

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

VLIV ROTACE KOL NA AERODYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY VOZU

INFLUENCE OF ROTATING WHEELS ON VEHICLE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. ALEŠ OSLIZLO
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. JAN VANČURA
SUPERVISOR

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Oslizlo Aleš, Bc.

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:

Vliv rotace kol na aerodynamické charakteristiky vozu

v anglickém jazyce:

Influence of rotating wheels on vehicle aerodynamic characteristics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pomocí zvoleného CFD softwaru proveďte analýzu proudění kolem vozidla s rotací a bez rotace kol a se stacionární a pohybující se vozovkou. Vyhodnoťte vlivy jednotlivých okrajových podmínek na aerodynamické charakteristiky vozu.

Cíle diplomové práce:

Cílem této práce je provést výpočtové posouzení vlivu nastavení okrajových podmínek v CFD na výsledné aerodynamické charakteristiky zvoleného vozidla.

Seznam odborné literatury:

W-H Hucho, Aerodynamics of Road Vehicles, 1998
J Katz, Race car aerodynamics, 2006

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Vančura

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na výpočtové posouzení vlivu nastavení okrajových podmínek v CFD softwaru na výsledné aerodynamické charakteristiky vozidla. Analýza proudění je provedena kolem vozidla s rotací a bez rotace kol a se stacionární a pohybující se vozovkou. Dále je znázorněn postup sestavení CFD modelu a popsán vliv rotace kol na aerodynamické charakteristiky vozidla.

Klíčová slova

Aerodynamika, kola, rotace, vozidlo, CFD

Abstract

The diploma thesis is focused on computational examination of influence of boundary condition settings in CFD software on the final aerodynamic characteristics of a vehicle. The flow analysis is carried out around a vehicle with and without the rotation of the wheels and along with the stationary and moving road.
Furthermore, there is demonstrated the method of the CFD model composition and there is described the influence of rotating wheels on vehicle aerodynamic characteristics.

Key words

Aerodynamics, wheels, rotation, vehicle, CFD

Bibliografická citace

OSLIZLO, A. *Vliv rotace kol na aerodynamické charakteristiky vozu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 64 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vančura.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem napsal sám za pomoci mého vedoucího diplomové práce pana Ing. Jana Vančury a za pomoci literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 25. května 2010 Bc. Aleš Oslizlo

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Vančurovi za odborné vedení, cenné rady a za získání znalosti v oblasti CFD. Dále bych chtěl poděkovat rodině a svým blízkým, kteří mi byli při tvorbě diplomové práce oporou.

1. Úvod 9
2. Vývoj aerodynamiky vozidel 10
3. Základy aerodynamiky 13
3.1 Aerodynamické síly a koeficienty 13
3.2 Vlastnosti tekutin, Bernoulliho rovnice 14
3.3 Typy proudění 15
3.4 Mezní vrstva 16
3.5 Obtékání kol, Magnusův jev 17
4. Metody stanovení aerodynamických charakteristik vozidla 19
4.1 Měření 19
4.2 Simulace 21
4.2.1 Rozdělení komerčních CFD softwarů: 21
5. Aerodynamika rotujících kol 22
6. Testovací výpočet 24
7. Výpočet aerodynamických charakteristik zvoleného vozu 26
7.1 Popis zvoleného vozidla 26
7.2 Metodika výpočtu aerodynamických charakteristik 27
7.3 Použité modely kol 28
7.4 Vytvoření výpočtové sítě v programu ICEM CFD 28
7.4.1 Import a úprava geometrie 28
7.4.2 Rozdělení modelu na části a nastavení velikosti elementů 29
7.4.3 Vytvoření povrchové sítě na náběžné hraně přítlačného křídla 32
7.4.4 Nastavení objemové hustoty sítě 32
7.4.5 Vytvoření objemové sítě 33
7.4.6 Kontrola a zkvalitnění sítě, export 34
7.5 Výpočet v programu Fluent 34
7.5.1 Import, nastavení modelu 34
7.5.2 Nastavení parametrů a okrajových podmínek výpočtu 34
7.5.3 Nastavení monitorů a spuštění výpočtu 37
7.6 Vizualizace proudění a rozložení tlaku v programu CFD-POST 38
7.6.1 Rozložení tlaku 38
7.6.2 Zobrazení proudnic 38
7.7 Zhodnocení vlivu rotace kol na aerodynamické charakteristiky vozu 39
7.7.1 Porovnání koeficientů odporu vzduchu 39
7.7.2 Porovnání koeficientů přítlaku 41
7.7.3 Vizuální porovnání proudění 43

8. Moderní prvky pro zlepšení proudění vzduchu v oblasti kol 58
8.1 Deflektory nebo clony před koly 58
8.2 Speciálně tvarovaná kola 59
8.3 Zakrytá nebo částečně zakrytá kola 59
8.4 Vzduchová clona 60
9. Závěr 61
Seznam použitých zdrojů 62
Seznam použitých veličin a jednotek 64

1. Úvod

V současné době je v automobilovém průmyslu kladen velký důraz na aerodynamiku vozidla. Aerodynamika je věda, která se zabývá obtékáním vzduchu kolem těles. Vhodně řešená aerodynamika u osobních automobilů má za následek snížení odporu vzduchu, využití maximálního výkonu motoru a tím snížení spotřeby paliva a škodlivých emisí. Dále lze zajistit dobrou ovladatelnost a stabilitu vozu, chlazení brzd, snížit hladinu hluku při jízdě a v neposlední řadě redukovat špinění vozidla. U závodních vozů má aerodynamika zásadní vliv z důvodů jízdních vlastností, kdy při průjezdu zatáčkou potřebuje vozidlo dostatečný přítlak, maximálního výkonu i maximální rychlosti.

Existují dvě metody jak zkoumat aerodynamiku vozidla. Měřením v aerodynamickém tunelu nebo simulací pomocí výpočtové dynamiky tekutin - CFD (Computational Fluid Dynamics). Vlivem rozvoje výkonné výpočetní techniky nám CFD programy umožňují simulovat chování tekutin v reálných podmínkách. Tyto programy pracují na základě rovnic dynamiky tekutin, fyzikálních zákonů, teorie podobnosti, výpočtových algoritmů a numerických metod. Simulace v CFD programech jsou hlavně oproti měření v aerodynamickém tunelu méně ekonomicky náročné. V dnešní době se při vývoji karoserie používá současně CFD simulace i měření v aerodynamickém tunelu z důvodu upřesnění a ověření simulací.

Cílem této diplomové práce je provedení analýzy proudění kolem vozidla s rotací a bez rotace kol a se stacionární a pohybující se vozovkou a posouzení těchto vlivů na aerodynamické charakteristiky vozu. Pro zjištění těchto vlivů je vytvořen CFD model pro vozidlo s detailními koly a pro vozidlo se zjednodušenými koly, poté je proveden výpočet v programu FLUENT pro dvě varianty. První pro vozidlo se stacionárními koly a nepohybující se vozovkou, druhá pro vozidlo s rotujícími koly a pohybující se vozovkou. Tyto varianty jsou zrealizovány pomocí nastavení rozdílných okrajových podmínek. Vizuální porovnání je vytvořeno v programu CFD-Post.

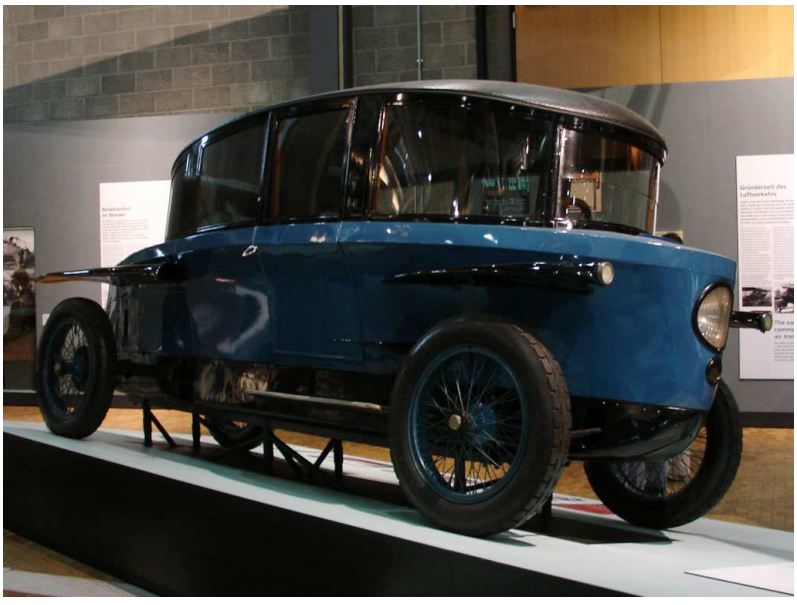
2. Vývoj aerodynamiky vozidel

První pokusy navržení karoserie vozidla s využitím aerodynamických principů byly na konci 19. století. V tomto období vznikaly prototypy vypadající jako torpédo, vzducholoď nebo loď. Na obr. 1. je vozidlo s názvem La Jamais Contente torpédového typu s elektrickým pohonem vytvořené Camillem Jenatzym. V roce 1899 překonalo toto vozidlo jako první v té době "magickou" rychlost 100 km/hod.



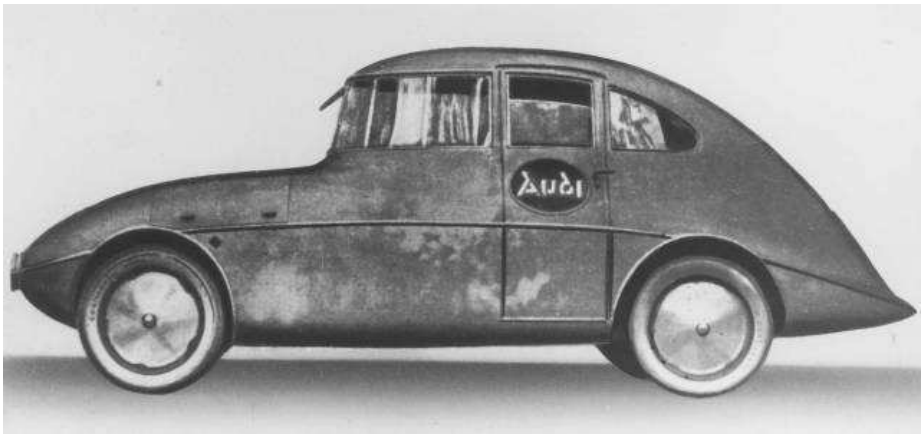
Obr. 1. Vozidlo torpédového typu La Jamais Contente [5]

Za první aerodynamický automobil lze ale považovat až vůz Tropfenwagen obr. 2, který představil Edmund Rumpler na berlínském autosalonu v roce 1921. Rumpler použil při vytváření tohoto vozu metody konstrukce z letectví. Vozidlo má z horního pohledu tvar kapky a je představitelem proudnicové éry vozidel. U dochovaného vozu byla naměřena hodnota koeficientu odporu vzduchu c_d=0.28, která je srovnatelná s hodnotami dnešních sériově vyráběných vozů.



Obr. 2. Limuzína Tropfenwagen [6]

Ve stejné době jako Rumpler začal vyvíjet proudnicové vozidla Paul Jaray. Tento konstruktér prováděl mnoho měření v aerodynamickém tunelu a upravoval tvar karoserií pro malý odpor vzduchu. Jeho automobily měly až poloviční koeficient odporu vzduchu než v té době konvenční vozidla. Jarayovo Audi Type K obr. 3.



Obr. 3. Audi Type K navržené P. Jarayem [7]

Jedním z prvních aerodynamických závodních automobilů bylo Ferrari 500 F2 obr. 4, kde konstruktéři redukovali pouze aerodynamickou odporovou sílu.



Obr. 4. Ferrari 500 F2[8]

Dalším zajímavým vozidlem, které bylo konstruováno pro malý aerodynamický odpor, je Auto Union Type C streamliner na obr. 5. Toto vozidlo v roce 1937 přesáhlo rychlost 400 km/hod.

Karoserie osobních i závodních vozů prošly od dob prvních aerodynamických automobilů řadou změn. Dnešní sériově vyráběné automobily jsou konstruovány s ohledem na mnoho požadavků, jako jsou malý aerodynamický odpor, jízdní vlastnosti, praktičnost a další.



Obr. 5. Auto Union Type C streamliner[9]

V tab. 1 je uveden vývoj konstrukce karoserie automobilů z hlediska snižování vzdušného odporu, který je charakterizován koeficientem aerodynamického odporu c_d.

Tab. 1 Rok výroby a koeficienty odporu vzduchu vybraných vozů

Automobil	Rok výroby	Koeficient odporu vzduchu c_D	Obr.
Daimler-Benz Type "Stuttgart"	1928	0,66	
Tatra 87	1937	0,36	
Škoda Octavia I	1996	0,3	
Mercedes-Benz E 2009	2009	0,25	

3. Základy aerodynamiky

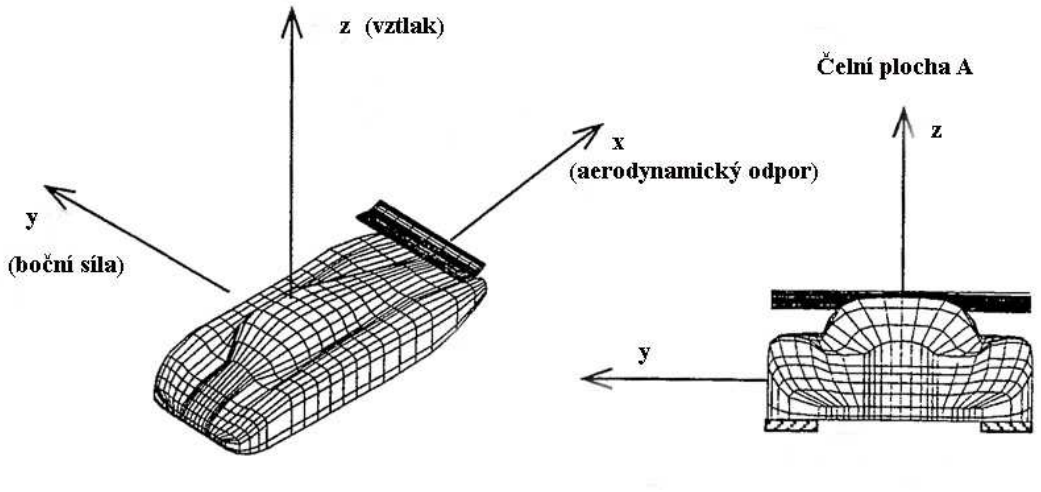
Aerodynamika je vědní obor, který se zabývá působením proudícího vzduchu na těleso. Tento obor mechaniky je důležitý hlavně v leteckém, automobilním i stavebním průmyslu.

Proudění vzduchu je relativní. Na těleso působí stále stejné síly, pokud je těleso vůči okolí v klidu a vzduch kolem něj obtéká nebo naopak.

Při obtékání tělesa vzduchem vznikne na povrchu tělesa vlivem nerovnoměrného stlačování vzduchu nerovnoměrné tlakové pole. To způsobuje silovou nerovnováhu. Existují tři základní druhy tlaku vzduchu na těleso: statický, dynamický a celkový. Jejich vztah je dán rovnicí (8).

3.1 Aerodynamické síly a koeficienty

Celková aerodynamická síla má obecný směr a velikost, je tedy nutné tuto sílu rozložit. Uvažujeme-li souřadný systém v těžišti vozidla, jak je ukázáno na obr. 6. tak aerodynamická odporová síla působí proti směru jízdy vozidla v ose x, aerodynamický vztlak působí ve směru osy z a boční síla ve směru osy y.



Obr. 6. Soustava aerodynamických sil[1]

Velikosti těchto složek jsou úměrné druhé mocnině relativní rychlosti, dále největšímu povrchu čelní plochy vozidla a příslušnému koeficientu, který představuje tvar vozidla.

Aerodynamická odporová síla: $$F_x = -\frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot {V_\infty}^2 \cdot A \quad (1)$$

Aerodynamická vztlaková síla: $$F_y = -\frac{1}{2} \cdot c_y \cdot \rho \cdot {V_\infty}^2 \cdot A \quad (2)$$

Aerodynamická boční síla: $$F_z = -\frac{1}{2} \cdot c_z \cdot \rho \cdot {V_\infty}^2 \cdot A \quad (3)$$

Jako aerodynamické charakteristiky vozu v této práci jsou uvažovány koeficienty odporu vzduchu v ose x a koeficient vztlaku v ose z. Vzorec pro výpočet koeficientů byl odvozen z rovnic (1) a (2).

Koeficient odporu vzduchu: $$c_D = c_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot {V_\infty}^2\cdot A} \quad (4)$$

Koeficient vztlaku: $$c_L = c_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\cdot\rho\cdot {V_\infty}^2\cdot A} \quad (5)$$

Koeficient přítlaku je záporná hodnota koeficientu vztlaku.

3.2 Vlastnosti tekutin, Bernoulliho rovnice

Pro pochopení základních principů aerodynamiky musíme znát vlastnosti tekutin. Potřebná síla k pohybu vozidla záleží na mnoha okolnostech, na teplotě, hustotě, tlaku a viskozitě.

Viskozita je fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny. Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo tělesa v kapalině. Viskozita způsobuje vznik mezní vrstvy, viz. níže.

Při teplotě 20°C a tlaku 101 325 Pa je hustota vzduchu 1,22 kg/m^3 a viskozita 1,8·10^{-5} Ns/m^2.

Bernoulliho rovnice

Zatížení aerodynamickými silami je závislé na rychlosti proudění v blízkosti povrchu obtékaného tělesa. Tato rychlost souvisí s velikostí tlaku na povrchu tělesa. Pro ustálené proudění a ideální případ beze ztrát popisuje Bernoulliho rovnice vztah mezi rychlostí proudění a tlakem na povrchu tělesa.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = const \quad (6)$$

Rovnice (7) slouží k porovnání rychlostí a tlaků ve dvou různých bodech pro spojité proudění s konstantní hustotou proudící tekutiny. V tomto případě lze tuto rovnici použít pro libovolný bod proudění.

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{{V_A}^2}{2} = \frac{p_B}{\rho} + \frac{{V_B}^2}{2} \quad (7)$$

Následující tvar Bernoulliho rovnice popisuje složení celkového tlaku.

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + p + \rho g h = p_{celk,konst} \quad (8)$$

$\frac{1}{2}\rho V^2$ je dynamický tlak způsobený rychlostí proudění, p je statický tlak a složka $\rho g h$ je hydrostatický tlak.

3.3 Typy proudění

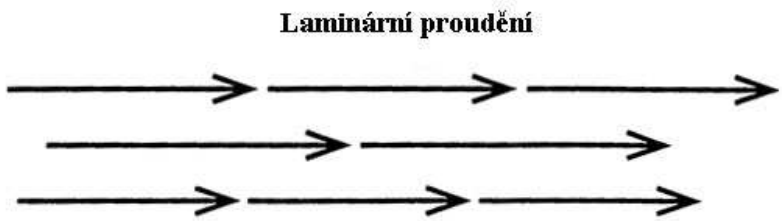
Částice proudícího vzduchu se spojují do proudnic. Jejich vizualizace je v aerodynamických tunelech uskutečněna obarveným kouřem, který má co nejvíce podobné vlastnosti jako vzduch, v CFD simulacích lze tyto trajektorie zobrazit.

Typy proudění:

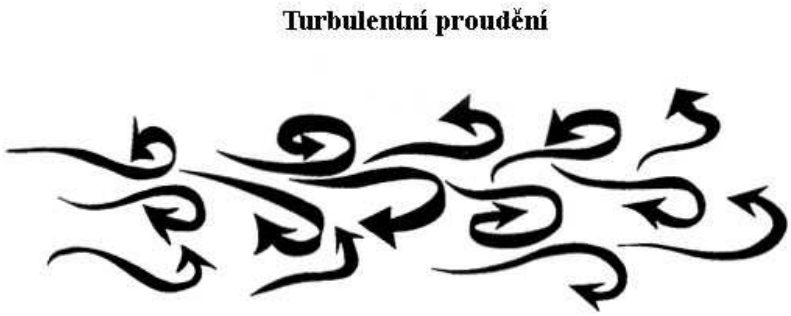
Laminární (ustálené) - proudnice jsou rovnoběžné, částice se posouvají, neprotínají se, viz obr. 7 A.

Turbulentní (vířivé) - proudnice se vlivem prostředí roztáčejí a následně se kříží. Toto proudění způsobuje vznik vírů, viz obr. 7. B.

A.



B.



Obr. 7. Laminární a turbulentní proudění[1]

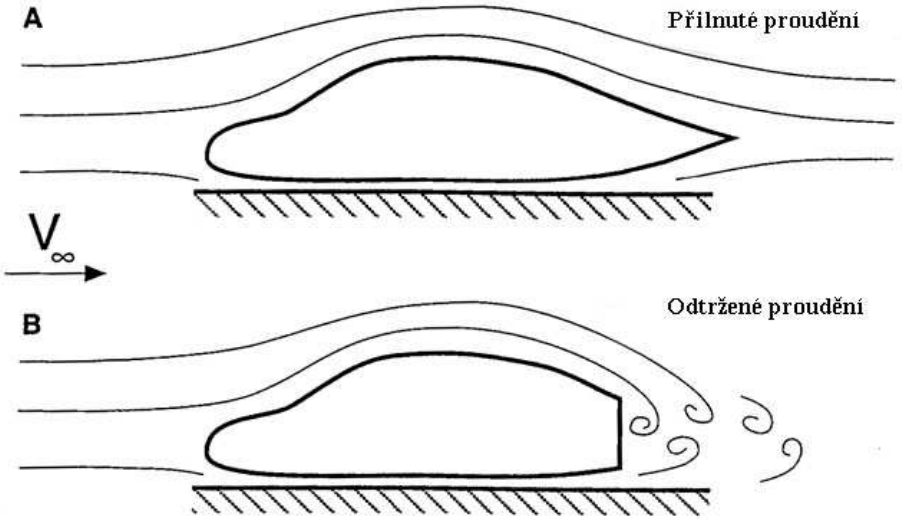
Přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním je dán Reynoldsovým číslem (Re).

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \tag{9}$$

kde V je rychlost proudění, d je charakteristický rozměr a ν je kinematická viskozita.

Charakteristický rozměr u automobilů je velký, a proto dochází při obtékání vždy k turbulentnímu proudění.

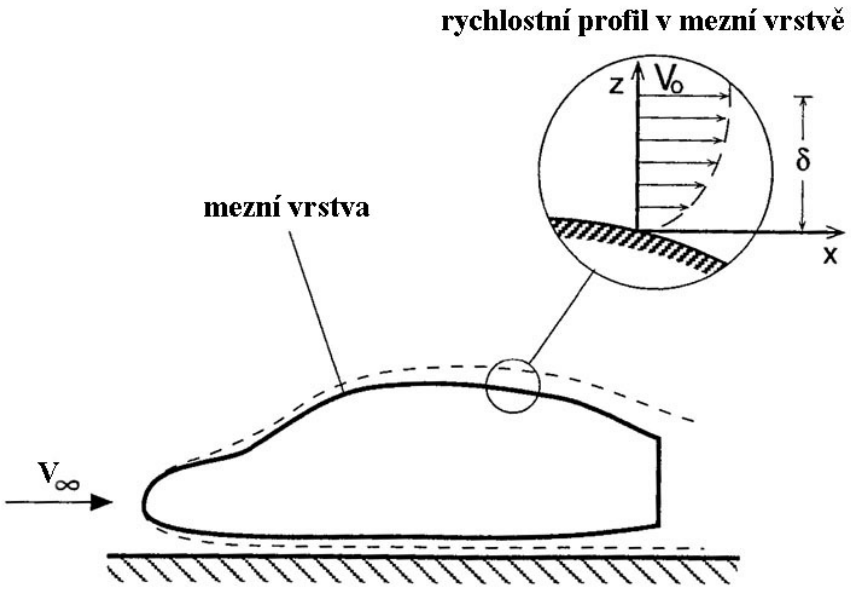
Proudění dále můžeme rozdělit na přilnuté a odtržené. Jestliže proudnice přesně opisuje tvar povrchu vozidla, tak jde o přilnuté proudění, přilnuté proudění je znázorněno na obr. 8. A. Pokud neopisuje tvar vozidla tak se jedná o proudění odtržené. Odtržené proudění vzniká především v zadní části automobilu a jeho počátek je v místě odtržení mezní vrstvy, viz obr. 8. B. Mezní vrstva je popsána v následující podkapitole.



Obr. 8. Přilnuté a odtžené proudění[1]

3.4 Mezní vrstva

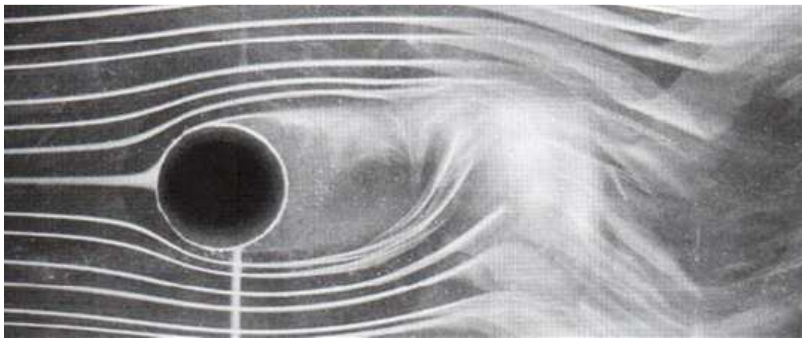
Mezní vrstvu vytváří několik proudnic vzduchu obtékající karoserii vozu v závislosti na rychlosti. Na povrchu obtékaného vozidla je rychlost proudění nulová. Proudnice mění svou rychlost od nuly až po určité maximum. Tato měnící se rychlost je způsobená viskozitou vzduchu, kdy vzniká tření mezi vrstvami vzduchu. Na obr. 9 je znázorněn vznik mezní vrstvy.



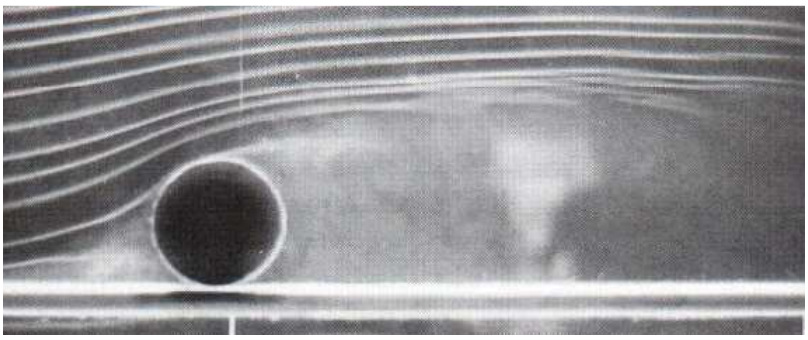
Obr. 9. Vznik mezní vrstvy [1]

3.5 Obtékání kol, Magnusův jev

Jedním z nejdůležitějších prvků ovlivňující aerodynamiku vozidla jsou kola. Obtékání kol můžeme zjednodušeně nahradit obtékáním válce. Na obr. 10 je ukázáno proudění okolo válce ve volném prostoru. Obtékání válce s deskou nahrazující vozovku je ukázáno na obr. 11.

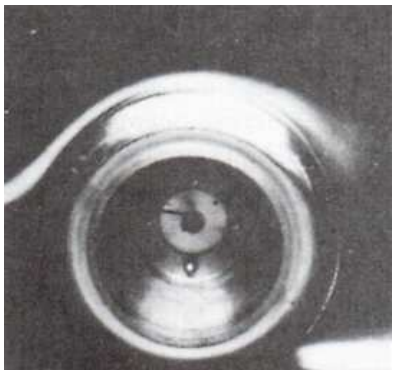


Obr. 10. Obtékání válce ve volném prostoru [1]

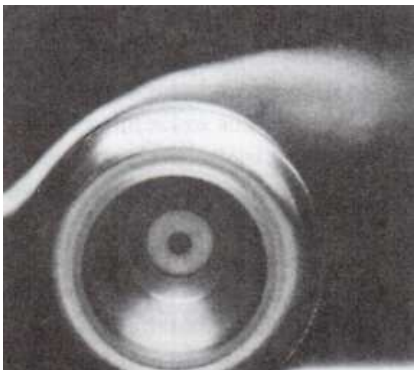


Obr. 11. Obtékání válce s deskou [1]

Důležitý je vliv rotace kol. Obtékání v případě rotujícího a stacionárního kola se liší, vizualizace obtékání stacionárního kola je ukázáno na obr. 12. a na obr. 13. je ukázáno obtékání rotujícího kola. Zde můžeme vidět rozdíl mezi místy odtržení přilnutého proudění.



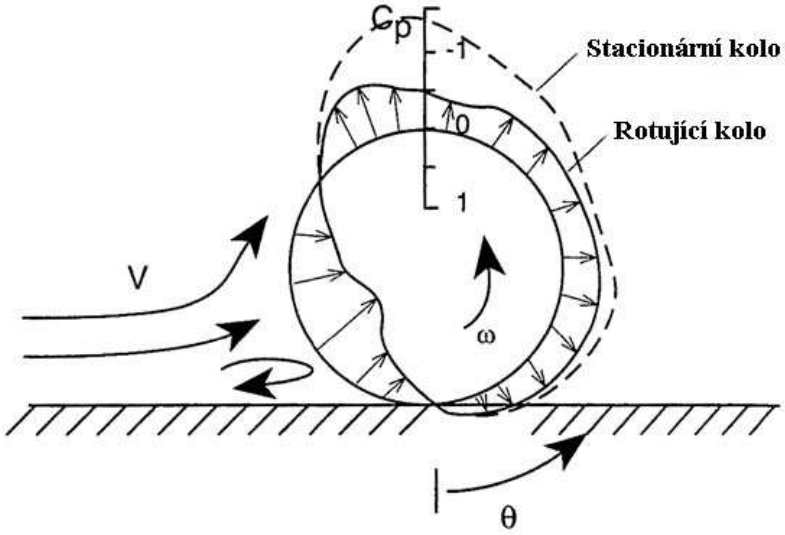
Obr. 12. Obtékání stacionárního kola[1]



Obr. 13. Obtékání rotujícího kola[1]

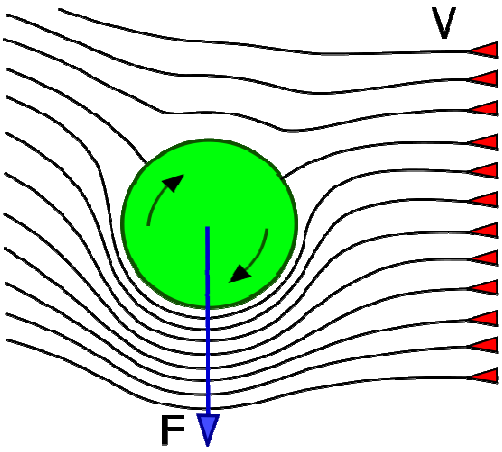
U stacionárního kola dojde k odtržení proudění v hodnotě úhlu $\theta \sim 160°$ na rozdíl od rotujícího kola, kde je hodnota úhlu θ vyšší. Celkové rozložení tlaku na povrchu kola a znázornění úhlu θ je na obr. 14. Rozložení tlaku je charakterizováno koeficientem tlaku $C_{P.}$

Kladná hodnota tohoto koeficientu na přední části kola a záporná v zadní části způsobuje aerodynamický odpor. Na horní straně stacionárního kola je tento koeficient záporný, vzniká zde vztlak. U rotujícího kola je tento vztlak menší a může se dostat i do záporných hodnot, v tomto případě by se jednalo o přítlak. Toto je zapříčiněno vznikem Magnusova jevu.

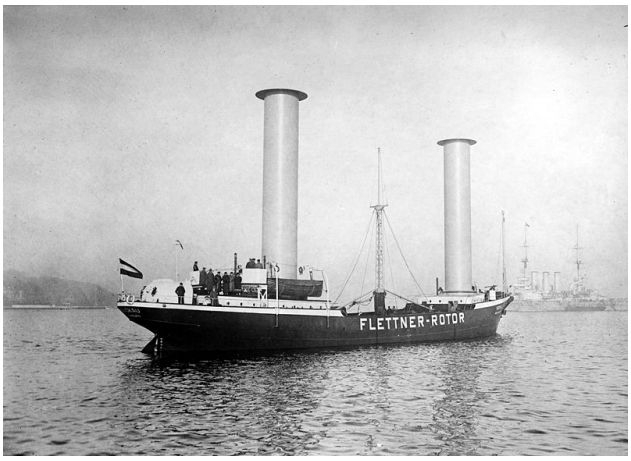


Obr. 14. Rozložení tlaku na povrchu kola[1]

Magnusův jev je zjednodušeně vznik boční síly při obtékání rotujícího tělesa proudícím plynem nebo kapalinou. Tento jev je využíván v balistice a v lodním průmyslu, kde vynálezce Anton Flettner využil Magnusova jevu a zkonstruoval Loď Buckau poháněnou vysokými rotory. I v různých odvětvích sportu si našel tento jev uplatnění, např. k vybočování drah golfových nebo baseballových míčků.



Obr. 15. Vznik boční síly Magnusovým jevem [17]



Obr. 16. Loď Buckau [19]

4. Metody stanovení aerodynamických charakteristik vozidla

Zjišťování aerodynamických charakteristik se provádí dvěma metodami, měřením a simulací. Výrobci automobilů dnes používají obě tyto metody, kdy nejprve simulují proudění vzduchu v CFD softwaru a poté měří v aerodynamickém tunelu, aby ověřili a posoudili výsledky získané simulacemi.

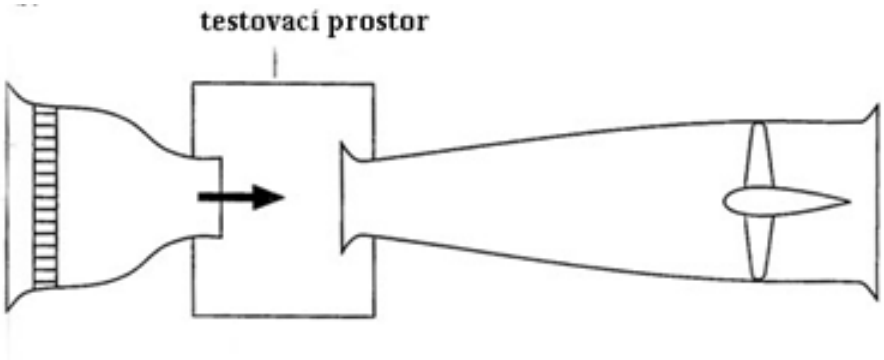
4.1 Měření

Měření se provádí v aerodynamickém tunelu, kde je skutečný vůz nebo model umístěn v měřícím prostoru. Proud vzduchu je vyvolán velkým ventilátorem. Hodnoty vlhkosti a teploty vzduchu se během měření přesně udržují. Zobrazení proudnic se provádí obarveným kouřem s co nejpodobnějšími vlastnostmi jako vzduch. Konečným výsledkem měření je koeficient odporu vzduchu.

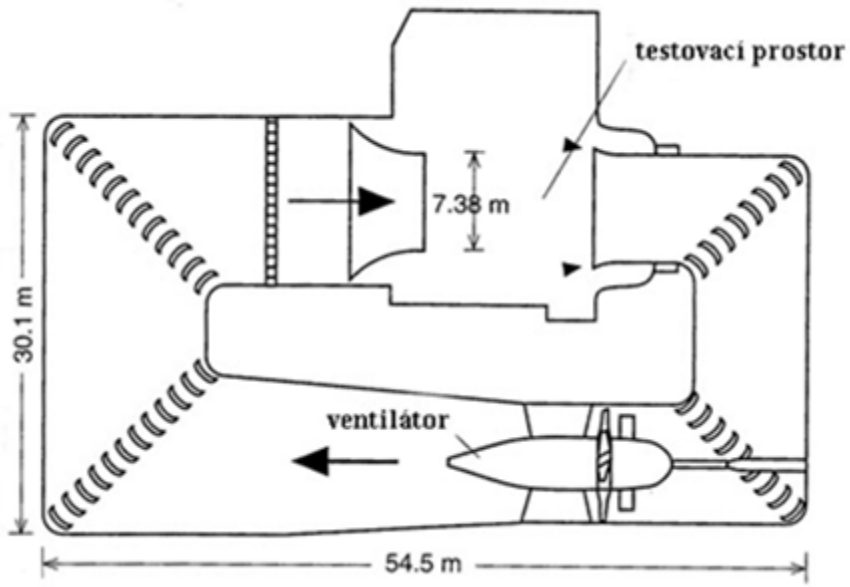


Obr. 17. Aerodynamický tunel BMW [10]

Jsou dva základní druhy konstrukce aerodynamických tunelů, s otevřeným a uzavřeným okruhem. Jejich konstrukce je znázorněna na obr. 18. a obr. 19.



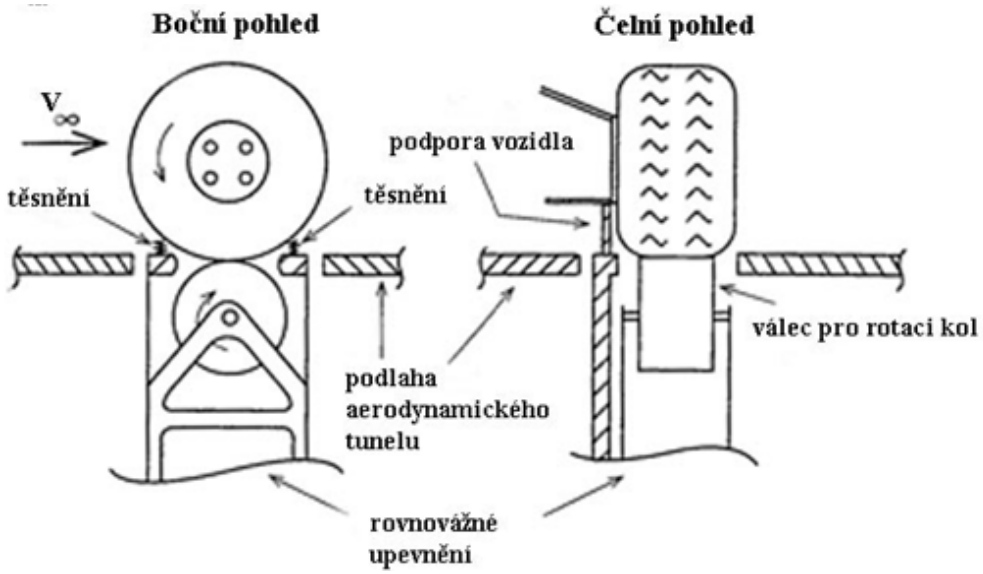
Obr. 18. Schéma konstrukce aerodynamického tunelu s otevřeným cyklem [1]



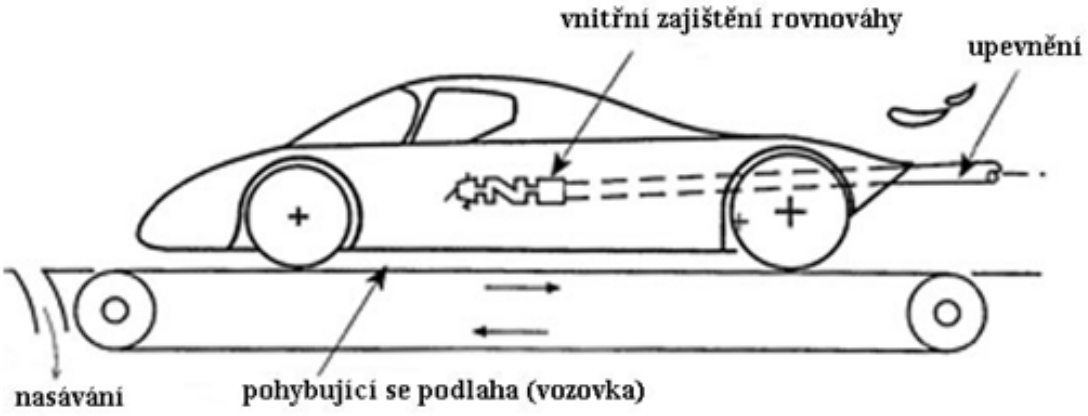
Obr. 19. Schéma konstrukce aerodynamického tunelu s uzavřeným cyklem [1]

Výsledky měření v aerodynamickém tunelu na vozidle se stacionárními koly jsou zatíženy určitou chybou. Jedoucímu vozidlu v reálném prostředí rotují kola, tudíž moderní aerodynamické tunely mají zařízení pro realizaci otáčení kol nebo i pro pohybující se vozovku.

Pro tento účel existují dva základní způsoby realizace rotujících kol vozidla. Prvním je usazení kol na rotující válce, při kterém musí být náboj kola rotačně připevněn k pevné části obr. 20. Druhým způsobem je pohybující se pás pod vozem, kdy je pevně upevněna karoserie vozidla na obr. 21.



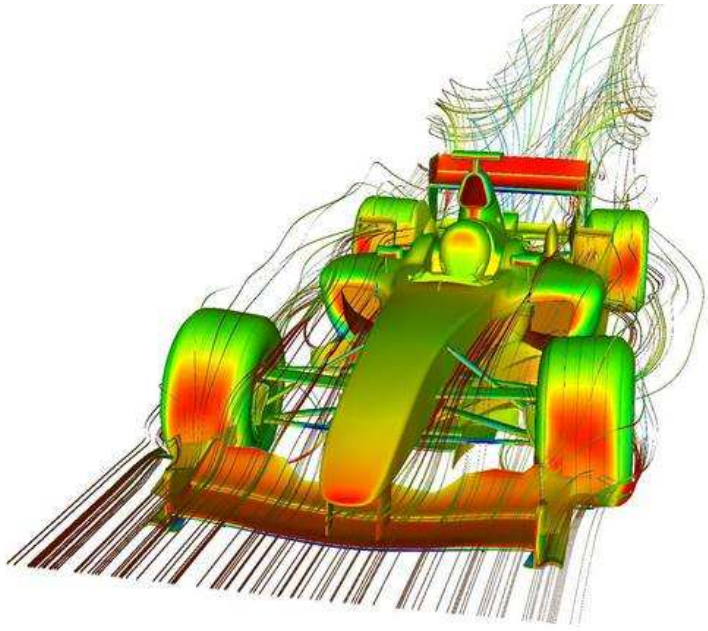
Obr. 20. Zajištění rotace kol na válcích [1]



Obr. 21. Zajištění rotace kol pohybujícím se pásem [1]

4.2 Simulace

Simulace pomocí výpočtové dynamiky tekutin - CFD (Computational Fluid Dynamics) se provádí v CFD softwarech, které nabízejí řadu výhod oproti měření v aerodynamickém tunelu. Z CFD simulací získáme detailní informace o úloze, simulace jsou rychlejší a ekonomicky méně náročné. Tyto programy pracují na základě rovnic dynamiky tekutin, fyzikálních zákonů, teorie podobnosti, výpočtových algoritmů a numerických metod.



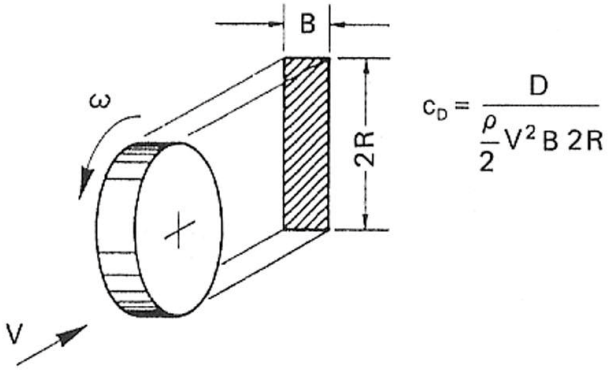
Obr. 22. Vizuální vyhodnocení získané CFD simulacemi [11]

4.2.1 Rozdělení komerčních CFD softwarů:

- Fluent- je nejznámějším a nejrozšířenějším CFD softwarem
- CFX- pracuje pod programem ANSYS
- Star CD/CCM- v tomto programu lze vytvořit polyhedrální sítě
- CFDesign

5. Aerodynamika rotujících kol

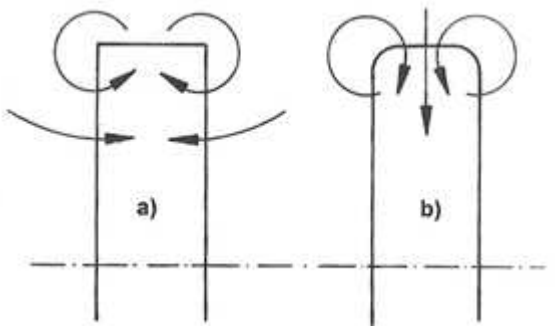
Rotace samostatného kola díky Magnusovu jevu zapříčiní menší koeficient aerodynamického odporu i koeficient vztlaku než u kola stacionárního. Na obr. 23. je zjednodušené kolo s hlavními rozměry a v tabulce jsou hodnoty koeficientu odporu vzduchu a koeficientu vztlaku.



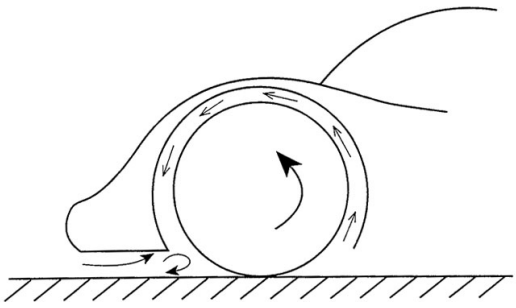
	$\omega = 0$	$\omega = \frac{V}{R}$	
c_D	0.593	0.579	**standartní kolo**
c_L	0.272	0.180	

Obr. 23. Vliv rotace kola v prostoru na koeficent odporu vzduchu a koeficient vztlaku [2]

Z pohledu zezadu na rotující kolo, můžeme vidět ovlivnění zaoblení hran pneumatiky na proud vzduchu za kolem. Proud vzduchu vyvolaný rotací kol je na obr. 24. a proudění v podběhu vozidla je na obr. 25.

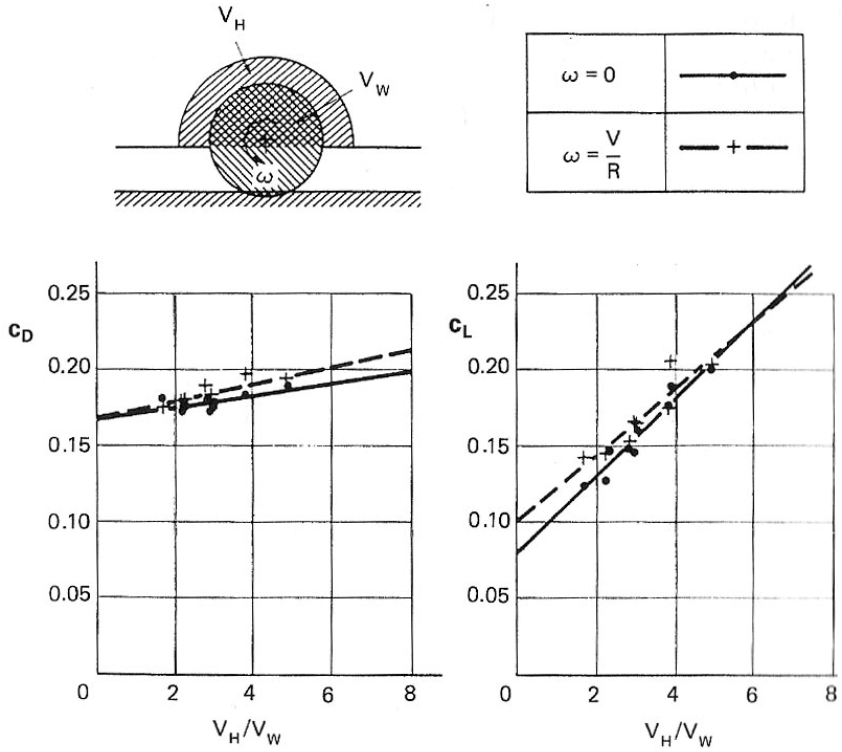


Obr. 24. Proud vzduchu za rotujícím kolem [2]



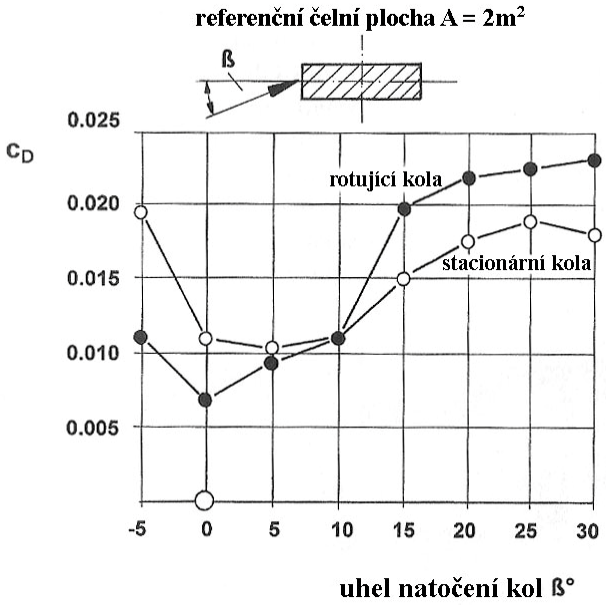
Obr. 25. Proud vyvolaný rotací kola v podběhu [1]

Koeficient odporu vzduchu a vztlaku záleží na objemech kol a podběhů. Závislost těchto parametrů je na obr. 26. Z tohoto obr. vyplývá, že čím více převyšuje objem podběhu objem kol, tím se zvyšuje koeficient odporu vzduchu.



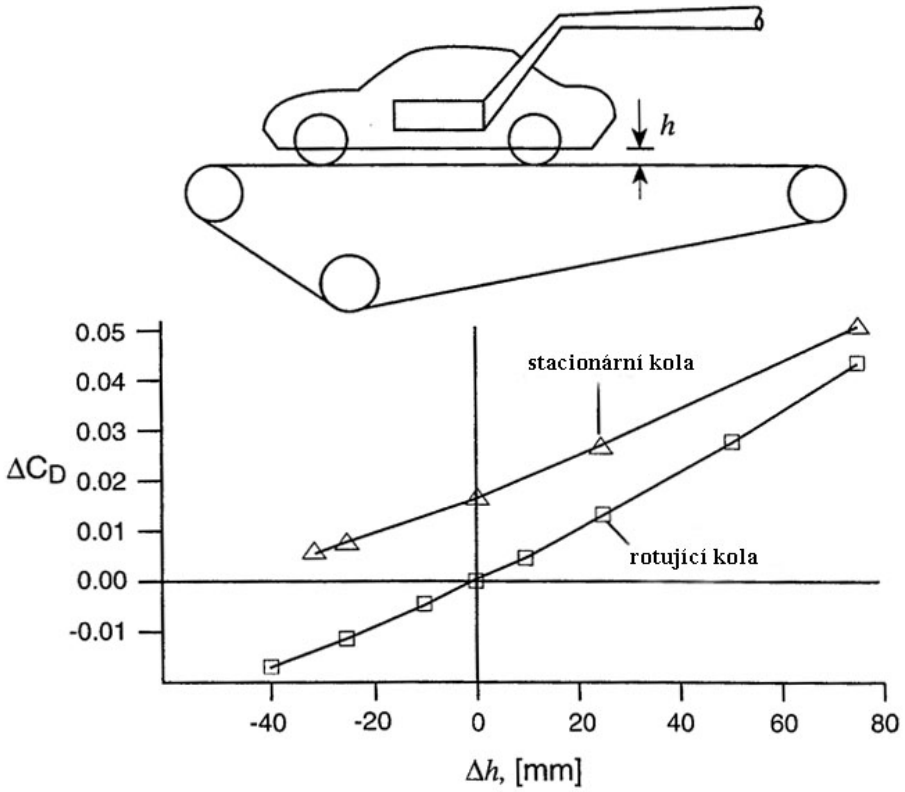
Obr. 26. Závislost koeficientů odporu vzduchu a koeficentu vztlaku na objemech částí[2]

Koeficient odporu vzduchu při zatáčení závisí na úhlu natočení kol, jak lze vidět na obr. 27. V mé úloze nebylo natočení kol simulováno, simulace byly provedeny pouze pro jízdu přímo.



Obr. 27. Závislost koeficentu odporu vzduchu na natočení kol vozidla [2]

Důležitý je také vliv světlé výšky vozidla, jak ovlivňuje velikost světlé výšky automobilu koeficient odporu vzduchu je znázorněno na obr. 28. Čím je tedy světlá výška menší, tím je menší odpor vzduchu jak pro stacionární tak i pro rotující kola. Při konstrukci vozidla ale musíme počítat s praktičností a použitím vozidla na reálných cestách.

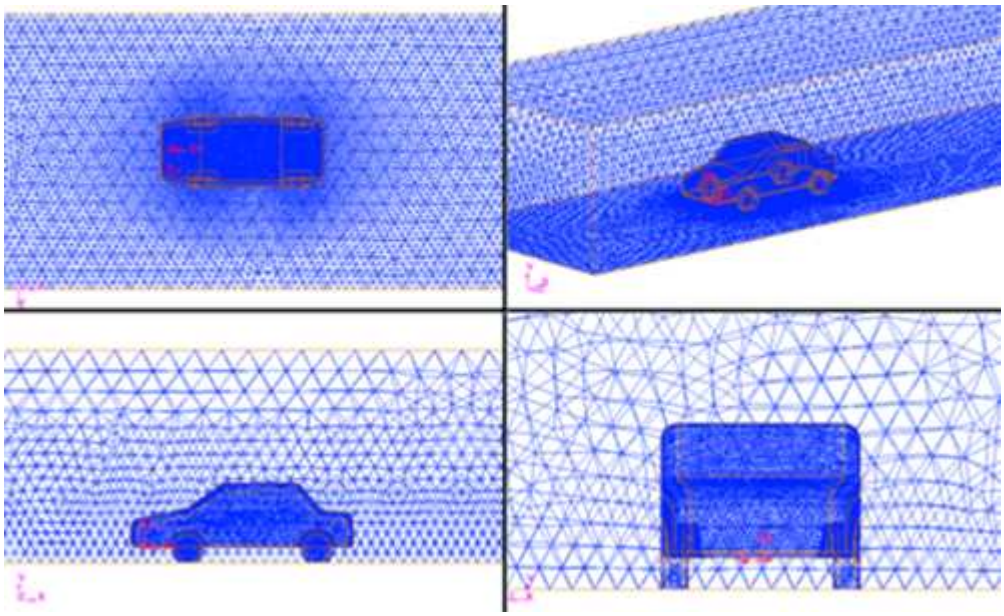


Obr. 28. Závislost koeficientu odporu na světlé výšce vozidla [1]

6. Testovací výpočet

Pro ukázku práce v CFD programu byl vytvořen zjednodušený model vozidla v aerodynamickém tunelu, na kterém je ukázán postup vytvoření sítě v programu Gambit a výpočet aerodynamického odporu a vztlaku v programu Fluent. Výpočet byl proveden pro dva typy úloh, pro vozidlo se stacionárními koly a pro vozidlo s rotujícími koly a pohybující se vozovkou.

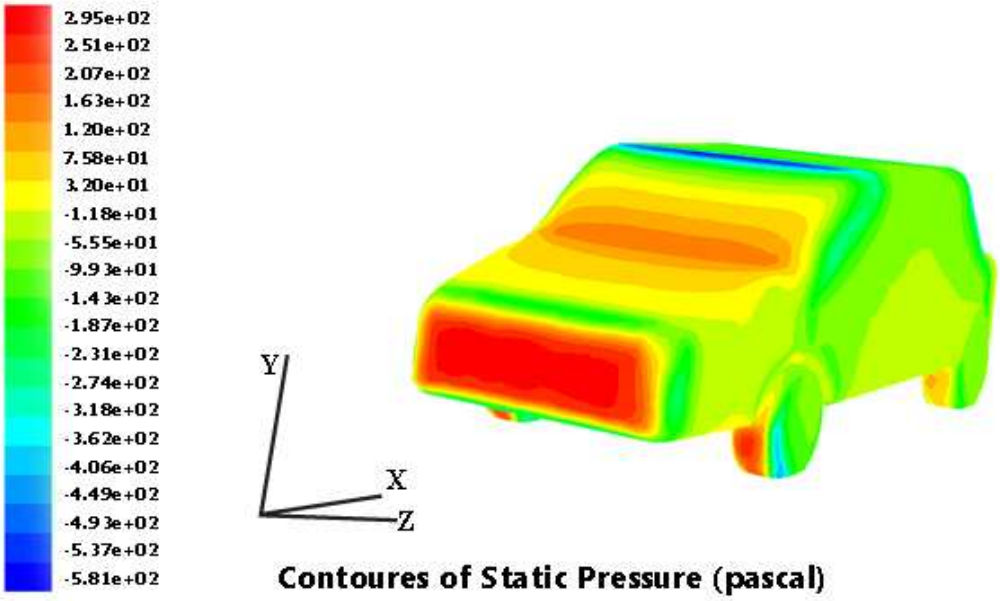
Model vozidla byl zhotoven v programu Pro/Engineer. Následně byl model importován do programu Gambit, kde byly spojeny některé části povrchu modelu a byl zde vytvořen aerodynamický tunel. Přední plocha tunelu byla pojmenována inlet a zadní outlet. Následně byla vytvořena povrchová síť vozidla a poté výpočtová objemová síť, která je ukázána na obr. 29.



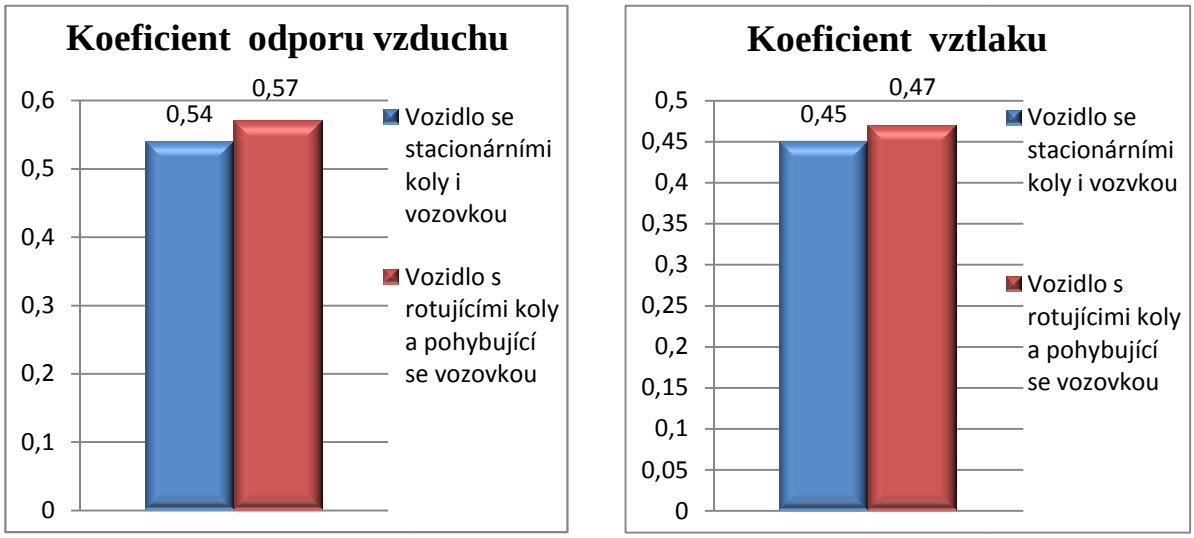
Obr. 29. Vytvořená objemová síť v programu Gambit

Do programu Fluent byla tato síť importována v souboru fluent.msh a byly zde zadány parametry výpočtu, jako např. typ proudění, proudící materiál - vzduch, byly nastaveny okrajové podmínky pro obě úlohy. Následně se provedla inicializace výpočtu na rychlost 30 m/s, nastavení počtu iterací a výpočet byl spuštěn. Výsledky ve formě koeficientů odporu vzduchu a vztlaku jsou v grafu 1.

Na obr. 30. je rozložení tlaku na karoserii tohoto vozidla. Největší tlak je na přední části vozu, na předních kolech a na čelním skle. Program Fluent vypočítal aerodynamické odporové a vztlakové síly i příslušné koeficienty.



Obr. 30. Rozložení tlaku na karoserii zjednodušeného modelu



Graf 1. Výsledky koeficientu odporu vzduchu (vlevo), výsledky koeficientu vztlaku (vpravo)

Z výsledků vzorového příkladu vyplývá, že vozidlo s rotujícími koly má větší koeficient odporu vzduchu a větší koeficient vztlaku než vozidlo s koly stacionárními. Důvodem je rozvíření vzduchu v podběžích vozidla. Během práce s programy Gambit a Fluent 6 se objevil na trhu nový ANSYS 12, pod kterým funguje nový Fluent a program pro tvorbu výpočtových sítí ICEM CFD. Z důvodu uživatelsky příjemnějšího ovládání i rozhraní jsem zvolil k vytvoření sítě pro hlavní úlohu program ICEM CFD místo programu Gambit.

7. Výpočet aerodynamických charakteristik zvoleného vozu

V následujících podkapitolách je popsáno zvolené vozidlo, metodika výpočtu a postup práce zjištění vlivu rotace kol na aerodynamické charakteristiky vozidla.

7.1 Popis zvoleného vozidla

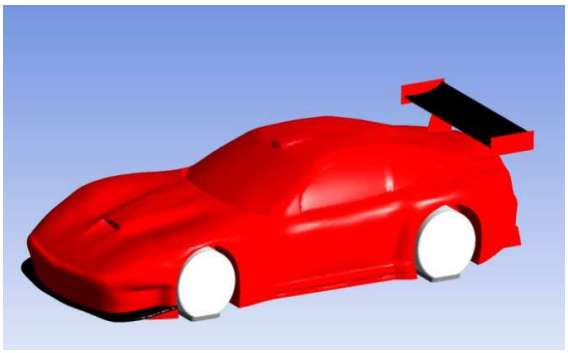
Jako vozidlo, u kterého byly posuzovány aerodynamické charakteristiky v závislosti na nastavení okrajových podmínek, bylo použito Ferrari Maranello. Model na obr. 31. vznikl kontaktním skenováním na reálném vozidle a dále byl upraven v programu Pro/Engineer. Jelikož je model symetrický, byl výpočet proveden s polovinou modelu. Bylo to také výhodné z důvodu menšího množství elementů ve výpočtové síti. Následující hodnoty platí pro sériové provedení Ferrari Maranello.

Výkon: 379kW (515k)

Hmotnost:1730kg

Maximální rychlost:325km/hod

Koeficient aerodynamického odporu:0,33



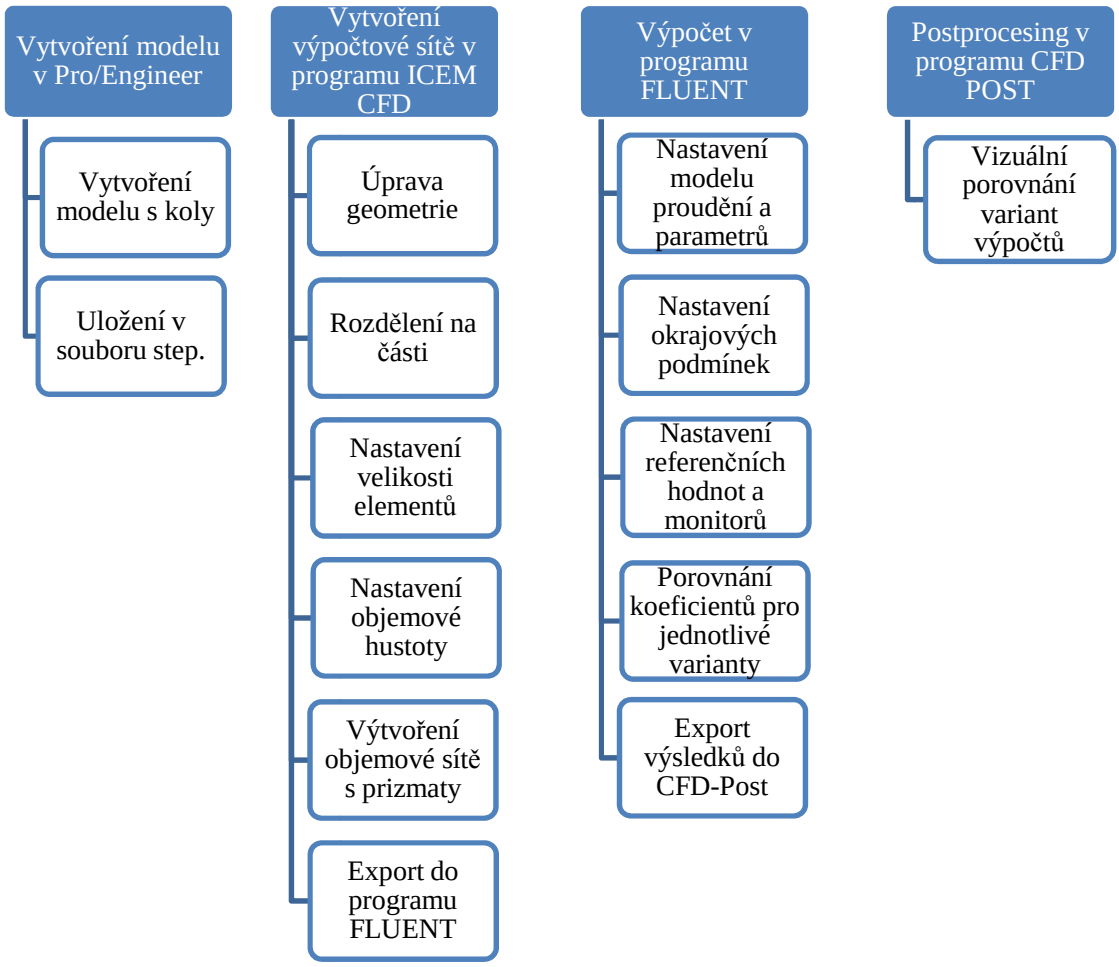
Obr. 31. Model Ferrari Maranello



Obr. 32. Sériové Ferrari Maranello [12]

7.2 Metodika výpočtu aerodynamických charakteristik

Ke zjištění aerodynamických charakteristik a vlivu nastavení okrajových podmínek výpočtu bylo zapotřebí těchto úkonů.



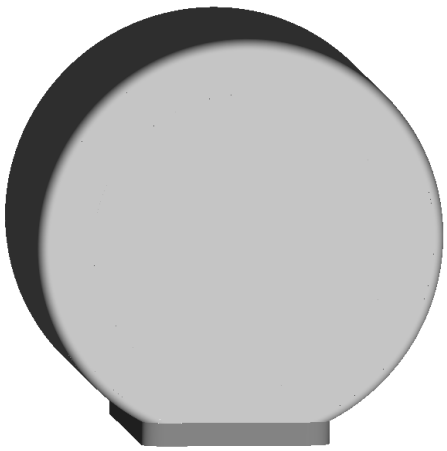
Obr. 33. Metodika výpočtu aerodynamických charakteristik a postup porovnání

Model byl upraven v programu Pro/Engineer a byl importován do programu ICEM CFD. V tomto programu byl vytvořen aerodynamický tunel a byla zde vytvořena výpočtová síť. Poté byl proveden výpočet v programu Fluent pro následující dvě varianty. První pro vozidlo se

stacionárními koly a stacionární vozovkou, druhá pro vozidlo s rotujícími koly a pohybující se vozovkou. Tyto varianty byly zrealizovány pomocí nastavení jiných okrajových podmínek. Vizuální porovnání bylo vytvořeno v programu CFD-Post. Postup práce v programech ICEM CFD, Fluent a CFD-Post je ukázán níže.

7.3 Použité modely kol

Úpravy v programech Pro/Engineer a ICEM CFD byly za účelem vytvoření modelu se zjednodušenými koly obr. 34. a modelu s detailními koly viz obr. 35. Pásky pod koly jsou v modelu z důvodu vytvoření velmi malých elementů sítě v místě styku kol s vozovkou. V programu ICEM byly tedy vytvořeny výpočtové sítě pro každý model.



Obr. 34. Zjednodušené kolo



Obr. 35. Detailní kolo

7.4 Vytvoření výpočtové sítě v programu ICEM CFD

Program ICEM CFD byl použit pro vytvoření výpočtové sítě. Tento program k vytvoření sítí využívá následující metodiky síťování:

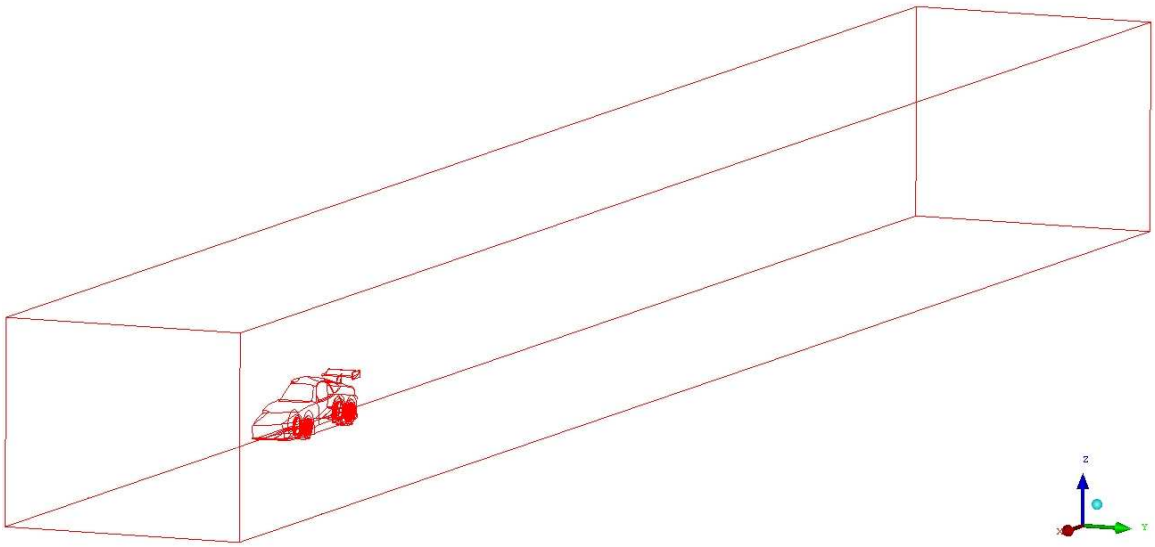
- Shell Meshing - pro vytvoření povrchových sítí
- Volume Mesh + Prism - pro vytvoření objemových sítí s prizmaty
- Blocking - pro vytvoření strukturovaných sítí

Byly využity první dvě metody. Shell Meshing k vytvoření povrchové sítě na náběžné hraně přítlačného křídla a Volume Mesh + Prism k vytvoření objemové sítě v celém tunelu a k vytvoření prizmat na silnici, vozidlu a kolech. Postup vytvoření sítě je v následujících podkapitolách.

7.4.1 Import a úprava geometrie

Do programu ICEM CFD byla naimportována geometrie v souboru *.step příkazem *File-Import Geometry-STEP/IGES*. Kontrola křivek modelu se provádí příkazem ve stromu *curves>color by count*, kdy při správné geometrii musí být křivky hranicí právě dvou ploch. Model musí být uzavřený objem. Geometrie aerodynamického tunelu byla prodloužena z

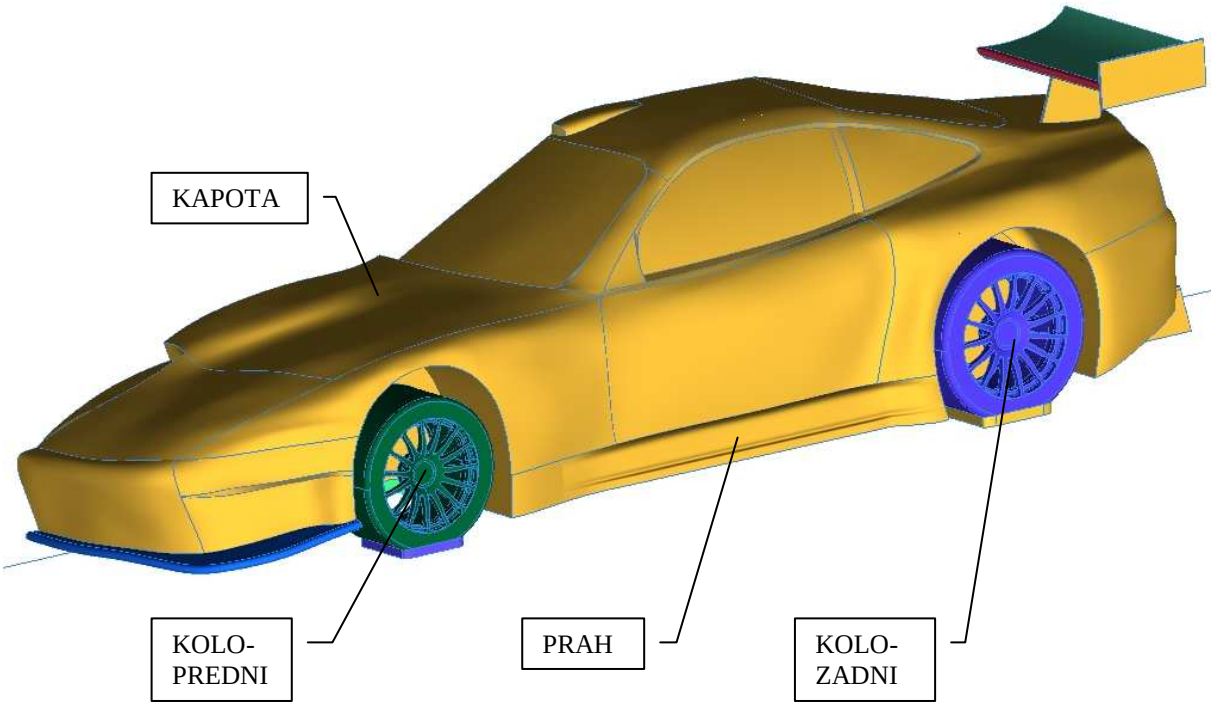
důvodu dobrého ustálení proudění, přebytečné křivky a body byly smazány, ovlivňovaly by totiž výpočtovou síť, geometrie po úpravě je na obr. 36.



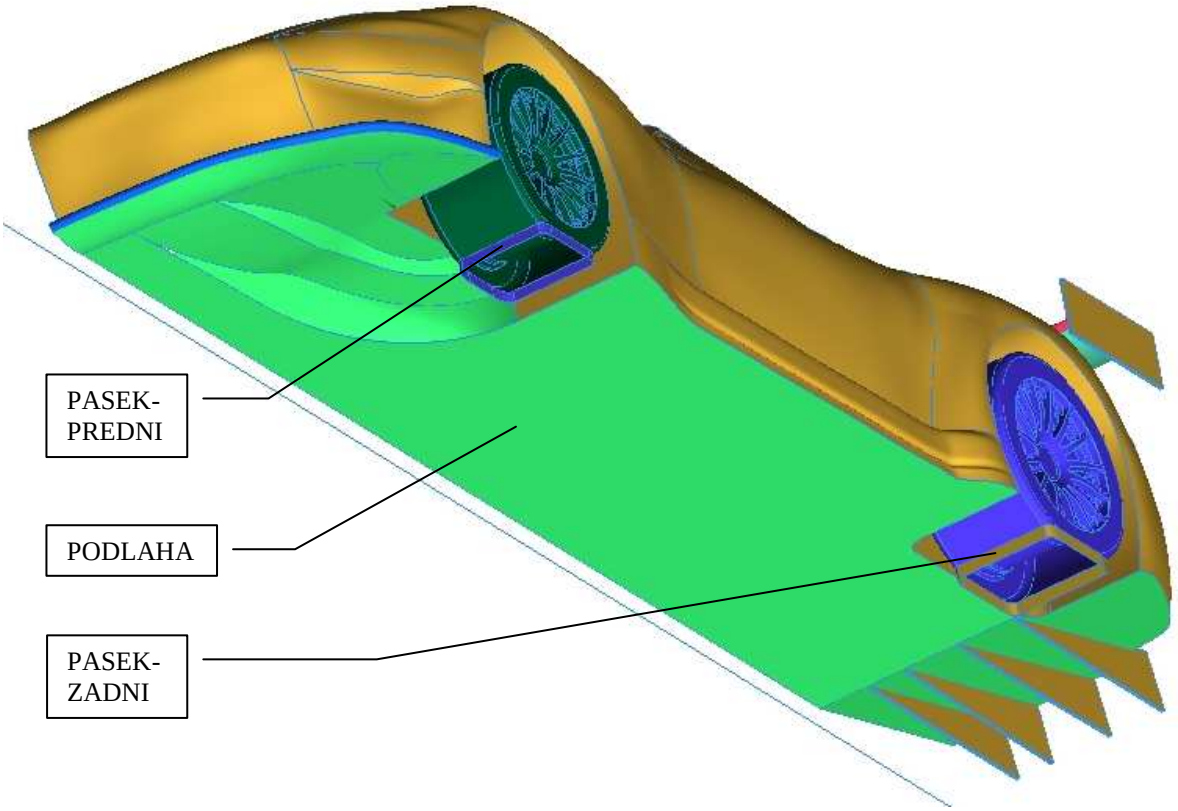
Obr. 36. Importovaná a upravená geometrie

7.4.2 Rozdělení modelu na části a nastavení velikosti elementů

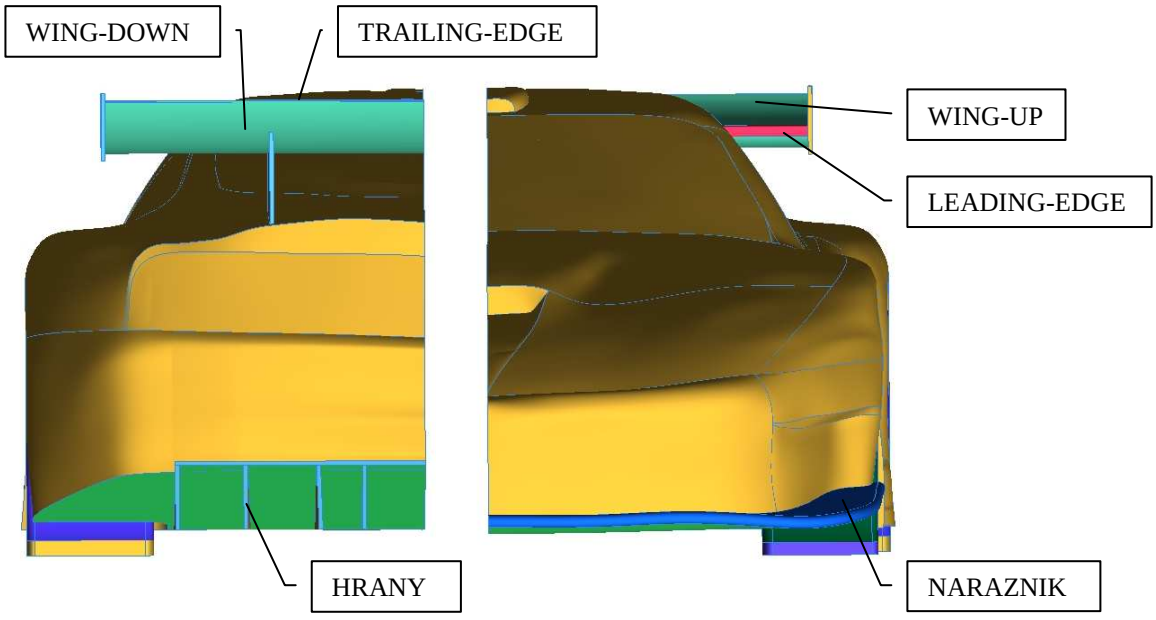
Povrchy byly rozděleny na jednotlivé prvky příkazem ve stromu *parts>create part*. Toto rozdělení bylo z důvodu lepší orientace v modelu a rozdílné velikosti elementu na jednotlivých plochách modelu (částech). Model rozdělený na jednotlivé části je na obr. 37.



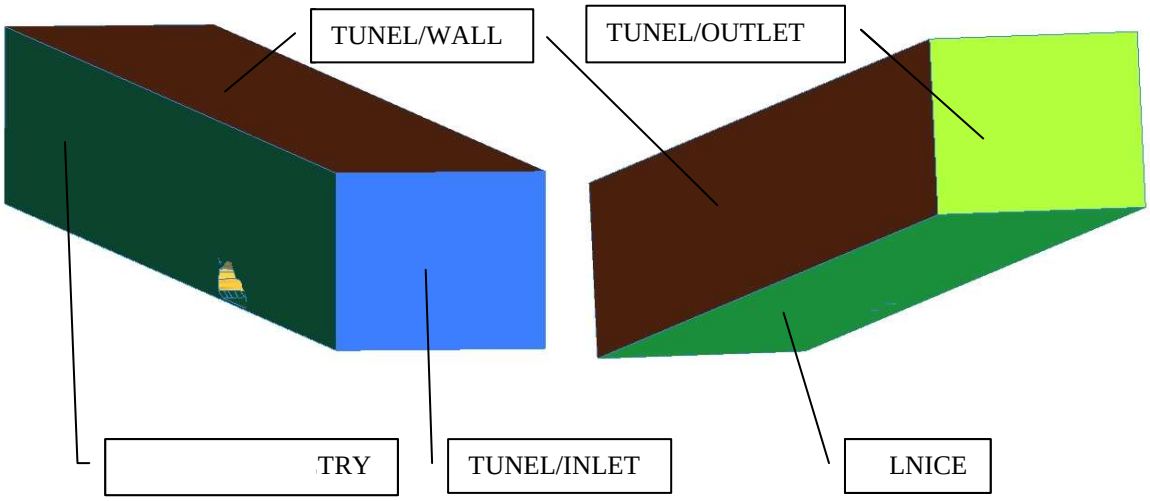
Obr. 37. Rozdělení modelu na části, šikmý pohled zeshora



Obr. 38. Rozdělení modelu na části, šikmý pohled zespodu

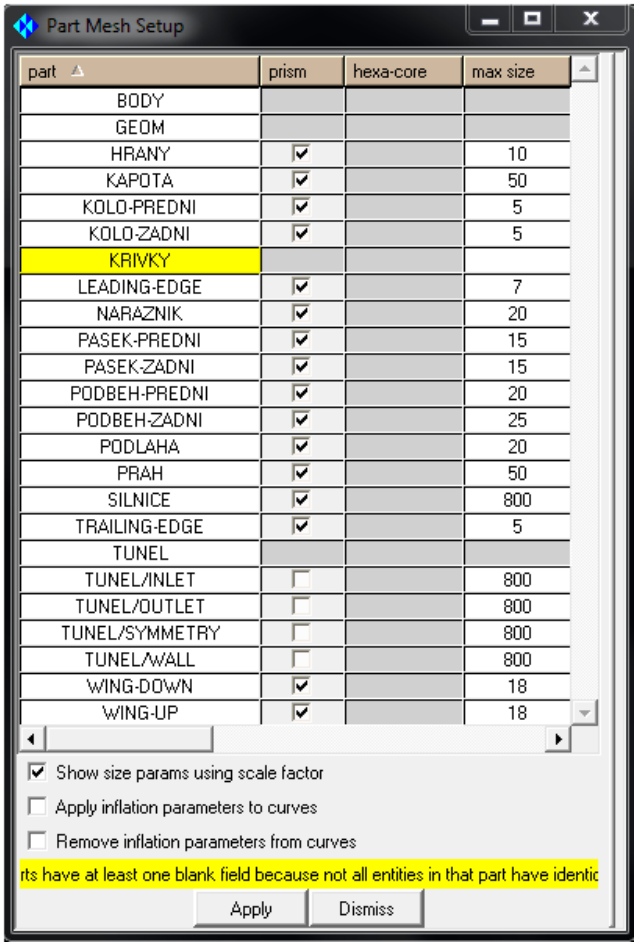


Obr. 39. Rozdělení modelu na části, zadní pohled (vlevo), čelní pohled (vpravo)



Obr. 40. Rozdělení modelu tunelu na části, šikmý pohled zepředu(vlevo), šikmý pohled zezadu(vpravo)

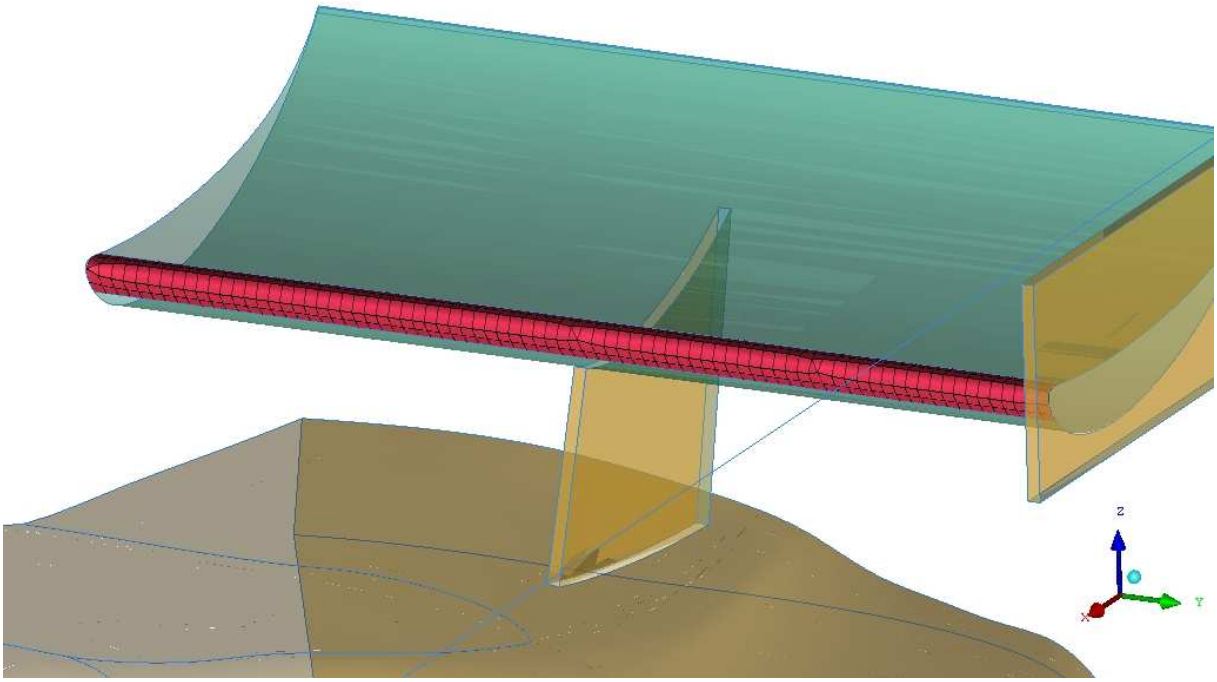
Nastavení velikosti elementů sítě na jednotlivých částech se zadává příkazem *Mesh>Part Mesh Setup*. Potvrzení nastavení se provádí tlačítkem *apply*. Různé velikosti elementu pro jednotlivé části modelu jsou ukázány na obr. 41.



Obr. 41. Velikosti elementů pro jednotlivé prvky

7.4.3 Vytvoření povrchové sítě na náběžné hraně přítlačného křídla

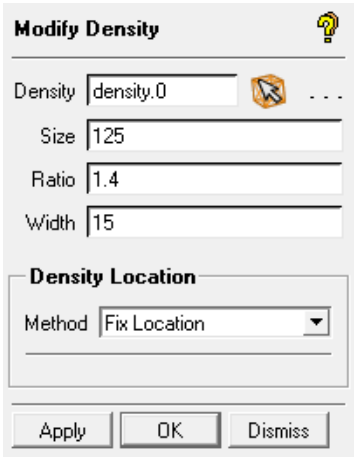
Nejprve byly křivky rozděleny na malé úseky příslušné délky, poté byla na křivky zadána funkce *Autoblock*, která umožňuje vytvoření mapované sítě. Byla vytvořena mapovaná povrchová síť na náběžné hraně přítlačného křídla (část leading edge) pomocí příkazu *Compute Mesh>Surface Mesh Only*, kde za input byla zadána část LEADING-EDGE.



Obr. 42. Mapovaná povrchová síť na náběžné hraně přítlačného křídla

7.4.4 Nastavení objemové hustoty sítě

Jelikož celou síť nelze vytvořit malými elementy z důvodu velkého množství elementů, musíme nastavit objemovou hustotu sítě pomocí příkazu *Mesh>Create Mesh Density*. Nastavení parametrů hustoty sítě je na obr. 43. Jsou zde také zadány dva body, které tuto hustotu sítě ohraničují.



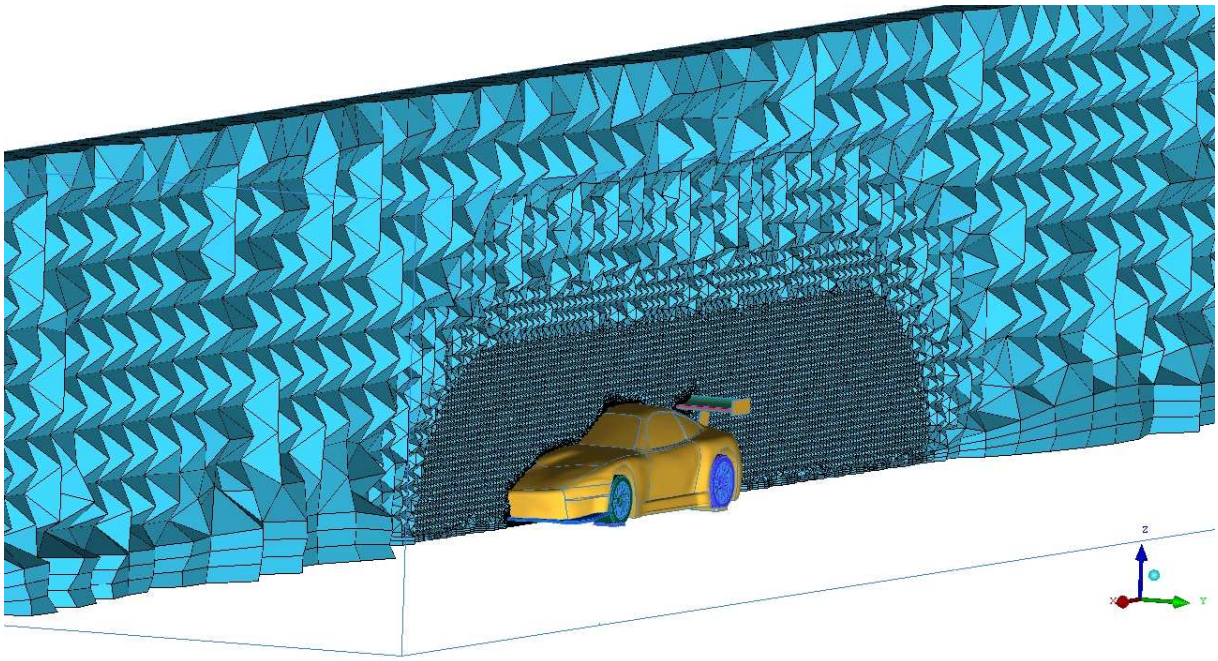
Obr. 43. Parametry hustoty sítě

7.4.5 Vytvoření objemové sítě

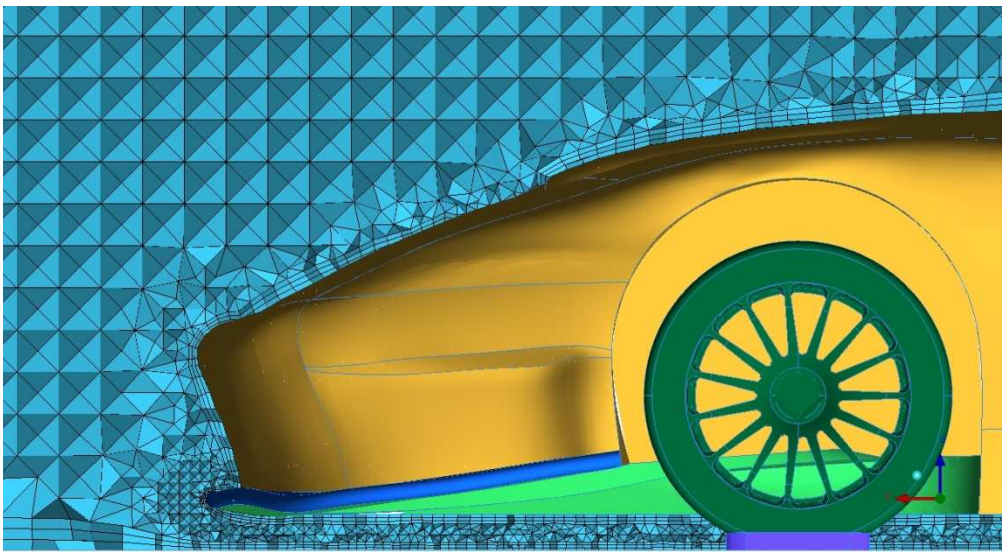
Definování globálního nastavení sítě se provádí v záložce *Mesh>Global Mesh Setup>Global Mesh Size*, kde byla zadána hodnota maximální velikosti elementu 800.

Dalším krokem bylo vytvoření prizmat pro simulaci proudění v mezní vrstvě na površích vozidla, kol a silnice. Nastavení prizmat je v záložce *Mesh>Global Mesh Setup>Prism Meshing Parameters*, kde bylo nastaveny 3 vrstvy, exponenciální nárůst prizmat a koeficient výšky prizmat 1. Na obr. 45. lze vidět prizmata ve vytvořené objemové síti.

Vytvoření objemové sítě bylo provedeno příkazem *Compute Mesh>Volume Mesh*. Byla použita metoda Robust (Octree), typ sítě Tetra/Mixed, potvrzeno vytvoření prizmat a tlačítkem *Compute* se provedlo vytvoření sítě.



Obr. 44. Vytvořená objemová síť



Obr. 45. Objemová síť s prizmaty

7.4.6 Kontrola a zkvalitnění sítě, export

Příkazem *Edit Mesh>Check mesh* byla tato síť zkontrolována. Dále byla zjištěna její kvalita příkazem *Edit Mesh>Display Mesh Quality*. Kvalita byla zlepšena příkazem *Smooth Mesh Globally* ve stejné záložce.

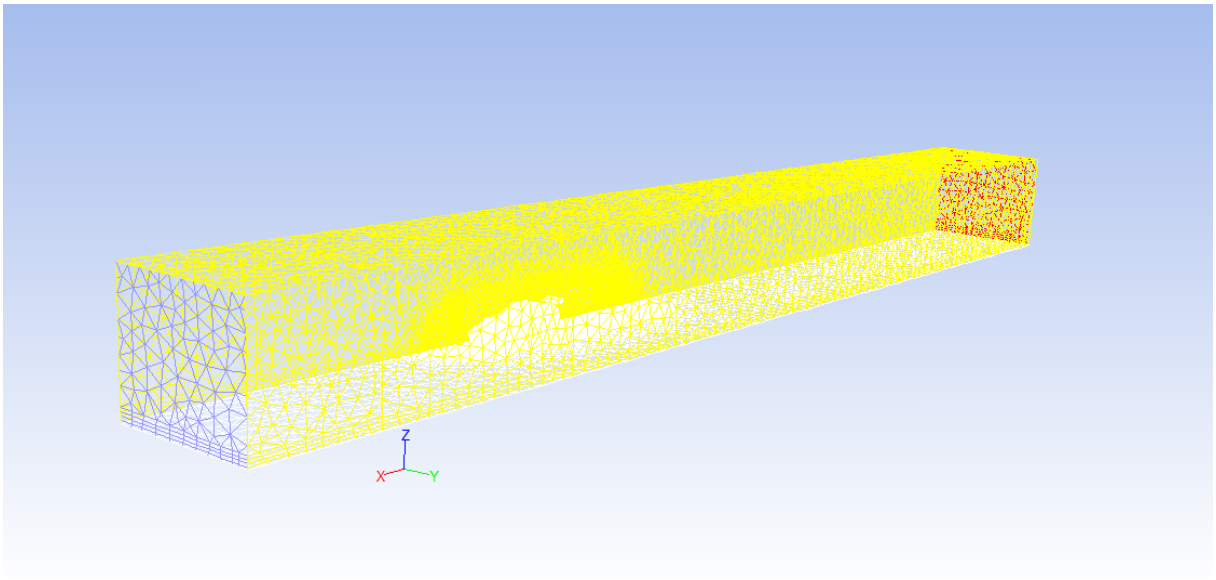
7.5 Výpočet v programu Fluent

Pro výpočet aerodynamických charakteristik byl zvolen program Fluent. Je to jeden z nejrozšířenějších CFD programů. Postup práce je v následujících podkapitolách.

7.5.1 Import, nastavení modelu

Na obr. 46 je importovaná výpočtová síť v programu Fluent příkazem *File>read>mesh*. V tomto programu se postupuje v menu *Problem Setup*. Příkazem *General>Mesh>Scale* byla síť zvětšena, aby byla v měřítku 1:1, byly zde nastaveny jednotky na metry a síť byla zkontrolována příkazem *General>Mesh>Check.* Poté byl definován typ matematického modelu proudění *Models>Viscous k-epsion-realizable.* Model k-epsion je nejčastěji používaný model turbulence, varianta realizovatelný k-epsion obsahuje úpravy, které zajišťují splnění několika matematických omezení.

Následně byl nastaven jako proudící tekutina vzduch příkazem *Materials>Fluid>air* a materiál povrchu karoserie a kol *Solid>aluminium.*



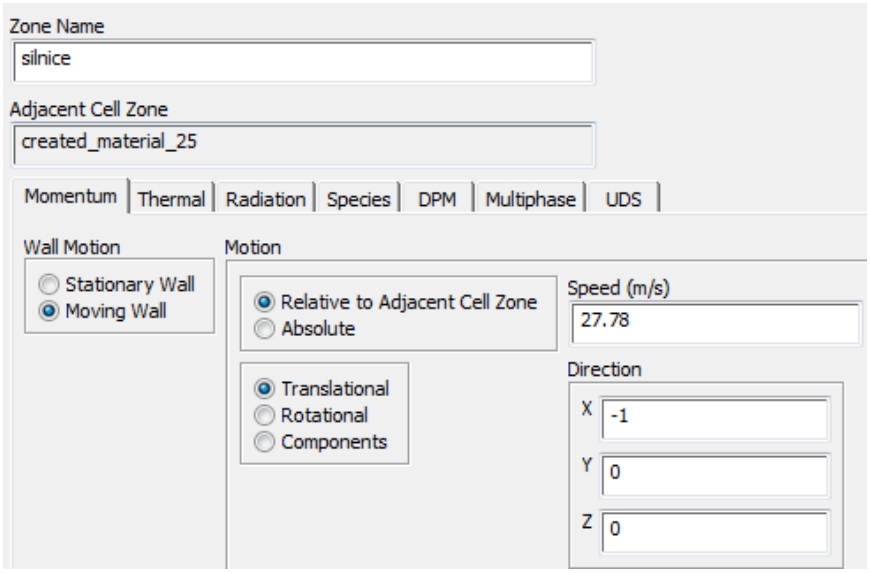
Obr. 46. Výpočtová síť v prostředí programu Fluent

7.5.2 Nastavení parametrů a okrajových podmínek výpočtu

Pro jednotlivé varianty byly nastaveny okrajové podmínky příkazem *Boundary Conditions.* Zóna Tunel/inlet byla změněna na *velocity-inlet* a pro rychlost vozidla 100 km/h (27,78m/s) byla nadefinována hodnota *Velocity Magnitude* na 27.78 m/s. Zóna tunel/outlet byla změněna na *pressure-outlet* a jako velikost *Gauge Pressure* byla zadána 0Pa. Na silnici byla podmínka *wall*, na tunel/wall a tunel/symmetry podmínka *symmetry*.

Pro variantu s rotujícími koly a pohybující se vozovkou byly při nastavování okrajových podmínek změněny následující parametry. Na silnici byla změněna okrajová podmínka na *Moving Wall- Relative to Adjencent Cell Zone-Translational* (translační pohyb) a definovala

se rychlost pohybu silnice na -27.27 m/s, nastavení okrajové podmínky pohybující se silnice je na obr. 47.

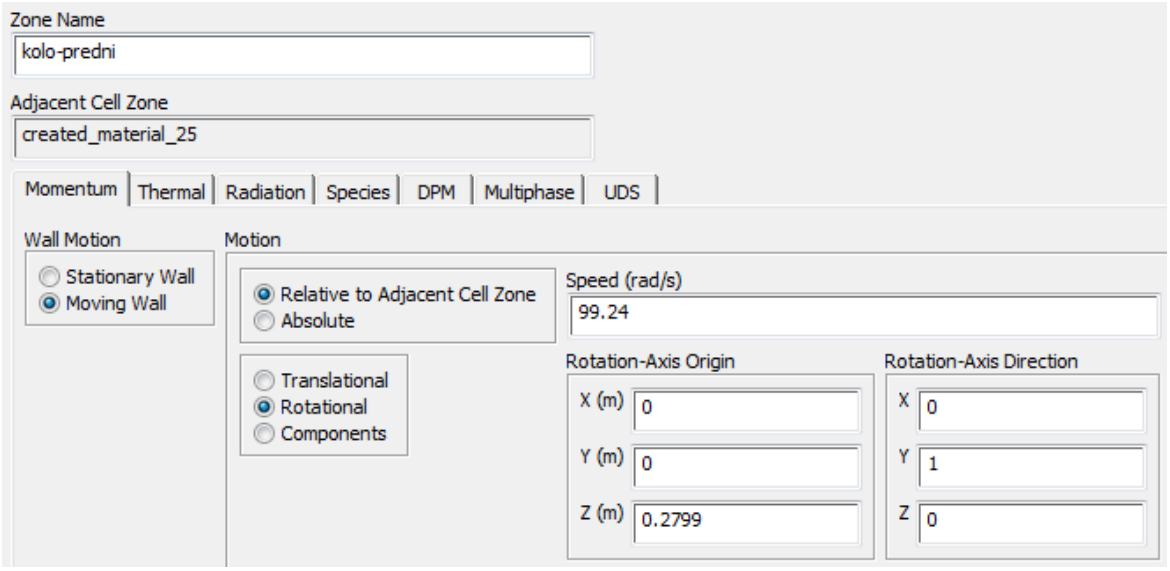


Obr. 47. Nastavení okrajové podmínky pro pohybující se silnici

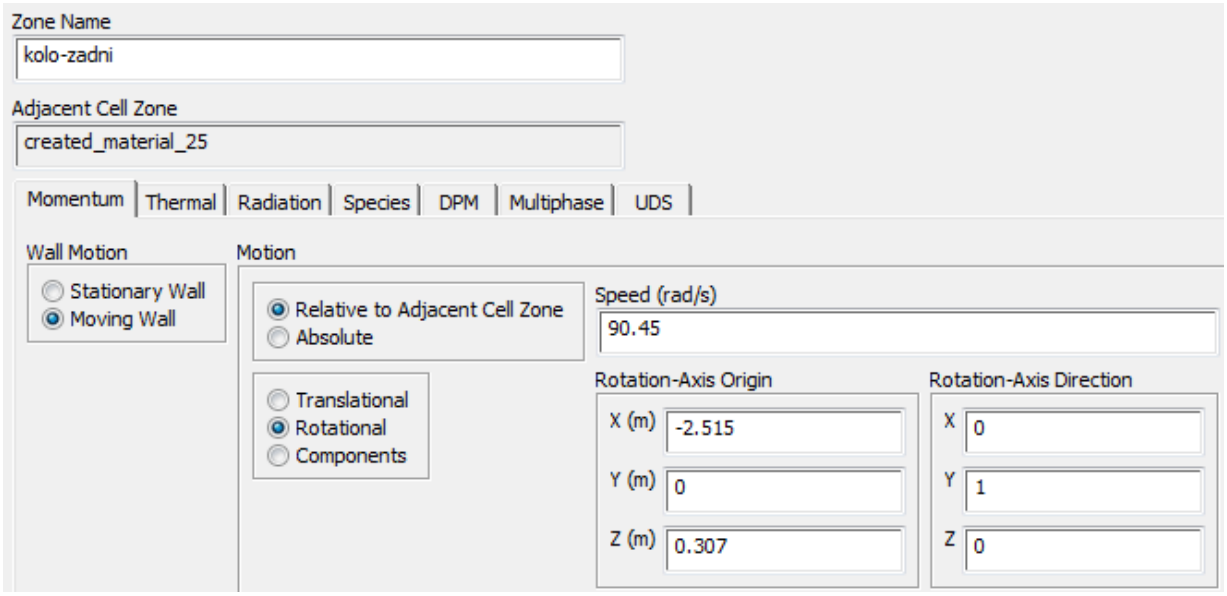
Kola byla nastavena na *Moving Wall>Relative to Adjencent Cell Zone*, ale zadán rotační pohyb (*Rotational*). Na obr. 48 a obr. 49 jsou ukázány parametry předních a zadních rotujících kol. Zadaná hodnota 99.24 rad/s resp. 90.45 rad/s je hodnota úhlové rychlosti kola vypočtená dle následujícího vztahu:

$$\omega = \frac{V}{R} \tag{10}$$

kde ω je úhlová rychlost na povrchu kol v rad/s, V je rychlost vozidla a R je poloměr kola v metrech. Dalšími zadanými parametry jsou poloha osy rotace jednotlivých kol v souřadném systému *Rotation>Axis Origin* a směr rotace *Rotation>Axis Direction*.



Obr. 48. Nastavení okrajové podmínky na předním kole



Obr. 49. Nastavení okrajové podmínky na zadním kole

Nastavení okrajových podmínek na jednotlivých plochách modelu pro vozidlo se stacionárními koly a stacionární vozovkou je v tab. 2.

Tab. 2. Nastavení okrajových podmínek pro vozidlo se stacionárními koly i stacionární vozovkou

Plocha	Okrajová podmínka	Hodnota okrajové podmínky
tunel/inlet	velocity-inlet	27,78 m/s
tunel/oulet	Pressure-outlet	0 Pa
silnice	Stationary Wall	X
kolo-predni	Stationary Wall	X
kolo-zadni	Stationary Wall	X

Nastavení okrajových podmínek na jednotlivých plochách modelu pro vozidlo s rotujícími koly a pohybující se vozovkou je v tab. 3.

Tab. 3. Nastavení okrajových podmínek pro vozidlo s rotujícími koly a pohybující se vozovkou

Plocha	Okrajová podmínka	Hodnota okrajové podmínky
tunel/inlet	velocity-inlet	27,78 m/s
tunel/oulet	pressure-outlet	0 Pa
silnice	Translational Moving Wall	-27,78 m/s
kolo-predni	Rotational Moving Wall	99,24 rad/s
kolo-zadni	Stationary Wall	90,45 rad/s

Poslední záložkou v nastavení úlohy (*Problem Setup*) je nastavení referenčních hodnot. Zde byla pomocí příkazu *Report>Result Reports>Projected Areas* vypočtena čelní plocha vozidla s koly. Jako hodnota minimálního prvku byla zadána desetina milimetru a byly vybrány všechny části vozidla a kol. Po stisknutí *Compute* byla zjištěna čelní plocha 1.024706m^2 a ta byla následně přepsána do *Reference Values>Area*. Další referenční hodnotou byla rychlost (*Velocity*) 27.78 m/s.Dalším krokem bylo nastavení řešení (Solution). Nastavení metody řešení je ukázáno na obr. 45.

7.5.3 Nastavení monitorů a spuštění výpočtu

V záložce *Monitors* byl nastaven reziduál definující hranici konvergence úlohy na přesnost 1e-05. V této záložce bylo také nastaveno sledování hodnot koeficientu odporu vzduchu (*Drag*) a koeficientu vztlaku (*lift*), kde bylo požadováno zapisování a ukládání historie jejich průběhů a jejich vykreslování. Zde se musí zadat vektory síly a všechny zóny na vozidle a kolech.

Před každým výpočtem musí být řešení inicializováno (*Solution Initialization*), zde byla nastavena rychlost ve směru x (*X Velocity*) -27.78 m/s a následně byla inicializace spuštěna příkazem *Initialize.*

V řádku *Calculation Activities* se provádí nastavení automatického ukládání. V *Run Calculation* byla úloha příkazem *Check Case* zkontrolována a byl zde nastaven počet iterací 6000 a výpočet úlohy byl spouštěn příkazem *Calculate*.

Během výpočtu, jak už bylo zmíněno, byla zapnuta funkce zapisování historie průběhů hodnot koeficientu odporu vzduchu a koeficientu přítlaku u každé iterace. Posledních 1000 zaznamenaných hodnot bylo zprůměrováno a tyto průměrné hodnoty koeficientu odporu vzduchu a koeficientu vztlaku byly použity jako aerodynamické charakteristiky.

7.6 Vizualizace proudění a rozložení tlaku v programu CFD-POST

V programu CFD-Post se provádí vyhodnocování úlohy, např. zobrazení trajektorií proudu vzduchu, rozložení tlaku na povrchu objektů, zobrazení vektorů a další.

7.6.1 Rozložení tlaku

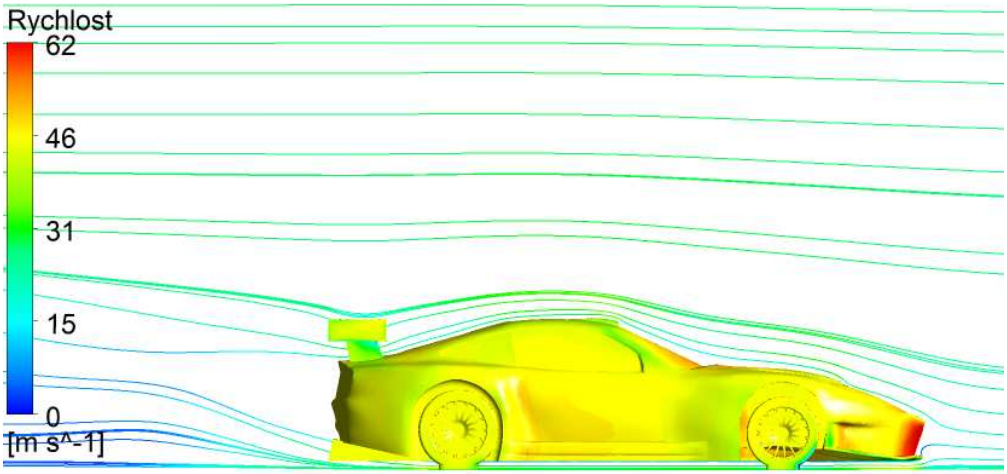
Příkazem *Contour* se zobrazuje např. rozložení tlaku na karoserii vozidla a na kolech. Všechny prvky, na kterých se má tlak zobrazit se zadávají do pole *Locations.* Na obr. 50 je rozložení tlaku modelovaného vozidla s rotujícími detailními koly a pohybující se vozovkou.



Obr. 50. Rozložení tlaku na karoserii, šikmý pohled

7.6.2 Zobrazení proudnic

Proudnice se zobrazují pomocí příkazu *Streamline.* Zde byla zadána jako počátek proudnic plocha tunel inlet. Na obr. 51. je vizualizace proudnic v rovině symetrie.



Obr. 51. Vizualizace proudnic v rovině symetrie vozu

7.7 Zhodnocení vlivu rotace kol na aerodynamické charakteristiky vozu

Hodnoty koeficientů a výsledky z programu FLUENT vyexportované do programu CFD-Post pro jednotlivé varianty jsou porovnány v následující podkapitole.

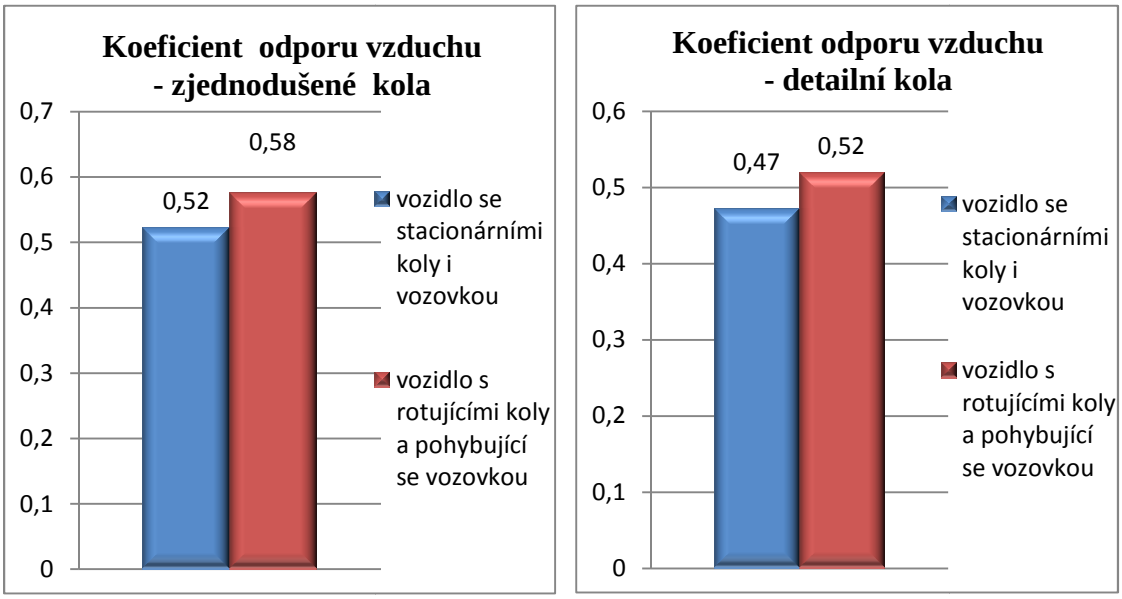
7.7.1 Porovnání koeficientů odporu vzduchu

Získané hodnoty koeficientů odporu vzduchu pro jednotlivé varianty jsou v tab. 4.

Tab. 4. Porovnání koeficientů odporu vzduchu pro jednotlivé varianty

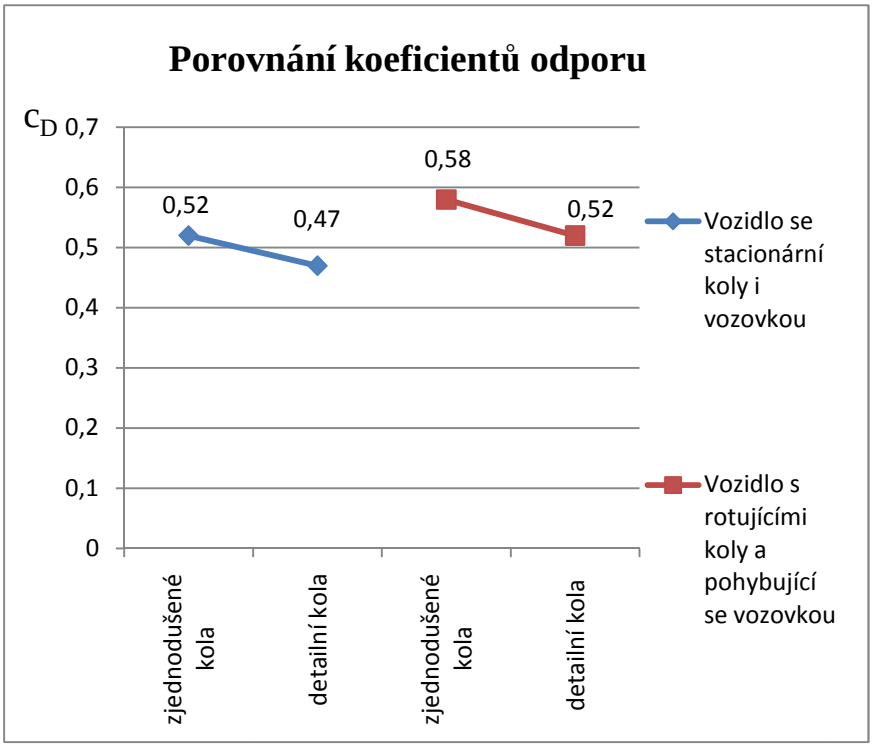
Varianty výpočtu	Koeficient odporu vzduchu c_D	Obr.
Vozidlo se stacionárními zjednodušenými koly a stacionární vozovkou	0,52	
Vozidlo se stacionárními detailními koly a stacionární vozovkou	0,47	
Vozidlo s rotujícími zjednodušenými koly a pohybující se vozovkou	0,58	
Vozidlo s rotujícími detailními koly a pohybující se vozovkou	0,52	

V následujících grafech jsou hodnoty koeficientů odporu vzduchu pro jednotlivé varianty úlohy. Tedy pro model vozidla se zjednodušenými nebo s detailními koly, a pro různé nastavení okrajových podmínek (vozidlo se stacionárními koly a stacionární vozovkou a vozidlo s rotujícími koly a pohybující se vozovkou).



Graf 2. Velikosti odporu vzduchu pro jednotlivé varianty, pro zjednodušená kola (vlevo), pro detailní kola (vpravo)

Pro samostatné rotující kolo se udává menší koeficient odporu vzduchu než pro kolo stacionární, jak lze vidět na obr. 23. Výsledky jasně ukazují, že mé modelované vozidlo má větší odpor vzduchu, jestliže kola rotují a vozovka se pohybuje. Toto platí jak u vozidla se zjednodušenými koly, tak i s detailními koly. Tudíž koeficient odporu vzduchu závisí na interakci vozidla s koly. V dalším grafu jsou pro srovnání velikosti koeficientů odporu vzduchu pro všechny varianty výpočtu a z hlediska použití zjednodušených nebo detailních kol.



Graf 3. Porovnání koeficientů odporu vzduchu

Z grafu 3. je jasně vidět, že odpor vzduchu klesne při použití detailních kol. Toto platí pro model s rotujícími i stacionárním koly.

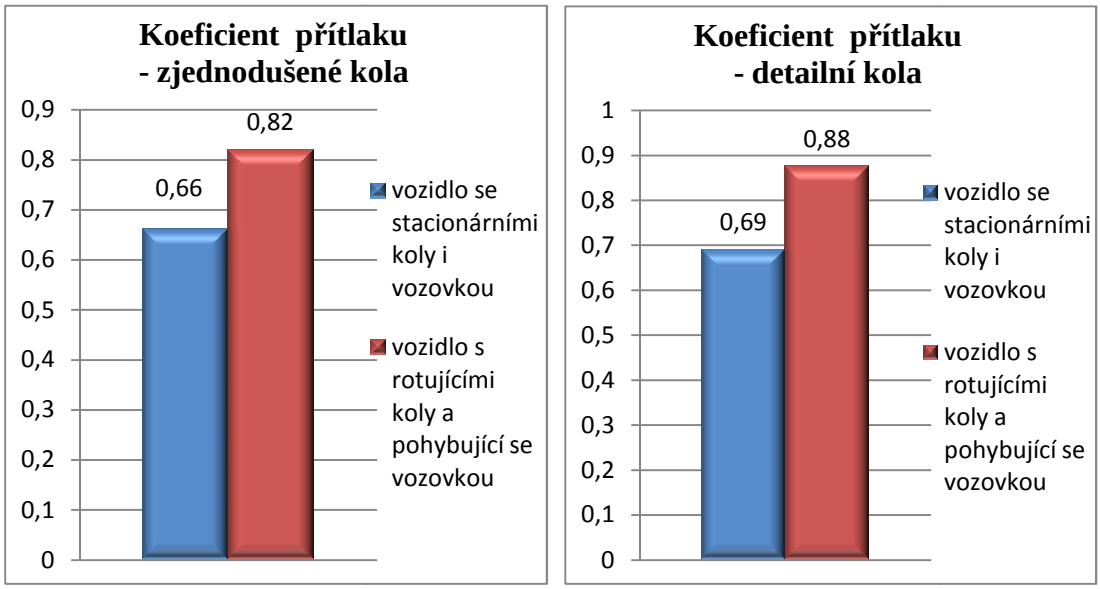
V některých článcích se udává, že při simulaci proudění kolem vozidla s rotujícími koly je koeficient odporu menší než s koly stacionárními, zde použili ale sériově vyráběný klasický automobil, zatímco mým modelem je okruhová verze sportovního vozu. Dalším rozdílem je, že mé modelované vozidlo nebylo průchozí, což ovlivňuje koeficient aerodynamického odporu také zásadně. Hodně tedy závisí na typu automobilu, na světlé výšce, rozměrech kol a velikosti objemu mezi podběhy a koly a také jestli je model průchozí nebo zaslepený.

7.7.2 Porovnání koeficientů přítlaku

Jelikož výsledky koeficientu vztlaku vyšly záporně, jedná se tedy o koeficient přítlaku. Výsledky koeficientů přítlaku pro jednotlivé varianty jsou v tab. 5. Tyto výsledky jsou porovnány v následujících grafech.

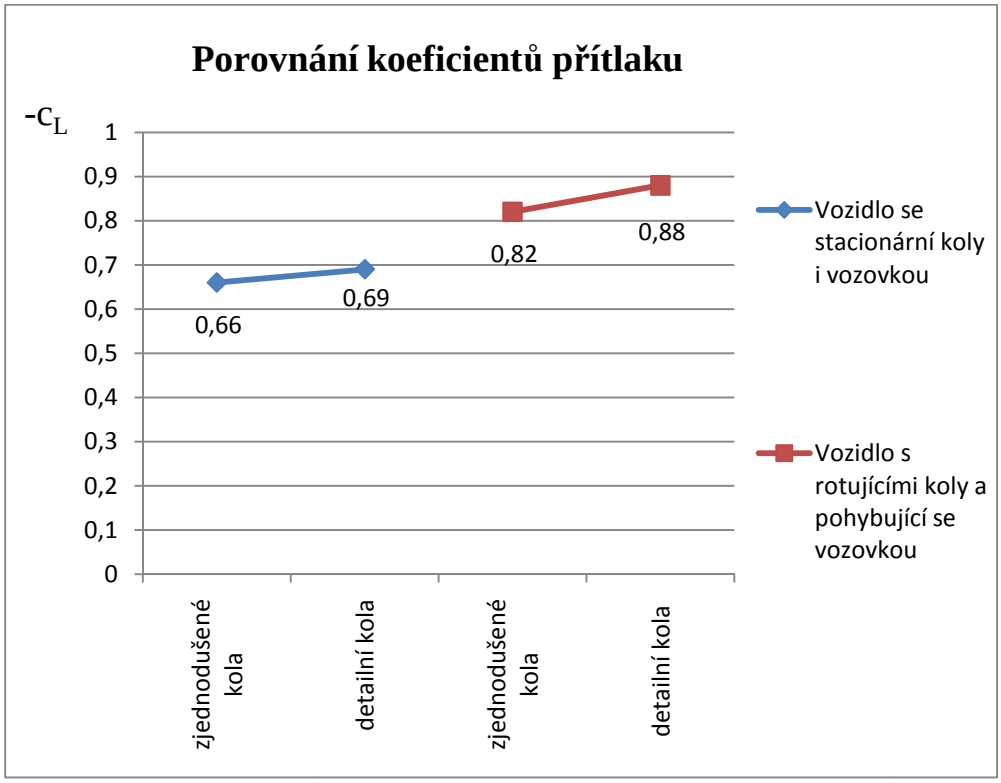
Tab. 5. Porovnání koeficientů přítlaku pro jednotlivé varianty

Varianty výpočtu	Koeficient přítlaku - c_L	Obr.
Vozidlo se stacionárními zjednodušenými koly a stacionární vozovkou	0,66	
Vozidlo se stacionárními detailními koly a stacionární vozovkou	0,69	
Vozidlo s rotujícími zjednodušenými koly a pohybující se vozovkou	0,82	
Vozidlo s rotujícími detailními koly a pohybující se vozovkou	0,88	



Graf 4. Velikosti odporu vzduchu pro jednotlivé varianty, pro zjednodušená kola (vlevo), pro detailní kola (vpravo)

Podle obr. je koeficient vztlaku menší v případě samostatných rotujících kol, tudíž hodnota koeficientu přítlaku by měla být u této varianty vyšší. V mé úloze u vozidla s rotujícími detailními i zjednodušenými koly vyšla hodnota koeficientu přítlaku také vyšší než u vozidla s koly stacionárními. Toto souhlasí i s použitou literaturou.

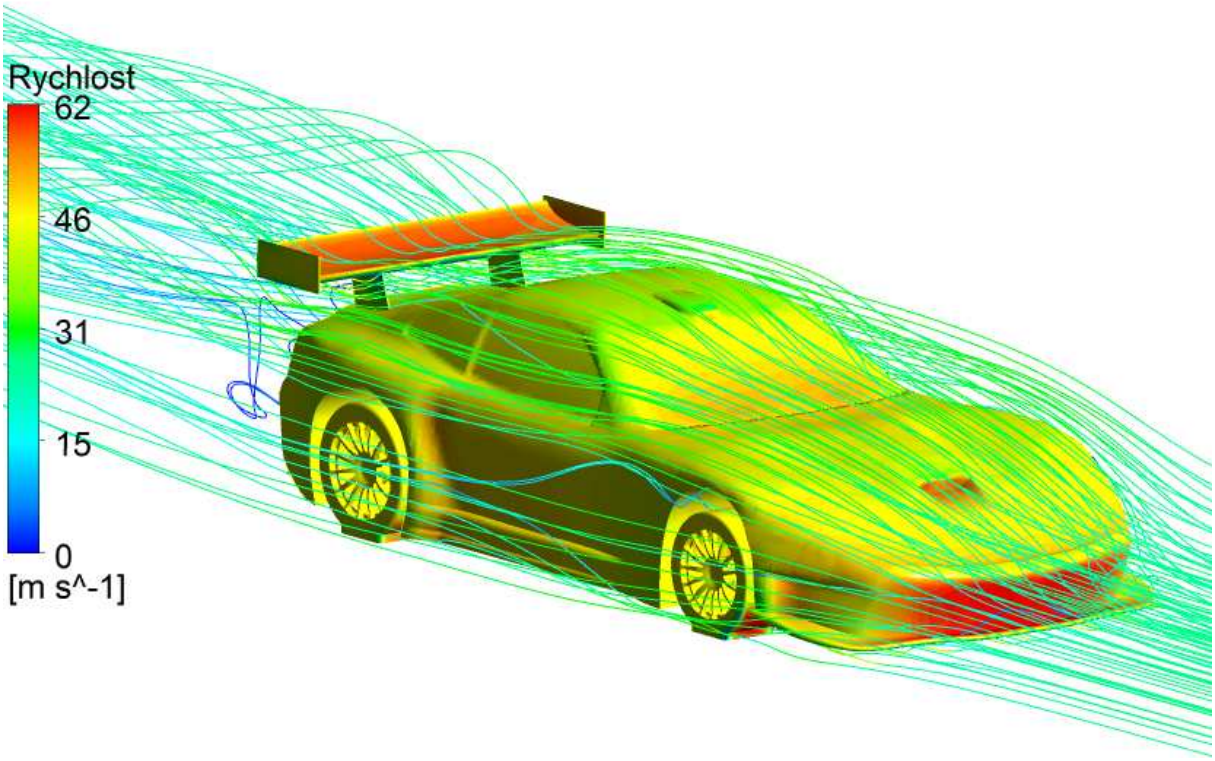


Graf 5. Porovnání koeficientů přítlaku

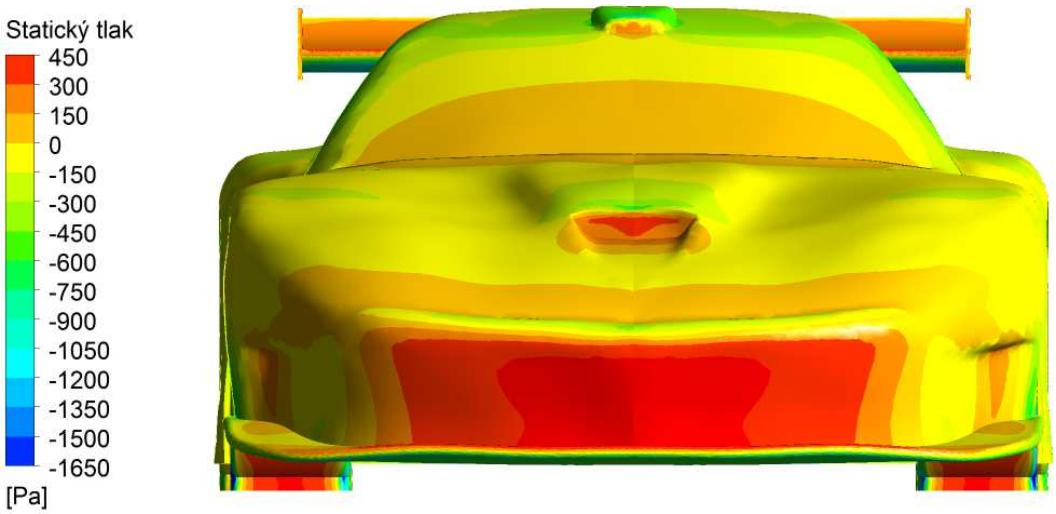
Z hlediska použití detailních a zjednodušených kol vychází koeficient přítlaku vyšší v případě použití detailních kol pro obě varianty výpočtu. Také zde závisí na poměru objemu podběhů a objemu kol a na světlé výšce.

7.7.3 Vizuální porovnání proudění

Následující obrázky popisují proudění kolem vozidla pro jednotlivé varianty výpočtu a zobrazují rozložení tlaku na vybraných částech vozidla. Proudění v blízkosti karoserie vozidla je znázorněno na obr. 52. Na dalších obrázcích je rozložení statického tlaku na karoserii vozidla.



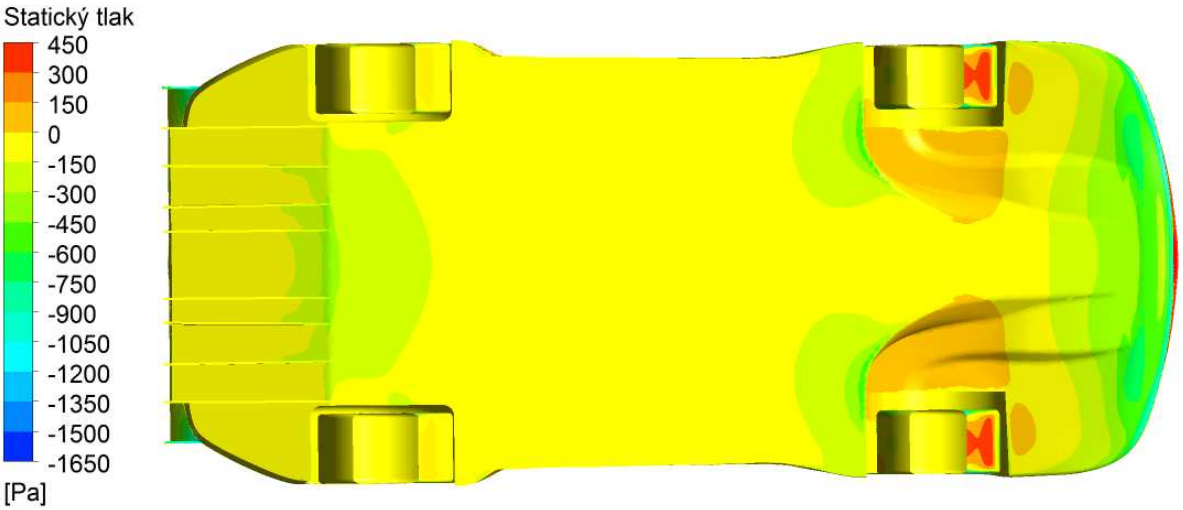
Obr. 52. Znázornění proudnic pro vozidlo s rotujícími koly, šikmý pohled



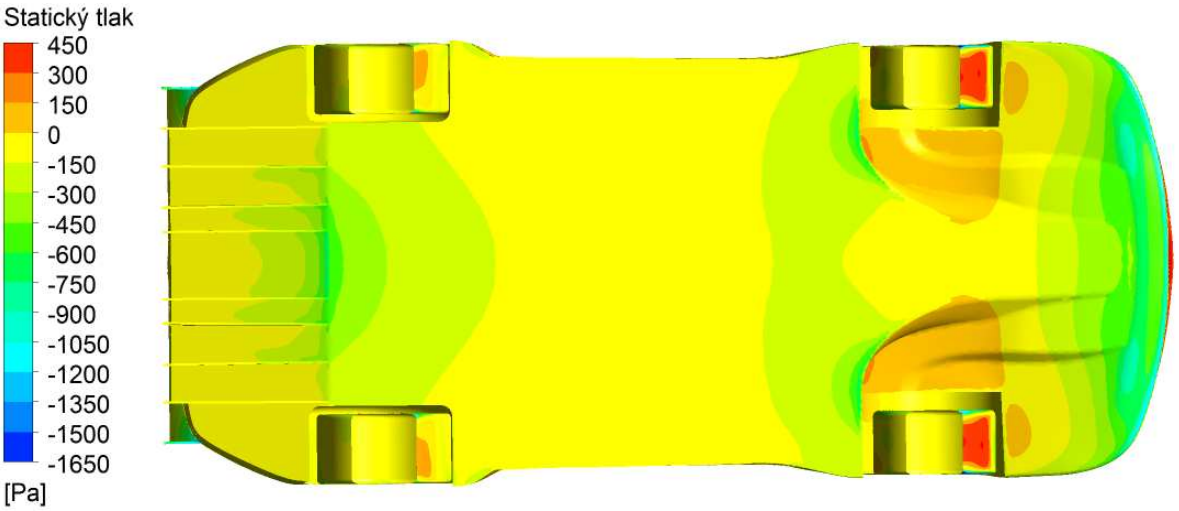
Obr. 53. Rozložení tlaku na vozidle s rotujícími detailními koly a s pohybující se vozovkou, čelní pohled

Jelikož z hlediska rotace kol jsou čelní pohledy rozložení tlaku na vozidle pro jednotlivé varianty velmi podobné, bylo pro vizuální porovnání dále použito rozložení statického tlaku na spodní části vozu, na horní části vozu a silnici, na boční části vozu společně s rozložením tlaku na rovině symetrie, na předních kolech a na předních podběžích. Dále jsou zobrazeny proudnice v podběžích vozidla a porovnání polí rychlosti proudu vzduchu za předními koly pro jednotlivé varianty.

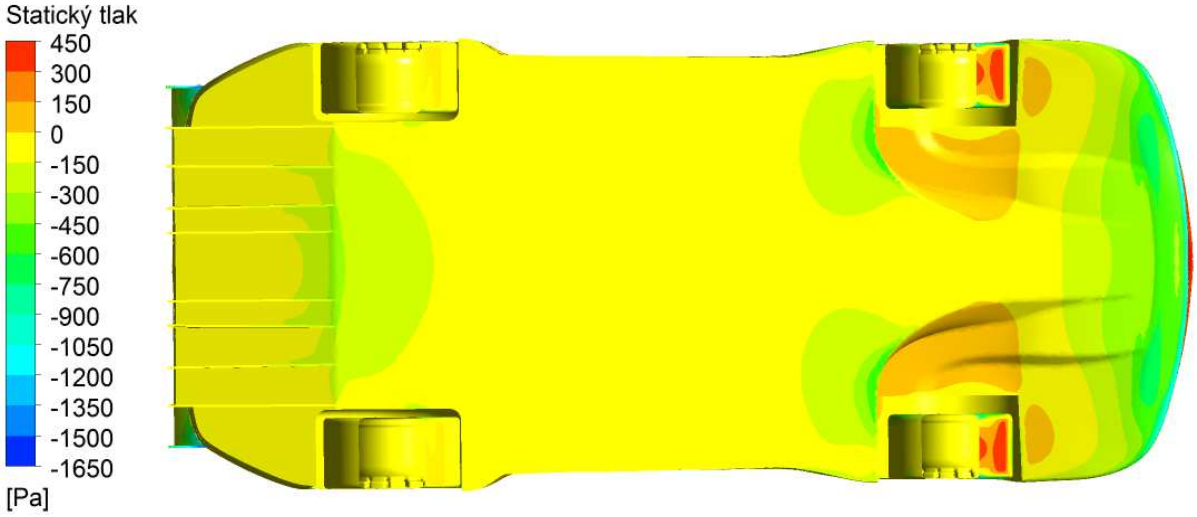
Na následujících obrázcích je znázorněno rozložení statického tlaku na površích ve spodní části vozidla.



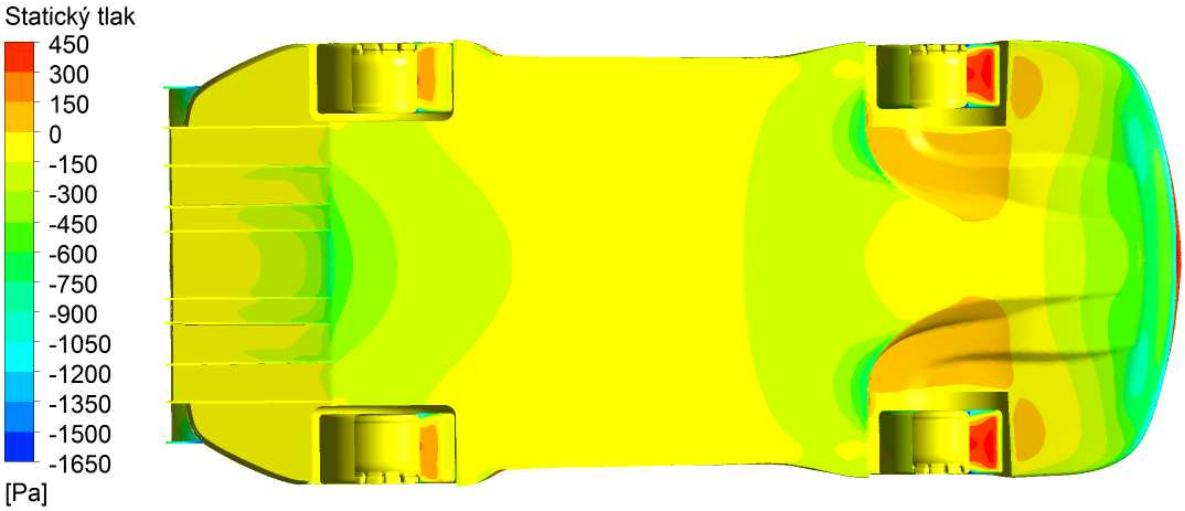
Obr. 54. Rozložení statického tlaku na podlaze vozidla se stacionárními zjednodušenými koly i stacionární vozovkou, pohled zespodu



Obr. 55. Rozložení statického tlaku na podlaze vozidla s rotujícími zjednodušenými koly a pohybující se vozovkou, pohled zespodu



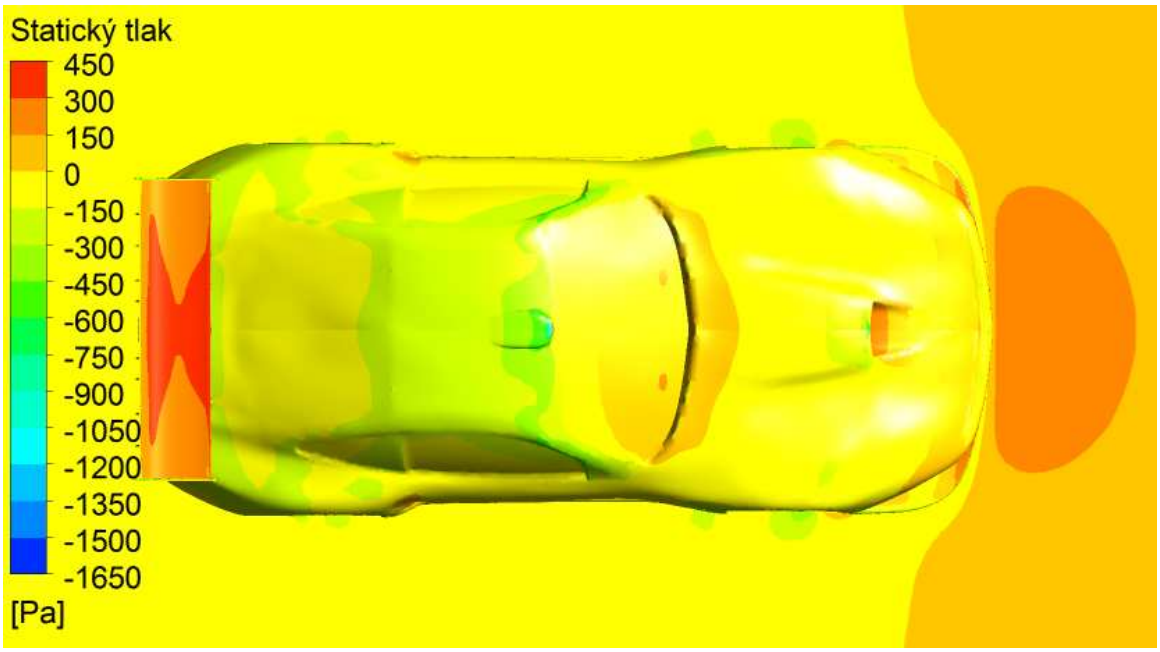
Obr. 56. Rozložení statického tlaku na podlaze vozidla se stacionárními detailními koly i stacionární vozovkou, pohled zespodu



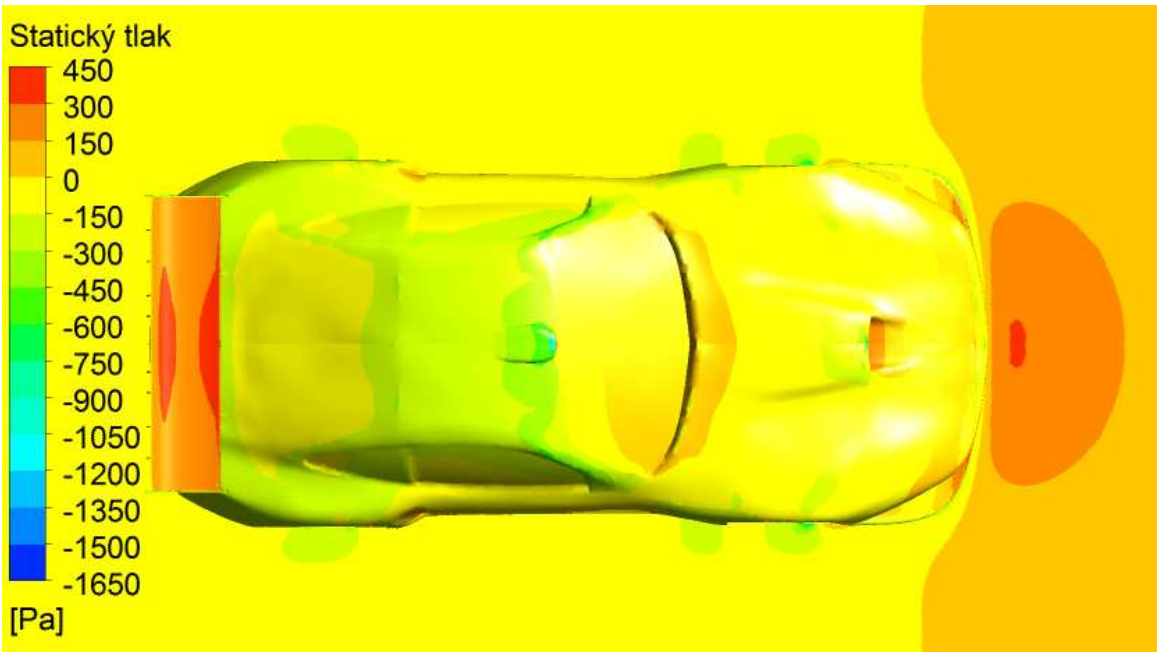
Obr. 57. Rozložení statického tlaku na podlaze vozidla s rotujícími detailními koly a pohybující se vozovkou, pohled zespodu

U vozidla s rotujícími koly a pohybující se vozovkou je vidět podtlak na přední části i v zadní části v oblasti difuzoru. Plocha působení podtlaku za přívodními kanály k předním kolům je větší než u varianty se stacionárními koly a stacionární vozovkou. Také vzniká větší přetlak na čelní ploše zadních rotujících kol.

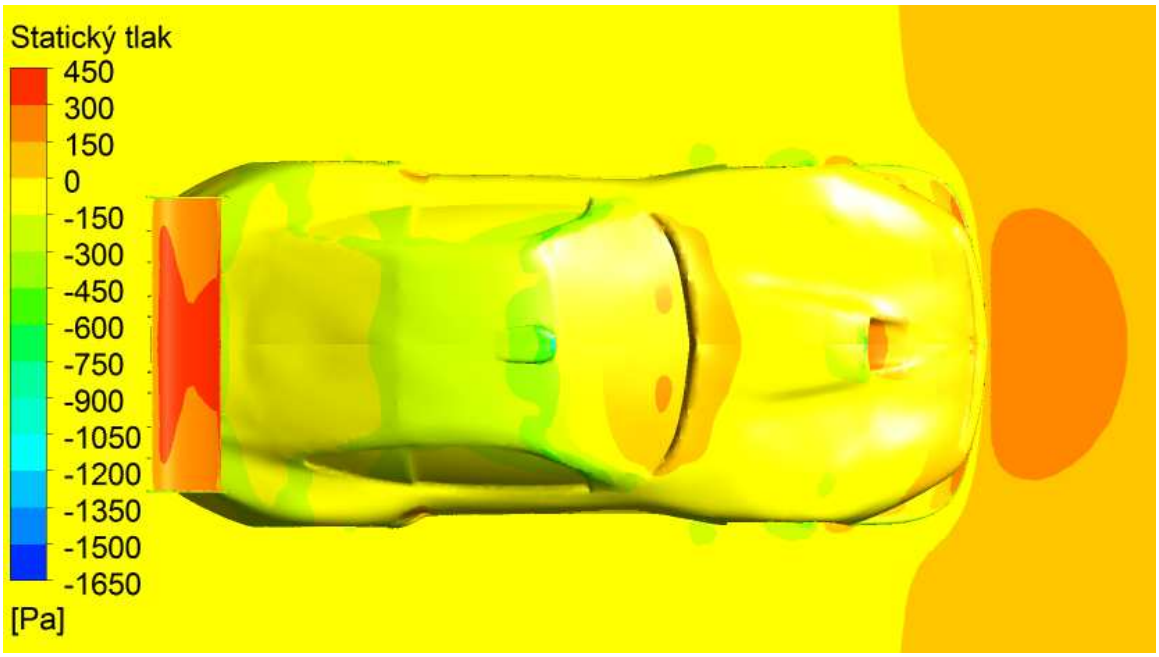
Dalším porovnáním je znázornění tlaku na površích vrchní části vozidla a na silnici pro všechny varianty.



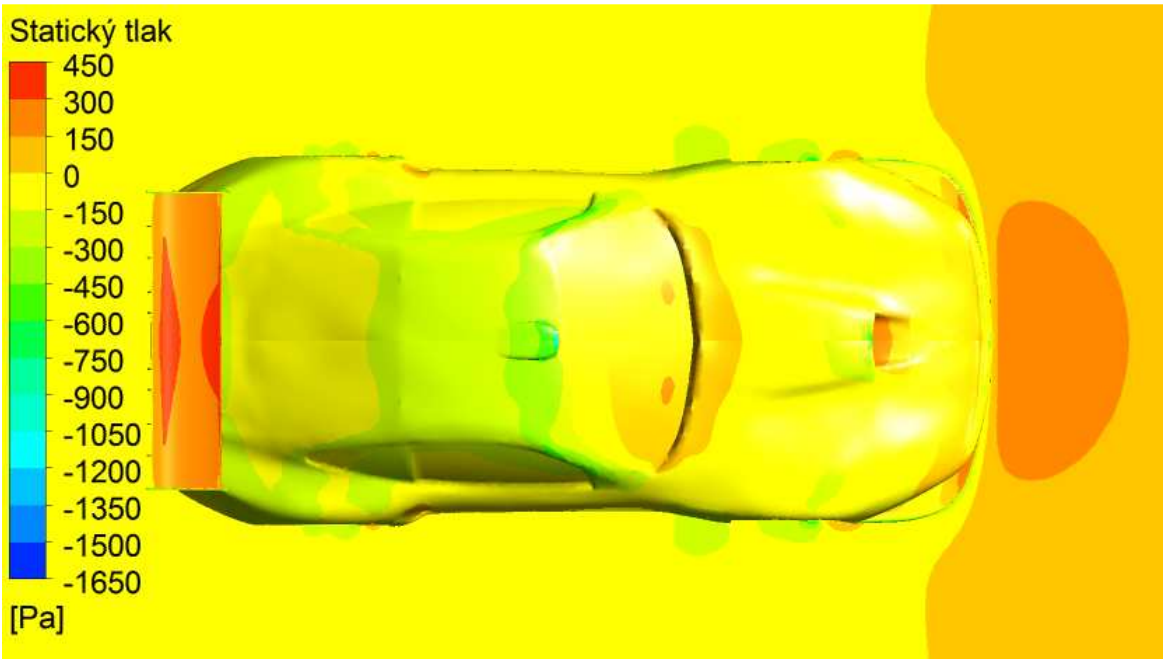
Obr. 58. Rozložení statického tlaku na horní části vozidla se stacionárními zjednodušenými koly i stacionární vozovkou a na silnici, pohled zespodu



Obr. 59. Rozložení statického tlaku na horní části vozidla s rotujícími zjednodušenými koly a pohybující se vozovkou a na silnici, pohled zespodu



Obr. 60. Rozložení statického tlaku na horní části vozidla se stacionárními detailními koly i stacionární vozovkou a na silnici, pohled zespodu



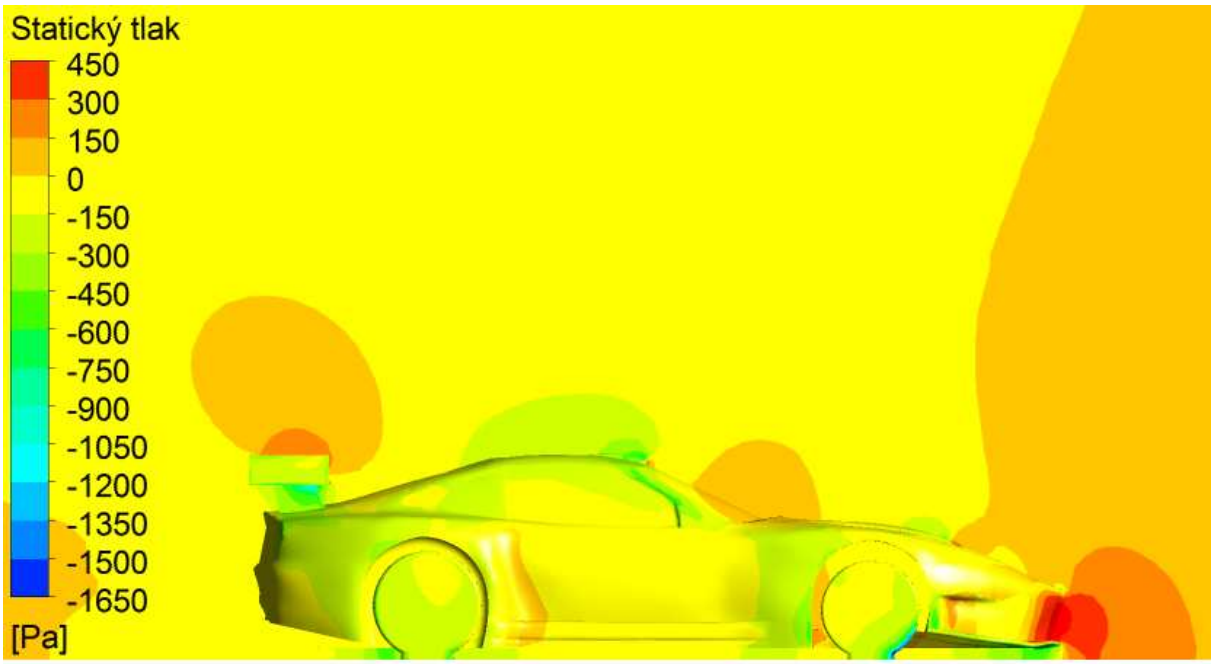
Obr. 61. Rozložení statického tlaku na horní části vozidla s rotujícími detailními koly a pohybující se vozovkou a na silnici, pohled zespodu

Na silnici v oblasti rotujících předních i zadních kol vzniká podtlak. Tvar rozložení podtlaku je závislý na tvaru kol. Výpočet nejhůře konvergoval ve variantě rotujících zjednodušených kol a pohybující se vozovky, proto u obr. lze vidět mírné odchylky od ostatních řešení.

Rozložení statického tlaku na rovině symetrie vozidla a na vozidle z bočního pohledu je znázorněno pro jednotlivé varianty na následujících obrázcích.



Obr. 62. Rozložení statického tlaku na rovině symetrie vozidla a na vozidle se stacionárními zjednodušenými koly i stacionární vozovkou, boční pohled



Obr. 63. Rozložení statického tlaku na rovině symetrie vozidla a na vozidle s rotujícími zjednodušenými koly a pohybující se vozovkou

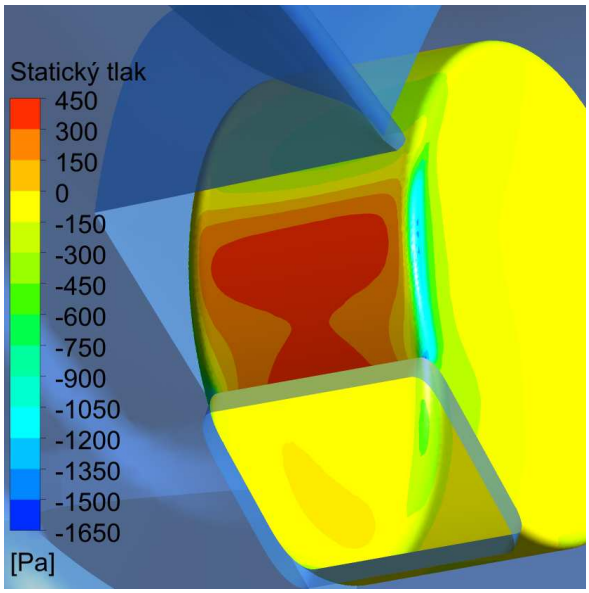


Obr. 64. Rozložení statického tlaku na rovině symetrie vozidla a na vozidle se stacionárními detailními koly i stacionární vozovkou, boční pohled

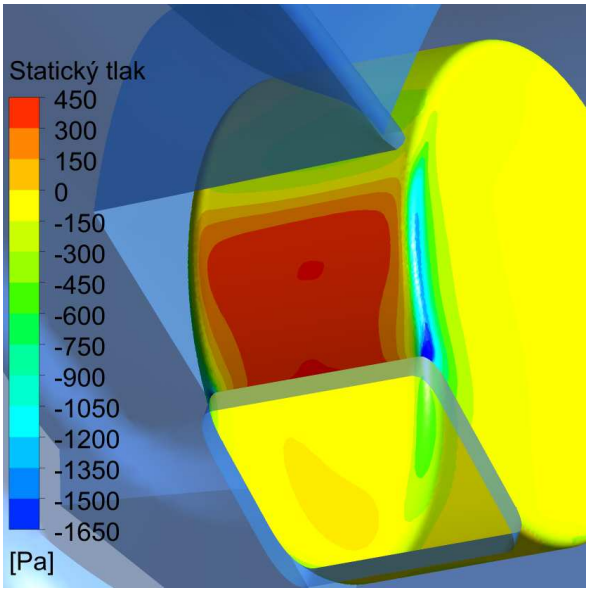


Obr. 65. Rozložení statického tlaku na rovině symetrie vozidla a na vozidle s rotujícími detailními koly a pohybující se vozovkou

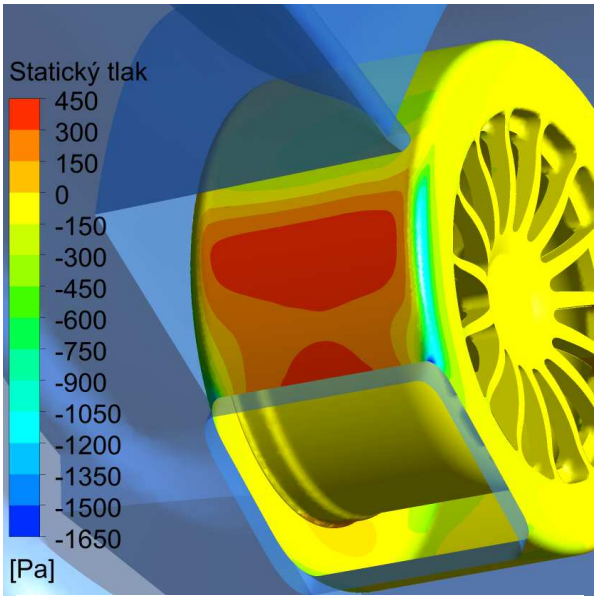
Na následujících obrázcích je vidět rozdíl v tlakových polích na povrchu kol.



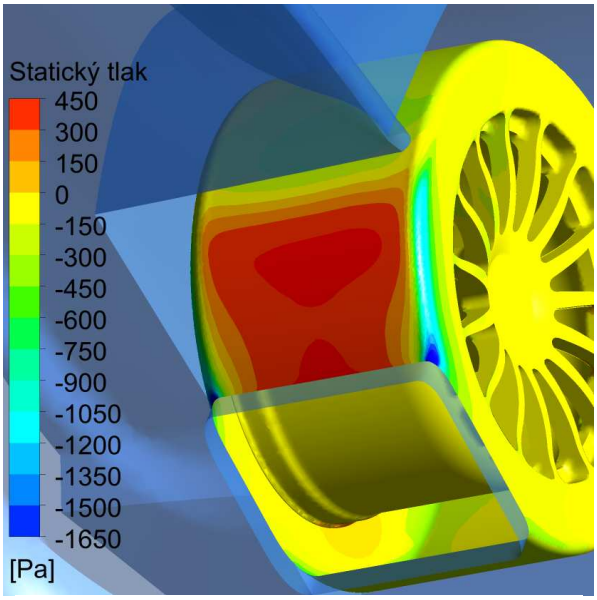
Obr. 66. Rozložení tlaku na stacionárním zjednodušeném předním kole



Obr. 67. Rozložení tlaku na rotujícím zjednodušeném předním kole



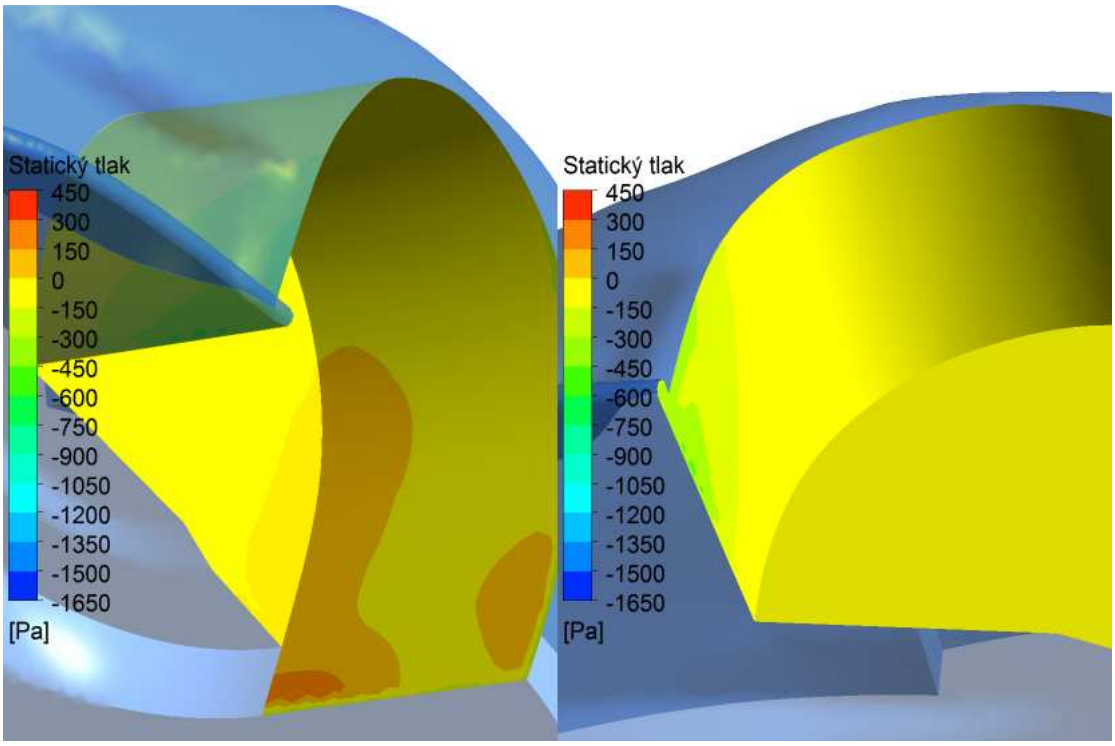
Obr. 68. Rozložení tlaku na stacionárním detailním předním kole



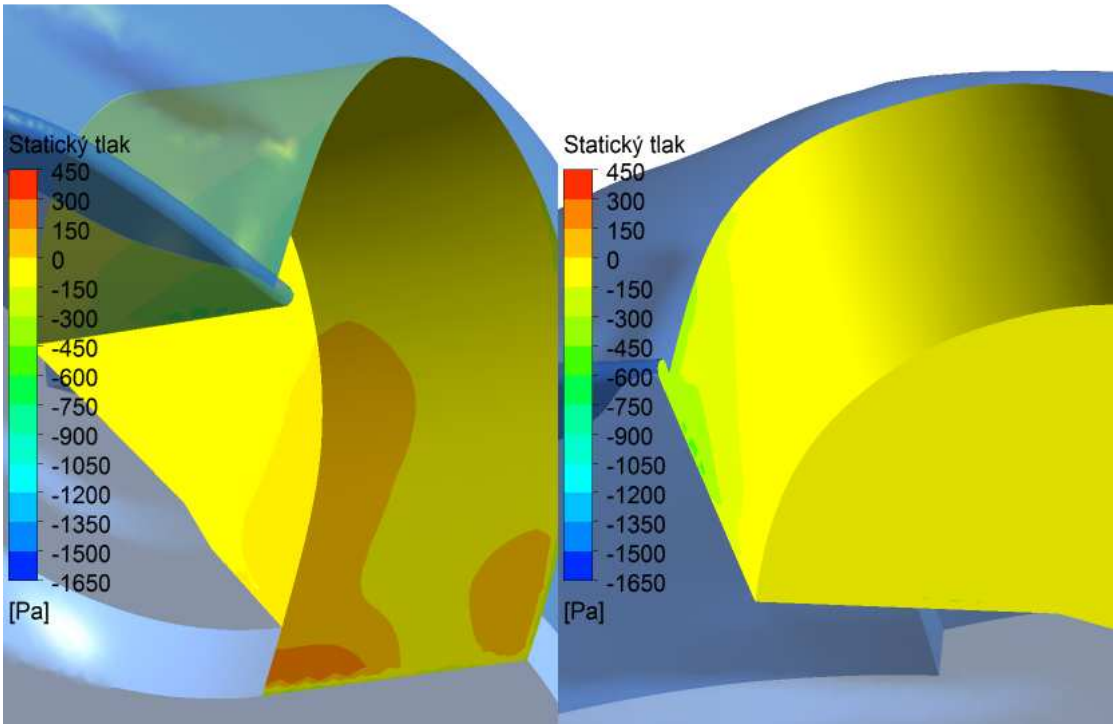
Obr. 69. Rozložení tlaku na rotujícím zjednodušeném předním kole

U rotujícího kola je vidět větší plocha působení tlaku, tudíž je tlak větší a aerodynamický odpor se zvyšuje. Na vnější straně rotujících kol v blízkosti vozovky je také vidět větší podtlak.

Jak kolo a jeho rotace působí na podběh je znázorněno na následujících obrázcích tlakových polí.

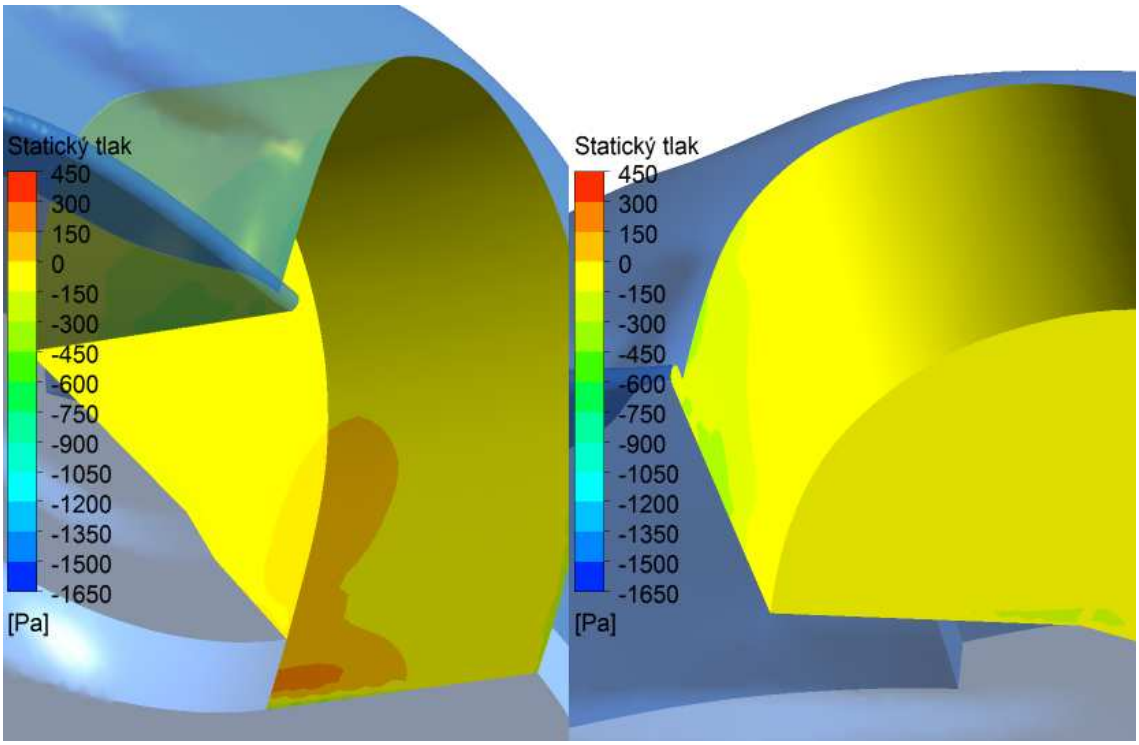


Obr. 70. Působení stacionárního zjednodušeného předního kola na podběh vozidla

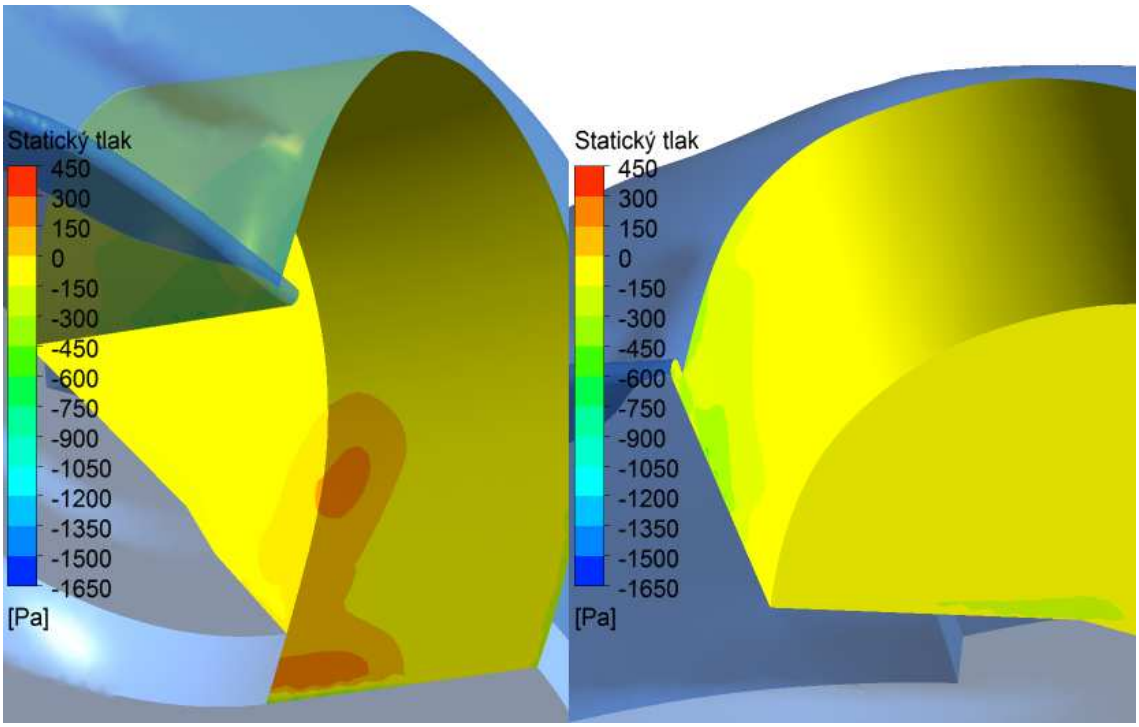


Obr. 71. Působení rotujícího zjednodušeného předního kola na podběh vozidla

U zjednodušených kol se tlaková pole na povrchu podběhu téměř neliší.



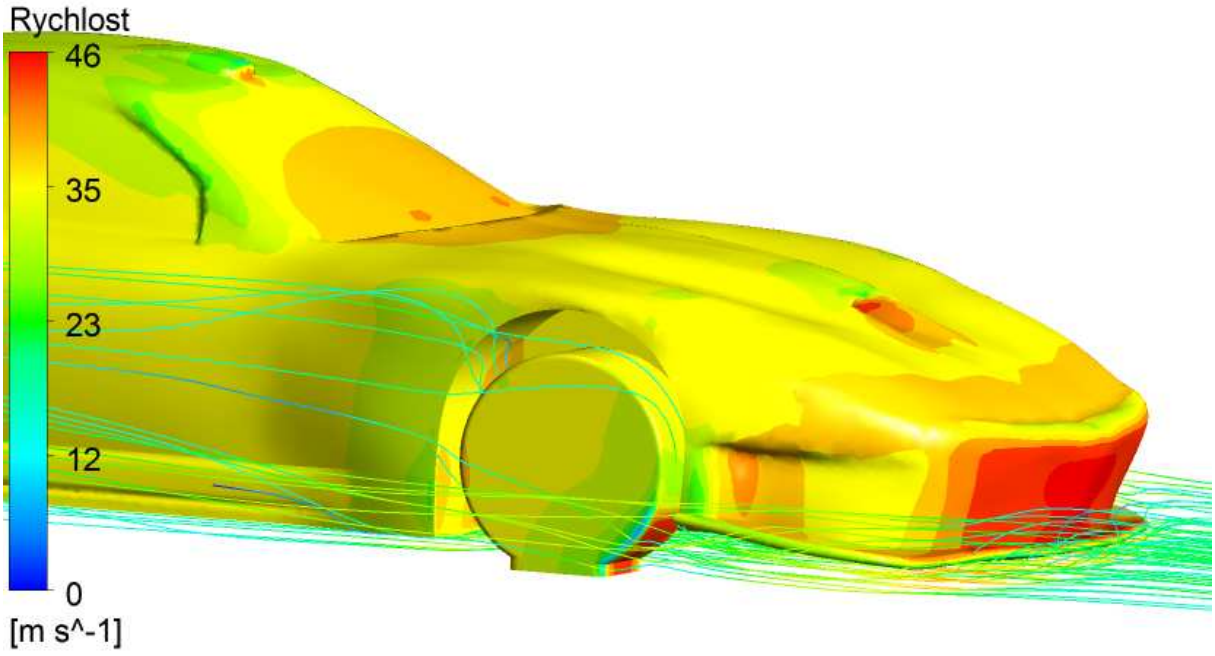
Obr. 72. Působení stacionárního detailního předního kola na podběh vozidla



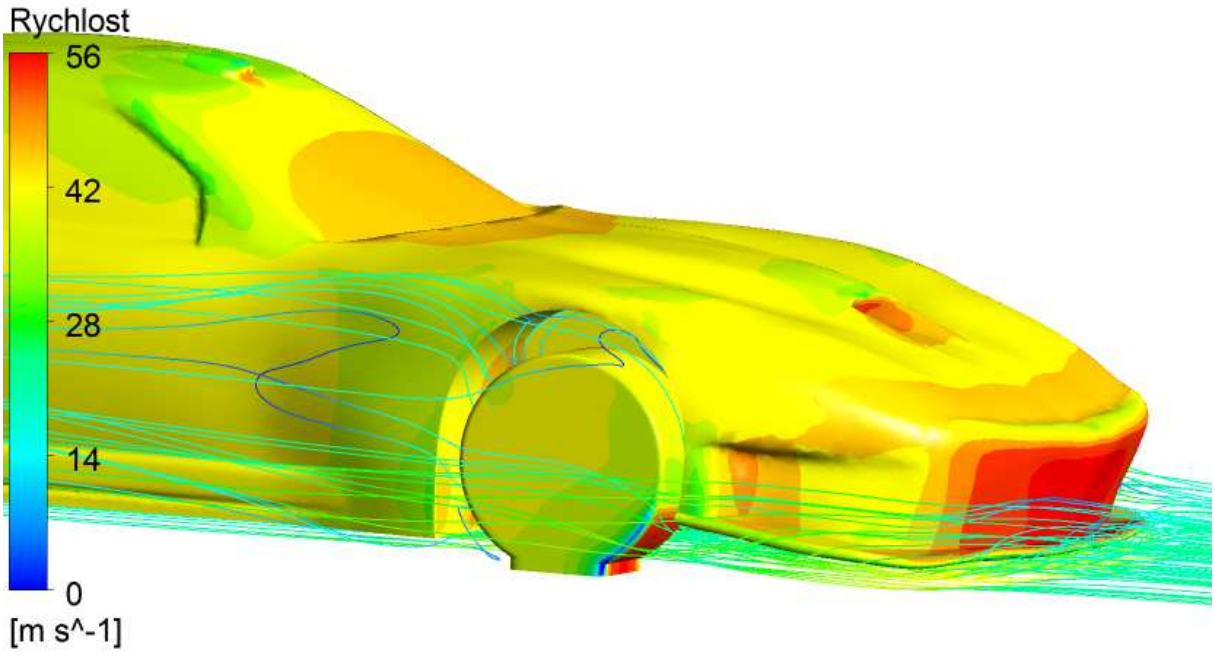
Obr. 73. Působení rotujícího detailního předního kola na podběh vozidla

V případě rotujícího detailního kola lze vidět nárůst vyššího tlaku na zadní stranu podběhu.

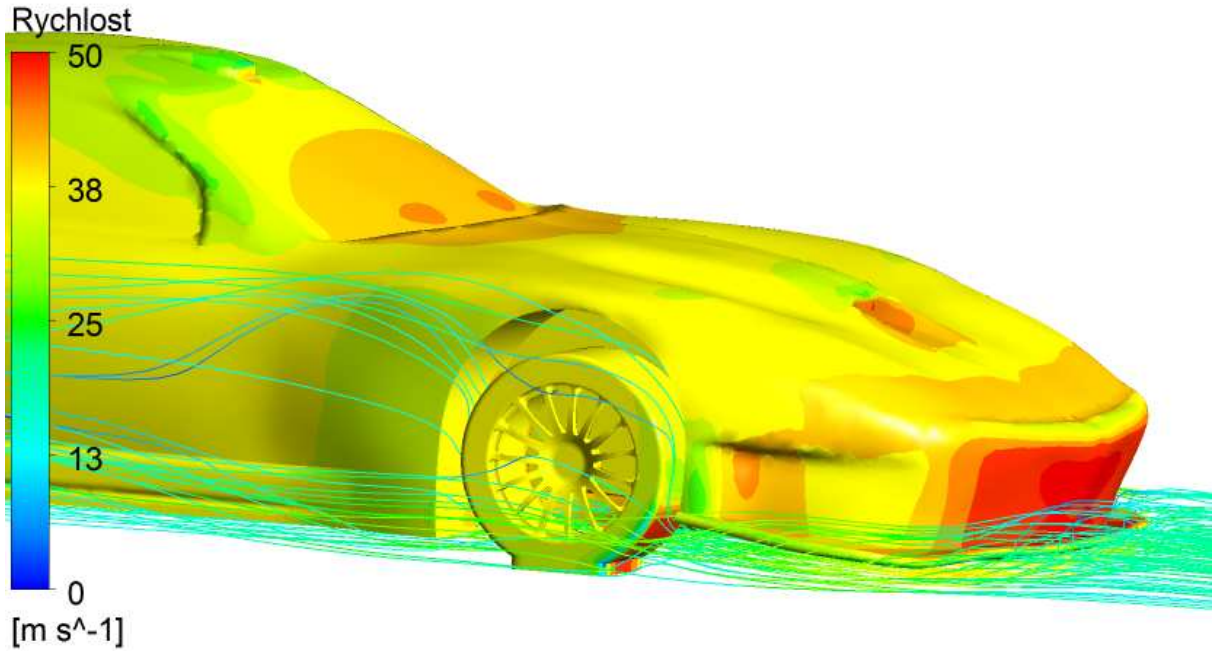
Porovnání proudění v předním podběhu je na následujících obrázcích. Pro dobrou ilustraci víření proudu vzduchu v podbězích byl zvolen menší průměr předních kol. Proudnice začínají ve výšce náběžné hrany předního spoileru.



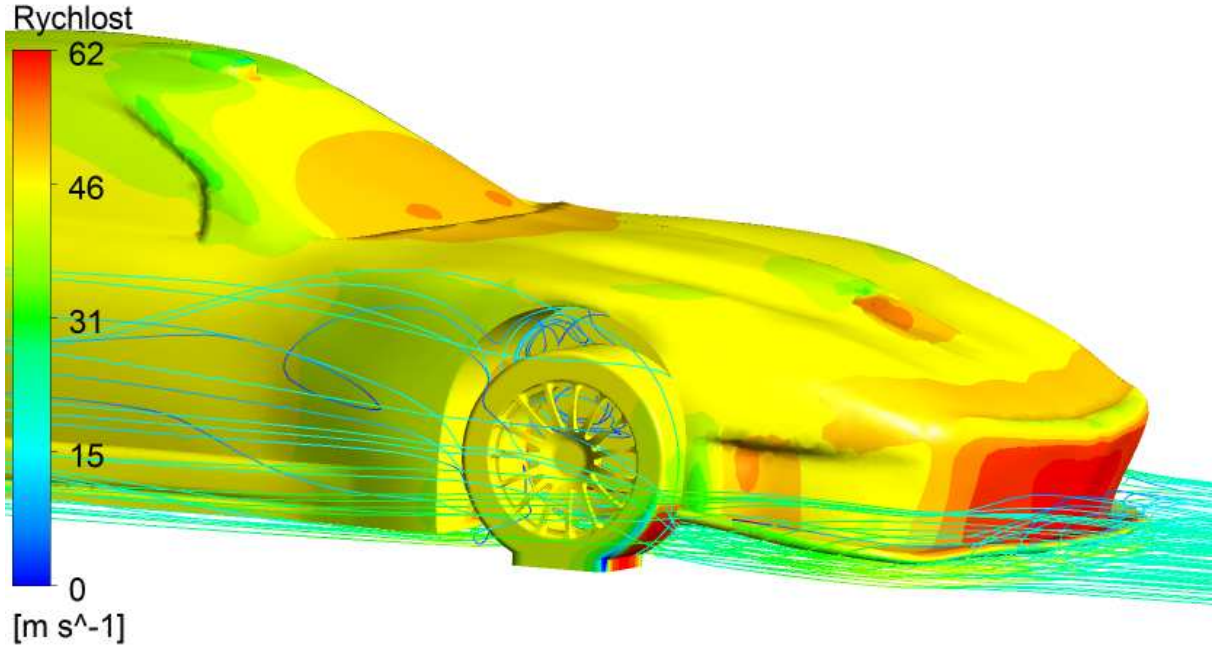
Obr. 74. Zobrazení proudnic v předním podběhu vozidla se stacionárními zjednodušenými koly a stacionární vozovkou



Obr. 75. Zobrazení proudnic v předním podběhu vozidla s rotujícími zjednodušenými koly a pohybující se vozovkou



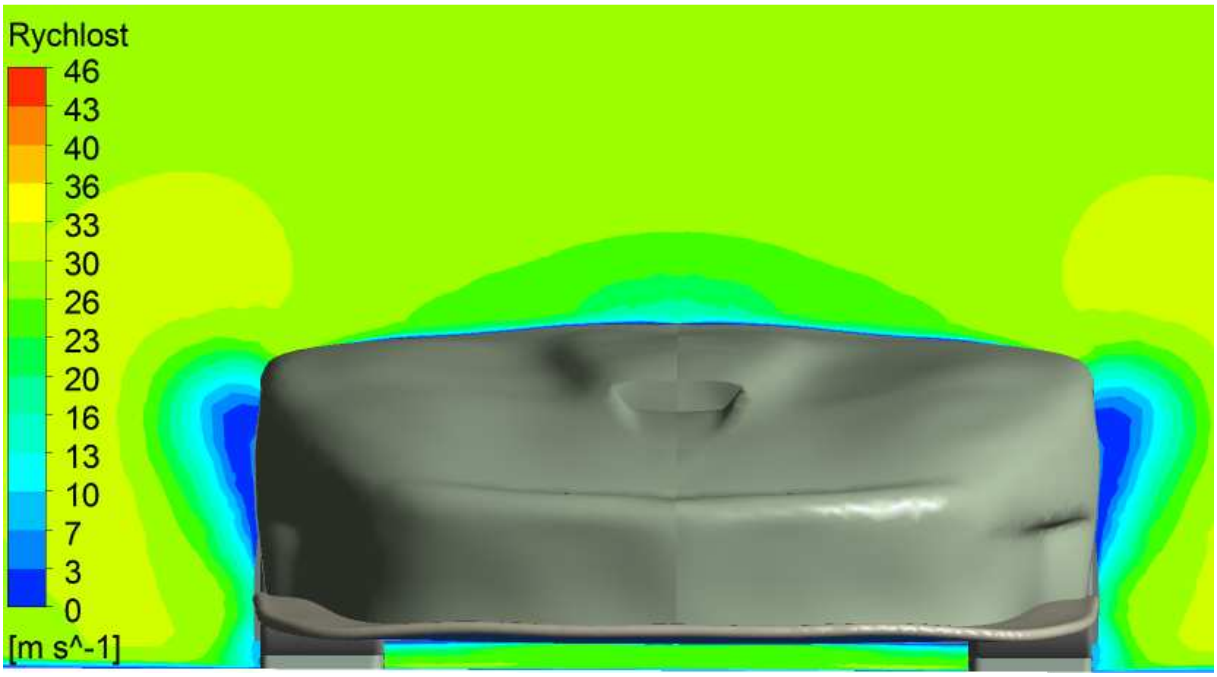
Obr. 76. Zobrazení proudnic v předním podběhu vozidla se stacionárními detailními koly a stacionární vozovkou



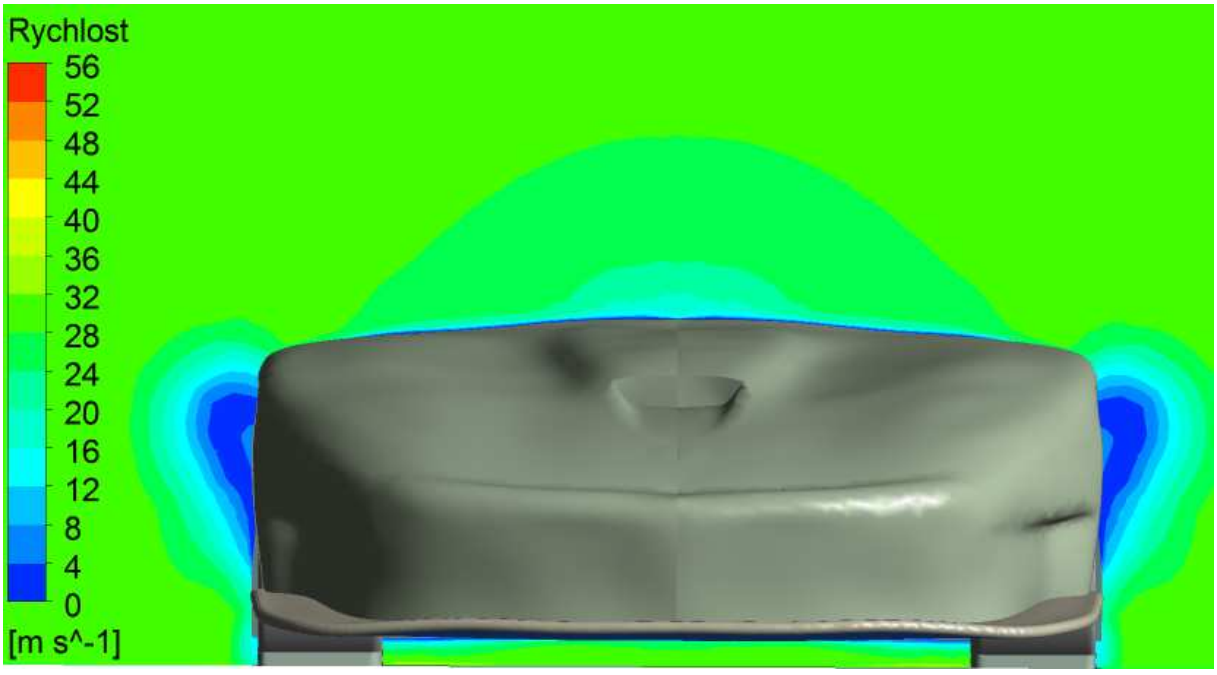
Obr. 77. Zobrazení proudnic v předním podběhu vozidla s rotujícími detailními koly a pohybující se vozovkou

Proudění okolo vozu se stacionárními koly je podobné jako u obr. 11. v kapitole 3.5. Proud vzduchu bez víření pokračuje plynule podél kola a po odtržení dále směřuje podél vozu. Na obrázcích s rotujícími koly lze vidět zpětné proudění vzduchu v podběhu a rozvíření vzduchu v podbězích. Toto rozvíření vzduchu také zvyšuje aerodynamický odpor a je tedy důvodem většího koeficientu odporu vzduchu u varianty s rotujícími koly a pohybující se vozovkou. Proto je důležité zvolit správný poměr mezi objemem podběhů a objemem kola jak je ukázáno na obr. 26. v kapitole 5.

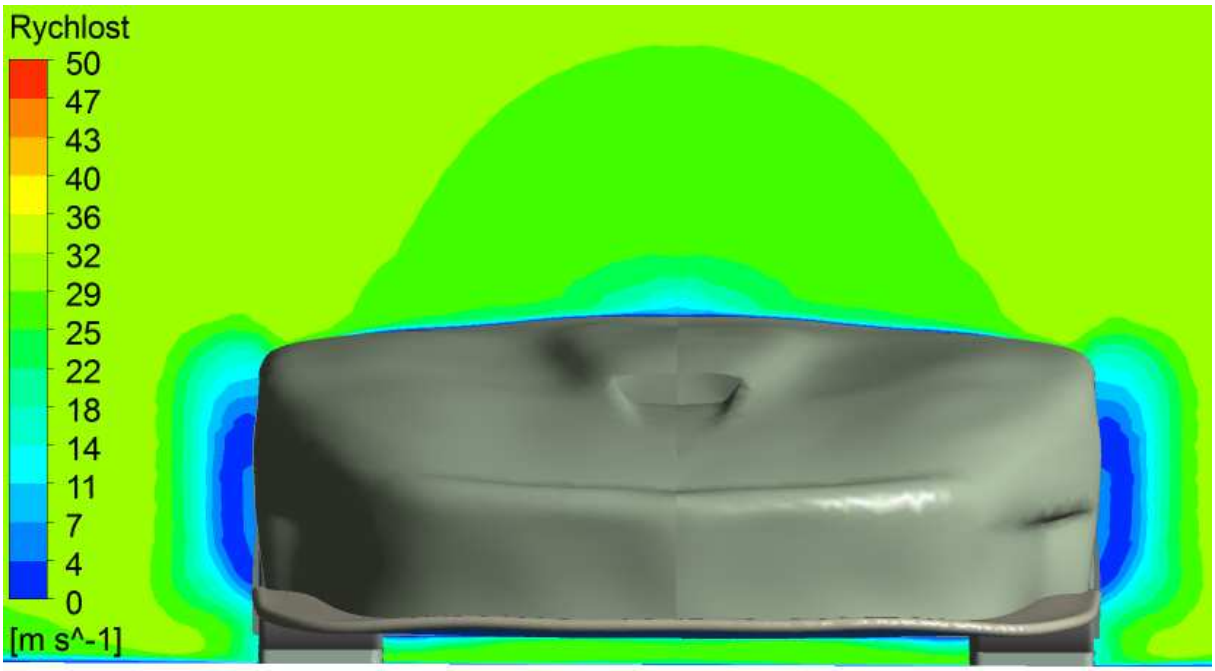
Z polí rychlostí vzduchu kolem vozidla je vidět rychlostní nárůst v mezní vrstvě, kdy na povrchu je rychlost vzduchu nulová a exponenciálně se zvětšuje. Toto pole je vytvořeno v rovině ve vzdálenosti 0,5 m za osou předního kola. Je zde také vidět rozdíl mezi tvarem rozložení a velikosti rychlostí vzduchu u jednotlivých variant.



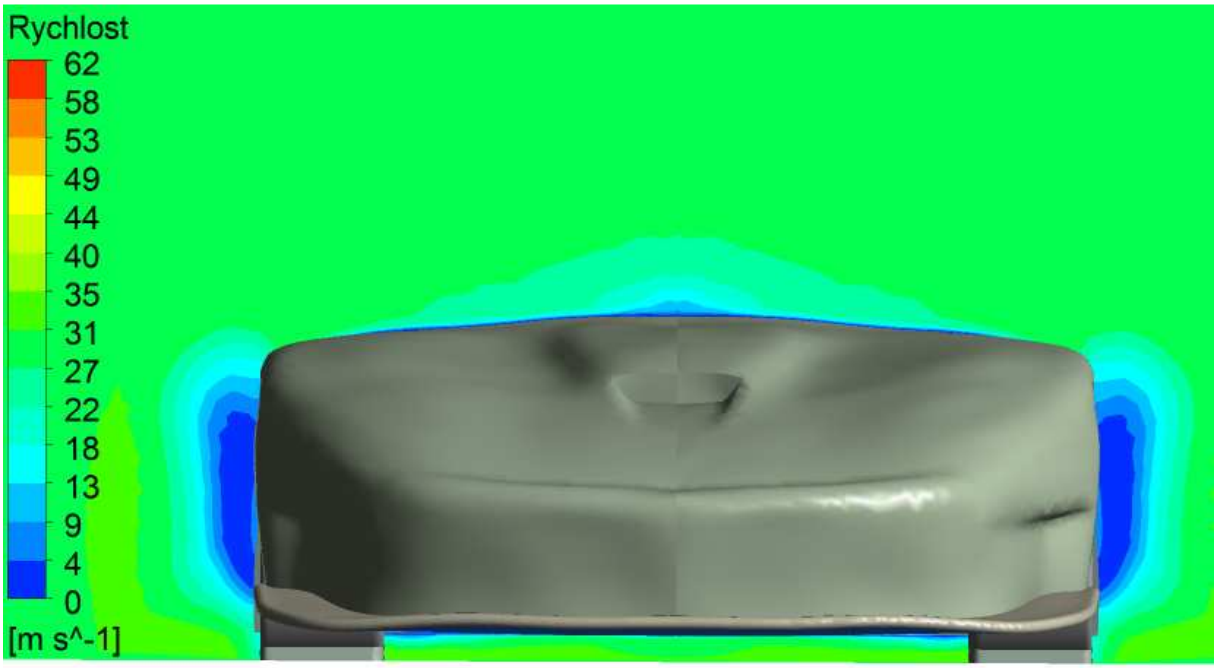
Obr. 78. Pole rychlosti u vozidla se stacionárními zjednodušenými koly a stacionární vozovkou



Obr. 79. Pole rychlosti u vozidla s rotujícími zjednodušenými koly a pohybující se vozovkou

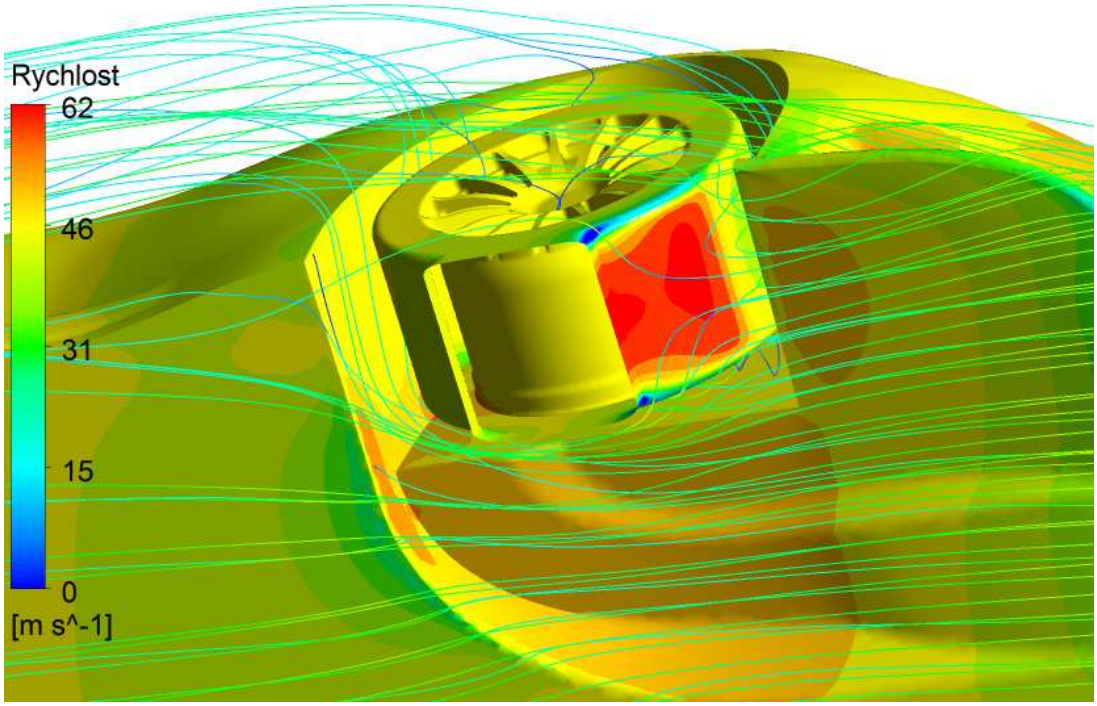


Obr. 80. Pole rychlosti u vozidla se stacionárními detailními koly a stacionární vozovkou

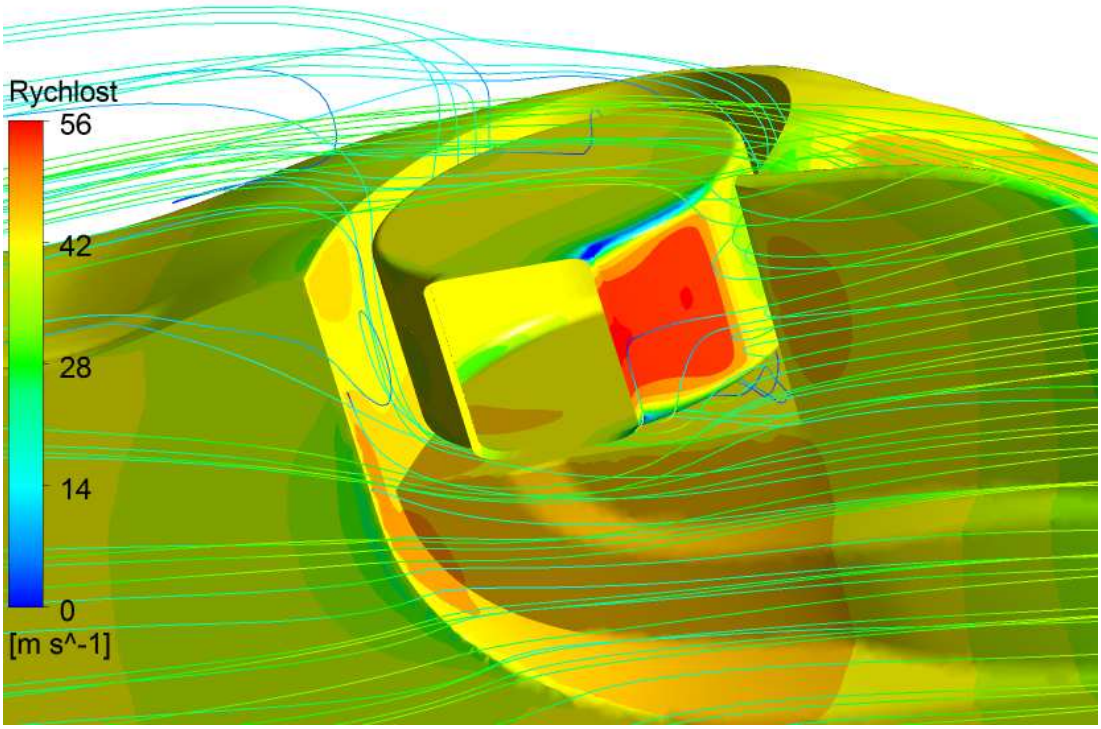


Obr. 81. Pole rychlosti u vozidla s rotujícími detailními koly a pohybující se vozovkou

Jak lze vidět z obrázků, tvar rychlostí polí závisí na tvaru kol, v případě rotujících kol je větší výskyt nulové rychlosti v oblasti za koly.



Obr. 82. Proudění v předním přívodním kanálu u rotujících detailních kol



Obr. 83. Proudění v předním přívodním kanálu u rotujících zjednodušených kol

Na obr. 82. a 83. je znázorněno proudění přívodním kanálem k předním kolům, tento kanál slouží k usměrnění proudu vzduchu ke kolům a k chlazení brzd. Proud vzduchu prochází prostorem za kolem i skrz něj. V případě zjednodušených kol je proud vzduchu omezen, tzn., že proud vzduchu neprochází skrz kolo, a tudíž dojde ke zvýšení aerodynamického odporu.

8. Moderní prvky pro zlepšení proudění vzduchu v oblasti kol

Karoserie u osobních sériově vyráběných automobilů je vhodně konstruována pro nízký odpor vzduchu. Snížení aerodynamického odporu o 10 % znamená snížit spotřebu paliva až o 2,5 %.

Moderní doba a trend snižování spotřeby a emisí byly důvody vzniku tzv. "eko" verzí osobních automobilů. Tyto automobily mají prvky pro snížení aerodynamického odporu. Těmito prvky jsou zmenšené nebo částečně zakryté otvory pro nasávání vzduchu, zakrytí spodní části vozu, tvarované deflektory pro usměrnění proudu vzduchu, pneumatiky s nízkým valivým odporem, speciální poklice na kolech a další.

Zlepšení aerodynamiky v oblasti kol vede ke značné redukci aerodynamického odporu, proto výrobci automobilů v současnosti kladou důraz na vývoj prvků, které snižují víření okolo kol nebo optimálně usměrňují proud vzduchu. Toto jde nejlépe vidět na nejnovějších konceptech.

V následujících podkapitolách jsou vybrané prvky, které zlepšují aerodynamiku v oblasti kol.

8.1 Deflektory nebo clony před koly

Deflektory před koly usměrňují optimálně proud vzduchu, přičemž část proudu vzduchu ochlazuje brzdy. Jedním z prvních průkopníků v této oblasti byla MAZDA.

Na obr. 85. jsou clony pro zabránění přívodu velkého množství vzduchu k předním kolům, k usměrnění proudu pro chlazení brzd a vyvedení proudu vzduchu skrz kola u Porsche Panamera. Dále je zde zakrytí celé spodní části vozu.



Obr. 85. Porsche Panamera [13]

8.2 Speciálně tvarovaná kola

U konceptu BMW Vision Efficient Dynamics byly použity speciálně tvarovaná kola, které proud vzduchu směřovaly do středu kol, a tím se zredukovalo víření vzduchu kolem kol.



Obr. 86. Speciálně tvarovaná kola BMW [14]

8.3 Zakrytá nebo částečně zakrytá kola

Z minulosti známé zakrytí kol zlepšuje aerodynamické charakteristiky, protože také zabraňuje víření vzduchu kolem kola.



Obr. 87. TOYOTA Prius G Sports Concept [15]

Porsche 918 Spyder má vylepšené proudění v oblasti kol použitím čirých částečných krytů kol. Zabraňuje se tím rozvíření vzduchu kolem kol.



Obr. 88. Porsche 918 Spyder [16]

8.4 Vzduchová clona

Vzduchová clona také redukuje aerodynamický odpor. V případě BMW Vision Efficient Dynamics vytváří tuto clonu dva otvory v čelním spoileru. Těmito otvory je vzduch veden ve dvou kanálech po vnitřní straně nárazníku až do podběhu kola. Zde velkou rychlostí vystupuje malým otvorem a na vnější straně rotujícího kola vytváří ochrannou clonu proti vzniku turbulencí.



Obr. 89. BMW Vision EfficientDynamics [14]

Někteří výrobci automobilů v současnosti už aktivně využívají deflektory před předními koly. Další aerodynamické prvky se nachází především jen u konceptů, je však jen otázka času, kdy dojde k dalšímu zavedení součástí z konceptů do sériově vyráběných automobilů.

9. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provedení výpočtového posouzení vlivu nastavení okrajových podmínek v CFD softwaru na výsledné aerodynamické charakteristiky zvoleného vozidla. Pro tuto úlohu byl sestaven CFD model a byly vypočteny aerodynamické charakteristiky pro dvě varianty výpočtu a pro dva typy modelu. První varianta výpočtu byla pro vůz se stacionárními koly a stacionární vozovkou. Druhá pro vozidlo s rotujícími koly a pohybující se vozovkou. Toto bylo realizováno nastavením rozdílných okrajových podmínek v CFD softwaru. Rozdíl v modelech byl v použití zjednodušených a detailních kol. V práci je posouzen vliv rotace kol na aerodynamické charakteristiky vozu jak vypočtenými hodnotami, tak i vizuálně.

Ve srovnání s články uvedené v seznamu použité literatury se výsledky liší. V literatuře se udává u vozidla s rotujícími koly a pohybující se vozovkou menší koeficient odporu vzduchu než v případě vozidla se stacionárními koly a stacionární vozovkou. V mé úloze byl koeficient odporu vzduchu ve variantě vozidla s rotujícími koly a pohybující se vozovkou větší. Vypočtený koeficient přítlaku v mé úloze je větší v případě rotujících kol, v literatuře se udává u rotujících kol menší koeficient vztlaku. Koeficient přítlaku je záporná hodnota koeficientu vztlaku, tudíž výsledky s literaturou souhlasí. Rozdíl v koeficientech odporu vzduchu udávaných v literatuře a ve vypočtených hodnotách je zapříčiněn rozdílem mezi modely vozidel. Mým modelem byla okruhová verze sportovního vozidla Ferrari Maranello na rozdíl od sériově vyráběného konvečního vozidla. Tyto modely se lišily především světlou výškou, kdy mé vozidlo mělo skoro minimální světlou výšku pro jízdu po okruzích a konvenční vozidlo mělo světlou výšku o mnoho větší, aby bylo schopno nést nástrahy reálných silnic. Dalším rozdílem bylo, že můj model nebyl průchozí. Tudíž vyšší aerodynamický odpor u varianty s rotujícími koly byl částečně způsoben zvýšeným tlakem v podběžích. Důvodem většího aerodynamického odporu v případě rotujících kol bylo také použití menšího průměru předních kol pro znázornění proudění v podběžích. Závěrem lze říci, že vliv rotace kol závisí především na typu a konstrukci automobilu a hlavními prvky, které ovlivňují aerodynamické charakteristiky vozu, jsou světlá výška, rozměry a tvar kol, podběhů a podvozku a uskutečnění přívodu vzduchu otvory v předním spoileru. Největší vliv z hlediska aerodynamiky mají rotující kola u vozidel s odkrytými koly např. formulového typu. Výsledky simulací proudění vzduchu kolem vozidel s rotujícími koly a pohybující se vozovkou nám přesně ukazují jaké síly, tlaky a průběhy proudnic při jízdě reálného vozidla vznikají. Těmito simulacemi můžeme nahradit časově i ekonomicky náročné měření v aerodynamických tunelech. Z hlediska výpočtu nejlépe konvergovala úloha pro vozidlo s rotujícími detailními koly a pohybující se vozovkou a nejhůře pro vozidlo s rotujícími zjednodušenými koly a pohybující se vozovkou.

Požadovaný cíl diplomové práce byl splněn. Bylo provedeno výpočtové posouzení vlivu nastavení okrajových podmínek v CFD softwaru na výsledné aerodynamické charakteristiky vozidla. Realizace jednotlivých variant výpočtu vedla k posouzení vlivu rotace kol.

V této práci lze pokračovat optimalizací objemového poměru podběhů a kol, domodelováním prvků, které zlepšují proudění v oblasti kol vozidla, nastavením průchozího modelu, nastavením optimální světlé výšky a následným zjištěním redukce koeficientu odporu vzduchu.

Seznam použitých zdrojů

[1] KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed.* Bentley Publishers 2006, ISBN 0-8376-0142-8

[2] WOLF-HEINRICH HUCHO, *Aerodynamics of Road Vehicles*, Society of Automotive Engineers, Inc. 1998, ISBN 0-7680-0029-7

[3] ALEXANDER WÄSCHLE, *The Influence of Rotating Wheels on Vehicle Aerodynamics - Numerical and Experimental Investigations*, Society of Automotive Engineers, Inc. 2007

[4] VANČURA, J. *Výpočet aerodynamiky závodního automobilu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 77 s.

[5] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 27.2. 2010 [cit. 2010-03-20]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Jamais_ contente.jpg>

[6] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 8.3. 2010 [cit. 2009-11-10]. Dostupné z WWW: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rumpler_Tropfenwagen. jpg&fileti mestamp=20060819114233>

[7] ALL CAR CENTRAL. [online]. 2010 [cit. 2010-05-18]. Dostupné z WWW: < http://www.allcarcentral.com/Audi/Audi_Type_K_1923_Audi_Photo-2009.jpg>

[8] LEGASY MOTORS. [online]. Poslední revize 2010 [cit. 2009-11-10]. Dostupné z WWW: <http://www.diecast.org/data/sac_cars/ex97192.jpg>

[9] MOTORPASION. [online]. Poslední revize 2010 [cit. 2010-05-19]. Dostupné z WWW: <http://img.motorpasion.com/2007/02/1937_auto_union_type_c-01.jpg>

[10] AUTOMOTOREVUE.CZ. *BMW AVZ - Aerodynamická strategie* [online]. Poslední revize 10. 2009 [cit. 2010-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.automoto revue.cz/auto/ technika/bmw-avz-aerodynamicka-strategie.html>

[11] DALCO. [online]. Poslední revize 2010 [cit. 2010-05-19].Dostupné z WWW: <http://www.dalco.ch/fileadmin/Press_pictures/Albert_2/ Dalco_Supercomputer_CFD_BMW_F1_PressurePath.jpg

[12] FERRARI. [online]. Poslední revize 2010 [cit. 2010-05-19]. Dostupné z WWW: <http://www.ferrari.com/English/GT_Sport%20Cars/Classiche/All_Models/ Pages/550_Maranello.aspx>

[13] CUBI[CC]APACITY. [online]. Poslední revize 2009 [cit. 2010-01-7]. Dostupné z WWW: <http://www.cubiccapacity.com/wpcontent/uploads/2009/03/2009_porsche_panamera_technical_preview_003-0318-950x650.jpg>

[14] CAR BODY DESIGN. *Automotive design & Engineering* [online]. Poslední revize 31.9. 2009 [cit. 2010-02-18]. Dostupné z WWW: <http://www.carbodydesign.com/archive/2009/08/31-bmw-vision-efficientdynamics-concept/BMW-Vision-EfficientDynamics-Concept-Wheel-1.jpg> <http://www.carbodydesign.com/gallery/2009/08/31-bmw-vision-efficientdynamics-concept/1/>

[15] DRIVE ARABIA. *Auto news block* [online]. Poslední revize 21. 1. 2010 [cit. 2010-02-18]. Dostupné z WWW: <http://www.drivearabia.com/news/wp-content/uploads/2010/01/Toyota-Prius-G-Sports-concept.jpg>

[16] DESIGN MAG. [online]. Poslední revize 13. 4. 2010 [cit. 2010-04-18]. Dostupné z WWW: <http://www.designmagazin.cz/foto/2010/04/porsche-918-spyder-1.jpg>

[17] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 16. 11. 2009 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnusův_jev>

[18] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 16. 4. 2010 [cit. 2010-02-12]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Aerodynamika>

[19] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [online]. Poslední revize 3. 3. 2010 [cit. 2010-05-01]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Buckau_Flettner_Rotor_Ship_LOC_37764u.jpg>

Seznam použitých veličin a jednotek

θ	[°]	úhel odtržení přilnutého proudění na kolech automobilu
ν	[Ns/m2]	kinematická viskozita
ρ	[Kg/m3]	hustota
c_x , c_D	[-]	koeficient odporu
c_z , c_L	[-]	koeficient vztlaku
d	[-]	charakteristický rozměr
F_x	[N]	aerodynamický odpor
F_y	[N]	aerodynamická boční síla
F_z	[N]	aerodynamický vztlak
p	[Pa]	tlak
V	[m/s]	rychlost
$V\infty$	[m/s]	rychlost volného proudu
ω	[rad/s]	úhlová rychlost
R	[m]	poloměr kola
Re	[-]	Reynoldsovo číslo