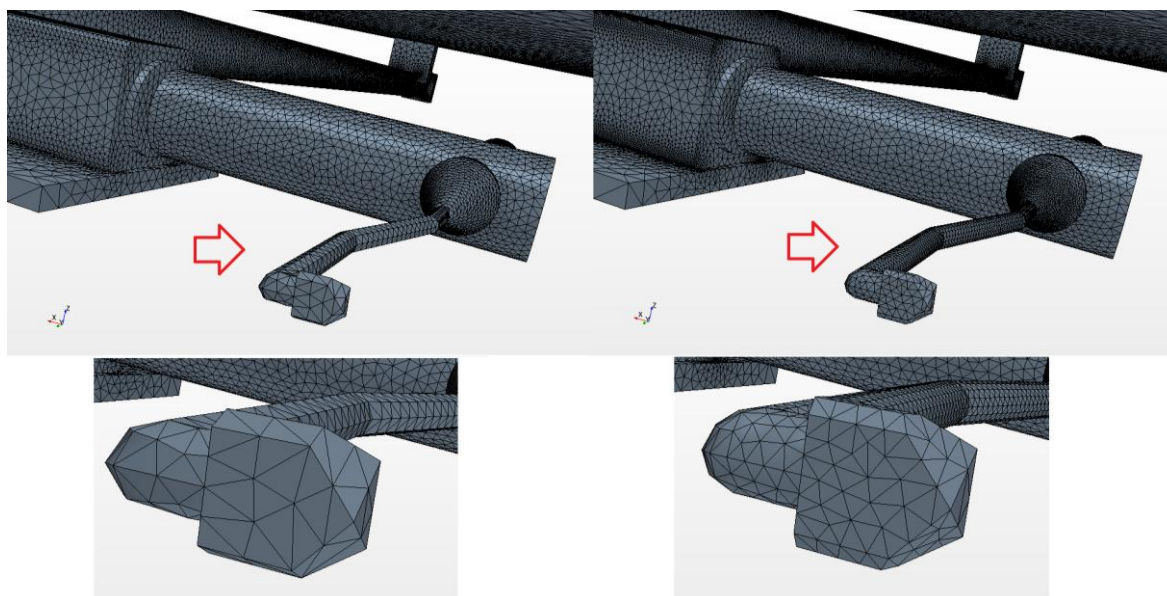


Model traverzovacího zařízení byl načten jako nový díl tak, aby byl spojen s modelem vozidla. Objem vozidla se zařízením musel být opět odečten od objemu tunelu. Fyzikální model a okrajové podmínky zůstaly v předešlém nastavení.



Obr. 64 CFD model vozidla se zařízením

Jediné úpravy byly provedeny v nastavení sítě. Traverzovací zařízení je oproti celkové velikosti vozidla velmi malé, proto na něm musela být nastavena správná korekce zhuštění buněk sítě. Nejprve byl vytvořený nový separovaný objem (*Block 3*) v oblasti okolo zařízení. Poté byla nastavena velikost buněk pro zařízení. Prvotní nastavení minimální velikosti buněk (*Minimum Size*) bylo 1 mm. Při kontrole byla tato hodnota nedostatečná, jelikož síť kopírovala nejmenší průměr sondy jako šestihran (Obr. 65 vlevo). Proto byla tato velikost upravena na hodnotu 0,5 mm a síť byla vygenerována znovu (Obr. 65 vpravo).



Obr. 65 Nastavení povrchové sítě na CFD modelu zařízení



Tab. 19 Velikost buněk na zařízení

Oblast	Veličina	Hodnota [m]
Traverzovací zařízení	Minimum Surface Size	0,0005
	Target Surface Size	0,01
	Prism Layer Total Thickness	0,003

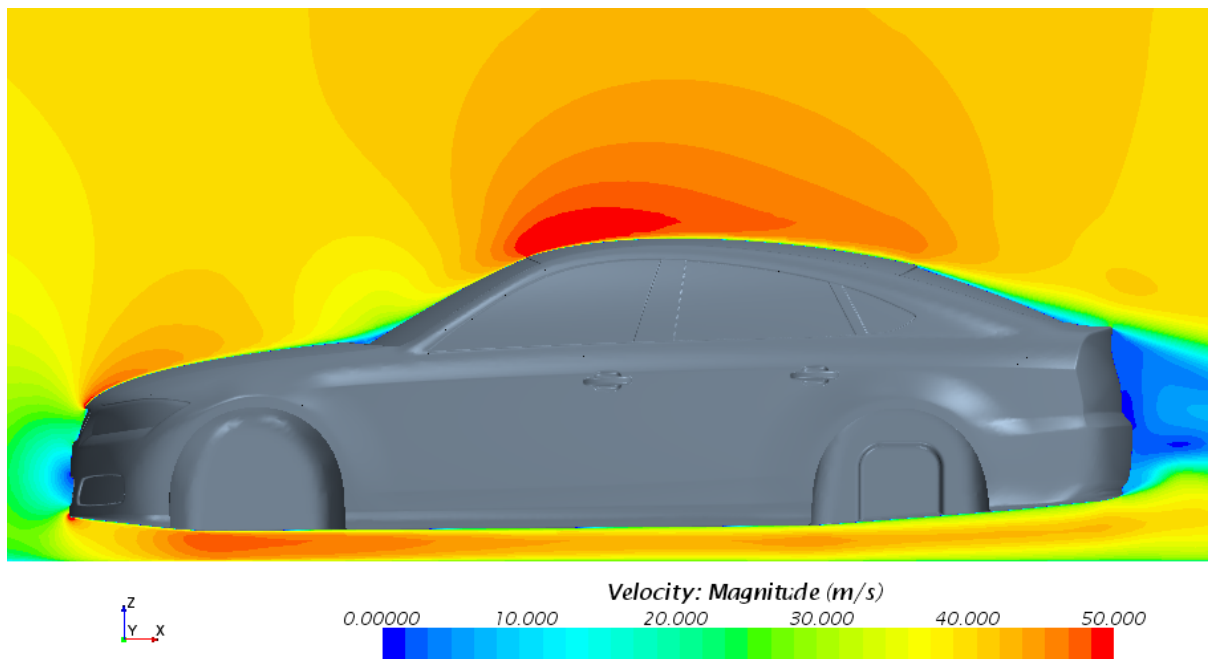
Tab. 20 Velikost buněk v novém separovaném objemu

Block	Corner 1 [m]			Corner 2 [m]			Relative Size [m]
	X	Y	Z	X	Y	Z	
3	1,2	-1	-0,4	1,7	1	-0,1	0,01

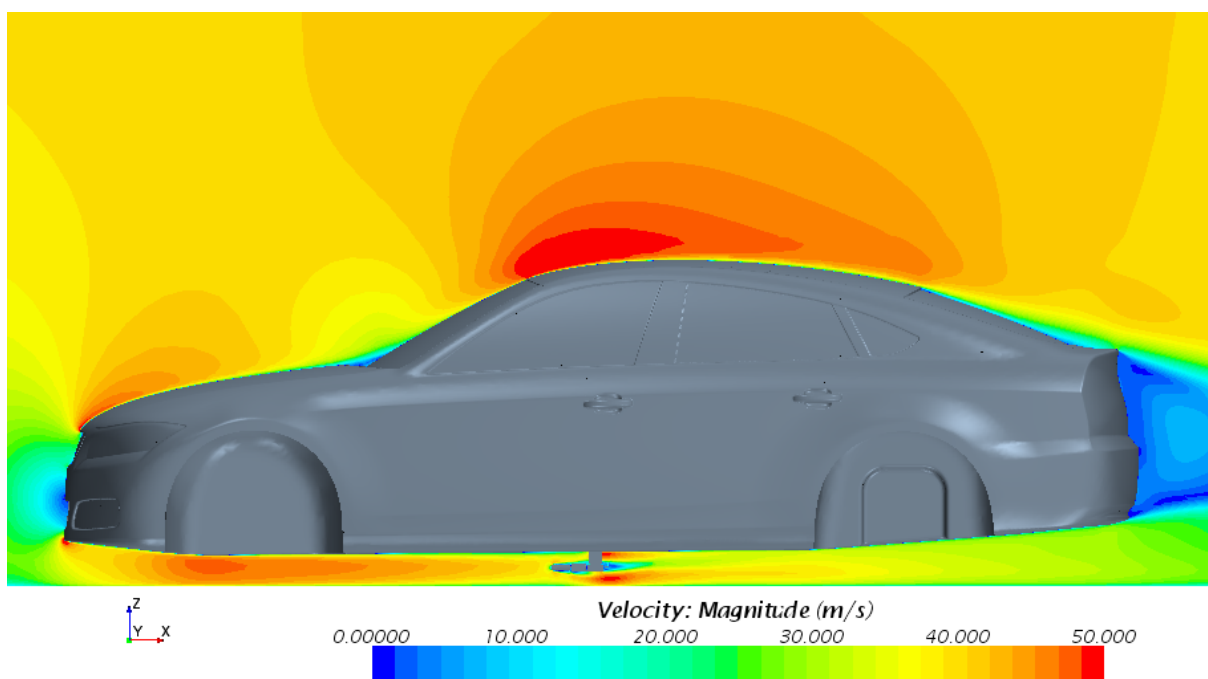


6 VÝSLEDKY CFD SIMULACÍ

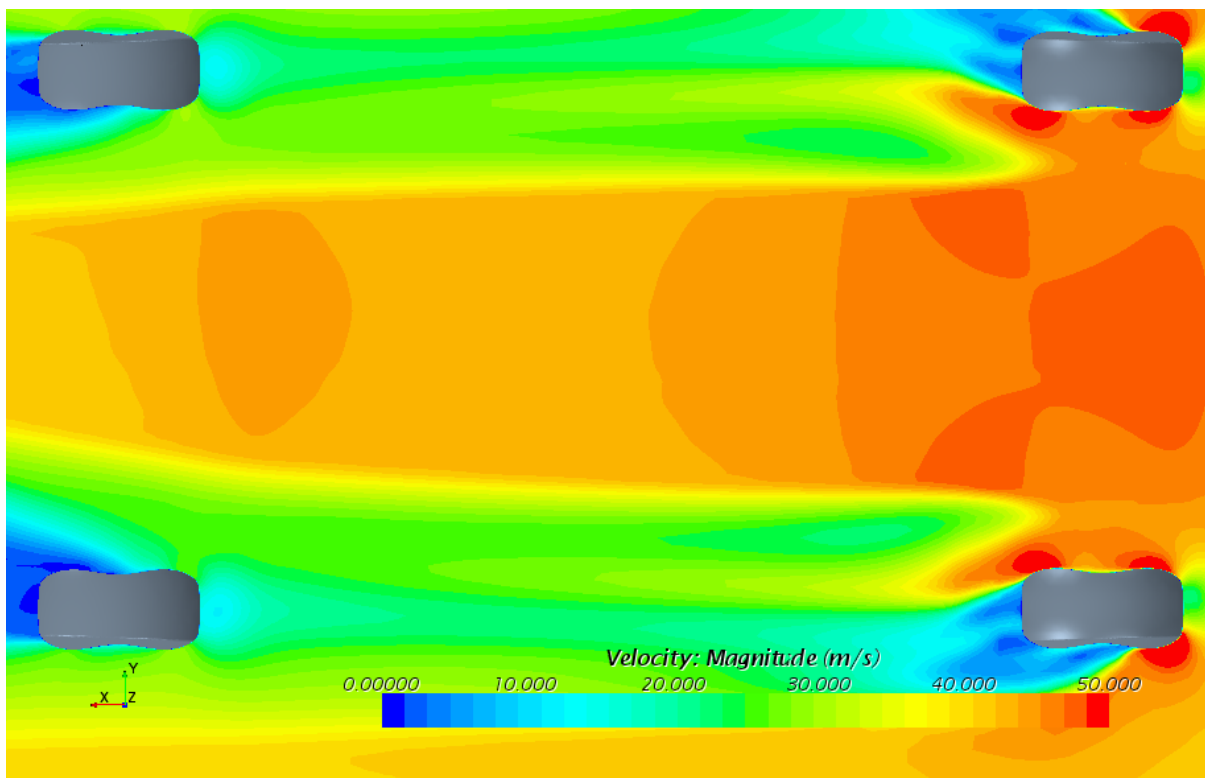
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny průběhy rychlosti proudění a rozložení statického tlaku na vozidle bez, a se zařízením. Tyto průběhy a rozložení jsou zobrazeny v různých rovinách. Hodnoty stupnice spektra barev odpovídají podtlaku, popř. přetlaku vůči tlaku atmosférickému (101 325 Pa).



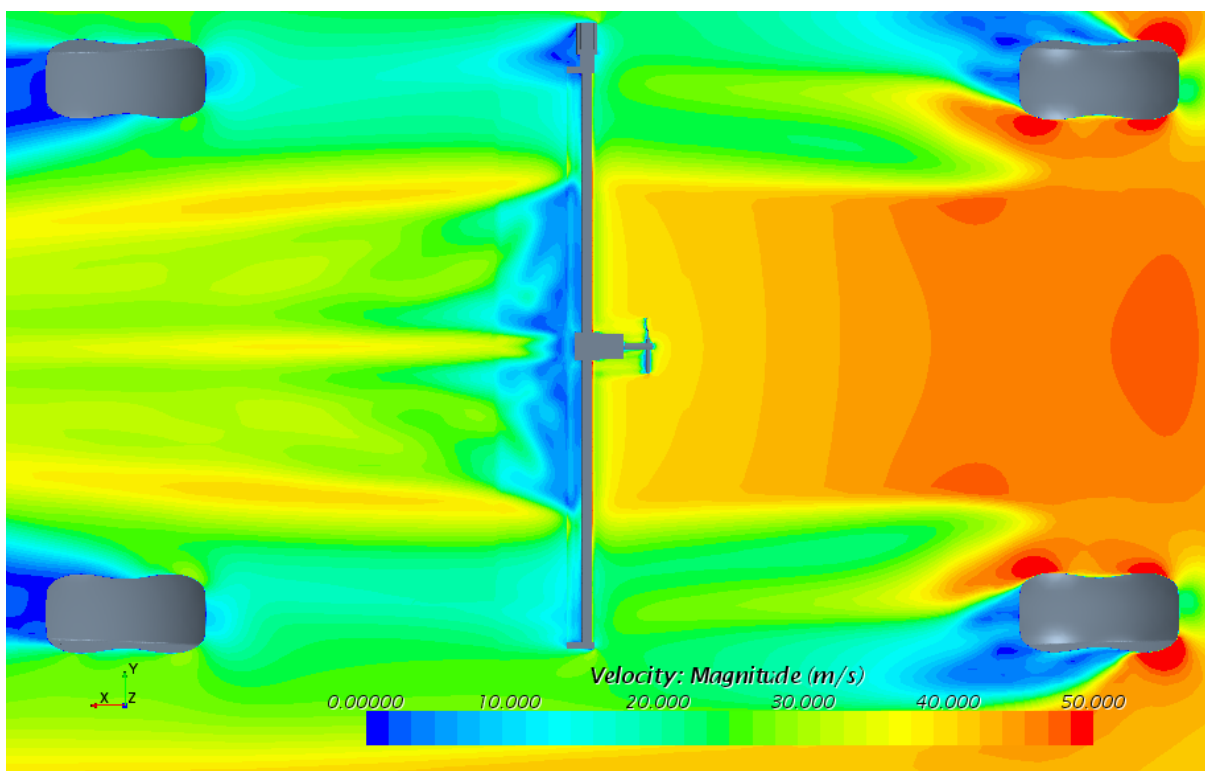
Obr. 66 Průběh rychlosti proudění na vozidle bez zařízení – zobrazení v rovině symetrie vozidla



Obr. 67 Průběh rychlosti proudění na vozidle se zařízením – zobrazení v rovině symetrie vozidla



Obr. 68 Průběh rychlosti proudění na vozidle bez zařízení – pohled zezdola, zobrazení v rovině 2 rovnoběžné s vozovkou

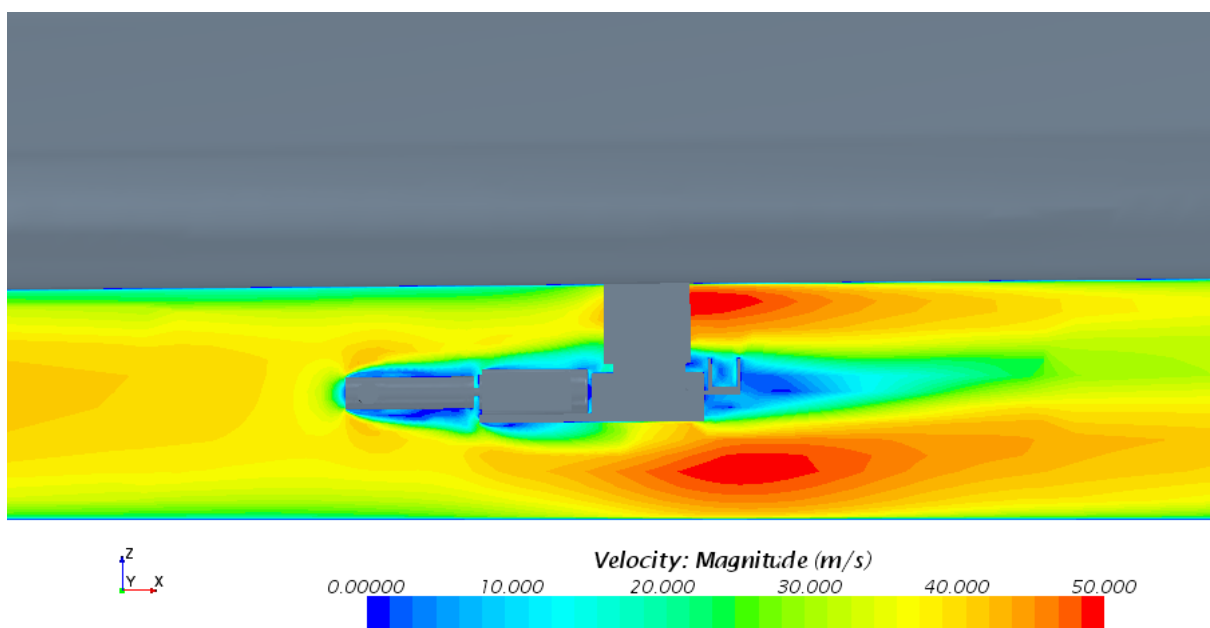


Obr. 69 Průběh rychlosti proudění na vozidle se zařízením – pohled zezdola, zobrazení v rovině 2 rovnoběžné s vozovkou

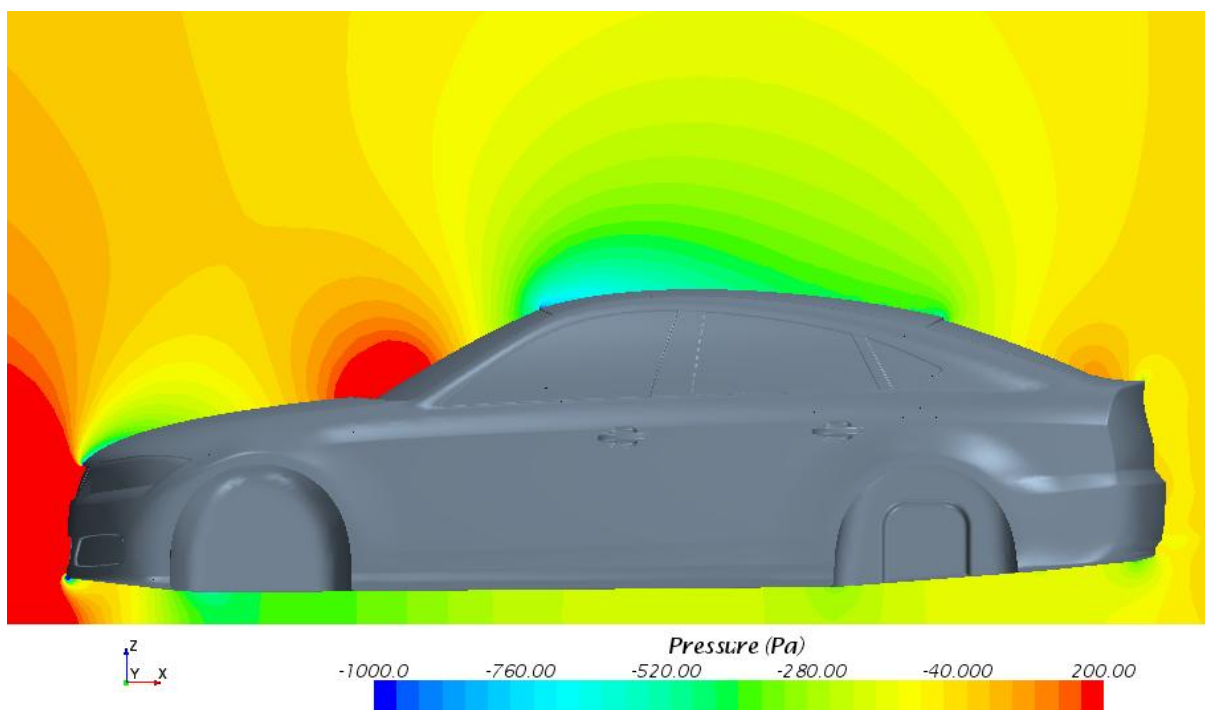


Z předchozích obrázků lze vidět, jak náběžná hrana vozidla rozděluje proud vzduchu na horní a spodní plochu karoserie. Na začátku mezery mezi podvozkem a vozovkou dochází ke zrychlení proudění. Vozidlo bez zařízení má téměř plynulý průběh rychlosti v celé části podvozku. V zadní části dochází ke snížení rychlosti (vlivem výškového rozšíření podvozku), a dále se proud vzduchu spojuje s úplavem za vozidlem.

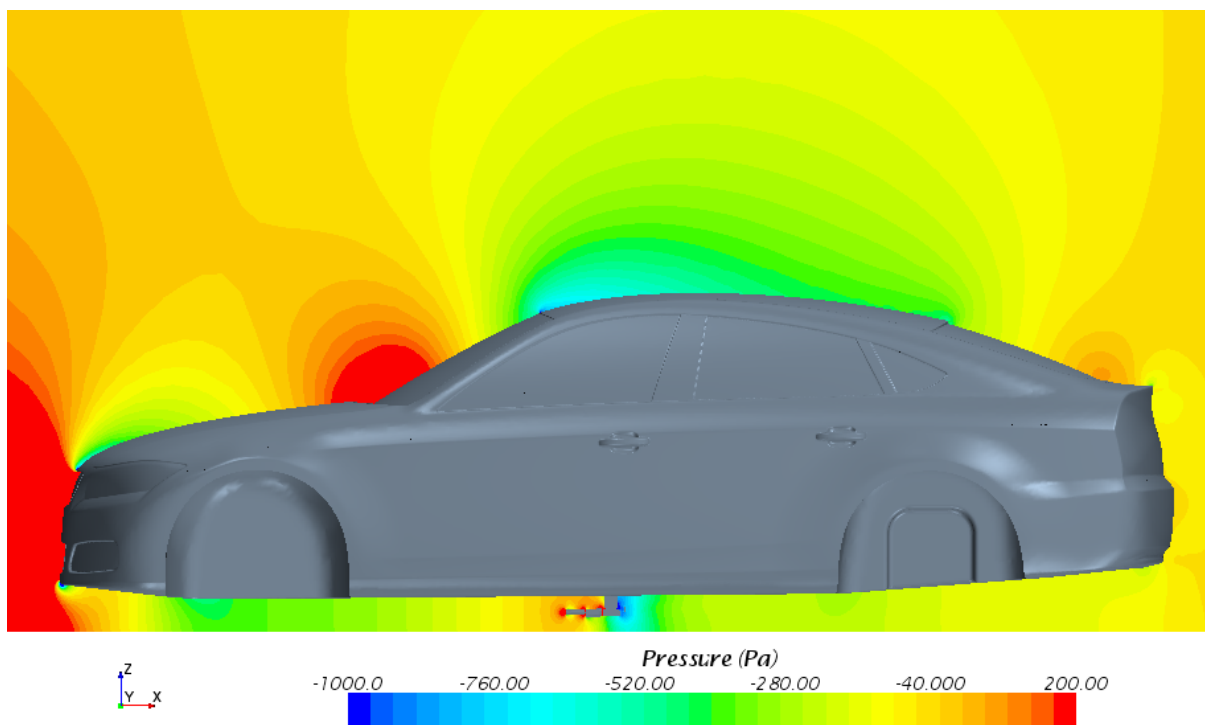
Zařízení způsobuje mírný pokles rychlosti již v oblasti předních kol. Tato rychlost se s blížící vzdáleností k zařízení nadále mírně snižuje. Avšak ten největší rozdíl rychlosti nastává v jeho těsné blízkosti. Zařízení rozděluje proud vzduchu na horní a spodní větev. Z detailního obrázku (*obr. 70*) je patrné, že v této části dochází k nárůstu mezní vrstvy jak na vozovce, tak i na vozidle. Dále dochází ke vzniku turbulencí, a to především za zařízením. Zde je patrný velký pokles rychlosti proudění. V některých místech je tato rychlost až nulová. To vše způsobuje snížení rychlosti proudění ve zbylé části podvozku vozidla.



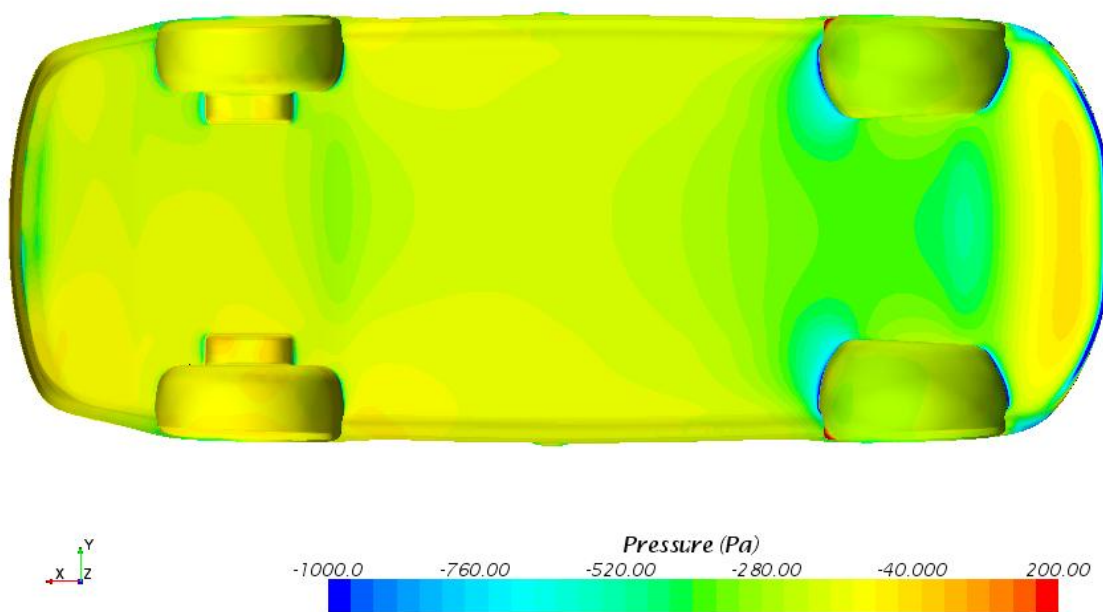
Obr. 70 Detail průběhu rychlosti proudění na povrchu zařízení – zobrazení v rovině symetrie vozidla



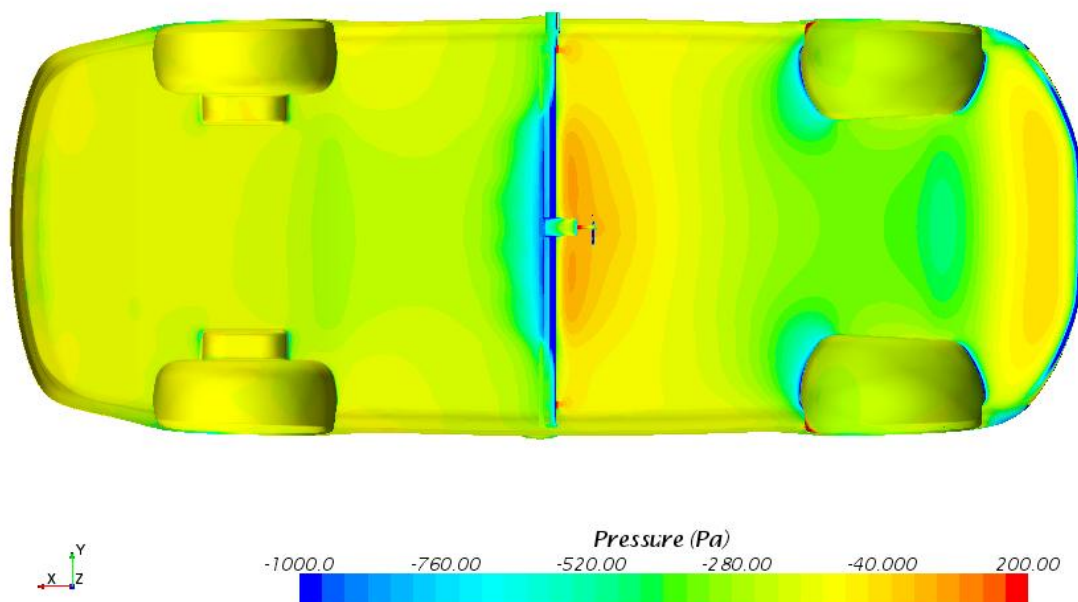
Obr. 71 Rozložení tlaku na vozidle bez zařízení – zobrazení v rovině symetrie vozidla



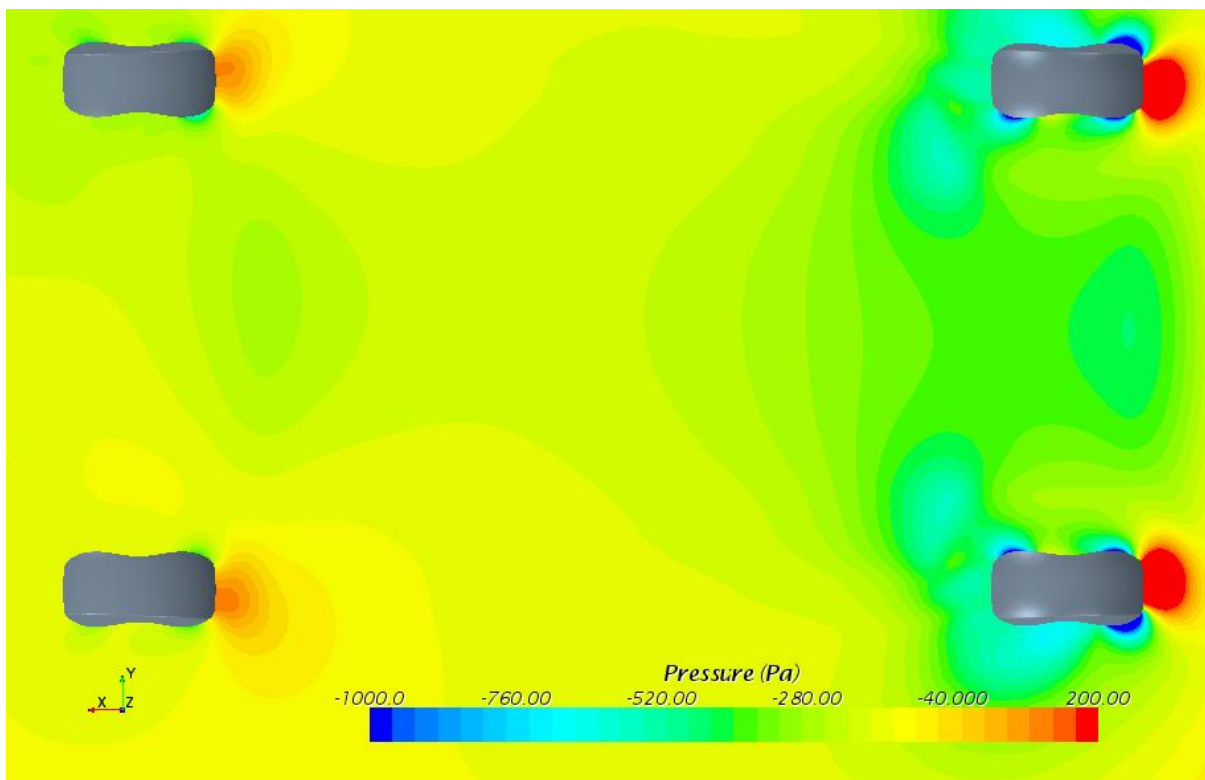
Obr. 72 Rozložení tlaku na vozidle se zařízením – zobrazení v rovině symetrie vozidla



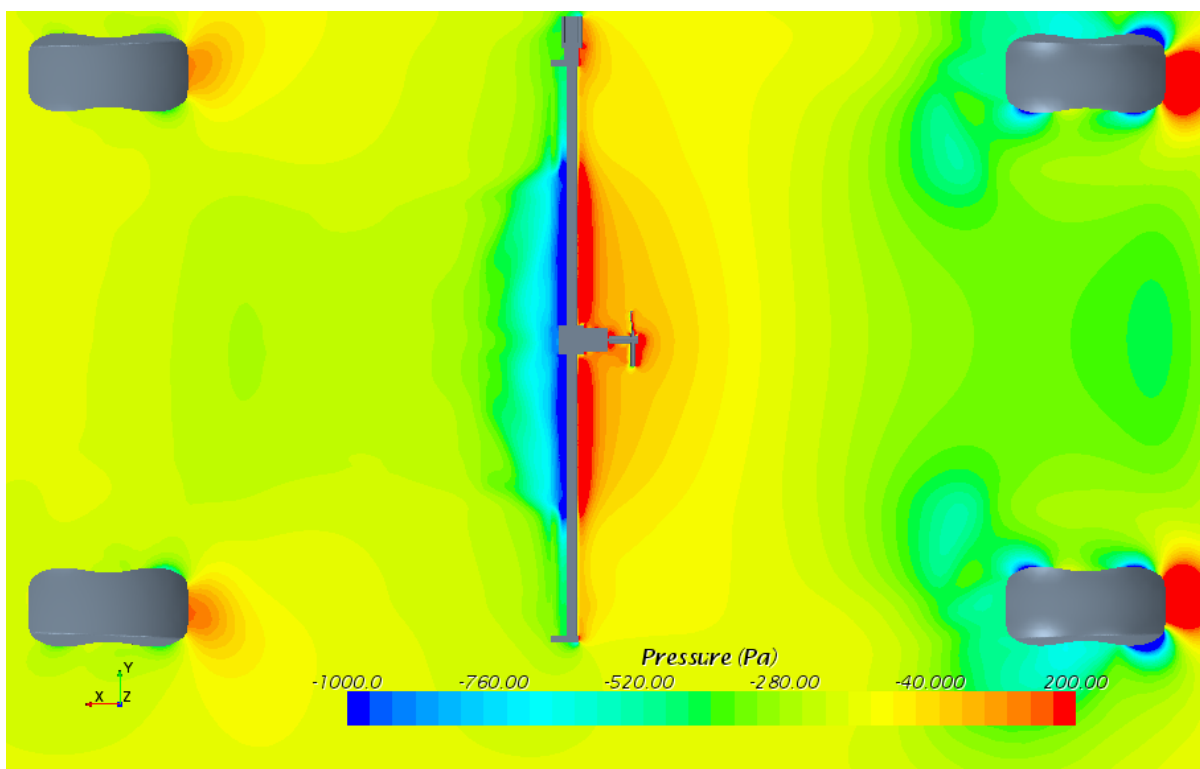
Obr. 73 Rozložení tlaku na povrchu vozidla bez zařízení – pohled zezdola



Obr. 74 Rozložení tlaku na povrchu vozidla se zařízením – pohled zezdola



Obr. 75 Rozložení tlaku na vozidle bez zařízení – pohled zezdola, zobrazení v rovině 2 rovnoběžné s vozovkou



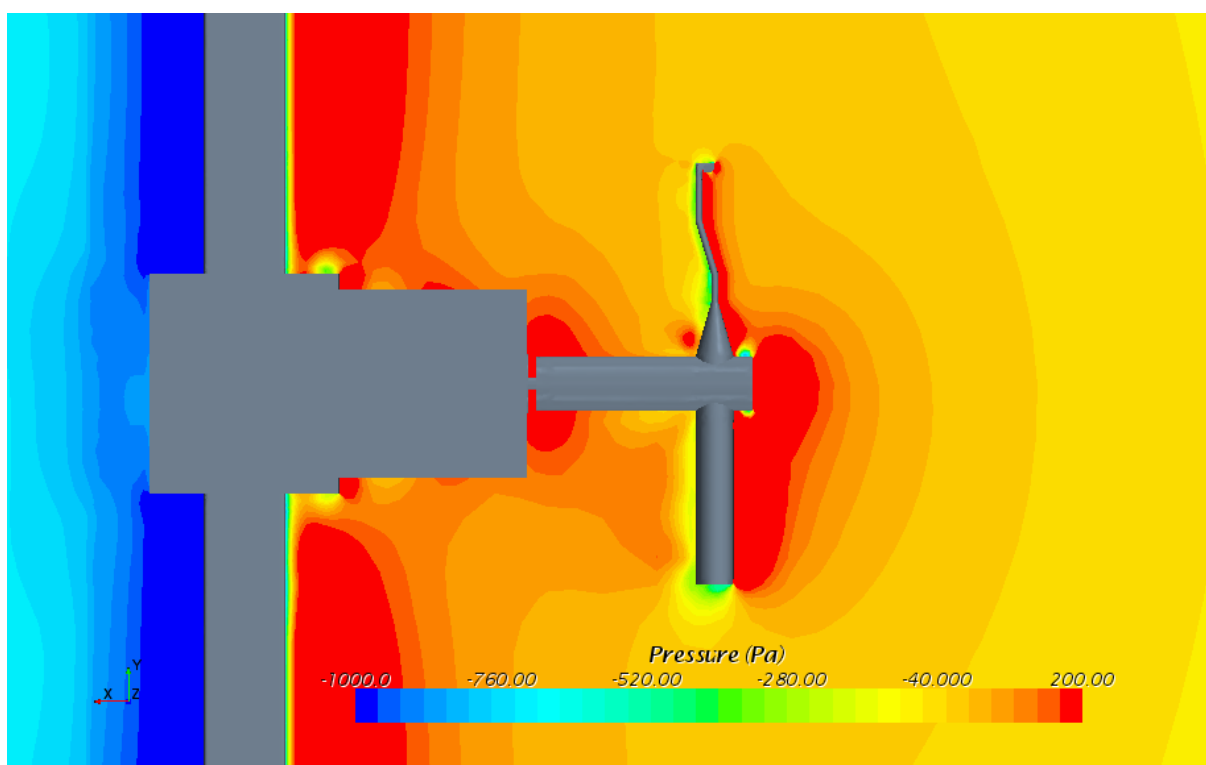
Obr. 76 Rozložení tlaku na vozidle se zařízením – pohled zezdola, zobrazení v rovině 2 rovnoběžné s vozovkou



Z předchozích obrázků je evidentní, že na začátku mezery mezi automobilem a vozovkou dochází ke snížení tlaku, což vytváří přítlak.

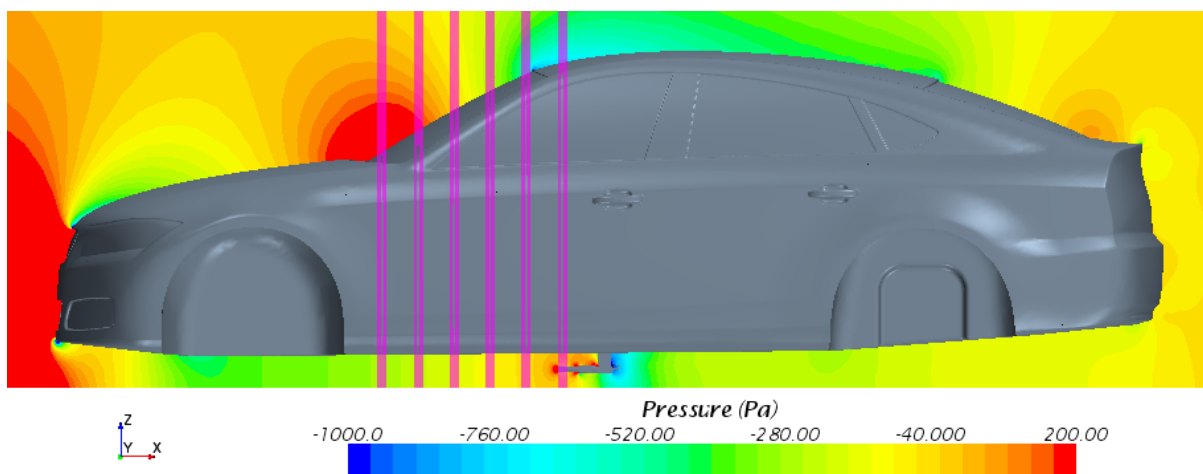
Z rozložení tlaku na vozidle se zařízením je zřejmý nárůst vyššího tlaku především v části před zařízením. Naopak za ním se nachází oblast s výrazným podtlakem (vůči atmosférickému), jenž způsobuje již zmíněné vířivé proudění v této části. V ostatních místech nejsou až tak zřetelné tlakové rozdíly oproti vozidlu bez zařízení.

Dále je očividné, že upínací tyč byla navrhnutá příliš krátká, jelikož sonda leží v oblasti, kde dochází k výraznému nárůstu tlaku od zařízení. Tímto by docházelo ke zkreslování naměřených hodnot touto sondou.



Obr. 77 Detail rozložení tlaku na povrchu zařízení – pohled zezdola, zobrazení v rovině 2 rovnoběžné s vozovkou

Detailní obrázek (obr. 77) ukazuje, že i samotné tělo sondy ovlivňuje měřící hlavici. To je další důvod pro umístění sondy dále od zařízení, aby bylo eliminováno co nejvíce faktorů, které by nějakým způsobem ovlivňovali přesnost měření. Pro nalezení dostatečné vzdálenosti byly vytvořeny další vyhodnocovací roviny. Tyto roviny byly umístěny normálově vzhledem k vozovce s 15 centimetrovými rozestupy od sondy (obr. 78). V nich bylo sledováno rozložení tlaku a průběhu rychlostí, a následně porovnáno s vozidlem bez zařízení. Jejich souřadnice jsou uvedeny v tab. 21. Počáteční rovina (rovina 3) prochází hrotem měřící sondy.

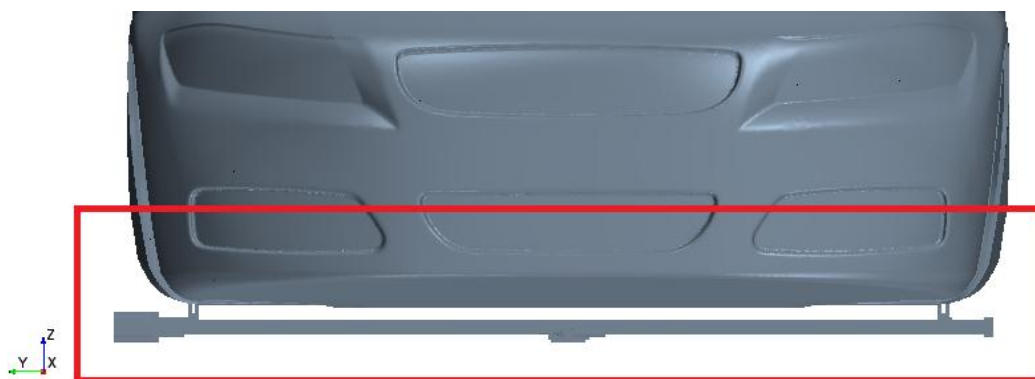


Obr. 78 Zobrazení vyhodnocovacích rovin - rozložení tlaku v rovině symetrie vozidla

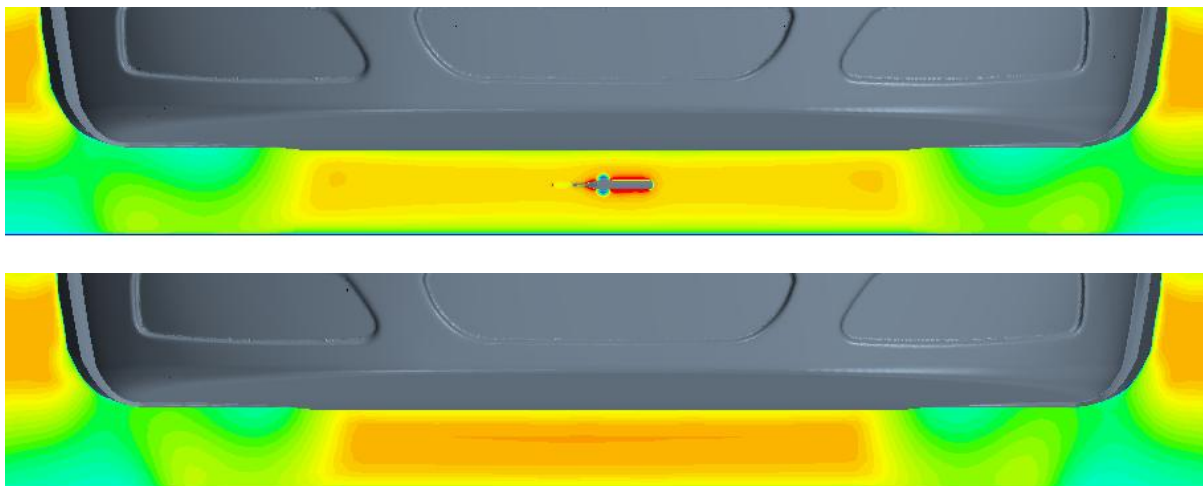
Tab. 21 Souřadnice vyhodnocovacích rovin

Rovina	Normal [m]			Origin [m]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
3	1	0	0	1,3	0	0
4	1	0	0	1,15	0	0
5	1	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0,85	0	0
7	1	0	0	0,15	0	0
8	1	0	0	0,55	0	0

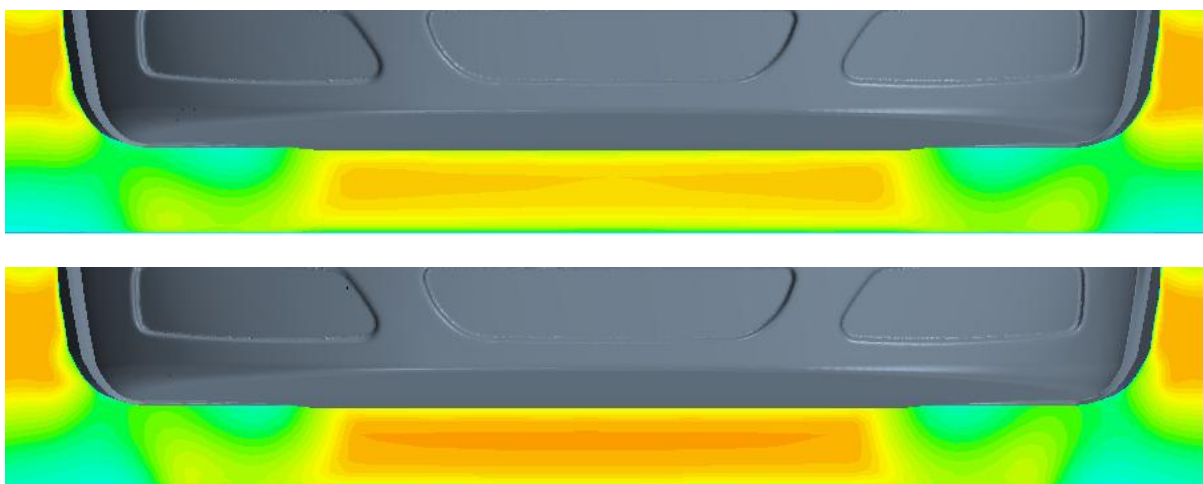
Následující obrázky mají zachovány stejné mezní hodnoty stupnice jako obrázky předešlé. Z důvodu lepší přehlednosti je tato stupnice umístěna vždy až na konci stránky. Nejdříve jsou porovnávány rychlosti, a poté tlaky. Horní obrázek vždy znázorňuje rozložení na vozidle se zařízením a spodní na vozidle bez něho. Tato rozložení jsou zobrazena pouze v oblasti pod vozidlem (červeně vyznačená na *obr. 79*).



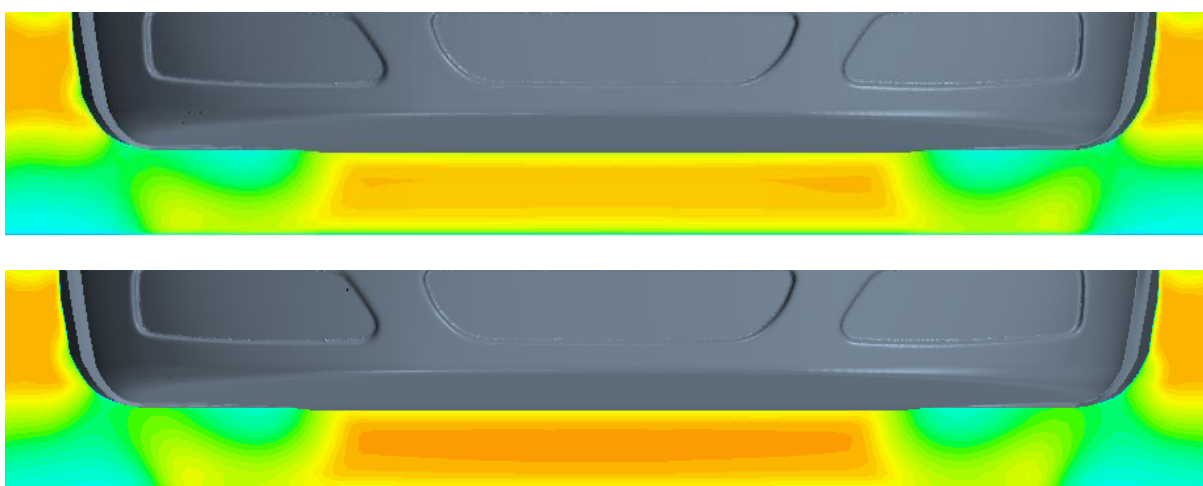
Obr. 79 Zobrazení vyhodnocovací oblasti – vozidlo se zařízením, pohled zepředu



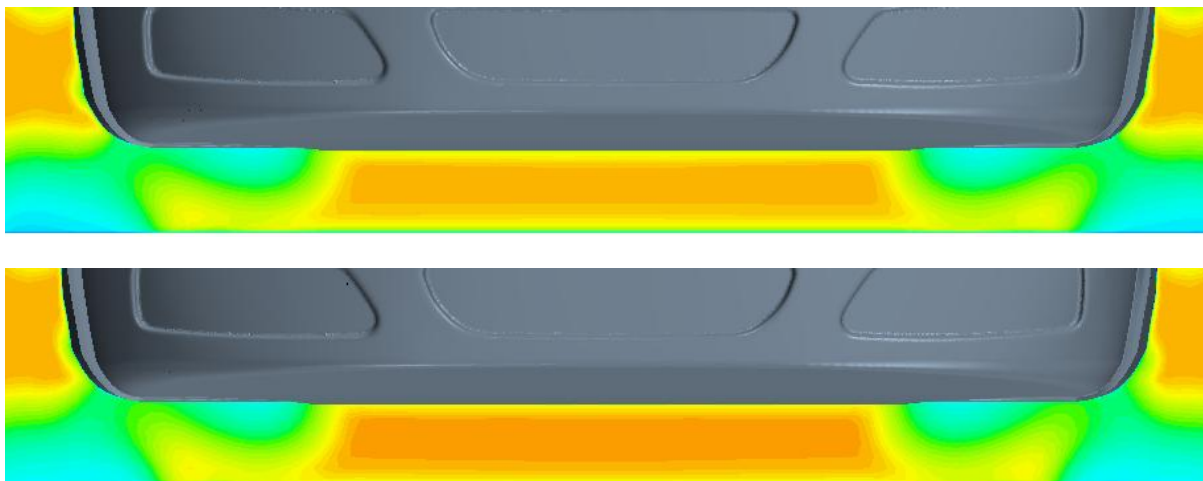
Obr. 80 Průběhy rychlosti proudění na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 3



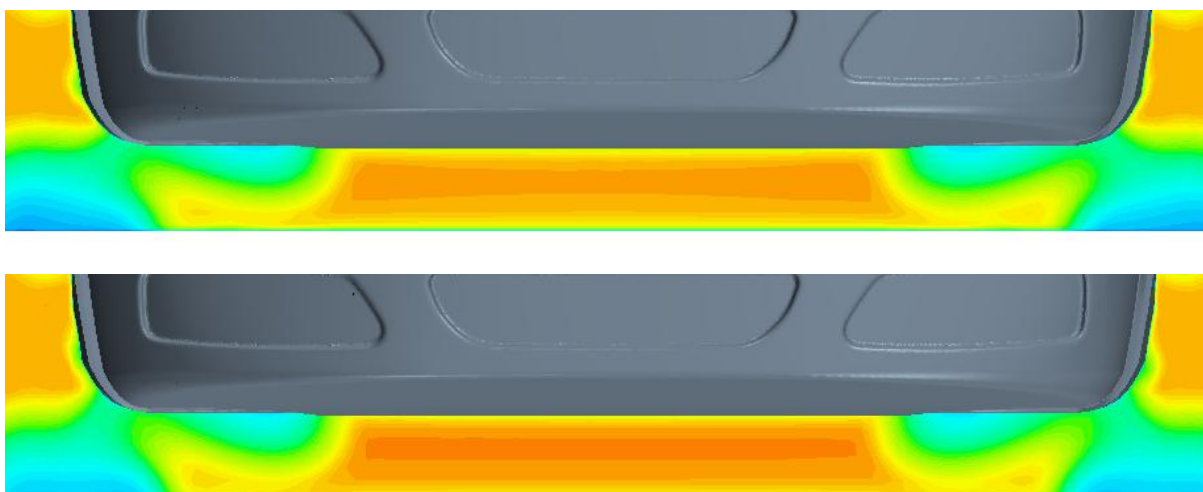
Obr. 81 Průběhy rychlosti proudění na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 4



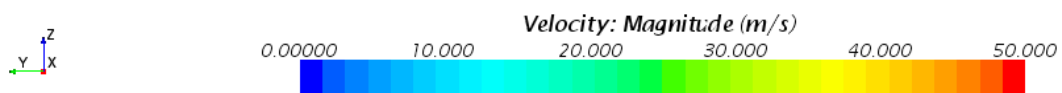
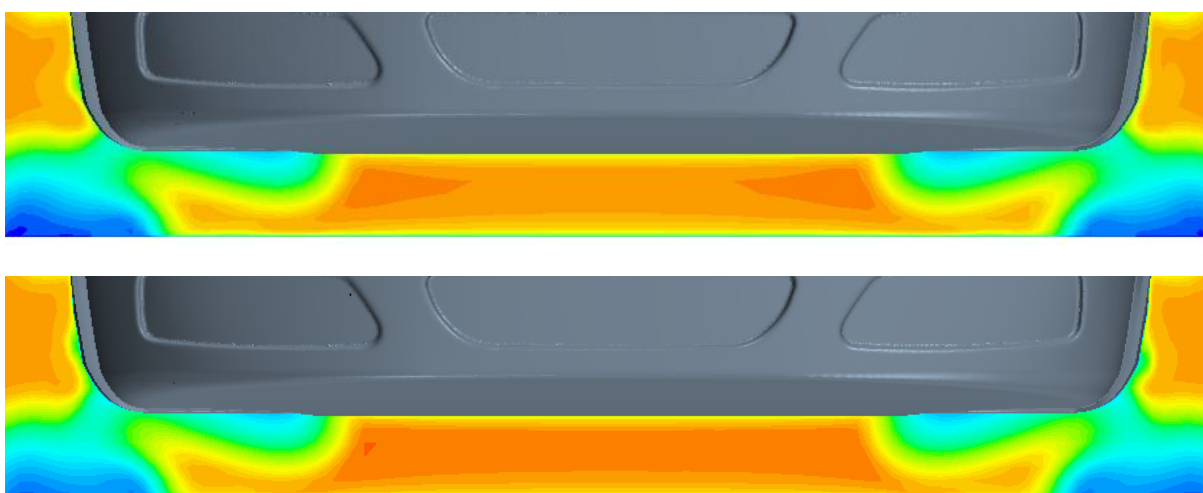
Obr. 82 Průběhy rychlosti proudění na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 5



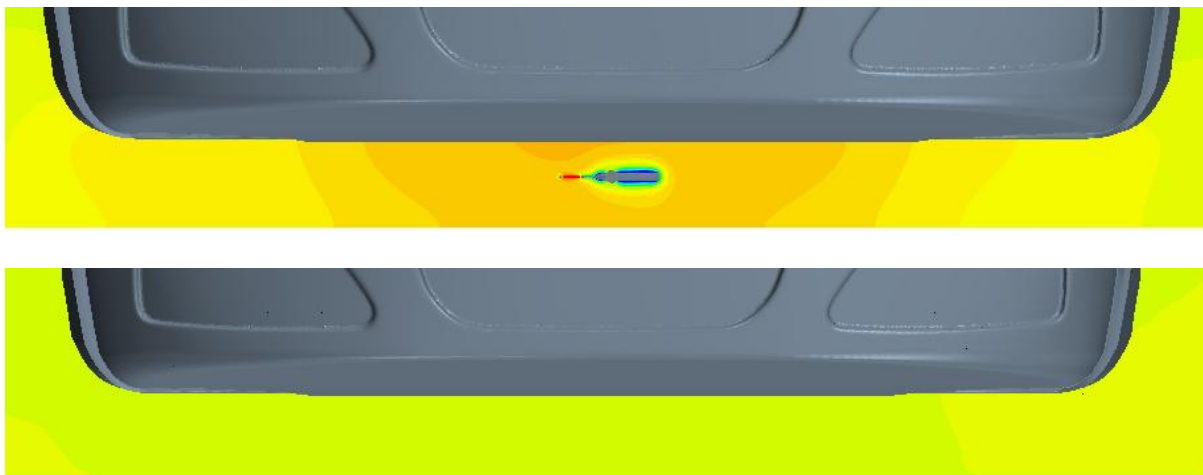
Obr. 83 Průběhy rychlosti proudění na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 6



Obr. 84 Průběhy rychlosti proudění na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 7



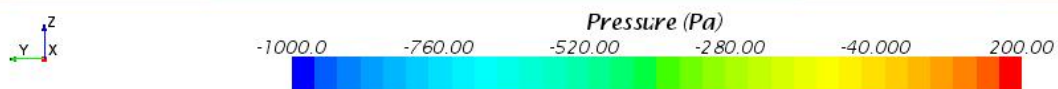
Obr. 85 Průběhy rychlosti proudění na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 8



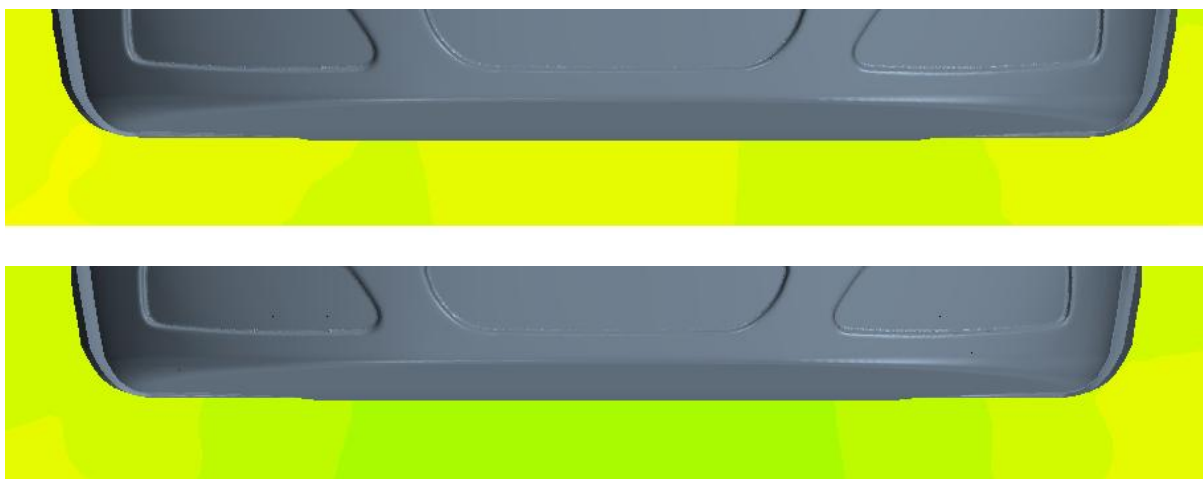
Obr. 86 Rozložení tlaku na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 3



Obr. 87 Rozložení tlaku na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 4



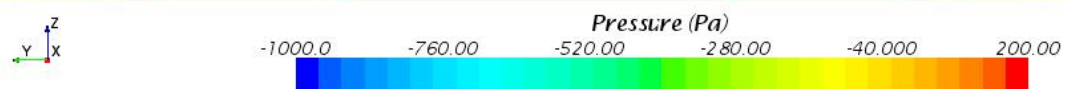
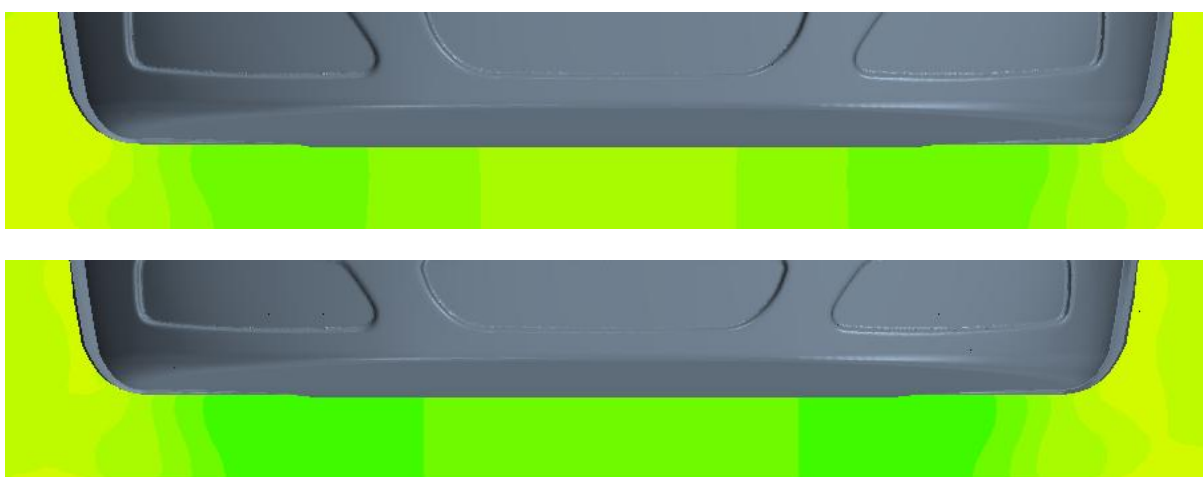
Obr. 88 Rozložení tlaku na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 5



Obr. 89 Rozložení tlaku na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 6



Obr. 90 Rozložení tlaku na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 7



Obr. 91 Rozložení tlaku na vozidle – pohled zepředu, zobrazení v rovině 8



Z předcházejících obrázků je patrné, že největší rozdíly rychlostí a tlaků jsou v rovinách 3 až 5, což odpovídá vzdálenosti 30 cm od vrcholu sondy. V dalších rovinách se rychlostní a tlakové pole vozidla se zařízením začínají podobat vozidlu bez zařízení. Z barevného spektra lze vidět, že v rovině 8, vzdálené 75 centimetrů od vrcholu sondy, jsou tyto rozdíly již minimální. Rozdíl rychlostí je zde okolo 1 m/s a tlaky jsou zde téměř shodné. Měřicí sonda by se tedy měla vysunout dopředu alespoň o vzdálenost 75 centimetrů, oproti původnímu umístění.



ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření konstrukčního návrhu dvou traverzovacích systémů. Jeden z nich měl být určen pro měření proudění v aerodynamickém tunelu, a ten druhý pro měření za jízdy. Navržená zařízení měla co nejméně ovlivňovat proudové pole pod vozidlem. Těžištěm této diplomové práce byl jak samotný návrh traverzovacích zařízení, tak i CFD analýza vlivu těchto zařízení na proudové pole pod vozidlem.

V konstrukční části této práce jsou nejdříve rozebrány požadavky pro navrhované zařízení. Hlavním kladeným požadavkem na zařízení byla univerzálnost použití tohoto zařízení, to znamená, aby bylo použitelné pro měření proudového pole v aerodynamickém tunelu i za jízdy. Dalšími velice důležitými požadavky byla možnost jeho využití pro různě široká vozidla a nízká hmotnost. Tyto, i zbylé požadavky byly splněny především díky vhodně zvolené polohovací jednotce, jež tvoří hlavní část celého traverzovacího systému. Pro možnost použití tohoto systému i za jízdy bylo nutné zajistit vedení kabelů tak, aby nedocházelo k jejich poškození při přejezdu měřicí sondy z jedné strany na druhou. To bylo vyřešeno použitím energetického kabelového řetězu. Celé zařízení se k vozidlu připevňuje za prahové lemy pomocí dvou svěrek, které jsou utahovány jedním šroubem. Díky tomu je zajištěna rychlá manipulace se zařízením. Zařízení lze použít pro vozidla široká až 2 metry. Další výhodou je absence druhého zařízení, čímž by byly ušetřeny výrobní náklady a čas.

Pro CFD simulace vlivu traverzovacího systému na proudové pole pod vozidlem byly sestaveny dva objemové modely s různými nastaveními sítě. Poté byly provedeny výpočty obou těchto modelů. Vyhodnocení vlivu zařízení v mezeře mezi podvozkem a vozovkou bylo získáno z průběhů rychlosti a rozložení tlaku v různých rovinách.

Z výsledků simulací je zřejmé, že k největšímu ovlivnění proudění pod vozidlem přítomností zařízení dochází, jak se dalo předpokládat, v oblasti zařízení. Avšak pro měřicí sondu je důležité, aby k tomuto ovlivnění nedocházelo v místě, kde se právě nachází. Z rozložení tlaků a rychlostí bylo evidentní, že upínací tyč byla navrhována příliš krátká, jelikož sonda byla umístěna v oblasti, kde docházelo k výraznému nárůstu tlaku a změně rychlosti vlivem zařízení. Ukázalo se, že dostatečná vzdálenost od zařízení je 75 centimetrů, a tedy upínací tyč by měla být o tuto hodnotu prodloužena. Dále bylo prokázáno, že i samotné tělo sondy mírně ovlivňuje její přesnost. Tento vliv by se mohl zmenšit použitím jiného tvaru sondy.

Z výše uvedených výsledků lze konstatovat, že by se dané zařízení dalo použít pro reálné měření v aerodynamickém tunelu i za jízdy, a tedy splnilo veškeré požadavky předem stanovené v této diplomové práci.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HUCHO, W. – H. *Aerodynamics of road Vehicles*. 4 ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. ISBN 0-7680-0029-7.
- [2] KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Publishers 2006, ISBN 0-8376-0142-8.
- [3] KOVANDA, B., KOVANDA J. *Aerodynamika vozidel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01942.
- [4] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [5] DVOŘÁK, L. *Vlastnosti tekutin* [online]. Ostrava: VŠB - technická univerzita Ostrava, 2010 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf>
- [6] JANALÍK, J. *Obtékání a odpor těles* [online]. Ostrava: VŠB - technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2015-05-11]. ISBN 978-80-248-1911-2. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>
- [7] KATZ, J. *Aerodynamics of Race cars*. [online]. Annual Reviews California: San Diego State University, 2006. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016>
- [8] LEVIN, J., RIGDAL R. *Aerodynamic analysis of drag reduction devices on the underbody for SAAB 9-3 by using CFD* [online]. Sweden, Goteborg: Chalmers university of technology, 2011 [cit. 2015-05-11]. ISSN 1652-8557. Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/143210.pdf>
- [9] SKÁLA, V., PICK, P. *Optimalizovaná pětiotvorová sonda* [online]. Praha: ČVUT, 2008 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf14/4552.pdf>
- [10] AUTOEXPERT. Správný tlak šetří nejen peněženku. In: *Autojob* [online]. © 2010 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.autojob.cz/auto-magazin/clanek/16-spravny-tlak-setri-nejenpenezenku.html>
- [11] BROŽ, J. Praktická dílna. *Autoexpert* [online]. 2007 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.znalec.tym.cz/kola%20a%20pneu.pdf>
- [12] EDGAR, J. Analysing Road Car Drag. In: *Autospeed* [online]. © 1996 - 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.autospeed.com/cms/article.html?&A=110351>
- [13] JONÁŠ, M. Lineární jednotky pro každé použití. In: *Mmspektrum* [online]. ©2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/linearni-jednotky-pro-kazde-pouziti.html>
- [14] Letecký ústav Brno: VUT. *Aerodynamics*, [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>



- [15] SAJDL, J. Aerodynamika. In: *Autolexicon* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/aerodynamika/>
- [16] SOUČKOVÁ, N., KOLÁŘ, P., TUČEK, A. Simulace proudění tekutin pomocí CFD. In: *Cad* [online]. © 2009 - 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3604-simulace-proudeni-tekutin-pomoci-cfd.html>
- [17] VOKÁČ, L. Aerodynamika ušetří víc paliva než odlehčení auta. Záleží na detailech. In: *Auto.idnes.cz* [online]. © 1999 - 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/aerodynamika-mercedes-benz-dde-/automoto.aspx?c=A130708_210416_automoto_vok
- [18] Aerodynamic Upgrades. *Rapid-Racer* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.rapid-racer.com/aerodynamic-upgrades.php>
- [19] Bezvůlové spojky. *Tyma* [online]. © 2004 - 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.tyma.cz/produkty/hridelove-spojky/sit/trasco-es/>
- [20] Cobra Probe. *TurbulentFlow* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.turbulentflow.com.au/Products/CobraProbe/CobraProbe.php>
- [21] Energetické řetězy. *Hennlich* [online]. © 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/produkty/energeticke-retezy-flexibilni-kabely-energeticke-retezy-system-e2-143/serie-04-e2-micro.html>
- [22] Funkce mikrospínače. In: *Arcade-automat* [online]. poslední revize 18. 9. 2014 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.arcade-automat.cz/index.php/serial-na-pokracovani/90-serial-na-pokracovani/83-7-funkce-mikrospinace>
- [23] Lineární osy NL. *TEA technik* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.teatechnik.cz/linearni-osa-sroubem-nl/>
- [24] Lineární pohybové saně. *Loziska* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: http://www.loziska.com/store/linearni_pohybove_sane.pdf
- [25] Mikrospínače. *Gme* [online]. © 1990 - 2015 [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/mikrospinac-zippy-sm-05l-02d0-z-p630-195>
- [26] Polohovací jednotky ELT. *Raveo* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.raveo.cz/s-rolnickovym-vedenim-ELT-ELK>
- [27] Car compact Fabia side view clip art. *Clker* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.clker.com/clipart-10840.html>
- [28] Free Printable Race Car Coloring Pages For Kids. *Bestcoloringpagesforkids* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.bestcoloringpagesforkids.com/race-car-coloring-pages.html>



- [29] Lamborghini side view. *Fansshare* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://cdn29.us3.fansshare.com/pictures/linedrawing/lamborghini-side-view-drawingsrt-line-drawing-srt-forums-srt-srt-srt-srt-dodge-crz-zpht-car-1741813123.jpg>
- [30] Learn how to draw a car front view. *Ytimg* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://i.ytimg.com/vi/5JEs-490l7c/hqdefault.jpg>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[ms ⁻¹]	zrychlení (zpomalení) obecně
c _x	[-]	součinitel aerodynamického odporu
c _z	[-]	součinitel aerodynamického vztlaku
D	[m]	průměr obecně
e	[m]	posunutí radiální reakce vozovky
f	[-]	součinitel valivého odporu
F	[N]	síla obecně
f _k	[-]	součinitel valivého odporu kola
F _K	[N]	hnací síla
F _y	[N]	aerodynamická boční síla
F _z	[N]	aerodynamický vztlak
G	[N]	tíhová síla vozidla
h	[m]	výška obecně
i _c	[-]	celkový převod mezi motorem a hnacími koly
i _p	[-]	převod převodky
i _r	[-]	převod rozvodovky
I _R	[gmm ²]	moment setrvačnosti rotoru motoru
I _{Red}	[gmm ²]	redukovaný moment setrvačnosti
I _s	[gmm ²]	moment setrvačnosti
I _S	[gmm ²]	moment setrvačnosti sondy
I _T	[gmm ²]	moment setrvačnosti upínací tyče
J _{Ki}	[kgm ²]	hmotnostní moment setrvačnosti kola
J _m	[kgm ²]	hmotnostní moment setrvačnosti rotujících částí motoru
l	[m]	délka obecně
m	[kg]	hmotnost obecně
M _{fk}	[Nm]	moment působící proti otáčení kola
M _K	[Nm]	kroučící moment motoru
M _m	[Nm]	moment motoru
M _n	[Nm]	moment nezatížené polohovací jednotky
M _r	[Nm]	setrvačný moment rotačních částí vozidla
M _{rK}	[Nm]	moment potřebný pro zrychlení kol vozidla
M _{rm}	[Nm]	moment potřebný pro zrychlení rotujících částí motoru



M_{rp}	[Nm]	moment potřebný pro zrychlení rotujících částí převodového ústrojí
n	[s ⁻¹]	otáčky obecně
n_1	[s ⁻¹]	otáčky motoru sondy
n_2	[s ⁻¹]	otáčky motoru polohovací jednotky
O_f	[N]	odpor valivý
O_{fk}	[N]	vodorovná reakce působící proti otáčení kola
O_p	[N]	odpor přívěsu
O_s	[N]	odpor stoupání
$O_v=F_x$	[N]	odpor aerodynamický
O_z	[N]	odpor zrychlení
O_{zp}	[N]	odpor zrychlení posuvné části
O_{zr}	[N]	odpor zrychlení otáčejících se částí
p	[Pa]	tlak obecně
P	[mm]	stoupání pohybového šroubu
p_∞	[kgm ⁻³]	statický tlak ve volném proudu
P_m	[kW]	výkon motoru
r	[m]	poloměr obecně
r_d	[m]	dynamický poloměr kola
r_K	[m]	poloměr valení
r_s	[m]	statický poloměr kola
s	[°]	stoupání
S_i	[mm]	bezpečnost polohovací jednotky
S_K	[N]	boční vodící síla pneumatiky
s_r	[m]	dráha rozběhu
S_x	[m ²]	čelní plocha vozidla
t	[°C]	teplota obecně
t_{r1}	[s]	požadovaná doba rozběhu motoru sondy
t_{r2}	[s]	požadovaná doba rozběhu motoru polohovací jednotky
V	[m ³]	objem
v_r	[ms ⁻¹]	rychlost proudění
Z_K	[N]	radiální reakce vozovky
α	[°]	úhel stoupání mezi povrchem vozovky a vodorovnou rovinou
ε	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení



ε_K	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení kol
ε_m	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení rotujících částí motoru
ε_p	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení spojovacího hřídele
η	[% , Pas]	mechanická účinnost, dynamická viskozita
ϑ	[-]	součinitel vlivu rotačních částí
μ	[-]	účinnost pohybového šroubu
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kgm ⁻³]	měrná hmotnost vzduchu
τ	[Pa]	tečné napětí
φ_m	[rad]	úhlová dráha rotujících částí motoru
ω	[rads]	úhlová rychlost



SEZNAM PŘÍLOH

Traverzovací zařízení	Výkres sestavy	TZ – DP – 15 – 00
Traverzovací zařízení	Seznam položek	TZ – DP – 15 – 00a
Traverzovací zařízení	Seznam položek	TZ – DP – 15 – 00b
Traverzovací zařízení	Seznam položek	TZ – DP – 15 – 00c
Úchyt motoru	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 01
Úchyt sondy	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 02
Úchyt kabelu	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 03
Úchyt vedení	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 04
Vedení kabelu	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 05
Základní deska	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 06
Příruba	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 07
Svěrka pevná	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 08
Svěrka volná	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 09
Pouzdro	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 10
Vymezovací kostka	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 11
T matice 1	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 12
T matice 2	Výkres součásti	TZ – DP – 15 – 13