



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VLIV ZADNÍ ČÁSTI KAROSERIE NA AERODYNAMICKOU INTERAKCI VOZIDEL

INFLUENCE OF THE REAR PART OF THE CAR BODY ON AERODYNAMIC INTERACTION OF VEHICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Vondruš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vančura, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Jan Vondruš**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vančura, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 zadní části karoserie na aerodynamickou interakci vozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na CFD výpočty aerodynamické interakce vozidel. Těžiště práce leží ve srovnání vlivu různých kombinací zádě (Fastback, Notchback a Estateback) vozidla DrivAer na jejich vzájemnou interakci.

Cíle diplomové práce:

Provést rešerši daného tématu.
Sestavit CFD modely vhodných kombinací za sebou jedoucích vozidel.
Realizovat vlastní výpočty.
Analyzovat výsledné integrální hodnoty a proudové pole.

Seznam doporučené literatury:

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road Vehicles. 4th edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.
GILLESPIE, Thomas. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
ředitel ústavu	děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na CFD simulaci jízdy skupiny dvou za sebou jedoucích vozidel DrivAer v různých karosářských variantách. Pro karosářské varianty Estateback, Fastback a Notchback jsou vytvořeny CFD modely, které jsou následně řešeny pomocí turbulentního modelu k-epsilon. Cílem práce je analýza vlivu zadní části karoserie vozů na jejich aerodynamické charakteristiky s ohledem na jízdu ve skupině.

KLÍČOVÁ SLOVA

DrivAer, Estateback, Fastback, Notchback, úplav, interakce, platooning, odpor, aerodynamický koeficient, CFD

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on CFD simulation of two platooning DrivAer cars with varying bodyworks. CFD models are made for bodywork variants Estateback, Fastback and Notchback, which are solved by k-epsilon turbulent model. Influence of rear body design on platooning and aerodynamics characteristics is analyzed.

KEYWORDS

DrivAer, Estateback, Fastback, Notchback, wave, interaction, platooning, drag, aerodynamic coefficient, CFD

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VONDRUŠ, Jan. *Vliv zadní části karoserie na aerodynamickou interakci vozidel*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124867>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 72 s. Vedoucí práce Jan Vančura.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. června 2020

.....

Bc. Jan Vondruš

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Vančurovi, Ph.D., za odbornou pomoc, cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval.

OBSAH

Úvod	11
1 Základní fyzikální veličiny a vztahy pro popis aerodynamiky vozidel.....	12
1.1 Hustota a viskozita vzduchu	12
1.2 Tlak, Bernoulliho rovnice	12
1.3 Mezní vrstva, laminární a turbulentní proudění.....	13
1.4 Reynoldsovo číslo.....	13
1.5 Navier–Stokesova rovnice	13
1.6 Aerodynamické síly a momenty	14
2 Aerodynamický odpor.....	15
2.1 Vliv tvaru karoserie na aerodynamický odpor.....	15
2.2 Vliv jízdy v úplavu na aerodynamický odpor.....	18
2.2.1 Platooning.....	18
2.2.2 Předchozí výzkumy jízdy v úplavu	19
3 Měření a simulace proudění	21
3.1 Technický experiment jízdní zkouškou	21
3.2 Aerodynamický tunel.....	21
3.3 CFD.....	22
3.4 Referenční modely vozidel	23
3.4.1 Ahmed, Mira a SAE modely	23
3.4.2 DrivAer model.....	24
4 Numerické řešení proudění.....	25
4.1 Metody RANS	26
4.2 Modely EVM	26
4.2.1 Model k-epsilon.....	26
4.2.2 Model k-omega.....	27
4.3 Výpočetní síť	27
4.3.1 Povrchové síťování.....	28
4.3.2 Objemové síťování	28
4.4 Modelování mezní vrstvy	30
4.5 Přehled dostupného softwaru.....	31
5 Příprava simulace	32
5.1 Definice souřadných systémů vozu a kol	32
5.2 Rozklad sil	32
5.3 Příprava geometrie modelu DrivAer.....	33
5.4 Příprava výpočetní oblasti	34
5.5 Příprava sítě	36
5.5.1 Výchozí nastavení sítě	36
5.5.2 Lokální nastavení sítě	37
5.5.3 Kontrola a velikost sítě	38
5.5.4 Kontrola mezní vrstvy sítě.....	39
5.6 Nastavení fyzikálního modelu	40
5.6.1 Nastavení řešiče.....	40

5.6.2	Inicializační a referenční podmínky simulace, proudící médium	40
5.6.3	Nastavení průběhu řešení	40
5.7	Nastavení výpisu informací, scén, monitorů a grafů	41
6	Výsledky metody k-epsilon	42
6.1	Zpracování dat	42
6.2	Simulace jízdy samotného vozu	42
6.2.1	Estateback	44
6.2.2	Fastback	45
6.2.3	Notchback	46
6.3	Porovnání výsledků simulace s experimentem	47
6.4	Simulace jízdy dvou vozů	48
6.5	Jízda skupiny stejné konstrukce karoserie	48
6.5.1	Vliv jízdy ve skupině na první vůz skupiny	48
6.5.2	Vliv jízdy ve skupině na druhý vůz skupiny	48
6.5.3	Porovnání úplavu pomocí izoploch koeficientu celkového tlaku	49
6.5.4	Porovnání rychlostních polí úplavu	50
6.5.5	Porovnání rozmístění tlaku na povrchu karoserie	51
6.5.6	Pozitivní vliv úplavu na druhý vůz	53
6.5.7	Negativní vliv úplavu na druhý vůz	54
6.6	Jízda za vozem Estateback	57
6.6.1	Vliv jízdy ve skupině na první vůz skupiny	57
6.6.2	Vliv jízdy ve skupině na druhý vůz skupiny	57
6.7	Vliv jízdy ve skupině na vztlak vozidel	58
7	Výsledky metody k-omega	59
7.1	Porovnání metod k-epsilon a k-omega	59
7.1.1	Časová náročnost simulace	59
7.1.2	Porovnání výsledků metod	60
7.2	Jízda samotného vozu	60
7.3	Jízda ve skupině	61
	Závěr	63
	Seznam použitých zkratk a symbolů	68
	Seznam příloh	72

ÚVOD

Aerodynamika vozu má zásadní vliv při vyšších rychlostech jízdy. Již při rychlosti $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ u něj převládají ztráty aerodynamické nad mechanickými. Stále rostoucí požadavky na ekologii a ekonomiku provozu vozidel nutí výrobce automobilů prohlubovat studium optimálního obtékání vozu, avšak návrh aerodynamiky samotného vozidla je dnes díky rozšířenému použití CFD společně s experimentálním měřením v tunelu doveden téměř k dokonalosti. Aerodynamika vozu je vždy kompromisem mezi požadavky na design, bezpečnost, funkčnost a výslednou cenu.

S příchodem stále častějšího využití autonomních systémů v dopravě se výzkum aerodynamiky nesoustředí pouze na samotný vůz, ale i na jízdní skupinu vozů a jejich aerodynamickou interakci. Použité systémy umožňují zmenšit rozestup vozidel na minimum, a tak maximalizovat pozitivní snížení odporu jízdní soupravy. Vzhledem k omezeným rozměrům tunelu a značné délce jízdní soupravy v reálném měřítku společně s vysokou variabilitou proměnných, jako jsou například druhy vozidel, jejich karosářské varianty či rozestupy, se pro analýzy těchto vlivů stává CFD primárním nástrojem.

Cílem diplomové práce je vytvořit CFD modely jízdní soupravy dvou vozidel s využitím modelu vozu DrivAer a porovnat vliv jednotlivých typů zadí Estateback, Notchback a Fastback na jejich aerodynamické charakteristiky při jízdě v úplavu pro různé modely turbulence.

1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VELIČINY A VZTAHY PRO POPIS AERODYNAMIKY VOZIDEL

Aerodynamika řeší silové působení plynného média na obtékané pevné těleso, přičemž při analýze těchto fyzikálních jevů se využívá relativity pohybu, kdy těleso stojí a plyn se pohybuje. V následující části jsou stručně popsány základní fyzikální veličiny a vztahy související s aerodynamikou vozidel.

1.1 HUSTOTA A VISKOZITA VZDUCHU

Pro nízké rychlosti používané v automobilovém průmyslu, tedy zhruba do $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, je hustota vzduchu $\rho \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ na povrchu vozu téměř neměnná, proto se při výpočtech uvažuje jako konstantní a vzduch jako nestlačitelný. V ideálním (neviskózním) prostředí nevznikají aerodynamické síly, v reálném prostředí kvůli vnitřnímu tření vznikají víry či odtržení proudu. Viskozita vzduchu se určuje v daném bodě a je závislá na teplotě a tlaku. Lze rozlišit viskozitu kinematickou a dynamickou, pro které platí vztah:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.1)$$

Kde:

ν kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

η dynamická viskozita [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]

Viskozita je konstantou úměrnosti mezi napětím a rychlostí deformace kapaliny. Pro newtonovské kapaliny platí:

$$\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial Y} \quad (1.2)$$

Kde:

τ tečné napětí [Pa]

$\frac{\partial v}{\partial Y}$ gradient rychlosti ve směru kolmém na rychlost [s^{-1}]

1.2 TLAK, BERNOULLIHO ROVNICE

Bernoulliho rovnice je základní rovnicí pro porozumění vztahu mezi tlakem a rychlostí. Celkový tlak p_{tot} je roven součtu statického p_s a dynamického tlaku p_d . Součet statického a dynamického tlaku v kterémkoliv bodě na povrchu vozu je konstantní, roven součtu statického a dynamického tlaku v nenarušeném okolí:

$$p_s + p_d = p_s + \frac{1}{2} \rho v^2 = p_{tot} = konst. \quad (1.3)$$

1.3 MEZNÍ VRSTVA, LAMINÁRNÍ A TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

Mezní vrstvou se označuje oblast proudu kapaliny v blízkosti povrchu obtékaného tělesa. Na povrchu tělesa je rychlost proudění nulová, postupně roste až do rychlosti v_∞ nerozrušeného proudu vzduchu na hranici mezní vrstvy. Pro většinu aerodynamických problémů je oblast vně mezní vrstvy považována za oblast proudění ideální tekutiny. Gradient rychlosti je zde nulový, kapalina je tedy považována za neviskózní. Nedochozí zde k výměně momentu, energie ani hmoty. Proudění v mezní vrstvě závisí na místní rychlosti a lze jej rozdělit na laminární a turbulentní. Proudnice laminárního proudění se navzájem nemísí a jsou rovnoběžné. Při turbulentním proudění dochází k promísení proudnic, a tím vzniku vírů.

1.4 REYNOLDSOVO ČÍSLO

Pomocí Reynoldsových kritických čísel známých pro jednoduché geometrie lze určit, zda proudění bude laminární, nebo turbulentní. Reynoldsovo číslo je definováno jako:

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad (1.4)$$

ν rychlost proudění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

l charakteristický rozměr [m]

Jako charakteristický rozměr se v automobilovém průmyslu nejčastěji volí celková délka vozu či rozvor, případně průměr kruhu o stejném obsahu jako maximální čelní průmět vozu.

1.5 NAVIER–STOKESOVA ROVNICE

Navier–Stokesova (N–S) rovnice vyjadřuje zákon zachování hybnosti v proudící stlačitelné viskózní tekutině a jedná se o vektorovou diferenciální rovnici. Analytické řešení má pouze pro jednoduché případy, zatímco pro složitější úlohy lze výsledek získat jen přibližně pomocí numerických metod. Existence kompletního řešení N–S rovnice ve třech dimenzích je součástí Problémů tisíciletí [1]. Obecný tvar N–S rovnice pro reálnou tekutinu lze zapsat ve formě součtu jednotlivých členů zrychlení jako:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \text{grad } \vec{v} = \vec{A}_v - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \vec{v} + \frac{\nu}{3} \text{grad } \text{div } \vec{v} \quad (1.5)$$

$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ lokální zrychlení

$\vec{v} \text{grad } \vec{v}$ konvektivní zrychlení

$\vec{A}_v$ objemové zrychlení

$\frac{1}{\rho} \text{grad } p$ zrychlení gradientu tlakového spádu

$\nu \Delta \vec{v}$ zrychlení nutné k překonání viskozity tekutiny

$\frac{\nu}{3} \text{grad } \text{div } \vec{v}$ zrychlení k překonání viskozity tekutiny způsobené její stlačitelností

1.6 AERODYNAMICKÉ SÍLY A MOMENTY

Příčinou aerodynamické síly působící na vůz je rozložení tlaku p a smykové síly τ na povrchu vozu [2]. Aerodynamickou sílu lze rozložit na složky aerodynamického odporu F_x , aerodynamického vztlaku F_z a aerodynamické boční síly F_y . Tyto síly jsou definovány rovnicí (1.6) jako:

$$F_{x,y,z} = \frac{1}{2} c_{x,y,z} \rho v_{\infty}^2 A \quad (1.6)$$

Kde:

$c_{x,y,z}$ aerodynamický součinitel tvaru [-], dále také jako c_D pro aerodynamický koeficient odporu v ose X a c_L pro koeficient vztlaku v ose Z

v_{∞} rychlost nerozrušeného proudu vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

A referenční plocha, zde průmět čelní plochy vozu [m^2]

Rychlost nerozrušeného proudu vzduchu v_{∞} vychází ze součtu rychlosti větru v_V a záporné rychlosti vozu v :

$$\vec{v}_{\infty} = \vec{v} + \vec{v}_V \quad (1.7)$$

Aerodynamický součinitel tvaru c_D , častěji také označovaný jako aerodynamický koeficient odporu, se získává experimentálně v aerodynamickém tunelu, případně numericky pomocí CFD. Vždy je nutné uvést, k jaké referenční ploše A se c_D vztahuje [3].

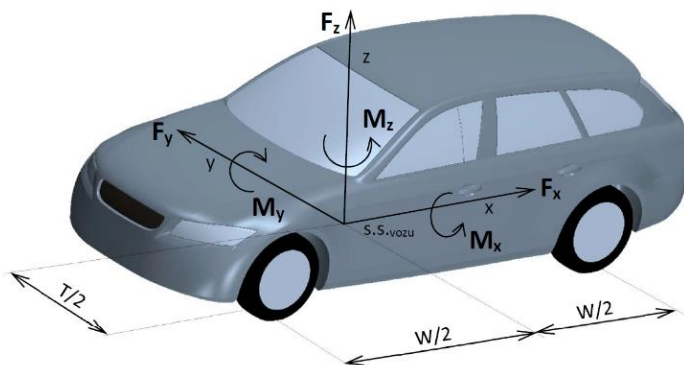
Aerodynamické momenty vozu lze rozložit do os souřadného systému na moment klopení M_x , klonění M_y a stáčení M_z :

$$M_{x,y,z} = \frac{1}{2} c_{M_{x,y,z}} \rho v_{\infty}^2 A W \quad (1.8)$$

$c_{M_{x,y,z}}$ aerodynamický koeficient momentu [-]

W rozvor kol vozu [m]

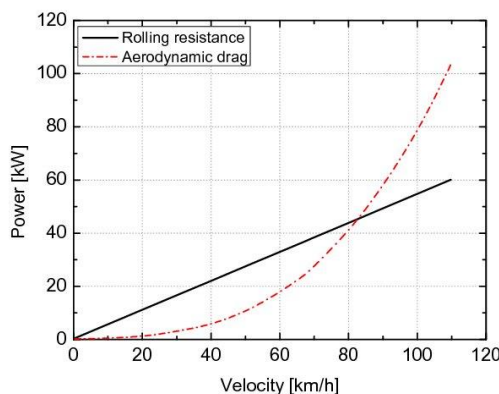
Souřadný systém vozu, výsledné síly a momenty jsou zřejmé z Obr. 1:



Obr. 1: Složky aerodynamických sil a momentů rozložené do os souřadného systému.

2 AERODYNAMICKÝ ODPOR

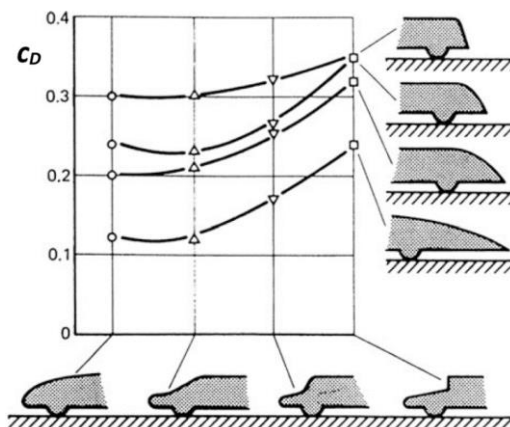
Aerodynamický odpor je při vyšších rychlostech podstatnou složkou energetických ztrát a jak je patrné z Obr. 2 již při běžné cestovní rychlosti okolo $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ převládá nad odporem valení, proto je důležité věnovat mu dostatečnou pozornost během návrhu nového vozu. Aerodynamický odpor lze dělit na odpor způsobený tvarem vozidla (55–90 %), odpor indukovaný vznikem aerodynamického vztlaču (3–10 %) a interferencí jednotlivých částí automobilu (10–20 %), odpor rotujících kol (5 %) a odpor vzniklý průchodem chladicího systému (10–20 %). Největší vliv má tedy odpor tvaru vozidla, který lze dělit na odpor tlakový (50–80 %) a třecí (5–10 %), jenž je ovlivněn viskozitou vzduchu a kvalitou povrchu vozu. Tlakový odpor vozu má zásadní dopad na celkový aerodynamický odpor, a tak nabízí největší možnost zlepšení aerodynamických vlastností vozu [4].



Obr. 2: Závislost velikosti aerodynamického a valivého odporu na rychlosti jízdy [5].

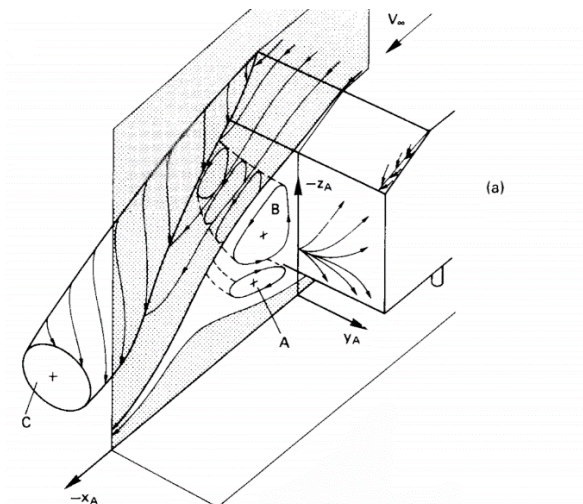
2.1 VLIV TVARU KAROSERIE NA AERODYNAMICKÝ ODPOR

Při obtékání proudy vzduchu kolem karoserie vozu se mění rozložení tlaku na jejím povrchu. Součtem statických tlaků na celém povrchu vozidla získáme výsledný tlakový odpor. Aerodynamický přetlak nastává v místě zpomaleného proudění, pro vůz typicky v oblasti přední masky. V místech s náhlou změnou geometrie dochází k odtržení proudy a vzniku úplavu s oblastí vysokého podtlaku. K odtržení proudy dochází především v zadní části karoserie či za koly vozu. Tento proces je často řízen vhodnými aerodynamickými prvky na voze. Vliv přední a zadní části vozu na aerodynamický součinitel tvaru C_D je zřejmý z Obr. 3.



Obr. 3: Vliv tvaru přední a zadní části karoserie na součinitel odporu [6].

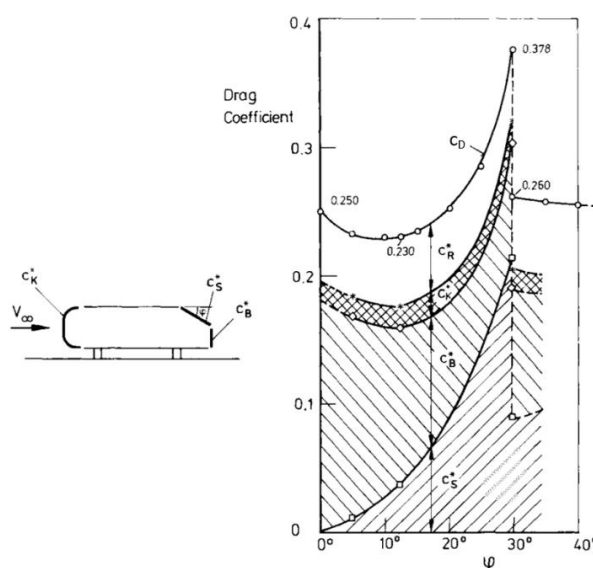
Jízda vozidel ve skupině je ovlivněna úplavem za vedoucím vozem. Zadní část karoserie má oproti tvaru přední části karoserie zásadní vliv na tvorbu úplavu, a proto bude dále podrobněji popsána. Obecný tvar úplavu byl nejprve studován na zjednodušeném modelu Ahmed v práci [7] při stacionárním proudění. Pozorovaný úplav za vozem je na Obr. 4.



Obr. 4: Tvar obecného úplavu za vozem [7].

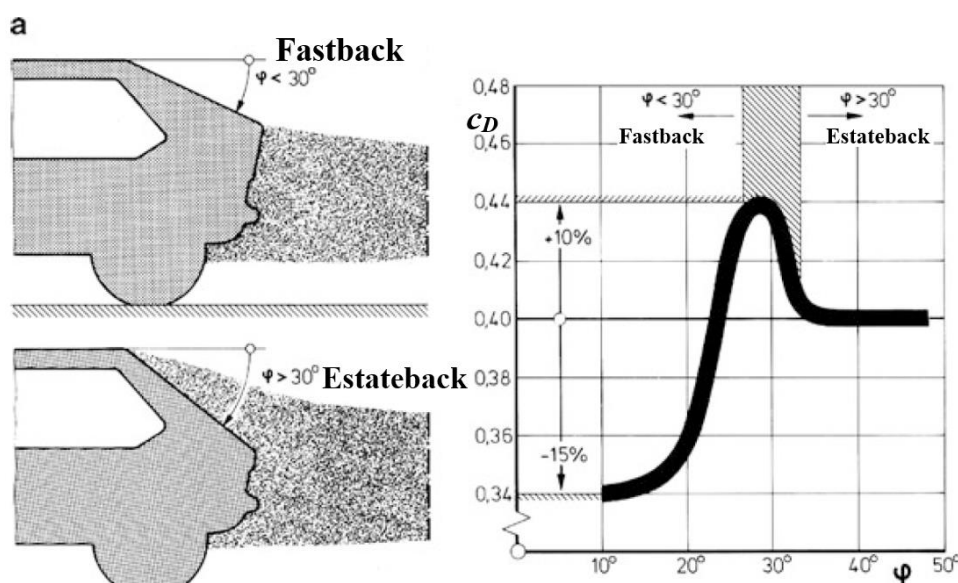
Utvořené víry lze rozdělit na kvazi-dvourozměrné víry a trojrozměrné víry. Kvazi-dvourozměrné víry označené jako A a B vznikají v separační bublině za zádí vozu a navzájem rotují v opačném směru. Výskyt a velikost trojrozměrného víru C, označovaného jako vír C-sloupku, je nejvíce ovlivněn sklonem zadní části karoserie. Velikost víru B závisí na velikosti víru C, tedy opět především na velikosti sklonu zadní části karoserie. Víř A je způsoben proudem mezi vozovkou a podlahou vozu a je zdrojem znečištění zádě vozu.

Vliv sklonu zadní části karoserie na odpor vozu byl prezentován ve studii [7], jež se zabývala testováním zjednodušeného modelu Ahmed s proměnným sklonem zádí v aerodynamickém tunelu. Výsledný graf vlivu úhlu sklonu zadní části karoserie na koeficient odporu je na Obr. 5.



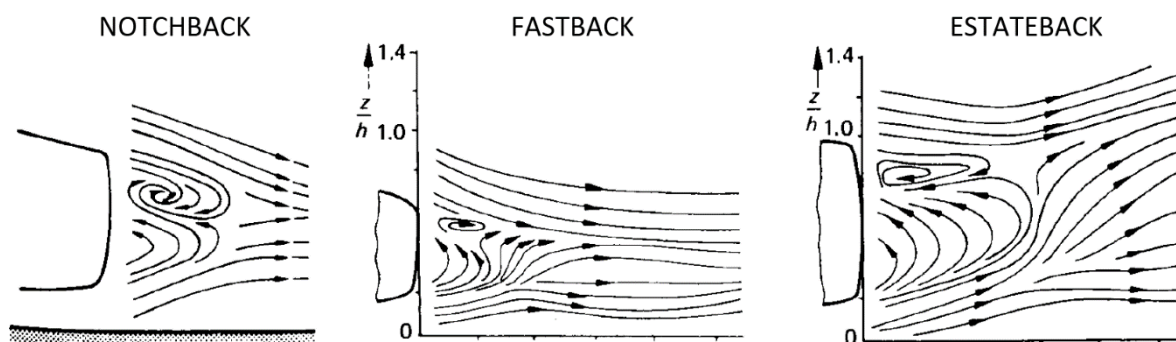
Obr. 5: Vliv sklonu zadní části karoserie na aerodynamický odpor zjednodušeného vozu Ahmed [7].

V grafu je zachycen celkový koeficient odporu vozu c_D , složený z třecího odporu c_R a tvarového odporu jednotlivých částí karoserie, tedy koeficient odporu čelní plochy c_K , koeficient odporu skloněné zádi c_S a svislé zádi c_B . Z grafu je patrný kritický úhel 30° , při jehož překročení dochází k razantnímu poklesu odporu vozidla, který se s rostoucím úhlem zádi již zásadně nemění. Tento pokles odporu je způsoben tím, že odtržený proud na hraně střechy se již nepřipojí v oblasti horní hrany kufru a separační vír B se dostává na skloněnou zád' vozu, kde vzniká nová separační oblast. Při úhlu větším než 30° či menším než 5° již nedochází k tvorbě C-vířů a režim obtékání je obdobný režimu obtékání vozu kombi. Správnost výsledků získaných Ahmedem podporuje experiment provedený při vývoji vozu VW Golf I. Kritický úhel 30° je zřejmý na Obr. 6.



Obr. 6: Vývoj zádě automobilu VW Golf I [8].

Tvar víru tvořený v delší vzdálenosti od zádě vozu má vliv na aerodynamický odpor druhého vozu, který se nachází v této oblasti úplavu. Zásadní rozdíly ve tvaru víru za vozem mezi jednotlivými karosářskými variantami jsou patrné z Obr. 7. Úplav za vozem Notchback i Fastback zřetelně klesá směrem k vozovce, víry A a B následují proud vycházející pod vozem a pokračují do strany směrem od roviny symetrie vozu, u varianty Estateback úplav stoupá, víry A a B stoupají ve směru proudu a postupují podél roviny symetrie vozu, k níž se přibližují.



Obr. 7: Tvar úplavu u různých karosářských variant [6].

Všeobecně lze říci, že nejmenšího aerodynamického odporu vozu se dosahuje u karosářské varianty Fastback, největšího naopak u varianty Estateback. Odpor zadní části vozu nutně souvisí se vztakovou silou na zadní nápravu, která je díky nejnižšímu odporu nejvyšší u varianty Fastback, naopak nejnižší je u varianty Estateback. Toto tvrzení je však zjednodušené, reálně existují případy, kdy verze Fastback dosahuje horších aerodynamických výsledků než verze Estateback, zejména pro potřebu vyššího přitlaku na zadní nápravu vozu. Nejpriznivěji se tak jeví jízda za vozem Estateback. U této varianty však dochází k zachování vírů A a B daleko za vozem, proto toto tvrzení není jednoznačné [4].

2.2 VLIV JÍZDY V ÚPLAVU NA AERODYNAMICKÝ ODPOR

Jízda či let v těsném závěsu je pozorovatelná v mnoha oblastech. Úspora fyzických sil je důvodem jízdy cyklistů v těsném závěsu nebo formování sestavy při dlouhých přeletech ptactva. V automobilovém sportu se tato metoda využívá během závodů NASCAR, kde je označována jako tzv. *bumpdrafting*. Dvojice automobilů v těsném závěsu dosahuje na rovných a nejrychlejších úsecích trati vyšší rychlosti než soupeři s větším rozestupem. Kvůli použití restriktoru v sání motoru je to jedna z mála možností, jak získat cenné sekundy oproti soupeři.



Obr. 8: Využití metody bumpdraftingu při závodě NASCAR, Daytona [9].

2.2.1 PLATOONING

Díky rychlému rozvoji autonomních vozů se jízda v úplavu stává velice zajímavou metodou ke snížení produkce škodlivých emisí a finančních nákladů v běžné dopravě. Největší rozvoj nastal v těžké nákladní dopravě, kde se jízda v jízdní soupravě označuje jako tzv. *platooning*. Rozvoj platooningu v nákladní dopravě souvisí s výraznou finanční úsporou, v níž je oproti osobní dopravě návrat investice do nutného vybavení vozu velmi rychlý a je v zájmu všech provozovatelů přepravních společností. Díky tomu se převážná většina dostupných studií a experimentů zaměřuje právě na nákladní vozy.

Pro platooning je nutné vozy vybavit systémem Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC), rozšiřujícím systém ACC o schopnost komunikace s ostatními vozy. Tyto systémy obsahují zejména radar, který spolu s LIDAREm hlídá optimální rozestup vozidla, dále komunikaci mezi vozy, označovanou jako V2V (*Vehicle to Vehicle*) pro předávání důležitých informací o nouzovém brzdění nebo změně směru jízdy, GPS jednotku společně s akcelerometrií a gyroskopy či systém udržování v jízdním pruhu a systém nouzového brzdění aj.

Takto vybavené vozy jsou schopny udržovat bezpečný časový odstup 0,3 s, tedy vzdálenost 6,7 m při rychlosti $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ [10]. Zdroj [11] zmiňuje dokonce rozestup vozů pouhé 3 m při rychlosti $90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, při kterém jízdní souprava byla schopna bezpečné jízdy. Při takové vzdálenosti je časový odstup pouhých 0,12 s.

Nevýhody platooningu, které musí být nutně vyřešeny před nasazením této technologie do každodenní dopravy, jsou především dlouhé jízdní soupravy ztěžující či znemožňující ostatním cestujícím bezpečné připojení nebo odpojení na dálnici, dále obtížné předjíždění těchto souprav a hmotnostní limity přejezdů nebo mostů. Samotná aerodynamika jízdní soupravy negativně ovlivňuje proudění vzduchu k chladičům, mezichladičům a brzdám. Poryv větru za vozem může vyvolat další boční síly na vůz či akustický hluk. V neposlední řadě je nutné při nižším aerodynamickém odporu počítat s delší brzdovou dráhou druhého vozu oproti prvnímu. Minimální rozestup vozidel, nutný pro nouzové brzdění při nečekaných dopravních situacích, je spolu se stávající legislativou největší překážkou pro masivní nasazení metody platooningu.

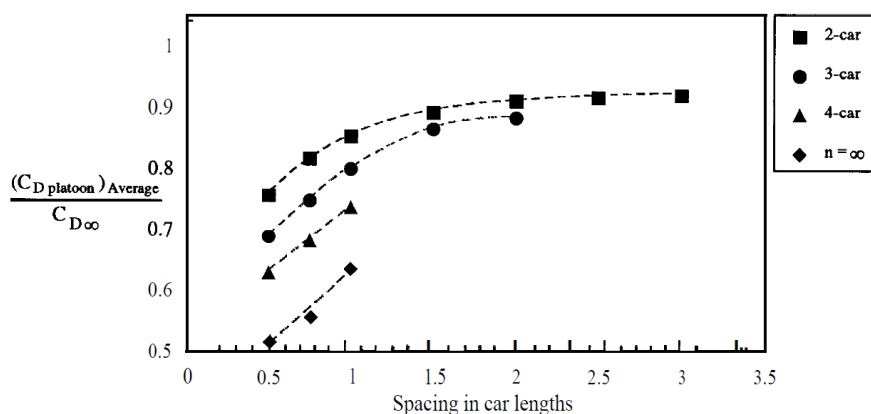
Jako bezpečný odstup vozidel se definuje dle zákona č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích v paragrafu §19 odstavec 1. takto: „Řidič vozidla jedoucí za jiným vozidlem musí ponechat za ním dostatečnou bezpečnostní vzdálenost, aby se mohl vyhnout srážce v případě náhlého snížení rychlosti nebo náhlého zastavení vozidla, které jede před ním.“ [12] Konkrétní hodnota vzdálenosti tedy není přesně stanovena a pro širokou veřejnost se jako bezpečný odstup uvádí taková vzdálenost, kterou vozidla při dané rychlosti urazí během dvou sekund. Tato podmínka platí pouze pro příznivé povětrnostní podmínky a osobní automobil. Pro nákladní automobil nebo motocykl tato hodnota roste, do výpočtu bezpečné vzdálenosti vstupují další proměnné jako reakční doba řidiče, prodleva nastoupení maximálního brzdného účinku či účinnost brzdné síly. Ze statistik vyplývá, že v roce 2018 bylo příčinou nedodržení bezpečného odstupů vozidel zaviněno 7740 nehod (7,4 % z celkového počtu), z toho bylo 6 nehod smrtelných [13]. Od roku 2022 budou tuto vzdálenost dodržovat povinné systémy prevence střetu montované do všech automobilů, proto v současné době jízda v úplavu na veřejné komunikaci z důvodu bezpečnosti není umožněna. S rychlým rozvojem autonomních vozidel však roste možnost využít jízdy v úplavu, která se stává předmětem mnoha studií.

2.2.2 PŘEDCHOZÍ VÝZKUMY JÍZDY V ÚPLAVU

Prvotní studie jízdy automobilu v úplavu hodnotily vizualizaci obtékání proudu vzduchu v aerodynamickém tunelu. Takovou studií je práce [14] zobrazující vliv obtékání dvou osobních automobilů na změnu Reynoldsova čísla a rozestup vozidel. Vizualizace obtékání osobního vozu v konfiguraci s autobusem lze nalézt i v uvedeném zdroji [15]. Následné experimenty sledují především vliv rozestupu vozidel na změnu jejich aerodynamického koeficientu odporu, případně na změnu spotřeby paliva. Experimenty se rovněž zabývají závislostí počtu vozů v soupravě na změnu aerodynamického odporu nebo porovnávají vliv různých konfigurací a velikostí vozů na jízdu v úplavu.

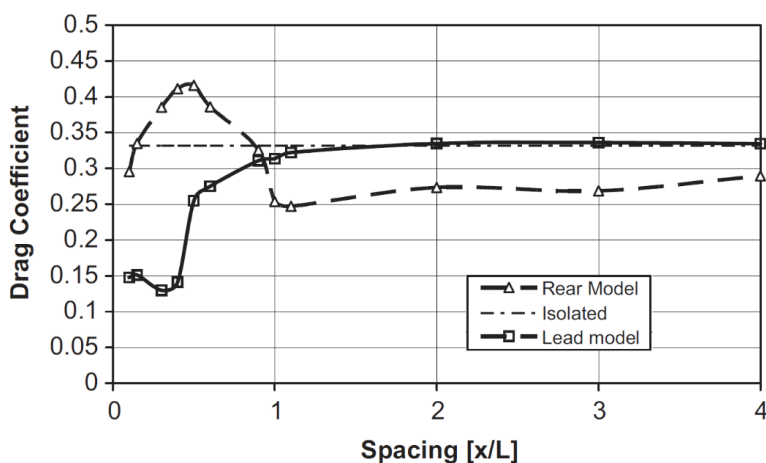
Článek [10] popisující výhodu platooningu u nákladních vozidel uvádí 2—8% úsporu paliva pro vedoucí vůz a 8—13% úsporu paliva druhého vozu. Experiment [16] provedený na reálných nákladních vozidlech toto tvrzení potvrzuje. Během měření došlo k ušetření 5,3 % paliva pro vedoucí vůz a 9,7 % paliva pro vůz v závěsu. Práce [17] zkoumá vliv rozestupu tří zmenšených modelů nákladních vozů v aerodynamickém tunelu na snížení odporu. Při rozestupu 3 m došlo ke snížení odporu celé soupravy o 36 % oproti jízdě izolovaných vozů. Práce [18] sleduje vliv rozestupu vozidel na změnu odporu u modelů souprav osobních vozů i autobusů v aerodynamickém tunelu. Soupravy obsahující 2—4 vozidla dosáhly v nejdelší konfiguraci

4 vozů snížení odporu prvního vozu o 12 % u osobního vozu a 18 % u autobusu a 21 % a 51 % pro poslední vůz soupravy (osobní automobil a autobus). Obr. 9 ilustruje pokles koeficientu odporu v závislosti na volbě délky rozestupu a počtu vozidel v jízdní soupravě z experimentu [19]. V aerodynamickém tunelu byla testována jízdní souprava složená ze 2—4 zmenšených modelů osobního vozu. Koeficient aerodynamického odporu je zde brán jako průměrná hodnota všech vozidel v konfiguraci. Efektivní je co nejvyšší počet členů v jízdní soupravě, kdy trend grafu ukazuje dosažení polovičního odporu vozidel při použití nekonečně dlouhé soupravy.



Obr. 9: Pokles koeficientu aerodynamického odporu v závislosti na velikosti soupravy a volbě rozestupu [19].

Negativní vliv na zvýšení odporu druhého vozu při malém rozestupu vozidel je popsán v práci [20] a je zřetelný na Obr. 10. Experiment, sestávající ze dvou zjednodušených modelů Ahmed, studuje vliv poměru vzdálenosti x/L na aerodynamický odpor vozů. Vzdálenost x je volený rozestup vozidel, L značí délku vozu. Druhý vůz soupravy vykazoval pro volbu x/L v rozmezí 0,1—1 vyšší odpor než samotný izolovaný vůz. Experiment ve studii [21] provedený s Ahmed modely v aerodynamickém tunelu, ukázal navýšení odporu druhého vozu o 20 % při volbě $x/L < 0,6$. V práci lze nalézt odkazy na další výzkumy potvrzující tento negativní vliv příliš malé volby vzdálenosti x .



Obr. 10: Negativní vliv příliš nízké hodnoty x/L na odpor druhého vozu [20].

3 MĚŘENÍ A SIMULACE PROUDĚNÍ

Charakteristiky proudu lze zkoumat z naměřených dat experimentu během jízdy skutečného vozu, nebo pomocí CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Mezistupněm je měření v aerodynamickém tunelu. Pro kalibraci tunelů či ověření správného nastavení CFD se používají výsledky z experimentů za použití referenčních modelů.

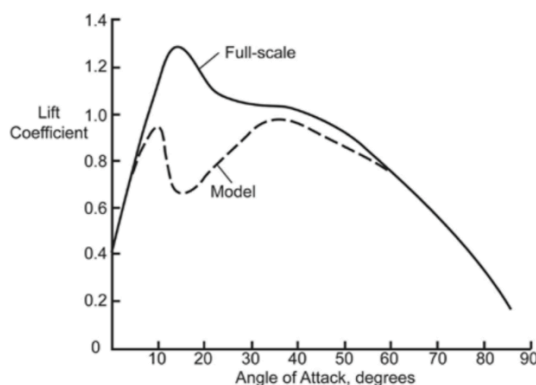
3.1 TECHNICKÝ EXPERIMENT JÍZDNÍ ZKOUŠKOU

Experiment jízdní zkouškou provedený na vozidle během provozu nabízí reálné podmínky, které jsou v aerodynamickém tunelu těžko proveditelné, tedy vliv povětrnostních podmínek nebo změnu směru a rychlosti jízdy. K vizualizaci proudění na povrchu vozu lze použít soustavy nalepených nití či metodu nátěru *flow-vis*, zobrazující trajektorii fluorescenčních částic rozpuštěných v oleji. Proudové pole kolem vozu lze měřit soustavou pitotových trubíc a tlakových senzorů. Aerodynamické síly působící na vůz je možné určit pomocí dojezdové zkoušky. Omezením experimentu je množství měřených dat, nízká opakovatelnost měření a často i vysoká finanční náročnost.

3.2 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Aerodynamický tunel přináší oproti jízdní zkoušce výhodu v podobě vysoké opakovatelnosti měření, přímého měření všech složek momentů a sil či další metody vizualizace proudění, jako je metoda kouřové clony případně metoda PIV (*Particle Image Velocimetry*). Výhodou aerodynamického tunelu je možnost použití modelu v určitém měřítku při využití podobnostních čísel (např. Reynoldsovo a Machovo). Pro letecký průmysl je použití zmenšených modelů nevyhnutelné jednak pro samotné rozměry objektů, ale i pro vysoké rychlosti, avšak i v automobilním průmyslu není neobvyklé díky přínosu značných finančních úspor. V leteckém průmyslu je však nutné kromě geometrické podobnosti dodržet i podobnost dynamickou. Tato podmínka platí také u zmenšených modelů Formule 1, u nichž je nutné dodržet kromě rozvržení hmotnosti vozu také stejnou deformaci aerodynamických komponentů či pneumatik při vyšším zatížení ve vysokých rychlostech nebo při změně akcelerace.

Použití zmenšených modelů však přináší chybné řešení mezní viskózní vrstvy. Jako příklad z leteckého průmyslu lze uvést určení kritického úhlu náběhu křídla, kdy dochází k přetažení letadla a následnému pádu do vývrtky [22]. Rozdíl mezi koeficientem vzlaku pro různý úhel náběhu u zmenšeného a reálného profilu křídla je zřejmý z Obr. 11. Kvůli této nepřesnosti je nutné určovat kritický úhel náběhu při letu reálného letadla, nebo u menších letadel při použití modelu skutečné velikosti.



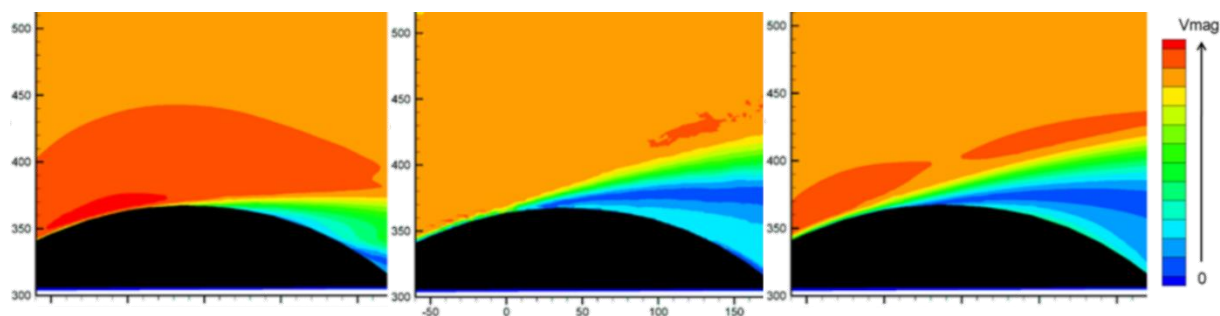
Obr. 11: Porovnání koeficientu vzlaku pro zmenšený a reálný profil křídla [22].

Mnoho reálných podmínek při jízdě vozu nelze v aerodynamickém tunelu simulovat nebo jen velmi omezeně. Vliv pohyblivé vozovky spolu s rotací kol můžeme dnes považovat za standardní výbavu aerodynamického tunelu, avšak simulace poryvu větru či pohyb vozovky společně se simulací bočního větru jsou zatím spíše výjimkou. Komplikované jsou také simulace teplot různých částí vozu a okolí, jako například teplota vozovky a výfukových plynů, chladičů či brzd. V těchto případech je použití CFD nenahraditelné.

3.3 CFD

CFD se dnes nejčastěji používá během vývoje průmyslového produktu jako následný krok po experimentu v aerodynamickém tunelu, v němž se pro danou studii naměří porovnávací data, na která se CFD model nastaví. Z CFD simulace jsou poté získána data, jejichž vyhodnocení by bylo v tunelu finančně nebo technicky obtížné. CFD je dále využíváno v případech, kdy předchozí metody nedostačují a je omezeno pouze výpočetním výkonem, časovou náročností a určitým zjednodušením a s tím související nepřesností. Použití CFD také hraje zásadní roli při vývoji prototypů a porovnání různých designů před tím, než se fyzicky vyrobí. Lze simulovat nestacionární úlohy, mezi které patří změna směru jízdy či decelerace a akcelerace vozu, deformace dílů nebo zahrnutí reálných povětrnostních podmínek jako jsou poryv větru nebo přítomnost překážek či dalších vozů. Při simulaci získáváme data v kterémkoliv místě celého objemu nezbytná pro pochopení celého děje.

Matematické modely CFD prochází neustálým vývojem s cílem dosažení přesnějších výsledků. K ověření jejich platnosti je nutné použití experimentálních metod měření v tunelu a případná úprava řešiče. Takový příklad je zobrazen na Obr. 12, kdy pomocí naměřených hodnot metodou PIV v aerodynamickém tunelu dochází k optimalizaci kódu CFD a dosažení přesnějších výsledků simulace [23].



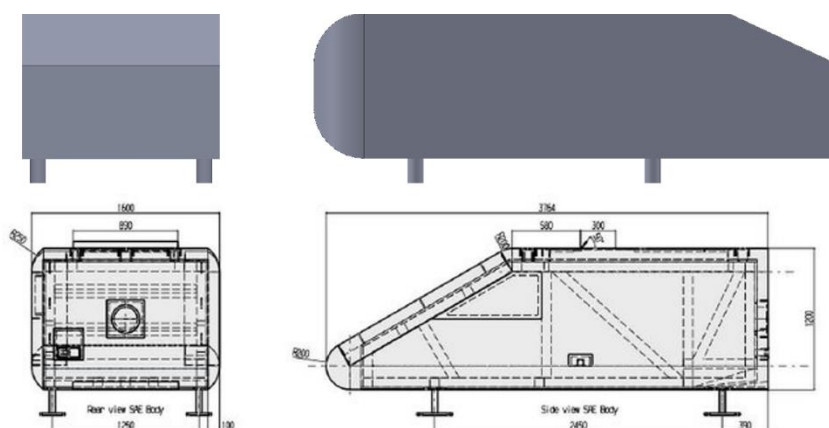
Obr. 12: Optimalizace CFD. Vpravo původní CFD, uprostřed metoda PIV, vlevo optimalizovaná CFD [23].

3.4 REFERENČNÍ MODEL Y VOZIDEL

Pro studium všeobecných aerodynamických vlastností, kalibraci a korelaci slouží zjednodušené modely vozidel. Prvními takovými modely byla vozidla velice jednoduchých tvarů Ahmed a SAE. Model Mira je svým tvarem bližší tvaru reálného vozu. V současnosti je rozšířený model DrivAer, proporcemi odpovídající produkčním vozům.

3.4.1 AHMED, MIRA A SAE MODEL Y

Model Ahmed představený v roce 1984 sloužil k výzkumu vlivu sklonu zadní části modelu na aerodynamické vlastnosti. Díky dostupnosti experimentálních dat se stal vhodným etalonem pro další měření a následně se používal jako model vhodný pro první CFD simulace. Modely Ahmed i SAE byly postupně modifikovány pro měření aerodynamického odporu proudění skrze motorový prostor.



Obr. 13: Zjednodušené modely Ahmed (nahore) a SAE 4 (dole) [32].

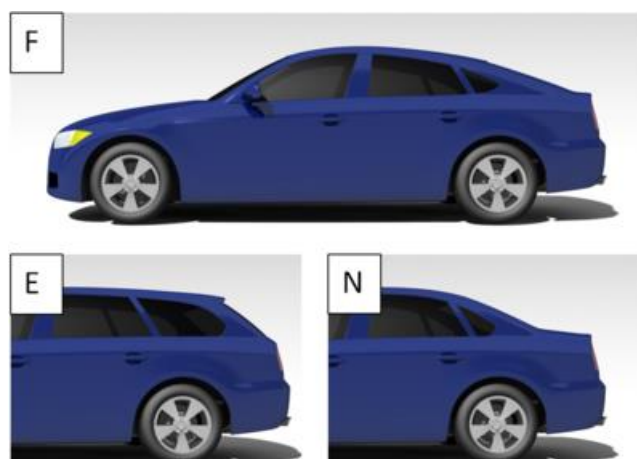
Referenční modely Mira (Motor Industry Research Association) obsahují karosářské verze Fastback, Notchback, Pickup a Estateback. Vznikly na počátku 80. let v různých měřítkách a během 90. let byly díky velkému množství experimentálních dat populární při validaci výsledků CFD simulací. Oproti předchozím modelům lépe zachycují tvar automobilu, součástí modelu jsou kola bez podběhů. Velké množství výzkumů, založených na použití zjednodušených modelů, je uvedeno v práci [33]. Pro kalibraci aerodynamických tunelů tyto modely slouží dodnes, avšak pro detailnější studium aerodynamiky produkčních vozidel jsou tyto zjednodušené geometrie nedostatečné.



Obr. 14: Modely Mira. Estateback, Fastback a Notchback [34].

3.4.2 DRIVAER MODEL

Vznikl v roce 2011 na TUM (*Technische Universität München*). Model nabízí propracovanější geometrii, než jakou disponují jednoduché modely, avšak je stále jednodušší ve srovnání s geometrií produkčního vozu. DrivAer model vznikl kombinací tvaru produkčního vozu BMW 3 a Audi A4, nabízí tři karosářské varianty Fastback (dále označeno jako F), Estateback (dále E) a Notchback (dále N). K dispozici se nabízí 18 variant karoserie lišících se detailností. Složitý model obsahuje propracovaný podvozek včetně výfukového systému, motorový prostor včetně vstupů v chladiči, zrcátka a disky kol. Pro výpočty méně náročné na výpočtový čas se oproti tomu nabízí varianta vozu se zjednodušenou geometrií podvozku, zakrytými koly a vstupy vzduchu do motorového prostoru [35].



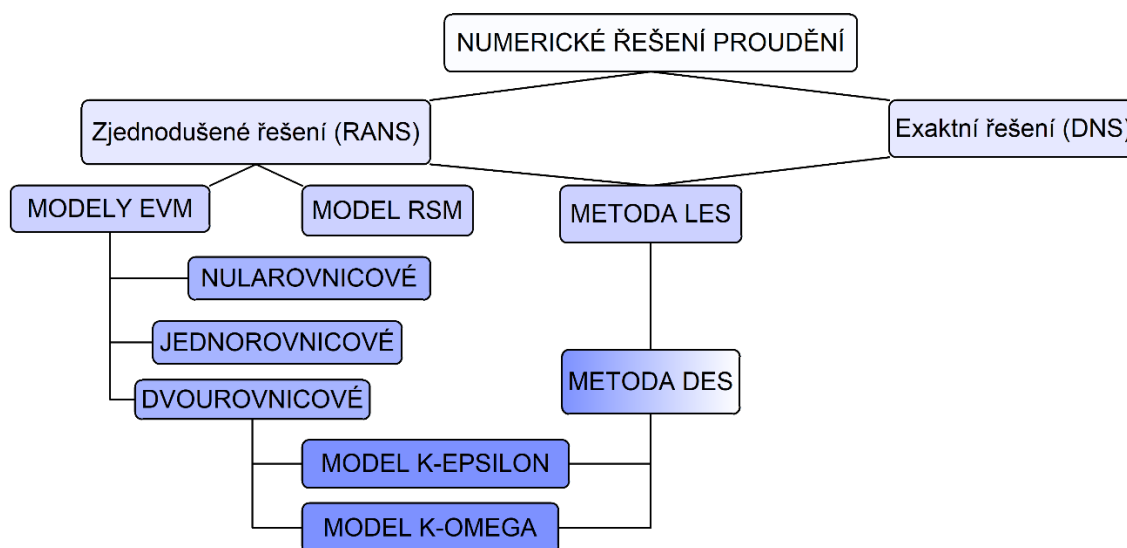
Obr. 15: Karosářské varianty modelu DrivAer [35].

4 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ PROUDĚNÍ

Simulace proudění pomocí CFD jsou založené na metodě konečných objemů a v každém z nich musí být numericky řešeny Navier–Stokesovy pohybové rovnice, které lze řešit pomocí numerických metod buď přímo, nebo využít tzv. turbulentních modelů. Metoda řešení N–S rovnic přímo se nazývá DNS (*Direct Numerical Simulation*). Vzhledem k vysoké výpočetní náročnosti je vhodná pouze pro superpočítače a pro nízké rychlosti proudění (proudění s nízkými Reynoldsovými čísly). Nedochozí zde k žádnému zjednodušení, proto je nutné používat velice malé časové kroky a detailní síť zachycující nejmenší víry. Bohužel k simulaci problémů běžně se vyskytujících v průmyslu je výkon dnešních superpočítačů nedostačující.

Pro modelování turbulentního proudění je proto nutné přistoupit ke zjednodušení. Různou úroveň zjednodušení nabízí turbulentní modely sloužící jako doplňkové rovnice k rovnicím N–S, a tyto modely je nutné pro daný problém vhodně zvolit. Spolu se zjednodušením problematiky klesá přesnost výsledků a výpočtové nároky. Doplňkové rovnice obsahují empirické konstanty pocházející z rozsáhlých sad měření. Výpočty, využívající turbulentní modely, se nazývají RANS (*Reynolds Averaged Navier–Stokes*). Jedná se o nejvíce využívané metody s dostačující přesností a s nízkými nároky na výpočetní čas.

Mezistupněm mezi metodou DNS a RANS je metoda LES (*Large Eddy Simulation*), hojně využívaná například v akustice či při modelování průběhu spalovacího procesu. Metoda LES řeší pouze větší víry přímým výpočtem N–S rovnic, malé víry jsou řešeny pomocí SGS (*Sub-grid Scale*) modelů. Kombinací metod RANS a LES vzniká metoda DES (*Detached Eddy Simulation*). Výhodou je použití hrubší sítě, a tím i úspora výpočetního výkonu. Oblast je řešena pomocí metody LES, v blízkosti povrchu v oblasti mezní vrstvy se přepíná na metodu RANS [25]. Schéma rozdělení numerického řešení proudění je na Obr. 16.



Obr. 16: Rozdělení numerického řešení proudění podle metod.

4.1 METODY RANS

Turbulentní proudění je ze své podstaty náhodné a velice chaotické, avšak k řešení průmyslových problémů běžně postačují průměrné hodnoty rychlostí a intenzity turbulentních fluktuací. Provádí se Reynoldsova dekompozice, kde složku okamžité hodnoty rychlosti lze rozložit na její středěnou složku v_{AVE} a fluktuační složku v' .

$$v = v_{AVE} + v' \quad (4.1)$$

Při časovém středění Navier–Stokesových rovnic pro fluktuační složku vzniká tzv. Reynoldsův tenzor napětí τ_R , který má 9 složek. Tenzor je na obou stranách diagonály souměrný, proto vzniká nových 6 neznámých, které jsou pomocí turbulentních modelů řešeny. Pokud jsou řešeny všechny neznámé v Reynoldsově tenzoru napětí, je výsledek přesnější, avšak mnohanásobně výpočtově náročnější. Takový způsob se nazývá RSM (*Reynold Stress Model*), v němž je turbulentní napětí uvažováno jako anizotropní. Model RSM je výhodný pro problémy se silně zakřivenými proudnicemi a vysokou rotací média, při výpočtech spalovacích prostorů, cyklonů či separátorů, kde jsou podstatné rozdíly fluktuačních složek rychlostí v různých směrech. Druhým modelem je model EVM (*Eddy Viscosity Model*), ve kterém jsou složky fluktuačních rychlostí ve všech osách považovány za stejné a řešení tenzoru Reynoldsových napětí je tudíž jednodušší. Řeší se pouze neznámá hodnota turbulentní viskozity η_t charakterizující turbulentní proudění [25].

4.2 MODEL EVM

Hierarchii modelů EVM lze rozdělit podle počtu použitých transportních rovnic na bezrovnícové, jednorovnicové a dvourovnícové. Bezrovnícové využívají pouze algebraických vztahů, v nichž nejsou řešeny žádné transportní rovnice. Příkladem bezrovnícového modelu může být Prandtlův model směřovací délky. Model Spalart-Allmaras je příkladem jednorovnicového modelu, který řeší modifikovanou turbulentní viskozitu pomocí rovnice pro kinetickou energii turbulentních fluktuací k a je ideální k řešení aerodynamiky obtékání profilů křídel, lopatek turbodmychadel či vrtulí, obtékání střel, raket, trupů letadel a lodí. Úlohy jsou řešeny jako dvourozměrné. Dvourovnícové modely se dělí na modely k -omega a k -epsilon.

4.2.1 MODEL K-EPSILON

Dvourovnícový model k -epsilon řeší rovnici pro kinetickou energii turbulentních fluktuací k , určující měřítko turbulentních rychlostí a rovnici pro disipaci turbulentní energie ε , která je způsobena viskozitou proudícího média. Obě rovnice obsahují empirické konstanty získané z experimentů. Model k -epsilon patří do skupiny tzv. *high-Re* modelů, což znamená, že je ideální pro oblasti s vysokým Reynoldsovým číslem ve větší vzdálenosti od stěny a nevhodný v blízkosti stěny, z toho důvodu není pro určování silových účinků proudu na stěnu tak vhodný, jako např. model k -omega. V oblasti stěny jsou využity stěnové funkce, tudíž není nutné v této oblasti podstatné zjemnění sítě.

Standard k -epsilon

Výsledky metody Standard k -epsilon jsou validní pouze pro plně turbulentní proudění. Model nesprávně řeší jak oblast odtržení, tak oblast se silně zakřivenými proudnicemi. Svou nízkou náročností na výpočetní čas je vhodný pro počáteční iterace či prvotní designové studie průmyslových dílů.

Realizable k-epsilon

Oproti metodě Standard k-epsilon řeší turbulentní viskozitu jako proměnnou a počítá s jinou formulací transportní rovnice pro disipaci turbulentní energie ε , čímž lépe predikuje oblast odtržení a dává dobré výsledky pro oblasti mírných vírů. Nejen z těchto důvodů je považován za průmyslový standard.

4.2.2 MODEL K-OMEGA

Modely k-omega řeší rovnici pro kinetickou energii turbulentních fluktuací k a míru turbulentní disipace ω . Patří do skupiny tzv. *low-Re* modelů, což znamená, že lépe řeší oblasti s nízkými Reynoldsovými čísly v blízkosti stěny. Jejich použití je optimální, pokud je cílem simulace silový účinek proudícího média na stěnu, a proto se využívají při studiu externí aerodynamiky. Při řešení mezní vrstvy je nutné použít velice jemnou síť. Použití metody je nevýhodné ve větší vzdálenosti od stěny a také při studiu mezní vrstvy, jejíž odtržení predikuje příliš brzy.

Standard k-omega

Metoda Standard k-omega je vhodná pouze pro oblasti blízko stěny, pro studium mezní vrstvy.

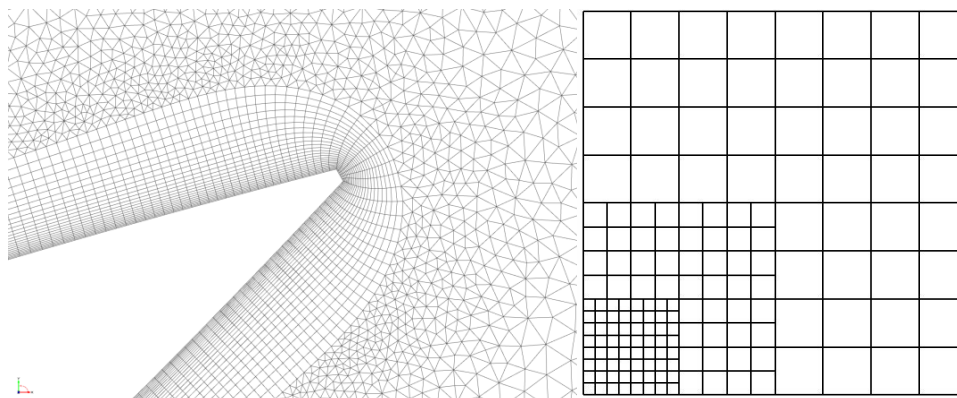
SST k-omega (Menter)

Metoda SST (*Shear Stress Transport*) kombinuje metody k-epsilon a k-omega a využívá výhod obou těchto metod. Oblast blízko stěny je řešena metodou k-omega a podle dosaženého Reynoldsova čísla směrem od stěny dochází k přepnutí na metodu k-epsilon. Spolu s metodou Realizable k-epsilon je metoda SST považována za průmyslový standard [24], [25].

4.3 VÝPOČETNÍ SÍŤ

Pomocí sítě se výpočetní oblast diskretizuje na jednotlivé kontrolní objemy. Numerické výpočty poté probíhají pro každý kontrolní objem (buňku) a také pro každý hraniční uzel jednotlivých buněk. Hustota sítě, a tedy i počet uzlů se mění s rychlostí změny zkoumaných veličin. V oblasti ustáleného proudění je možné síť nastavit hruběji, v oblastech stěn či náhlých změn proudění je nutné síť naopak zjemnit. Požadována je co možná nejhrubší síť s ohledem na nízký výpočetní čas, a naopak dostatečně jemná pro validní výsledky výpočtu.

Síť lze dělit podle mnoha kritérií, např. na povrchovou a objemovou, dále podle tvaru kontrolních objemů na trojúhelníkovou a čtyřúhelníkovou u sítě povrchové či na tetrahedrální, hexahedrální a polyhedrální u sítě objemové. Podle struktury se síť dělí na uspořádanou, tedy strukturovanou (např. síť hexahedrální), a nestrukturovanou (tetrahedrální). Výhody strukturovaných sítí spočívají v menší náročnosti na výpočetní výkon a lepší konvergenci, naopak předností nestrukturované sítě je rychlost její tvorby. Spojením sítě strukturované a nestrukturované vzniká síť hybridní, která využívá předností obou sítí. Pokud jsou sousední uzly buněk propojeny, síť se stává konformní, v opačném případě je nekonformní. Nekonformní síť se vyskytuje na rozhraní sousedních těles, pokud jsou síťovány odlišně, případně u strukturované hexahedrální sítě při jejím lokálním zjemnění. Oproti konformní síti je zde nutné informace z jednotlivých buněk interpolovat, a proto výpočetní náročnost roste [24], [25].



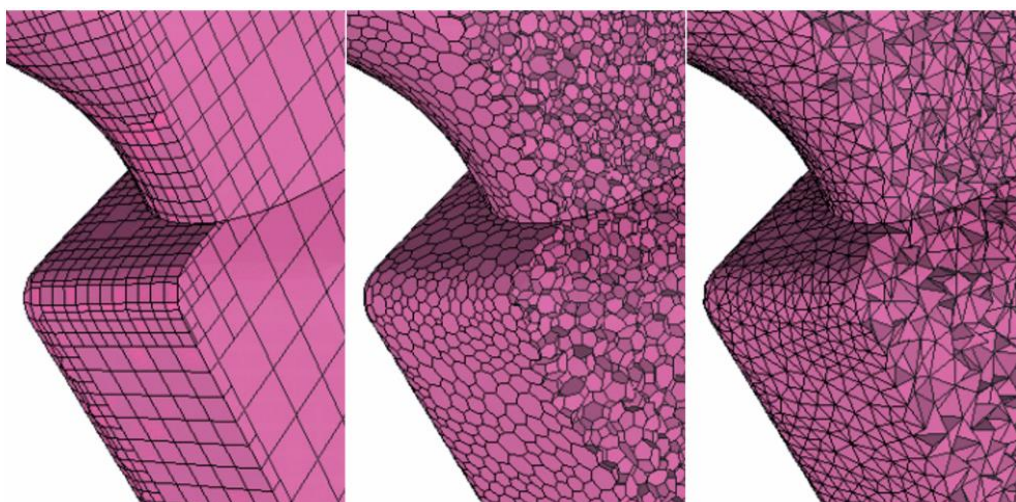
Obr. 17: Vlevo — hybridní síť tvořená strukturovanou hexahedrální sítí v blízkosti povrchu a nestrukturovanou tetrahedrální sítí. Vpravo — nekonformní síť vytvořená ze strukturované hexahedrální sítě po jejím zjemnění [26], [27].

4.3.1 POVRCHOVÉ SÍŤOVÁNÍ

Software Star CCM+ nabízí dva typy tvorby povrchové sítě, a to metodu *Surface wrapper* a metodu *Surface remesher*. První jmenovaná metoda je vhodná pro nekvalitní geometrie obsahující mnoho chyb, jako jsou nespojené či překrývající se plochy. *Surface remesher* rozdělí kvalitní a uzavřený povrch importované geometrie na jednotlivé trojúhelníkové plošky jako přípravu pro výslednou povrchovou síť, nebo ji dále upraví po metodě *Surface wrapper*. Výchozí informací pro *Surface remesher* je *Target surface size*, tedy cílová velikost plošky volená uživatelem. Lze také nastavit zjemnění sítě v oblasti zakřivení geometrie či v oblasti dvou blízkých hran. Software taktéž nabízí možnost automatické opravy ploch importované geometrie pod položkou *Automatic surface repair*.

4.3.2 OBJEMOVÉ SÍŤOVÁNÍ

Ve Star CCM+ jsou k výběru celkem tři typy objemových sítí, a to tetrahedrální, polyhedrální a hexahedrální síť, která je v softwaru označovaná jako *Trimmed mesh*.



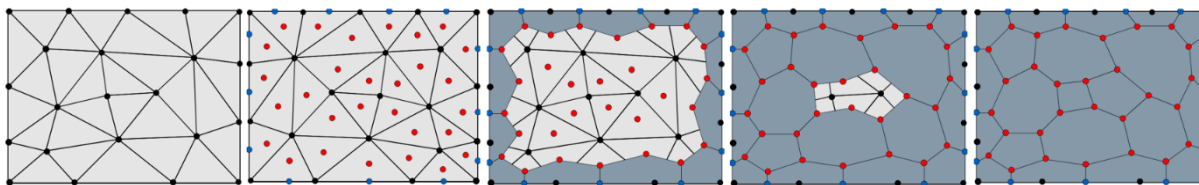
Obr. 18: Zleva — hexahedrální, polyhedrální a tetrahedrální síť [25].

Tetrahedrální síť

Ačkoliv má tetrahedrální síť ze tří výše jmenovaných typů sítí ve stejném objemu nejmenší počet uzlů, tento objem ve srovnání s ostatními typy sítí zaplní největším počtem buněk, a tudíž je nejnáročnější metodou na výpočetní výkon. Použití tetrahedrální sítě je výhodné především u složitě tvarovaných geometrií, kde je u jiných typů sítí nutné geometrii vhodně rozdělit. Kvalita objemové sítě silně závisí na kvalitě sítě povrchové. Tetrahedrální síť je nejvíce náchylná k tvorbě nekvalitních buněk, a proto si žádá větší kontrolu kvality sítě.

Polyhedrální síť

Polyhedrální síť vychází ze sítě tetrahedrální postupným růstem buněk od hraničních křivek směrem do středu plochy, viz Obr. 19. Její kvalita tedy závisí na kvalitě sítě povrchové tak jako v případě tetrahedrální sítě. Po přeměnění povrchové sítě následuje růst buněk do objemu. Díky této přeměně má polyhedrální síť oproti síti tetrahedrální zhruba pětkrát méně buněk, a tedy i nižší výpočtovou náročnost.



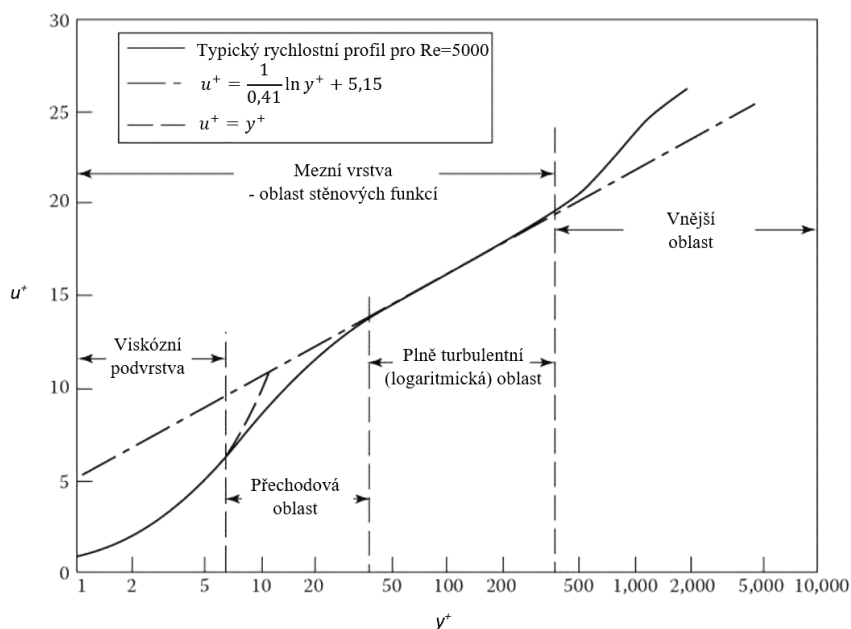
Obr. 19: Postupná tvorba povrchové polyhedrální sítě ze sítě tetrahedrální [25].

Hexahedrální síť (Trimmed mesh)

Hexahedrální síť je vysoce kvalitní a uspořádaná síť. Náročností na výpočetní výkon je dobrým kompromisem mezi sítí tetrahedrální a polyhedrální, avšak nabízí velké možnosti nastavení lokálního zjemnění či použití zjemnění sítě v úplavu vozu, tzv. *Wake refinement*. Díky vysoké uspořádanosti buněk, jejich minimálnímu zkosení a vysoké kvalitě nezávislé na povrchu se s oblibou používá pro případy externí aerodynamiky [25].

4.4 MODELOVÁNÍ MEZNÍ VRSTVY

Podle vybraného turbulentního modelu řešení N–S rovnic je nutné vhodně nastavit síť v blízkosti stěny tak, aby bylo proudění v této oblasti adekvátně řešeno. Na Obr. 20 je zobrazena závislost bezrozměrné rychlosti u^+ v závislosti na bezrozměrné vzdálenosti od stěny y^+ .



Obr. 20: Rozdělení mezní vrstvy, převzato a přeloženo z [29].

Nejblíže stěny se nachází oblast viskózní podvrstvy, v níž jsou dominantní viskózní síly. S rostoucí vzdáleností od stěny se mění charakter proudění a přechází do plně turbulentního režimu. V oblasti viskózní podvrstvy je závislost rychlosti na vzdálenosti od stěny lineární a v plně turbulentní oblasti se řídí logaritmickou závislostí. Spolu s přechodovou oblastí tyto tři oblasti tvoří mezní vrstvu, která je podle vybraného turbulentního modelu řešena přímo, nebo pomocí empirických stěnových funkcí [28]. Přímé řešení laminární vrstvy je nutné pro *low-Re* modely (např. *k-omega*). U těchto modelů je nutné síť na povrchu tělesa dostatečně zjemnit, čímž se navyšuje výpočetní náročnost simulace. Stěnovou funkci využívají *high-Re* modely (např. *k-epsilon*), u kterých není nutné síť na povrchu zásadně zjemňovat, což šetří výpočetní nároky. Při nastavení sítě je nutné výšku y první buňky na povrchu tělesa nejdříve odhadnout, poté ji případně upravit dle výsledků simulace. Výška y souvisí s bezrozměrným parametrem y^+ , který se volí s ohledem na použitý turbulentní model. V případě použití modelu využívajícího stěnové funkce je nutné volit y^+ v rozmezí $30 < y^+ < 300$. Jestliže se řeší laminární vrstva přímo, je nutné udržet y^+ na povrchu kolem hodnoty $y^+ = 1$. Doporučené hodnoty y^+ se mohou pro použitý software lišit. Určení výšky y první buňky je popsáno rovnicí (4.2) a s rostoucí vzdáleností od povrchu se výška jednotlivých buněk vhodně zvyšuje až do oblasti plně vyvinutého turbulentního proudu [25].

$$y = \frac{y^+ \eta}{U_\tau \rho} \quad (4.2)$$

Kde smyková rychlost U_τ se určí jako:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4.3)$$

Kde stěnové smykové napětí τ_w :

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho v_\infty^2 \quad (4.4)$$

Kde povrchové tření na desce C_f :

$$C_f = 0,058 \cdot Re^{-0,2} \quad (4.5)$$

4.5 PŘEHLED DOSTUPNÉHO SOFTWARE

V současné době je dostupných přes 200 různých softwarů souvisejících s CFD [30]. Software lze dělit na produkty komerční nebo volně dostupné, tzv. *open-source* programy. Dále se rozdělují podle zaměření. Samostatnou skupinou jsou CFD nadstavby obsažené přímo v CAD programech jako např. Flow simulation, implementovaný v SolidWorks od Dassault Systemes, nebo program CFD v softwaru Autodesk. Jejich předností je již známé prostředí CAD programu a uživatelům postačuje jen elementární znalost CFD problematiky. Nevýhodou je omezené použití pouze na ustálené jednofázové proudění ideální tekutiny a mnohdy nesprávné výsledky při velmi vysokém výpočetním čase oproti plným CFD programům. Vhodné jsou pro produktové studie prototypů, kdy umožňují efektivní porovnání různých designů a optimalizaci parametrů.

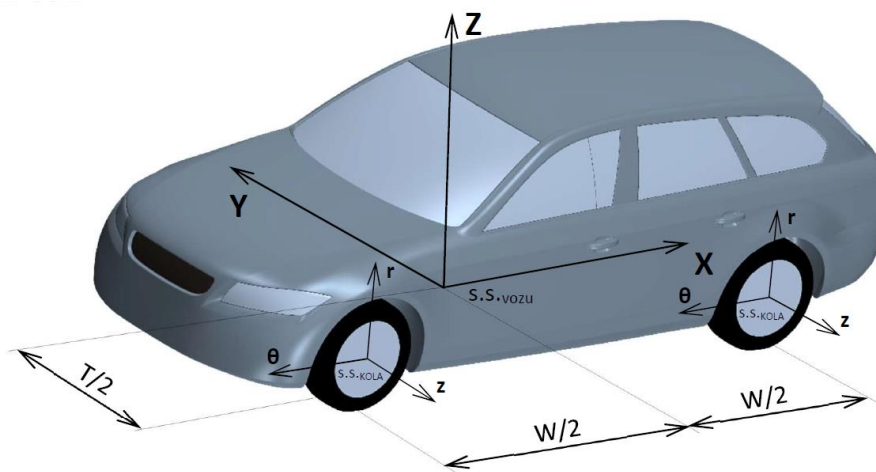
Předním představitelem open-source softwarů je program OpenFOAM. Značnou výhodou otevřeného kódu je rozšířená základna uživatelů, volně dostupné tutoriály a komunitní diskusní fóra. Další předností jsou možnosti úpravy zdrojového kódu k možnému rozšíření či úpravě uživatelského prostředí. Častou nevýhodou může být požadavek na prostředí Linuxu či omezené funkce pro Windows a také vyšší nároky na znalosti a předchozí zkušenosti uživatele. Příprava a zpracování výsledků jsou v mnoha případech prováděny externě mimo řešič a chybí zde uživatelská podpora. Řešením mohou být komerční verze se základem v open-source. Takovým příkladem je software OpenFOAM+.

Dva největší komerční CFD softwary jsou Fluent společnosti ANSYS a Star-CCM+ společnosti CD-Adapco Siemens. Podle nasazení v průmyslu je Fluent používán spíše pro průmyslové výrobky a elektroniku, zatímco Star-CCM+ se uplatňuje především v externí aerodynamice automobilního a leteckého průmyslu. Druhý jmenovaný poskytuje lepší uživatelské prostředí a návaznost jednotlivých kroků, avšak oba softwary jsou dnes srovnatelně silné a záleží spíše na uživatelských preferencích. Mezi softwary s konkrétní specializací lze řadit ANSYS CFX pro výpočty turbodmychadel, pump a kompresorů či AVL Fire k výpočtu spalovacích procesů. Vznikají také různé nadstavby, např. Visual CFD pro OpenFOAM. Ten nabízí oproti zdrojové verzi uživatelsky přívětivější prostředí. Samotnou skupinou jsou CFD řešiče pracující v online režimu pomocí webového prohlížeče jako je Simscale. Výhodou jsou nulové nároky na použitý hardware a software, případně možnost týmové práce na projektu, kdy výpočet probíhá cloudově na externím serveru [31].

5 PŘÍPRAVA SIMULACE

5.1 DEFINICE SOUŘADNÝCH SYSTÉMŮ VOZU A KOL

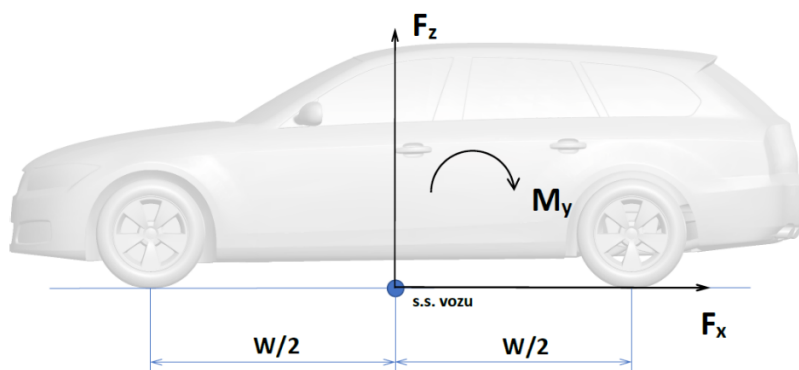
Střed souřadného systému vozu leží v rovině vozovky, uprostřed rozvoru W a rozchodu kol T . Jako kladný směr osy X je považován směr proudění vzduchu v tunelu, směr gravitační síly působí v záporné ose Z . Pro použití podmínky rotace kol je zapotřebí definovat nové souřadné systémy pro kola vozu. Jsou vytvořeny nové válcové souřadné systémy s radiálními r , axiálními z a tangenciálními θ složkami.



Obr. 21: Souřadné systémy vozu.

5.2 ROZKLAD SIL

Aerodynamické síly odporu F_x , vztlaku F_z a moment klonění M_y působící na bod souřadného systému vozu lze nahradit silami účinkujícími v místech styku pneumatiky s vozovkou.



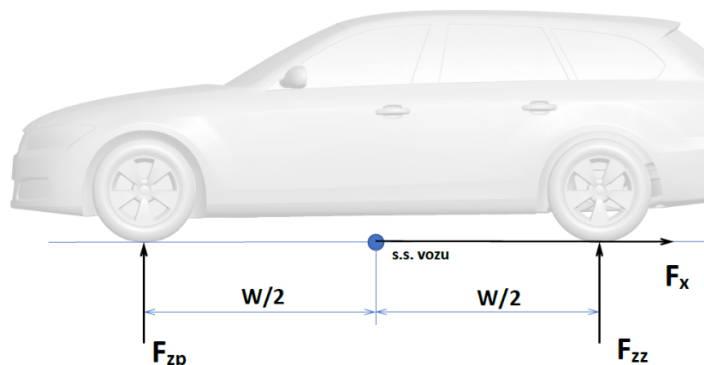
Obr. 22: Aerodynamické síly a momenty působící na souřadný systém vozu.

Pro vztlakovou sílu F_{zp} na přední nápravě platí:

$$F_{zp} = \frac{F_z}{2} + \frac{M_y}{W} \quad (5.1)$$

Pro vztlakovou sílu F_{zz} na zadní nápravě platí:

$$F_{zz} = \frac{F_z}{2} - \frac{M_y}{W} \quad (5.2)$$



Obr. 23: Rozložení vztlakové síly do míst kontaktu kola s vozovkou.

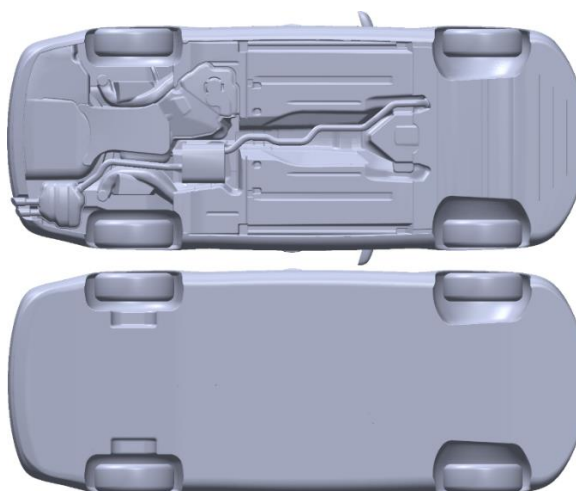
Po dosazení rovnic (1.6) a (1.8) do rovnic (5.1) a (5.2) získáme koeficienty vztlaku c_{LF} a c_{LR} pro přední a zadní nápravu:

$$c_{LF} = \frac{c_L}{2} + c_{My} \quad (5.3)$$

$$c_{LR} = \frac{c_L}{2} - c_{My} \quad (5.4)$$

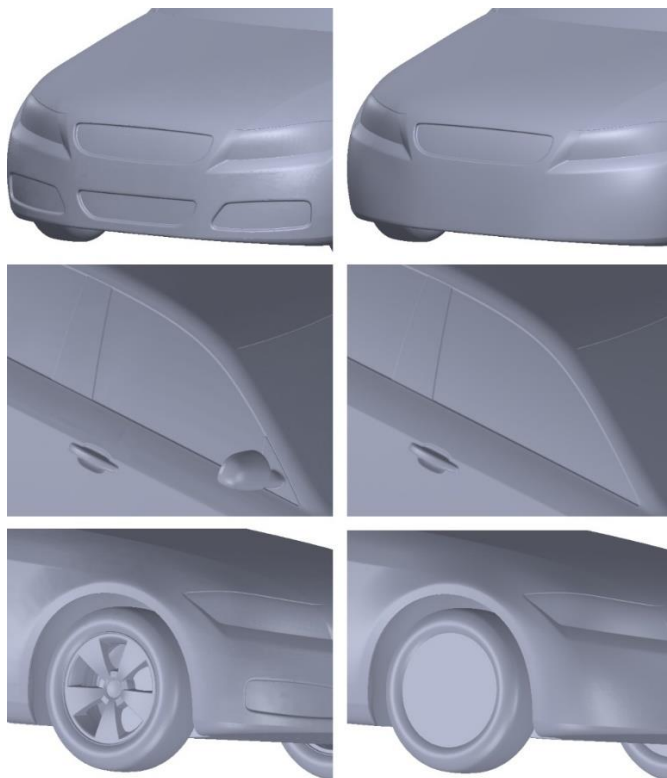
5.3 PŘÍPRAVA GEOMETRIE MODELU DRIVAEER

Geometrie modelu DrivAer je veřejně dostupná ze zdroje [35] ve formátech *step*, *iges* a *stl*. Tyto soubory již obsahují jednotlivé úrovně zjednodušení. Do simulace byl nejprve importován kompletní model s detaily, avšak vzhledem k velkému počtu buněk sítě v detailním modelu DrivAer a vysoké hardwarové náročnosti výpočtu při simulaci jízdy dvou vozů bylo nutno přistoupit k zjednodušené variantě geometrie. K největšímu zjednodušení došlo v oblasti podvozku vozu a uzavřením přívaděče vzduchu do oblasti brzd a motoru.



Obr. 24: Zjednodušení podlahy modelu vozu DrivAer.

Jednoduchá geometrie podvozku umožnila využít symetrii vozu, a tak bylo možné přistoupit k výpočtu polovičního modelu. Dále byla z geometrie vozu odstraněna zpětná zrcátka a použito se zjednodušených uzavřených disků kol. Přední nárazník se zjednodušil odstraněním ploch pro vstup vzduchu ke chladiči a ke kolům. Zadní nárazník byl zaslepen v oblasti koncovky výfuku. Tímto zjednodušením geometrie došlo k výraznému snížení počtu buněk vytvořené sítě.



Obr. 25: Zjednodušení geometrie modelu DrivAer.

5.4 PŘÍPRAVA VÝPOČETNÍ OBLASTI

Oblast pro simulaci proudění vzduchu kolem vozů musí být vhodně volena tak, aby se plochy stěn tunelu a vozů při proudění tunelem vzájemně neovlivňovaly. Dále je nutné umístit vstupní a výstupní plochy v dostatečné vzdálenosti před a za vozidly tak, aby na vozidla dopadal již ustálený proud uvnitř tunelu a za vozem opět nedošlo k ovlivnění proudu výstupní stěnou tunelu.

Volba velikosti vstupní plochy tunelu

Velikost plochy vstupu vzduchu do tunelu či výpočetní domény se volí adekvátně s ohledem na dodržení parametru poměru blokace B podle rovnice (5.5). Ta udává, že poměr průmětu čelní plochy vozu A ku vstupní ploše tunelu S_{IN} nesmí přesáhnout doporučených 5 %, jinak dochází k blokaci tunelu a je nutno použít korekce. Při volbě čelní plochy 14 x 7 m je poměr blokace $B = 2 \%$, a tím k blokaci nedochází. V simulaci je ověřeno, že se změny hodnot rychlostí a tlaků v oblasti tunelu neprojevují až na jeho stěny a dochází zde k ustálení.

$$B = \frac{A}{S_{IN}} < 0,05 \quad (5.5)$$

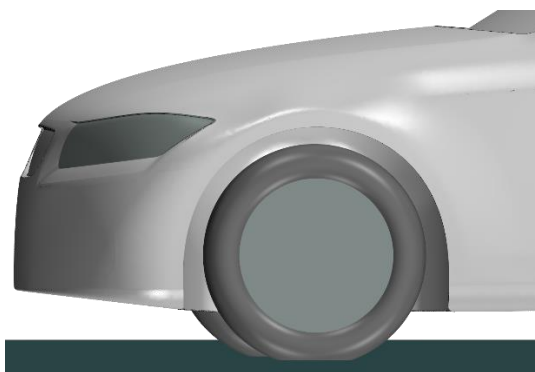
Volba délky tunelu a umístění vozu v tunelu

Čelní plocha tunelu, na kterou se definují vstupní okrajové podmínky, musí být v takové vzdálenosti před vozem, aby proud dopadající na vůz měl plně vyvinutý charakter a byl v rámci simulace ustálený. Výstupní plocha tunelu musí být opět v dostatečné vzdálenosti od druhého vozu tak, aby došlo ke kompletnímu ustálení proudu za vozem. Rozměry tunelu pro simulaci proudění vzduchu byly s ohledem na výše zmíněné podmínky a s přihlédnutím na doporučení ve zdroji [36] voleny podle Tab. 1:

Tab. 1: Rozměry výpočetní domény.

Rozměry výpočetní domény	
Délka tunelu	60 m
Šířka tunelu (bez využití symetrie)	14 m
Výška tunelu	7 m
Vzdálenost přední stěny tunelu od prvního vozu	11 m
Vzdálenost zadní stěny tunelu od druhého vozu	32 m
Vzdálenost vozidel	8 m

Tunel byl poté vytvořen jako jednoduchá geometrie výše uvedených rozměrů. Vůz je umístěn na vozovku s posunem osy $Z = -30$ mm. Důvodem je zachycení reálné situace deformace pneumatiky v oblasti styku s vozovkou a také zabránění vzniku ostrého úhlu mezi běhounem pneumatiky a vozovkou. Tento úhel by způsobil problémy s kvalitou sítě v této oblasti. Druhý vůz je umístěn ve vzdálenosti 8 m za vedoucím vozem. Volba vzdálenosti vychází z řešeršní části kapitoly 2.2.1 jako střední hodnota již dosažených odstupů autonomně vybavených vozidel v praxi. Vložení druhého vozu je provedeno pomocí funkce *Translate* pod položkou *Transform*. Výsledná výpočetní oblast vznikla odečtením objemu vozů z objemu tunelu.



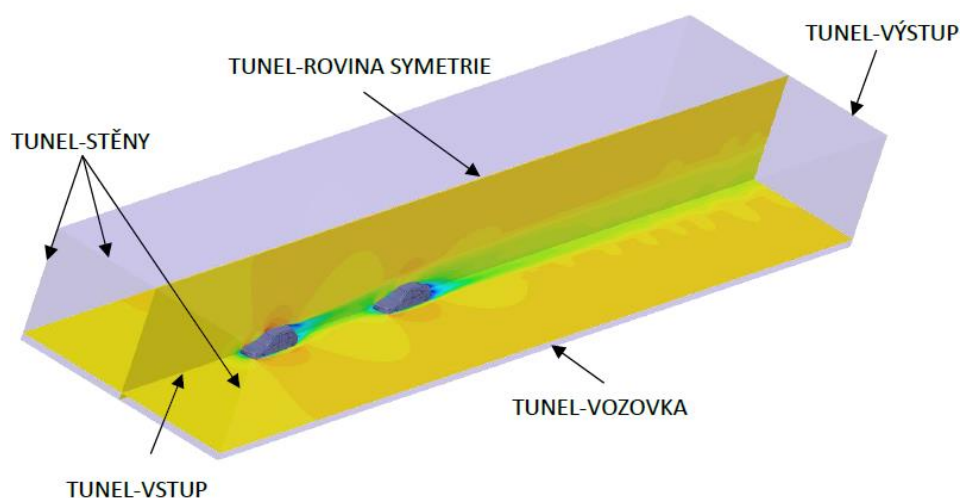
Obr. 26: Posun vozu v ose $Z = -30$ mm.

Okrajové podmínky simulace

Z vytvořené výpočetní oblasti je vytvořen nový region, ve kterém se určují okrajové podmínky. Definovány jsou pro každou plochu geometrie. Okrajové podmínky jsou zadány podle Tab. 2 následovně:

Tab. 2: Okrajové podmínky simulace.

	Typ okrajové podmínky	Hodnota okrajové podmínky
Tunel: Vstup	Velocity inlet	140 km·h ⁻¹
Tunel: Výstup	Pressure outlet	0 Pa
Tunel: Stěny	Symetry plane	-
Tunel: Rovina symetrie	Symetry plane	-
Tunel: Vozovka	Tangential velocity specification	140 km·h ⁻¹
Vůz: Povrch	Wall	-
Vůz: Kola	Wall relative rotation	129,63 rad·s ⁻¹



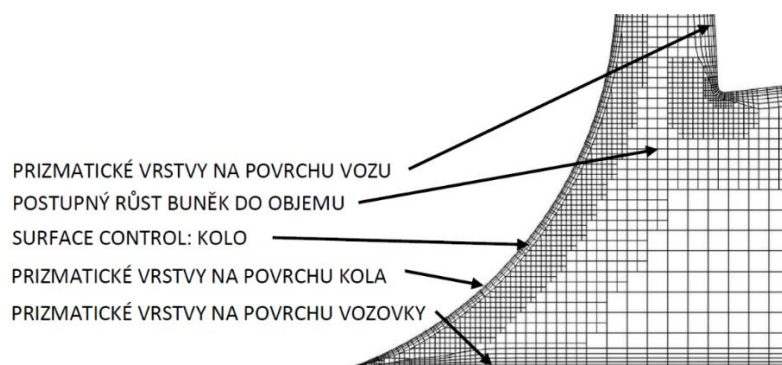
Obr. 27: Výpočetní oblast, definice ploch.

5.5 PŘÍPRAVA SÍŤ

Software Siemens Star CCM+ nabízí tři druhy sítě, a to konkrétně polyhedrální, tetrahedrální a hexahedrální (trimmed). Volena byla hexahedrální síť, protože jako jediná nabízí postupné zjemnění sítě pomocí funkce *Wake refinement* v oblasti obrysu vozu, dále vysokou míru ortogonalitu a s tím související nejvyšší kvalitu sítě, navíc je s ohledem na výsledný počet buněk sítě dobrým kompromisem. Limitujícím faktorem pro přípravu, výpočet a samotnou simulaci byl použitý hardware, pro který byl limit v počtu buněk sítě podle [37] stanoven na 13 milionů buněk.

5.5.1 VÝCHOZÍ NASTAVENÍ SÍŤ

Ve výpočetní oblasti je vytvořena povrchová síť, z níž poté vzniká síť objemová. Nejprve je volena základní velikost sítě *Base size*. Konkrétní hodnoty jsou dále voleny jako relativní hodnoty k zvolené *Base size* a jsou zadávány procentuálně. Tato volba je vhodná pro škálování celé sítě najednou pouhou změnou *Base size*. Dále jsou určeny hodnoty pro povrchovou síť, a to *Target surface size*, určující velikost prvku na povrchu s minimálním zakřivením, a *Minimum surface size* pro prvky ležící na malých rádiusech povrchu. Velikosti jsou vždy zadávány jako n-té mocniny *Minimum surface size*, a to z důvodu optimálního dělení buněk v použité síti. Objemová síť vyžaduje nastavení prizmatických vrstev na povrchu vozu a vozovce. Zde se volí výška první prizmatické vrstvy podle požadované hodnoty y^+ , počet prizmatických vrstev a jejich celková výška, viz Obr. 28.



Obr. 28: Zjemnění sítě na povrchu vozu a vozovky.

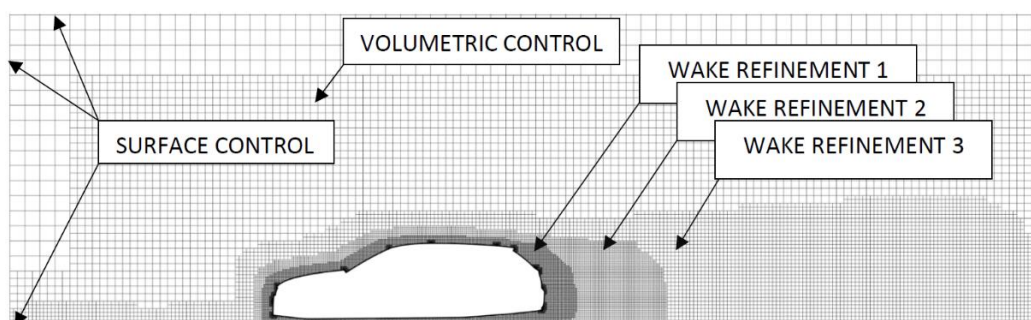
Nastavení *Maximum cell size* určuje maximální velikost buňky v objemu. Tyto buňky se nachází v dostatečné vzdálenosti od vozu v blízkosti stěn tunelu, kde již nedochází k velkým změnám proudění. Růst buněk do povrchu je nastaven jako rychlý, do objemu jako pomalý. Další volby jsou ponechány jako výchozí, s výjimkou vypnuté položky *CAD Projection*. Po optimalizaci sítě byly jednotlivé položky nastaveny podle Tab. 3:

Tab. 3: Nastavení sítě.

Globální nastavení	
Base size	100 mm
Povrchová síť	
Minimum surface size	2 mm
Target surface size	16 mm
Surface growth rate	1,6
Objemová síť	
Počet prizmatických vrstev	6
Výška první prizmatické vrstvy	1,4 mm
Celková výška prizmatických vrstev	16 mm
Maximum cell size	256 mm

5.5.2 LOKÁLNÍ NASTAVENÍ SÍTĚ

Kromě výchozího nastavení sítě je nutné ji dále upravit tak, aby byla dostatečně jemná v oblastech velkých změn proudění, tedy v určité vzdálenosti od vozu a v oblasti za vozem. Naopak ve vzdálenějších místech výpočtové oblasti je nutné síť dostatečně zvětšit, aby klesl počet buněk a s tím související potřebný výpočetní výkon. Zjemnění sítě je zřetelné na Obr. 29:



Obr. 29: Zjemnění sítě výpočetní oblasti.

Pomocí volby *Wake refinement* je síť postupně zjemňována ve směrech osy *X* a *Z* v různých vzdálenostech od vozu. Na vozovku je dále nastaven požadavek *Target surface size* tak, aby bylo správně řešeno proudění v její blízkosti. Při zapnuté okrajové podmínce pro rotaci kol vznikají v oblasti pneumatik a podběhů vysoké změny proudění. Unášený proud v oblasti rotujících kol má odlišnou rychlost od rychlosti proudění kolem karoserie a hodnota y^+ zde musí být přehodnocena, proto je vhodné síť na povrchu kol zjemnit opět pomocí volby *Target surface size* a dále nově nastavit oblast prizmatických vrstev. Pomocí *Surface control* jsou na stěnách tunelu, rovině symetrie a vstupu/výstupu tunelu vypnuté prizmatické vrstvy. Nakonec je vytvořen zmenšený obraz tunelu o rozměrech 4 x 7 x 52 m, ve kterém je nastavena volba *Volumetric control* pro další zjemnění oblasti. Parametry lokálního nastavení byly voleny následovně:

Tab. 4: Lokální zjemnění sítě.

Wake refinement v okolí vozu		
	Vzdálenost:	Velikost buňky:
Osa X+	500 mm	16 mm
	2000 mm	32 mm
	8000 mm	64 mm
Osa X-	150 mm	16 mm
Osa Z-	500 mm	16 mm
Vozovka		
Target surface size		64 mm
Oblast kol		
Target surface size		4 mm
Počet prizmatických vrstev		4
Výška první prizmatické vrstvy		0,8 mm
Celková výška prizmatických vrstev		6 mm
Tunel		
Volumetric control		128 mm

5.5.3 KONTROLA A VELIKOST SÍTĚ

Špatná kvalita sítě ovlivňuje správnost výsledků výpočtu, čas simulace potřebný ke konvergenci a v hraničních případech vede k divergenci řešení. Pod položkou *Mesh-Diagnostic* byla provedena diagnostika sítě. Kontroluje se topologie sítě, kvalita povrchové sítě a parametry *Volume Change* a *Skewness Angle*. Povrchová síť nesmí mít žádné buňky s negativním objemem, u kterých normály směřují do buňky nebo kde dochází k jejich překrytí, dále buňky s konkávními stěnami, pro které by se normály vycházející z těchto stěn protínaly. Pokud jsou některé buňky povrchové sítě špatné kvality, pak diagnostika vypíše počet buněk s *Face validity* < 1. Vytvořená síť má všechny povrchové buňky validní. Parametr *Volume Change* informuje o změně objemu sousedních buněk, ty s hodnotou *Volume Change* < 0,01 jsou považovány za špatné. Problémových buněk bylo z celkového objemu nalezeno 0,002 % a ověřeno, že se žádná nenachází v oblasti úplavu vozidel. Parametr *Skewness Angle* určuje úhel zkosení buněk, přičemž hodnota 0° značí ortogonální síť. Tento parametr nesmí překročit hodnotu 85°. Předností použité sítě je její vysoká ortogonalita, a proto maximální hodnoty

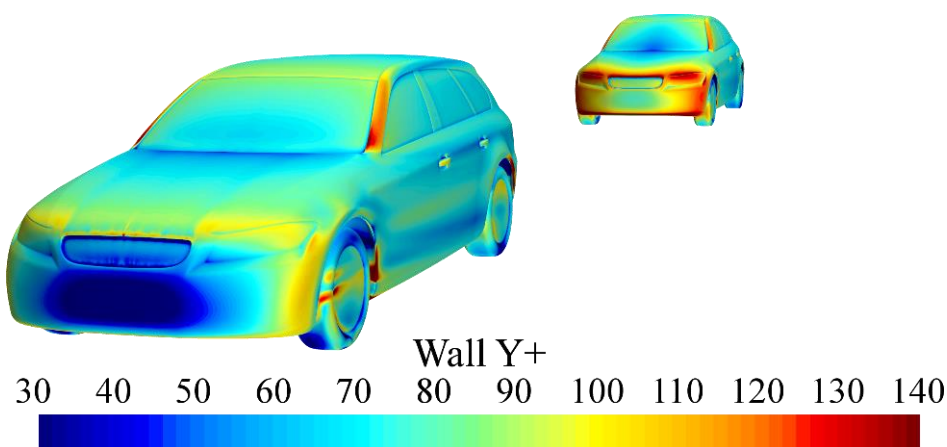
Skewness Angle u všech vysítovaných verzí nepřesahují hodnotu 9° . Celkový počet buněk vytvořených sítí pro všechny varianty je v Tab. 5:

Tab. 5: Počet buněk sítě pro všechny varianty simulace.

Varianta simulace	Počet buněk sítě
E	7 011 316
F	7 031 216
N	6 949 645
E x E	12 548 542
E x F	12 614 673
E x N	12 485 329
F x F	12 592 366
N x N	12 415 061

5.5.4 KONTROLA MEZNÍ VRSTVY SÍTĚ

Při výpočtu výšky první buňky v mezní vrstvě pomocí funkce y^+ jsou dosazované hodnoty předem odhadovány z důvodu neznámého charakteru proudění. Po průběhu simulace je nutné zkontrolovat hodnoty y^+ na povrchu vozu, přičemž musí být v použitelném intervalu stěnové funkce. Pro modelování mezní vrstvy s využitím stěnových funkcí je doporučeno použítelné rozmezí $30 < y^+ < 300$, avšak při použití stěnové funkce *All- y^+* je využit tzv. *Blending approach*, který nabízí dobré řešení i pro $y^+ < 30$. V oblasti stagnace či separace proudů jsou nízké hodnoty y^+ akceptovány, a síť tudíž není potřeba v těchto místech dále upravovat [25]. Na Obr. 30 jsou zobrazeny výsledné hodnoty funkce y^+ upravené sítě. Hodnoty $y^+ < 30$ se nachází v oblastech stagnace či separace proudů. Hodnoty y^+ ve zbylém povrchu obou vozů jsou pro použitou stěnovou funkci v akceptovatelném rozmezí.



Obr. 30: Zobrazení hodnot funkce y^+ na povrchu vozu.

5.6 NASTAVENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU

5.6.1 NASTAVENÍ ŘEŠIČE

Dále je nutné nastavit řešič výpočtu pod položkou *Continua*. Nastaví se typ proudění, turbulentní model a způsob modelování mezní vrstvy. Pro celou studii je volen turbulentní model Realizable k-epsilon. Některé varianty byly nad rámec samotné studie následně počítány turbulentním modelem k-omega SST pro porovnání vlivu na výsledek simulace. Modelování času je v simulaci nastaveno na *Implicit unsteady*. Toto nastavení dává výsledky bližší reálnému nestabilnímu proudění a odtrhávání proudění v zadní části karoserie. Řešič je nastaven následovně:

Tab. 6: Nastavení řešiče.

Prostor	3D
Čas	Implicit unsteady
Materiál	Plyn
Řešení proudění	Coupled flow
Stavová rovnice plynu	Konstantní hustota
Viskózní režim	Turbulentní
Numerické řešení	RANS
Modelování mezní vrstvy	All y+
Gradient metrics	Gradients
Wall distance	Exact wall distance
	Cell quality remediation
Turbulentní model	Realizable k-epsilon, two-layer SST k-omega (Menter)

5.6.2 INICIALIZAČNÍ A REFERENČNÍ PODMÍNKY SIMULACE, PROUDÍCÍ MÉDIUM

Před spuštěním simulace je nutné zadat počáteční a referenční podmínky simulace, dále se definují fyzikální hodnoty proudícího média podle Tab. 7:

Tab. 7: Fyzikální hodnoty proudícího média.

Proudící médium:	Fyzikální veličina	Hodnota
Vzduch	Hustota	1,184 kg·m ⁻³
	Dynamická viskozita	1,855·10 ⁻⁵ Pa·s
	Referenční hodnota tlaku	101 325 Pa
	Inicializační hodnota tlaku	0 Pa
	Inicializační rychlost média	140 km·h ⁻¹

5.6.3 NASTAVENÍ PRŮBĚHU ŘEŠENÍ

Modelování fyzikálního času v průběhu simulace je pro prvních tisíc iterací řešeno jako ustálený model RANS (*Reynolds Averaged Navier—Stokes*), výpočet pro každou buňku výpočetní oblasti tedy probíhá ve stejný fyzikální čas. Důvodem je rychlejší konvergence řešení a pokles reziduálů. Nad tisíc iterací se řešič přepíná na *Implicit unsteady* model, tedy model URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier—Stokes*) s časovým krokem 0,001 s. Výsledky proudění jsou stejně jako u modelu RANS časově středěné, avšak výpočet v buňkách probíhá

podle voleného časového kroku, který umožňuje zachytit nestabilitu proudění. Pro každý časový krok je pod položkou *Stopping criteria* nastaven počet 6 vnitřních iterací a fyzikální čas výpočtu 1,5 s pro simulaci jízdy samotného vozu a 3 s pro dva vozy. Delší výpočet pro dva vozy souvisí se složitějším prouděním, a tím větší časovou náročností na ustálení řešení než u vozu samotného.

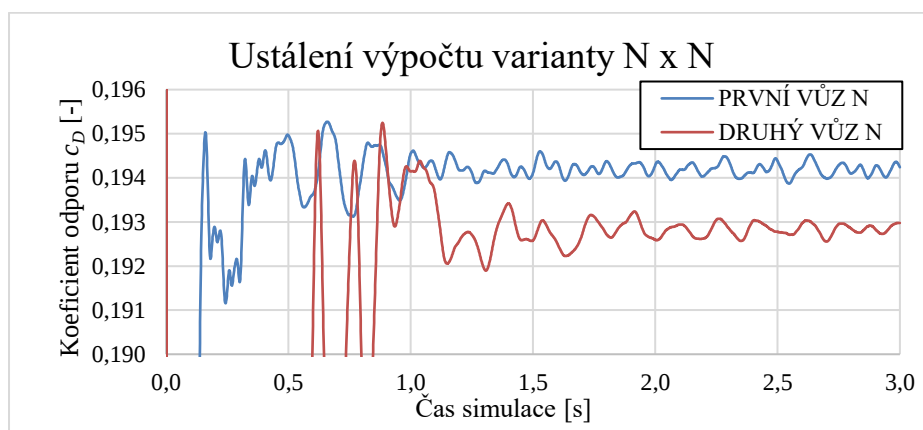
5.7 NASTAVENÍ VÝPISU INFORMACÍ, SCÉN, MONITORŮ A GRAFŮ

Aby nemusela být ukládána kompletní výpočetní doména, je nutné nastavit parametry, které budou během iterací ukládány, a také oblasti, na něž budou fyzikální hodnoty zobrazovány. Pod položkou *Derived parts* jsou vytvořeny plochy, na které budou vykreslována rychlostní pole proudu. Proudění bude vyhodnocováno v řezu $Z = 450$ mm pro pohled shora a dále v řezech $Y = 0$ mm (rovina symetrie) a $Y = 300$ mm pro pohled z boku. Řezy jsou vytvořeny také mezi vozidly k zachycení vývoje úplavu. Pod položkou *Reports* jsou nastaveny výpisy pro koeficient vztlaku c_L , odporu c_D a momentu klonění c_{My} každého vozu. Tyto výpisy jsou pod záložkou *Monitors* sledovány a zapisovány pro každou iteraci. Pod položkou *Plots* jsou tyto veličiny vykresleny do grafů, které slouží nejen pro následné zpracování, ale také pro sledování průběhu řešení v čase a ověření jeho ustálení. Ve volbě *Scenes* jsou vytvořeny pohledy pro vhodné grafické porovnání jednotlivých variant obsahující předem vytvořené řezy výpočetní domény.

6 VÝSLEDKY METODY K-EPSILON

6.1 ZPRACOVÁNÍ DAT

Výsledná data bylo nutné filtrovat a průměrovat. Pro každý časový krok se data filtrovala z poslední vnitřní iterace, tedy před novým časovým krokem. U všech variant byl vyhodnocen časový úsek, ve kterém došlo k ustálení sledovaných hodnot a reziduálů. Tento časový úsek byl poté průměrován. V grafu 1 je zobrazen časový průběh simulace verze N x N a vývoj koeficientu odporu c_D během výpočtu. K ustálení reziduálů pro tuto verzi došlo v časovém intervalu 2—3 s. V případě simulace samotného vozu došlo k ustálení reziduálů v časovém intervalu 0,8—1,5 s.



Graf 1: Průběh iterace simulace pro hodnoty koeficientu odporu c_D .

6.2 SIMULACE JÍZDY SAMOTNÉHO VOZU

Při simulaci jízdy samotných vozů byly získány hodnoty koeficientu odporu c_D pro porovnání s experimentem a dále koeficient vztlaču c_L a klonivého momentu c_{My} . Podle vztahů (5.3) a (5.4) je dopočítán koeficient vztlaču pro přední a zadní nápravu c_{LF} a c_{LR} . Hodnoty těchto veličin jsou uvedené v Tab. 8. Při studii je využita symetrie vozu, proto není možné zachytit interakci vírů v oblasti úplavu za vozem. Vliv využití symetrie na aerodynamické veličiny pro samotný vůz je nepatrný, avšak pro vývoj úplavu za vozem je použití symetrie zásadní a bude mít negativní dopad na přesnost výsledků při simulaci jízdy v úplavu. Použití kompletního modelu by však přesáhlo výpočetní možnosti, a proto nebude uvažováno. Grafické porovnání tvaru úplavu za samostatně jedoucími vozidly je zřejmé z přílohy 1 a 2.

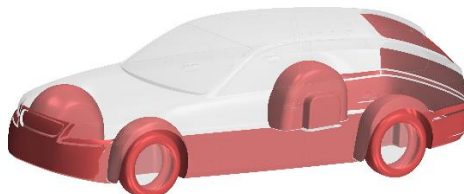
Tab. 8: Průměrné hodnoty aerodynamických koeficientů pro jízdu samotného vozu.

Aerodyn. koeficienty [-]	c_D	c_L	c_{My}	c_{LF}	c_{LR}
Estateback	0,234	-0,189	-0,048	-0,143	-0,046
Fastback	0,196	-0,026	-0,095	-0,108	0,082
Notchback	0,197	-0,046	-0,080	-0,103	0,057

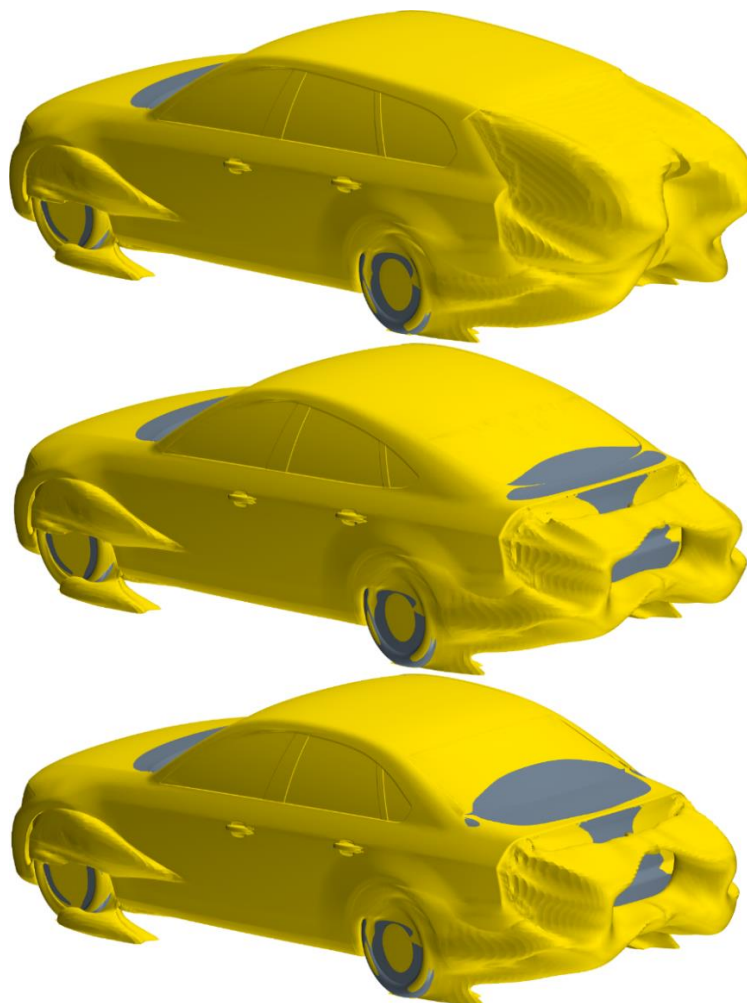
Plochy se zásadním vlivem na velikost koeficientu odporu vozu jsou v Tab. 9 pro variantu Estateback. U verze Notchback a Fastback se ke zmíněným plochám přidává ještě výrazný vliv střechy vozu. Pro jízdu v úplavu je důležité, aby úplav prvního vozu co nejvíce zasáhl tato kritická místa přední části druhého vozu, aby se snížil jeho aerodynamický odpor.

Tab. 9: Plochy vozu se zásadním vlivem na jeho koeficient odporu.

Estateback	Δc_D
Přední nárazník	+0,130
Podběhy	+0,034
Přední pneumatiky	+0,027
Chladič	+0,025
Boční části zadního nárazníku	+0,018
Zadní pneumatiky	+0,016
Podlaha	+0,013
Zadní okno	+0,013
Zadní nárazník	+0,011
Zadní čelo	+0,010

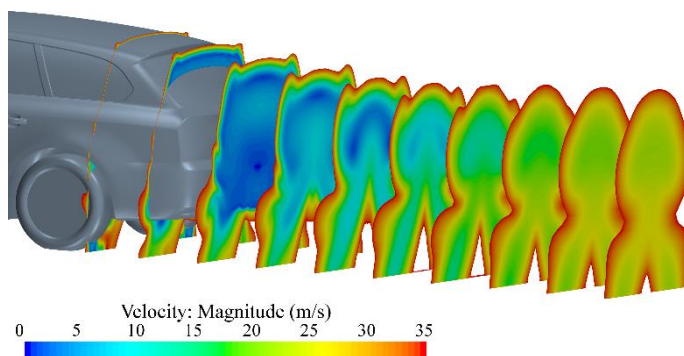


Na Obr. 31 je úplav vozů vykreslen pomocí izoploch pro koeficient celkového tlaku $c_{Pt} = 0$. Kromě zadní části karoserie je výrazný úplav tvořen za předními a zadními pneumatikami. Úplav vozu Notchback se od Fastbacku liší především v oblasti roviny symetrie vozu.

Obr. 31: Porovnání úplavů vozů. Vykresleny jsou izoplochy pro koeficient celkového tlaku $c_{Pt} = 0$.

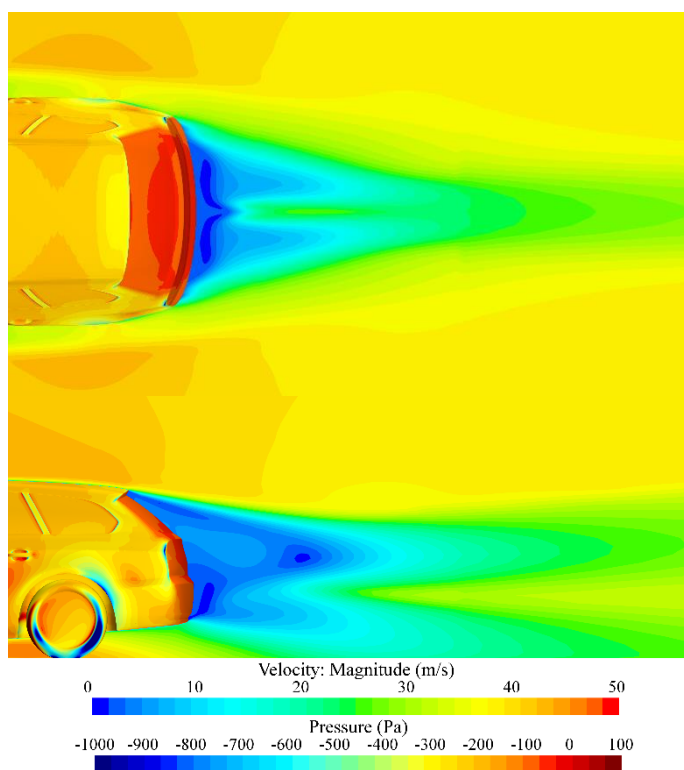
6.2.1 ESTATEBACK

Střecha vozu Estateback je v zadní části prodloužena pro maximální praktické využití vozu a zakončena zřetelnou lištou určující moment odtržení proudu. Tím je způsoben největší odpor vozu ze všech karosářských variant. Víry C-sloupků se za vozem spojují, kumulují v rovině symetrie vozu a pokračují směrem vzhůru od vozovky. Okolní proud je úplavem ze všech variant nejvíce rozrušen, proto se jízda za touto variantou jeví jako nejvýhodnější.



Obr. 32: Řezy rychlostních polí úplavu vozu Estateback.

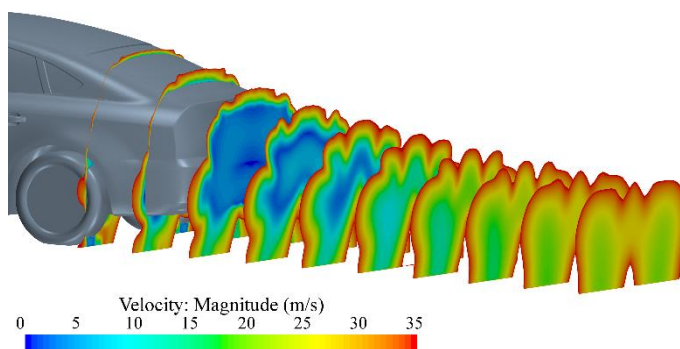
Z řezů rychlostních polí úplavu na Obr. 32 je patrné spojení vírů C-sloupku v rovině symetrie vozu. Z Obr. 33 je zřejmé rozdělení úplavu na dva proudy směrem k vozovce a od vozovky. Proud je řízeně odtržen v místě odtrhové lišty na konci střechy, a tím je celá zadní část karoserie v separační bublině. Díky tomu má vůz Estateback ze všech variant největší vztlak.



Obr. 33: Estateback — rychlostní pole v řezech $Y = 300 \text{ mm}$, $Z = 450 \text{ mm}$ a tlak na povrchu vozu.

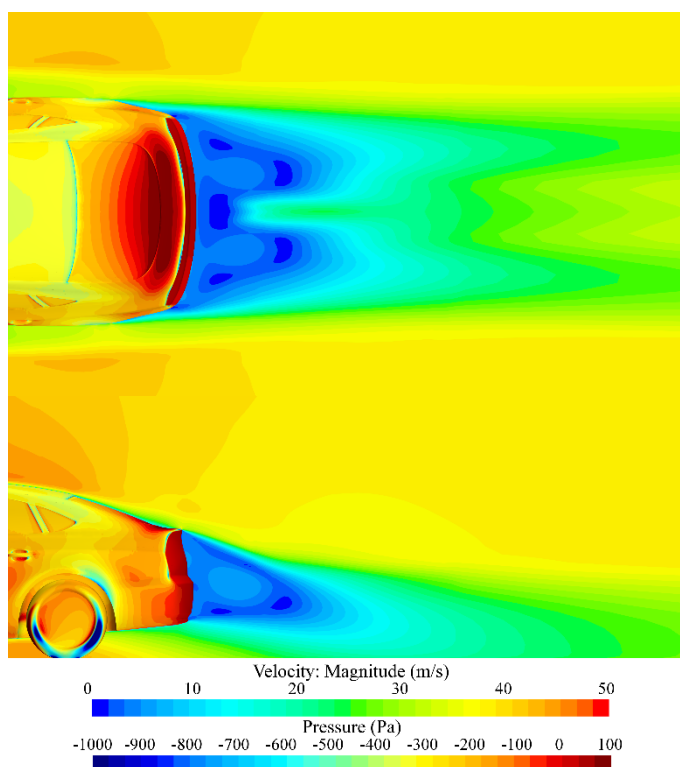
6.2.2 FASTBACK

Karoserie typu Fastback se vyznačuje splývavou záďí proudnicového tvaru a z aerodynamického hlediska se jedná o karoserii s nejnižším odporem. Zadní sklo plynule přechází ve víko zadního kufru a praktičnost zavazadlového prostoru ustupuje sportovnímu vzhledu. Mezi střechou a zadním sklem je odtrhová lišta jako u vozu Estateback. Umístěním, velikostí a geometrií těchto prvků lze řídit odtržení proudy, a tím docílit změn odporu a přtlaku. Působení některých z těchto prvků na vůz DrivAer lze nalézt v práci [38].



Obr. 34: Řezy rychlostních polí úplavu vozu Fastback.

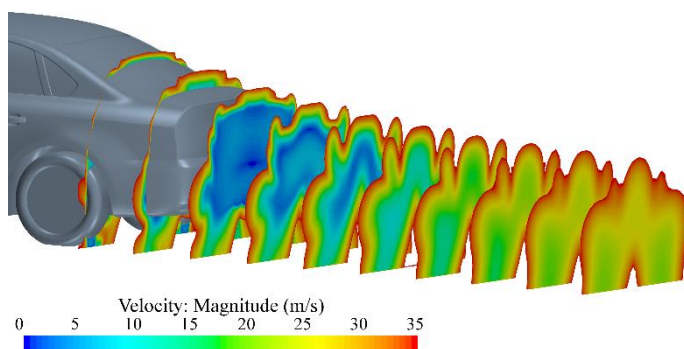
Řezy úplavu na Obr. 34 zachycují vzdalování vírů C-sloupků od roviny symetrie. Víry C-sloupků se rychle spojují s úplavem za oblastmi kol a směřují k vozovce. Odtrhová lišta mezi střechou a zadním oknem má malé rozměry, proto je proud přilnutý téměř po celé délce zadního okna, a tím má verze Fastback nejvyšší hodnotu přtlaku. Tato karosářská verze nejméně rozrušuje okolní proudění, a proto se předpokládá jízda za tímto vozem jako nejméně výhodná.



Obr. 35: Fastback — rychlostní pole v řezech $Y = 300 \text{ mm}$, $Z = 450 \text{ mm}$ a tlak na povrchu vozu.

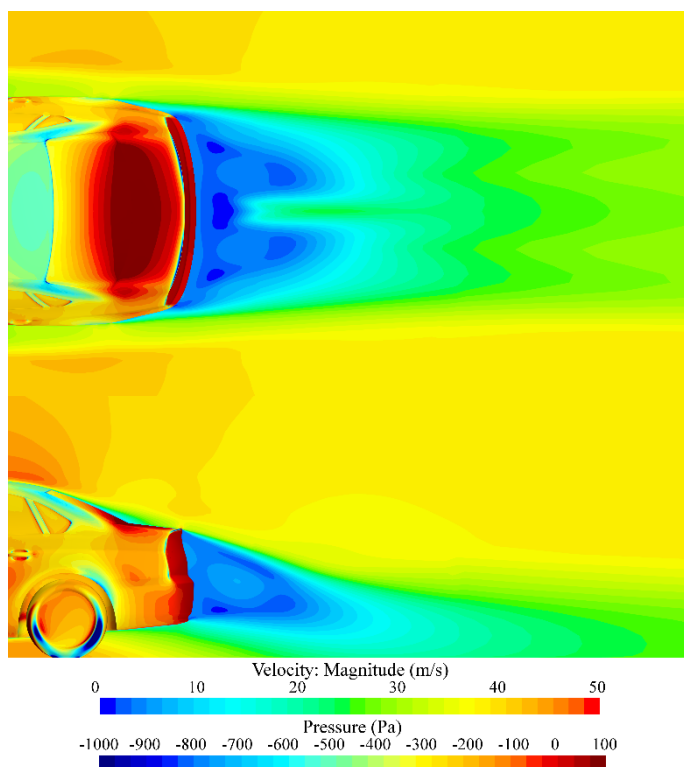
6.2.3 NOTCHBACK

Karosářská varianta Notchback je kompromisem mezi Estatebackem a Fastbackem. S tím souvisí i velikost odporu vozu, která se nachází mezi hodnotami odporu Fastbacku a Estatebacku. Velikost odporu a vztlaku vozu se odvíjí od použitého sklonu zadního okna a výšky víka kufru. V této oblasti se proud od vozu odtrhne a přilne se až těsně před odtrhovou hranou kufru. Zde se nachází stagnační bublina vysokého tlaku způsobující přítlak na zadní část vozu.



Obr. 36: Řezy rychlostních polí úplavu vozu Notchback.

Na Obr. 37 víry C-sloupků v rovině symetrie směřují k vozovce a spojují se s úplavem za koly vozu. Pro vůz Notchback je typický vír formující se v blízkosti roviny symetrie vozu, způsobený přechodem zadního okna a kufru. Díky němu je oblast úplavu vyšší než u vozu Fastback.

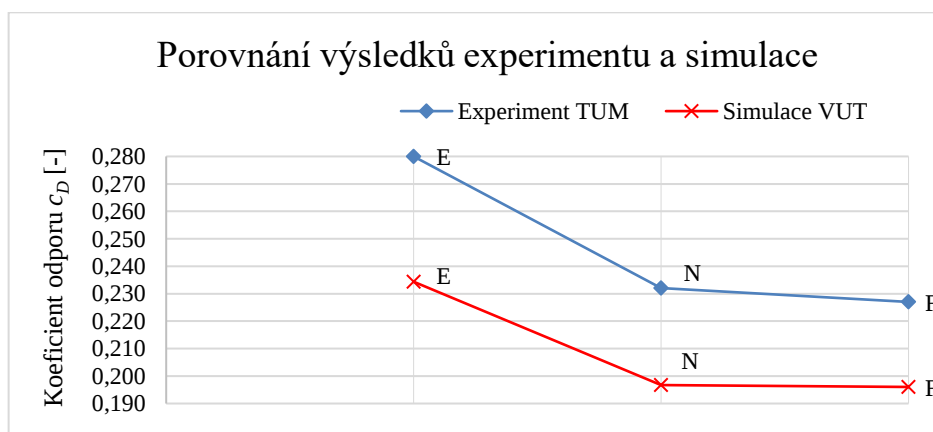


Obr. 37: Notchback — rychlostní pole v řezech $Y = 300 \text{ mm}$, $Z = 450 \text{ mm}$ a tlak na povrchu vozu.

6.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE S EXPERIMENTEM

Experimentální měření byla součástí prezentace nového srovnávacího modelu vozu DrivAer v práci [39]. Měření proběhla v aerodynamickém tunelu TUM na vozech v měřítku 1:2,5. Aerodynamický tunel byl vybaven pohyblivým pásem simulujícím pohyb vozovky a rotaci kol. Model vozu byl uchycen na nosnících v oblasti kol a hlavním nosníkem v oblasti střechy. Data koeficientu aerodynamického odporu jsou k dispozici pro variantu modelu vozu bez zrcátek, s detailními koly a s hladkou podlahou.

Hlavní příčiny rozdílu hodnot koeficientu odporu mezi experimentem a simulací jsou v odlišné geometrii a samotné podstatě zjednodušení fyzikálního problému pomocí simulace. Jako příčiny rozdílu hodnot koeficientu odporu vozů mezi experimentem a simulací lze označit především vliv detailní geometrie kol, použité u experimentu, a jednoduché geometrie kol v simulaci, dále vliv nosníků kol a karoserie vozu v tunelu a samotné rozměry tunelu s odlišným poměrem blokace či posun vozu ve směru záporné osy Z u simulace. Tyto geometrické rozdíly jsou pro všechny karosářské varianty stejné, a proto by měly mít u každé z nich podobný dopad ve snížení koeficientu aerodynamického odporu v simulaci. Numerická simulace přináší zásadní zjednodušení zejména v nedostatečně jemné síti a použití jednoduchých modelů turbulence pro dosažení adekvátní výpočetní náročnosti, což výsledné hodnoty koeficientu odporu oproti realitě dále podhodnocuje. Úroveň zjednodušení nesmí výrazně ovlivnit rozdíly odporů mezi jednotlivými variantami. Graf 2 zobrazuje porovnání dat experimentu a simulace. Následné simulace jízdy dvou vozů vychází z přesnosti simulace jízdy samotného vozu. Pro přesnost těchto výsledků je zcela zásadní zachování trendu změny koeficientu odporu v závislosti na použité karoserii vozu oproti experimentálním hodnotám. Rozdíly hodnot koeficientu odporu u simulace oproti hodnotám experimentu jsou téměř totožné pro všechny karosářské varianty a jsou způsobeny výše uvedenými důvody. Současné nastavení parametrů výpočtu je proto pro následující simulace považováno za vyhovující.



Graf 2: Porovnání výsledků experimentu TUM a simulace VUT.

6.4 SIMULACE JÍZDY DVOU VOZŮ

Nejprve byla simulována jízda dvou totožných vozů stejné konstrukce karoserie, poté následovala simulace jízdy všech konstrukčních karoserií za vozem Estateback. Zprůměrované hodnoty koeficientů odporu c_D , celkového vztlaku c_L , vztlaku na přední a zadní nápravu c_{LF} , c_{LR} a klonivého momentu c_{My} jsou uvedeny v Tab. 10. Indexy 1 a 2 značí pořadí vozu ve skupině.

Tab. 10: Výsledné aerodynamické koeficienty všech variant.

Aerodyn. koeficienty [-]		c_{D1}	c_{L1}	c_{My1}	c_{D2}	c_{L2}	c_{My2}	c_{LF1}	c_{LR1}	c_{LF2}	c_{LR2}
samotný vůz	E	0,234	-0,189	-0,048				-0,143	-0,046		
	F	0,196	-0,026	-0,095				-0,108	0,082		
	N	0,197	-0,046	-0,080				-0,103	0,057		
jízda skupiny	E x E	0,230	-0,184	-0,050	0,225	-0,138	-0,026	-0,142	-0,042	-0,095	-0,044
	F x F	0,193	-0,026	-0,096	0,204	0,036	-0,155	-0,109	0,083	-0,137	0,173
	N x N	0,194	-0,044	-0,081	0,193	0,044	-0,130	-0,103	0,059	-0,108	0,152
jízda za Estatebackem	E x E	0,230	-0,184	-0,050	0,225	-0,138	-0,026	-0,142	-0,042	-0,095	-0,044
	E x F	0,231	-0,186	-0,050	0,196	-0,005	-0,063	-0,143	-0,044	-0,065	0,060
	E x N	0,232	-0,186	-0,049	0,196	-0,021	-0,050	-0,142	-0,044	-0,060	0,039

6.5 JÍZDA SKUPINY STEJNÉ KONSTRUKCE KAROSERIE

V Tab. 11 jsou zprůměrované hodnoty koeficientu odporu pro jízdu samotného vozu a jízdu ve skupině. V závorce jsou uvedeny rozdíly hodnot koeficientu odporu oproti jízdě samotného vozu.

Tab. 11: Průměrné hodnoty koeficientu odporu. Jízda samotného vozu a skupiny.

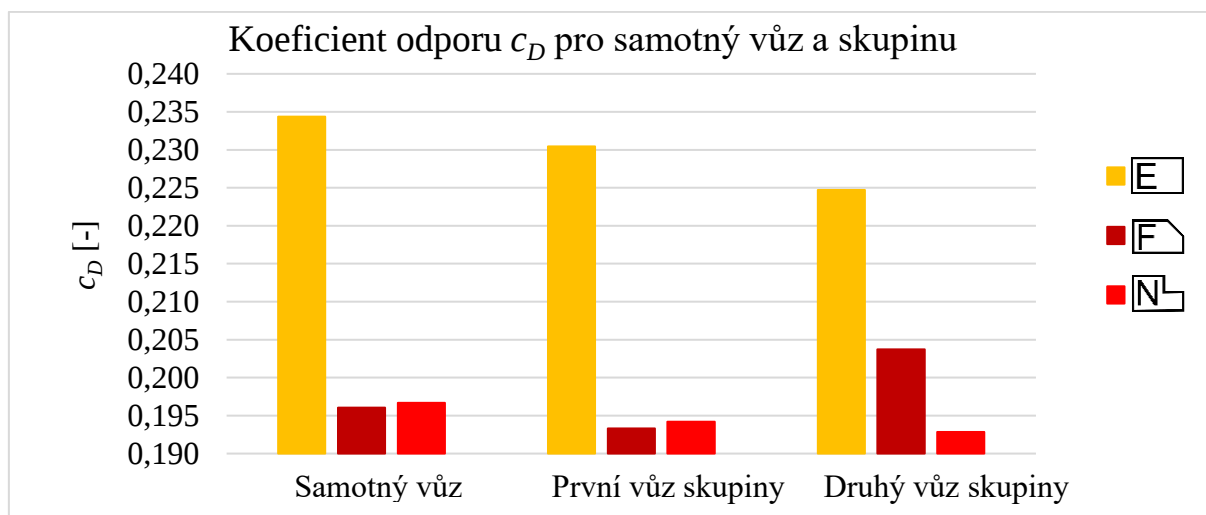
Aerodyn. koeficienty [-]	Samotný vůz c_{D0}	První vůz skupiny c_{D1}	Druhý vůz skupiny c_{D2}
E x E	0,234	0,230 (-0,004)	0,225 (-0,009)
F x F	0,196	0,193 (-0,003)	0,204 (+0,008)
N x N	0,197	0,194 (-0,003)	0,193 (-0,004)

6.5.1 VLIV JÍZDY VE SKUPINĚ NA PRVNÍ VŮZ SKUPINY

K pozitivnímu snížení odporu prvního vozu při jízdě ve skupině oproti jízdě samotného vozu došlo u všech simulovaných variant. Největší zlepšení nastalo u varianty Estateback, kdy se koeficient odporu prvního vozu snížil o $\Delta c_D = 0,004$ v porovnání s jízdou samotného vozu.

6.5.2 VLIV JÍZDY VE SKUPINĚ NA DRUHÝ VŮZ SKUPINY

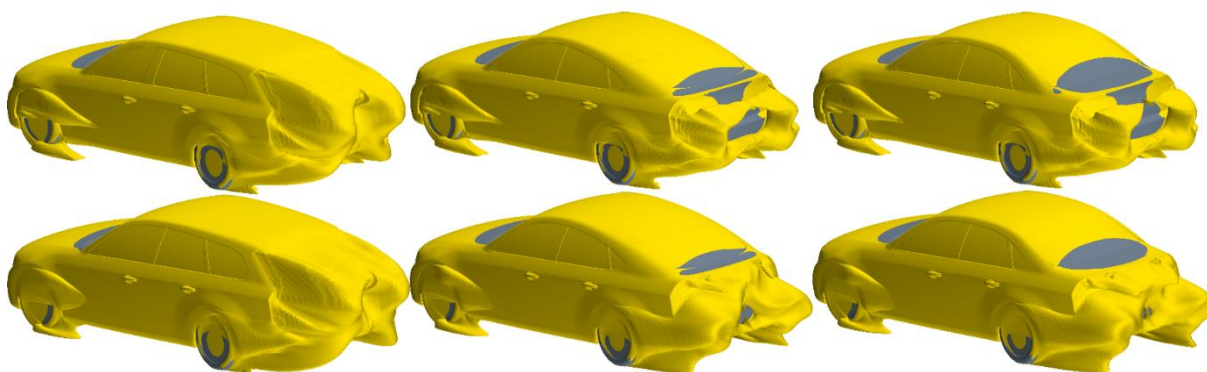
Jízda za Estatebackem je ze všech variant nejvýhodnější a umožňuje snížit koeficient odporu vozu o $\Delta c_D = 0,009$. Oproti tomu se jízda za Fastbackem jeví jako nevýhodná. U jediné ze všech simulovaných variant došlo ke zvýšení koeficientu odporu druhého vozu o $\Delta c_D = 0,008$ na rozdíl od jízdy vozu samotného. Graf 3 zobrazuje vliv jízdy ve skupině na změnu hodnoty koeficientu odporu c_D oproti jízdě samotného vozu.



Graf 3: Koeficient odporu c_D pro samotný vůz a skupinu.

6.5.3 POROVNÁNÍ ÚPLAVU POMOCÍ IZOPLOCH KOEFICIENTU CELKOVÉHO TLAKU

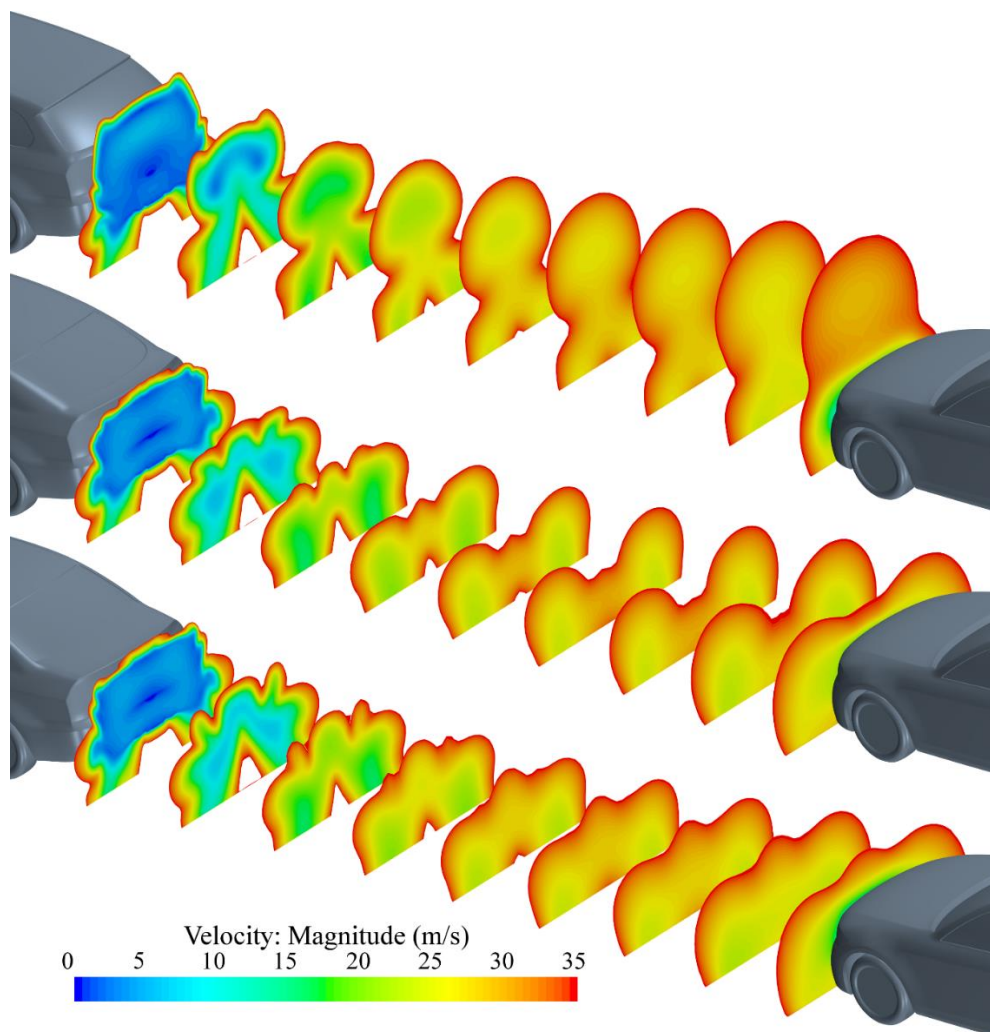
Porovnání úplavů pro první a druhý vůz je zobrazeno na Obr. 38 pomocí izoploch pro celkový tlak $c_{Pt} = 0$. U všech variant je zřetelný menší úplav za předními koly druhého vozu. U vozu Fastback a Notchback se zadní část úplavu za druhým vozem zvětšuje a u oblasti zadních světel vozu dochází k odlišnému odtržení proudu, než jako je tomu u vedoucího vozu. To má zásadní vliv na zvětšení aerodynamického odporu zadní části obou variant.



Obr. 38: Úplav prvního (nahore) a druhého (dole) vozu. Varianty E x E, F x F a N x N. Izoplochy koeficientu celkového tlaku pro $c_{Pt} = 0$.

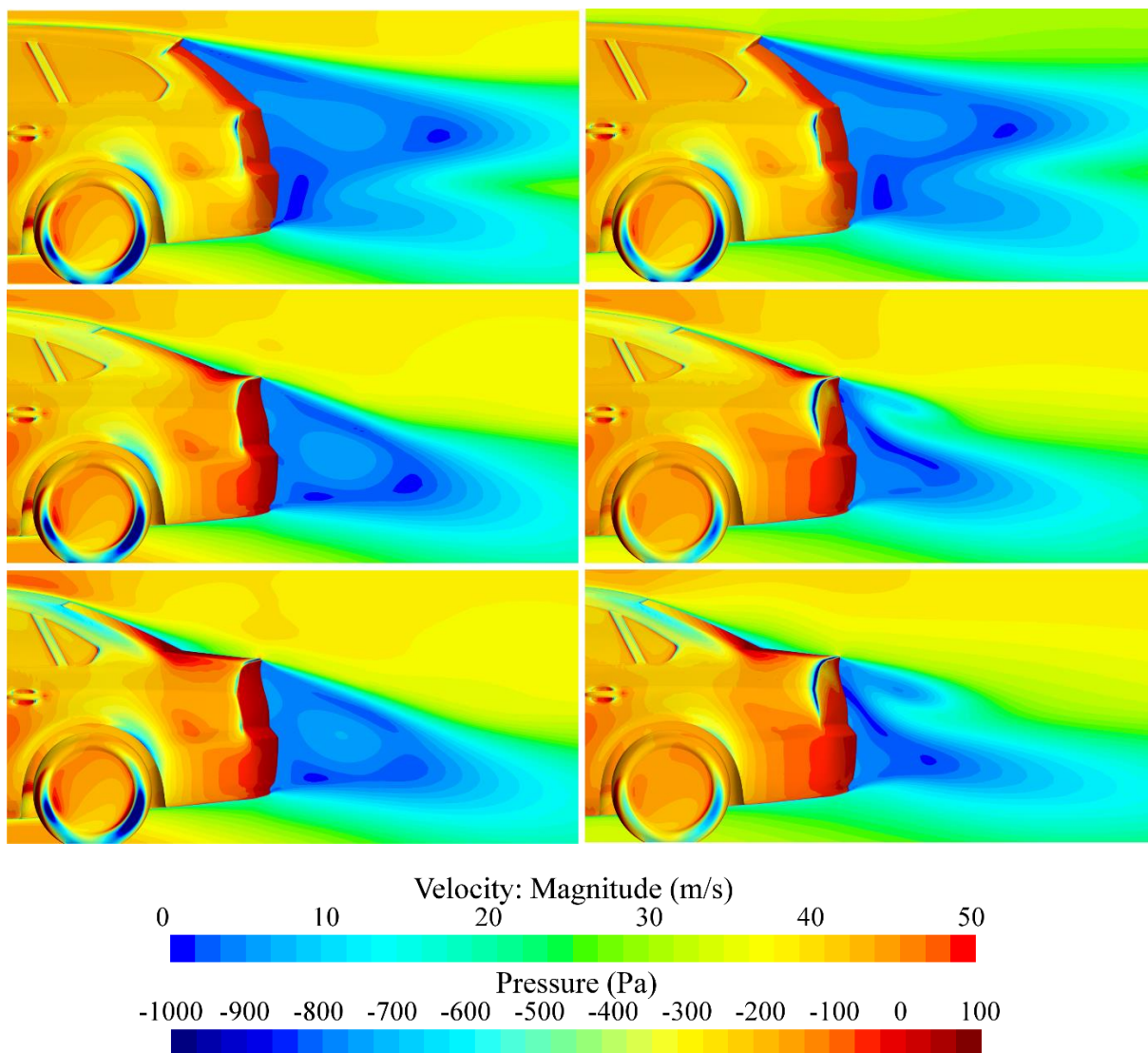
6.5.4 POROVNÁNÍ RYCHLOSTNÍCH POLÍ ÚPLAVU

Na řezech úplavu za prvním vozem v Obr. 39 je zřejmé, že téměř celá čelní plocha druhého vozu za Estatebackem je v oblasti jeho úplavu, kdežto při jízdě za Fastbackem a Notchbackem úplav míří pouze na čelní masku a nárazník vozu, čímž dochází k odlišné rychlosti proudu na střeše a bocích vozu. Víry C-sloupků se za Fastbackem a Notchbackem vzdalují od roviny symetrie vozů, tudíž v této rovině zůstává oblast s vysokou rychlostí proudícího vzduchu. Porovnání rychlostních polí při jízdě skupiny vozů stejné konstrukční kategorie je provedeno v příloze 3—12.



Obr. 39: Řezy rychlostních polí pro varianty E x E, F x F a N x N, odshora.

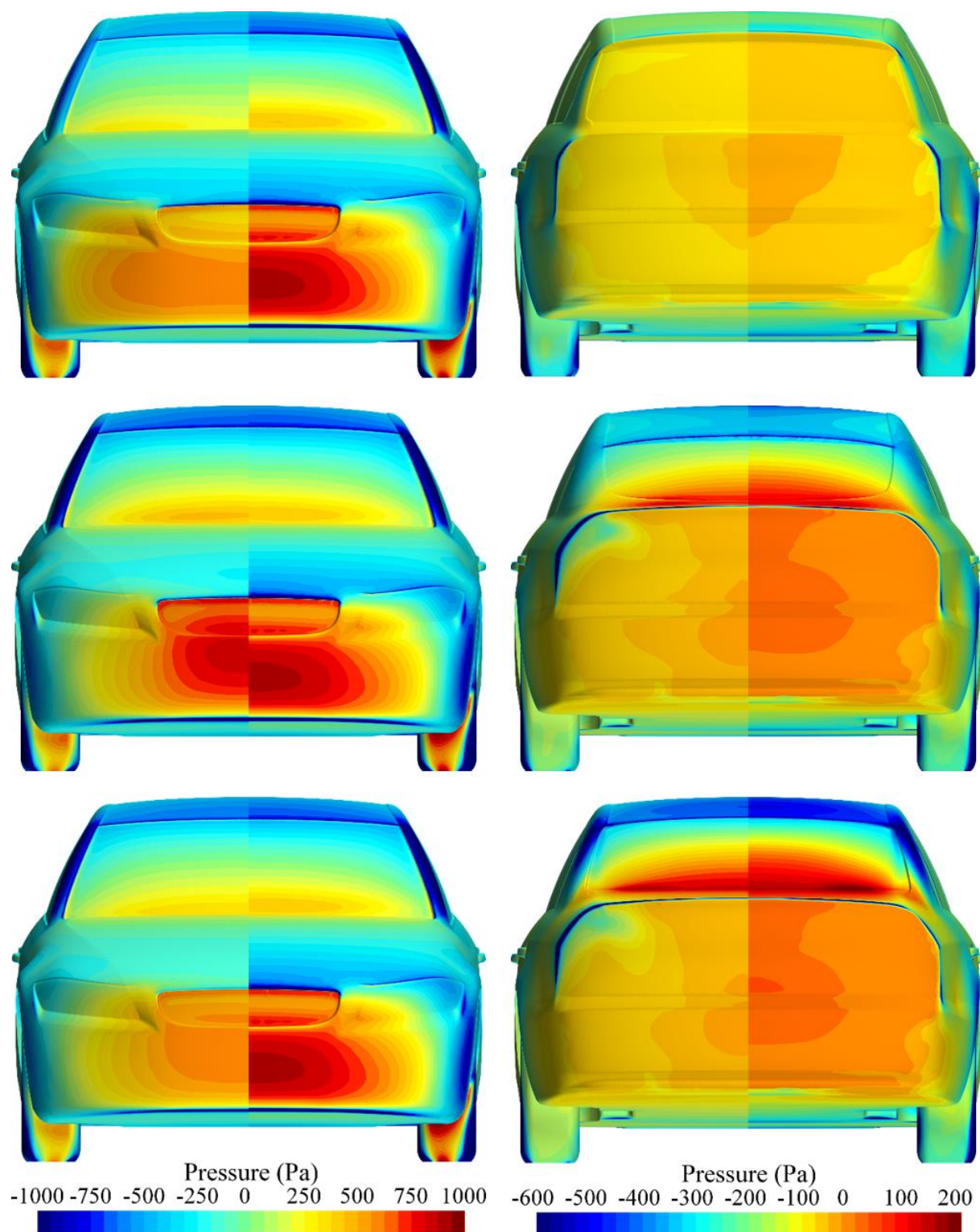
Odtrhové hrany v zadní části karoserie jsou optimalizovány pro jízdu samotného vozu, avšak při jízdě v úplavu způsobují u vozidel Fastback a Notchback zvýšení odporu. K tomuto jevu dochází především na hraně zadních blatníků v oblasti koncových světel. Porovnání rychlostních polí úplavu za vozidly je provedeno na Obr. 40, na němž je zřejmý vliv odlišného odtržení proudu v oblasti odtrhové hrany zadního blatníku u druhého vozu Fastback a Notchback. U vozu Estateback jízda v úplavu zásadně neovlivňuje funkci odtrhových hran, a proto nedochází v této části vozu ke zvýšení odporu.



Obr. 40: Úplavy za prvním (vpravo) a druhým (vlevo) vozem E x E, F x F a N x N, řez $Y = 300$ mm. Evidentní je odlišné odtržení proudu na hraně zadního blatníku kolem koncových světel.

6.5.5 POROVNÁNÍ ROZMÍSTĚNÍ TLAKU NA POVRCHU KAROSERIE

Na Obr. 41 je zobrazeno rozložení tlaku na povrchu karoserie u prvního a druhého vozu. Kritickými místy určujícími velikost odporu druhého vozu při jízdě v úplavu jsou oblast nárazníku vozu, dále chladič vozu, přechod mezi kapotou a čelním sklem, běhouny pneumatik, a především zadní odtrhové hrany karoserie. U verze Estateback dochází oproti jiným variantám k podstatnému snížení tlaku v oblasti přechodu kapoty a čelního skla díky výšce úplavu za prvním vozem. Kvůli vysoké rychlosti proudění v rovině symetrie u varianty Fastback dochází ve srovnání s ostatními k zásadnímu zvýšení tlaku na oblast chladiče a předního nárazníku. Změna rychlosti obtékání vzduchu kolem kapoty oproti vedoucímu vozu má za následek zvýšení tlaku na čelní sklo nad hodnotu tlaku u vedoucího vozu. Při jízdě za Notchbackem dochází díky tvaru jeho úplavu k největšímu poklesu tlaku na běhouny pneumatiky. Zásadní rozdíly v rozložení tlaku zadní části karoserie jsou u vozů Fastback a Notchback v oblastech odtrhové hrany zadních blatníků kolem koncových světel a mezi přechodem zadního skla ve víko kufru. Obtékání na těchto plochách způsobuje vyšší odpor a nižší přítlak než u vedoucích vozů.



Obr. 41: Tlak na povrchu prvního (vpravo) a druhého (vlevo) vozu pro pohledy zepředu a zezadu. Varianty E x E, F x F, N x N odshora.

6.5.6 POZITIVNÍ VLIV ÚPLAVU NA DRUHÝ VŮZ

S využitím výpisu koeficientu odporu na jednotlivé plochy karoserie a kol lze porovnat změny odporu druhého vozu oproti prvnímu. V Tab. 12, Tab. 13 a Tab. 14 jsou vypsány plochy, u kterých došlo ke snížení hodnot koeficientu odporu o $\Delta c_D = 0,005$ a více. U všech karosářských variant jsou pozitivně ovlivněny přední části nárazníku, přední běhouny pneumatik a podběhy. Povrch podběhů vozu nebyl rozdělen na přední a zadní, avšak předpokládá se pozitivní ovlivnění podběhů přední nápravy.

Pro vůz Estateback jsou pozitivně ovlivněné plochy v Tab. 12. Oproti ostatním verzím zde došlo díky výšce úplavu ke zmenšení odporu na čelním skle a chladiči.

Tab. 12: Pozitivní vliv úplavu na vůz Estateback.

Estateback — pozitivní vliv úplavu	Δc_D
Přední nárazník	-0,016
Přední pneumatiky	-0,014
Podběhy kol	-0,010
Chladič	-0,008
Čelní sklo	-0,007



Vůz Fastback má nejméně pozitivně ovlivněných ploch. Hodnoty snížení koeficientu odporu, uvedené v Tab. 13, jsou vyšší než u Estatebacku, avšak nedosahují hodnot Notchbacku.

Tab. 13: Pozitivní vliv úplavu na vůz Fastback.

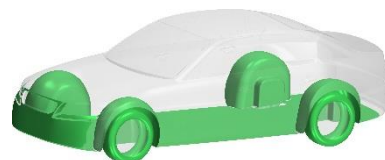
Fastback — pozitivní vliv úplavu	Δc_D
Přední nárazník	-0,027
Přední pneumatiky	-0,015
Podběhy kol	-0,011



Tab. 14 ukazuje, že u verze Notchback došlo v porovnání s jinými variantami ke snížení odporu na podlaze vozu a také na běhounech zadních pneumatik. Společné plochy pozitivního poklesu odporu pro všechny varianty jsou u vozu Notchback úplavem nejvíce ovlivněny, a tak dosahují nejnižších hodnot.

Tab. 14: Pozitivní vliv úplavu na vůz Notchback.

Notchback — pozitivní vliv úplavu	Δc_D
Přední nárazník	-0,036
Přední pneumatiky	-0,017
Podběhy kol	-0,013
Zadní pneumatiky	-0,005
Podlaha	-0,005



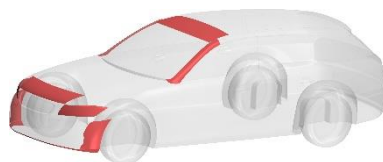
6.5.7 NEGATIVNÍ VLIV ÚPLAVU NA DRUHÝ VŮZ

Úplavem negativně ovlivněné plochy společné pro všechny varianty jsou přední světla vozu a přední část kapoty nad chladičem. Celkový odpor vozů Notchback a Fastback zásadně ovlivňuje jejich zadní část.

Při jízdě Estatebacku v úplavu dochází ke zhoršení obtékání v oblasti A-sloupků a přechodu mezi čelním sklem a střechou vozu. Oproti Notchbacku je zde také více ovlivněna spodní odtrhová hrana nárazníku. Hodnoty změny koeficientu odporu pro tyto plochy obsahuje Tab. 15.

Tab. 15: Negativní vliv úplavu na vůz Estateback.

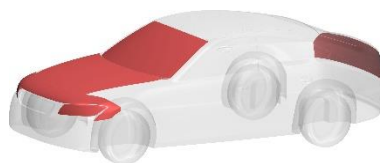
Estateback — negativní vliv úplavu	ΔC_D
Spodní odtrhová hrana předního nárazníku	+0,010
A-sloupek	+0,008
Přední světla	+0,008
Přední část kapoty	+0,007
Boční část předního nárazníku	+0,005
Střecha	+0,005



Úplav nízkého profilu zasahující Fastback především do oblasti předního nárazníku a kol způsobuje zhoršení obtékání čelního skla vozu. Kritickou částí vozu Fastback je oblast zadního čela a víka kufru. Odlišné odtržení proudu v oblasti zadního čela společně se zvětšeným odporem čelního skla má za následek vyšší hodnotu odporu druhého vozu v úplavu oproti prvnímu. Negativně zasažené plochy druhého vozu jsou v Tab. 16.

Tab. 16: Negativní vliv úplavu na vůz Fastback.

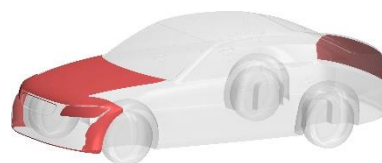
Fastback — negativní vliv úplavu	ΔC_D
Přední část kapoty	+0,014
Zadní čelo	+0,007
Zadní čelo-víko kufru	+0,007
Část blatníku za předními světly	+0,006
Čelní sklo	+0,006
Přední světla	+0,005
Zadní část kapoty	+0,005



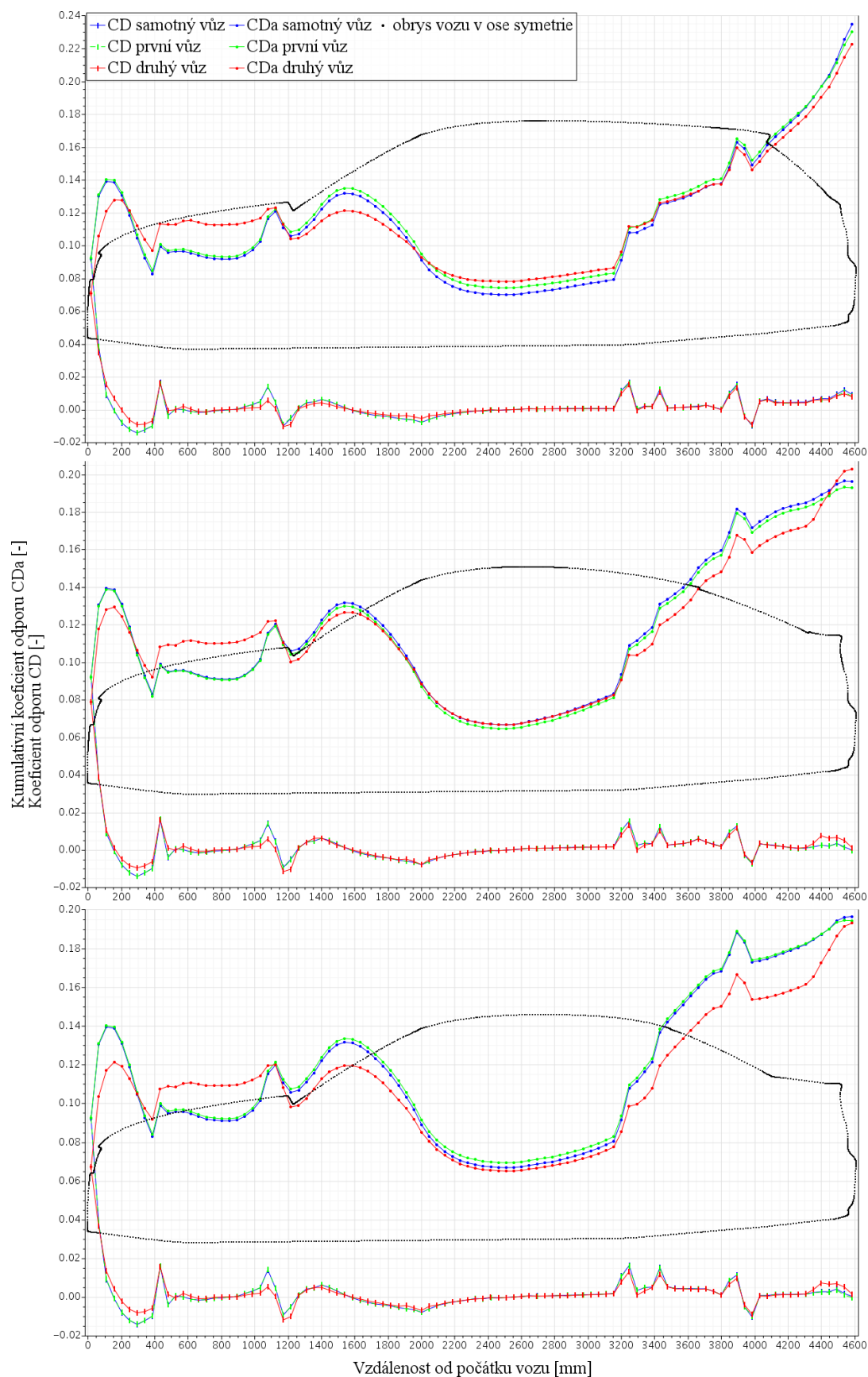
U vozu Notchback je při jízdě v úplavu nejvíce zasažena přední část kapoty. Zvětšení úplavu zadní části karoserie druhého vozu má stejně jako pro vůz Fastback negativní vliv kvůli odlišnému odtržení proudu oproti prvnímu vozu. U varianty Notchback však nárůst odporu této části není tak vysoký jako u karoserie Fastback. Tab. 17. uvádí negativně zasažené plochy.

Tab. 17: Negativní vliv úplavu na vůz Notchback.

Notchback — negativní vliv úplavu	Δc_D
Přední část kapoty	+0,017
Spodní odtrhová hrana předního nárazníku	+0,008
Zadní čelo	+0,007
Přední světla	+0,007
Část blatníku za předními světly	+0,006
Zadní čelo-víko kufru	+0,006
Zadní část kapoty	+0,005
Boční část předního nárazníku	+0,005
Horní část masky chladiče	+0,005



Vývoj odporu podél vozu je dobře patrný i z grafu koeficientu odporu c_D a kumulativního koeficientu odporu c_{Da} na Obr. 42. Křivky koeficientů jsou zobrazeny pro samotný vůz, první i druhý vůz. U karoserie Fastback a Notchback je na pozici 4300 mm od začátku vozu zřejmý vliv odlišného odtržení proudu za vozem, a tím zásadní navýšení odporu. U druhého vozu Fastback křivka akumulovaného koeficientu odporu přesahuje hodnoty jízdy samotného vozu a prvního vozu skupiny.



Obr. 42: Kumulativní koeficient odporu vozu c_{Da} a koeficient odporu c_D , varianty E x E, F x F, N x N.

6.6 JÍZDA ZA VOZEM ESTATEBACK

V Tab. 18 jsou zprůměrované hodnoty koeficientu odporu c_D pro jízdu samotného vozu a jízdu ve skupině. Rozdíly hodnot koeficientu odporu oproti jízdě samotného vozu jsou uvedené v závorce.

Tab. 18: Průměrné hodnoty koeficientu odporu. Jízda za Estatebackem.

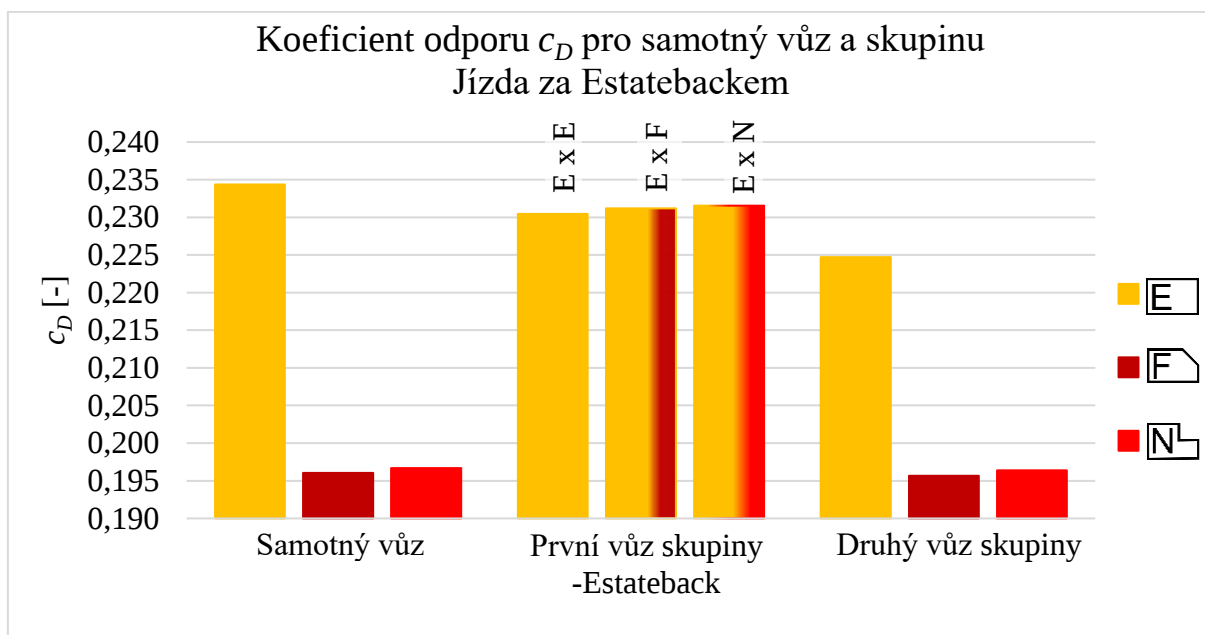
Aerodyn. koeficienty [-]	Samotný vůz		První vůz skupiny		Druhý vůz skupiny	
	c_{D0}	c_{D0}	c_{D1}		c_{D2}	
E x E	0,234	0,234	0,230	(-0,004)	0,225	(-0,009)
E x F	0,234	0,196	0,231	(-0,003)	0,196	(0)
E x N	0,234	0,197	0,232	(-0,002)	0,196	(-0,001)

6.6.1 VLIV JÍZDY VE SKUPINĚ NA PRVNÍ VŮZ SKUPINY

Ačkoliv odpor vedoucího vozu Estateback při jízdě ve skupině je stále nižší než jízda osamoceního vozu, z výsledků vyplývá, že jiné varianty karoserií mají na Estateback negativní vliv a nejnižšího odporu vůz dosahuje při jízdě před stejnou karosářskou variantou.

6.6.2 VLIV JÍZDY VE SKUPINĚ NA DRUHÝ VŮZ SKUPINY

Přestože Estateback má největší oblast úplavu ze všech variant, pozitivně jeho úplav působí pouze na Fastback, kdy se koeficient odporu Fastbacku jedoucího za Estatebackem snížil o $\Delta c_D = 0,008$ v porovnání s jízdou za Fastbackem, a tak dosáhl stejné hodnoty odporu jako při osamocené jízdě. Při jízdě Notchbacku za Estatebackem došlo ke zhoršení jeho koeficientu odporu o $\Delta c_D = 0,003$ oproti jízdě Notchbacku za Notchbackem. Jízda v úplavu za Estatebackem mu přinesla snížení koeficientu odporu pouze o $\Delta c_D = 0,001$ ve srovnání s jízdou samotného vozu. Graf 4 znázorňuje vliv jízdy ve skupině s vedoucím vozidlem Estateback na změnu aerodynamického koeficientu odporu oproti jízdě samotného vozu.



Graf 4: Koeficient odporu c_D pro samotný vůz a skupinu. Jízda za Estatebackem.

Vývoj koeficientu odporu podél vozu při jízdě za Estatebackem v porovnání s jízdou samotných vozů je zachycen v příloze 13, z níž je patrné, že při jízdě za Estatebackem s vysokým tvarem úplavu nedochází u vozů Fastback a Notchback ke změně odtržení proudu v zadní části vozu, která měla při jízdě skupiny stejné karoserie zásadní vliv na velikost aerodynamického odporu druhého vozu.

6.7 VLIV JÍZDY VE SKUPINĚ NA VZTLAK VOZIDEL

Tab. 19 zobrazuje průměrné a zaokrouhlené hodnoty vztlaku pro první a druhý vůz skupiny, které jsou poté přepočítány pro přední a zadní nápravu. V závorce jsou uvedeny rozdíly hodnot koeficientu vztlaku oproti jízdě samotného vozu. Z výsledku je zřejmé, že kromě prvního vozu ve skupině vozidel Fastback se přítlak všech verzí oproti jízdě samotného vozu snížil. Největší změna přítlaku nastala u druhého vozu ze skupiny Notchback, zatímco k největší změně rozvržení zatížení přední a zadní nápravy došlo u druhého vozu skupiny Fastback. Vozidla při samotné jízdě jsou aerodynamicky navržena tak, aby obtékaný vzduch zvyšoval přítlak na přední i zadní nápravu, a tím zvětšoval reakci mezi koly a vozovkou. Při jízdě ve skupině však u druhého vozu dochází ke zmenšení této síly. Při jízdě za Fastbackem a Notchbackem se dokonce směr této síly mění a namísto přítlaku na vůz působí vztlak. Zejména pro druhý vůz skupiny bude mít tato změna negativní vliv na jeho jízdní vlastnosti a bezpečnost provozu.

Tab. 19: Vliv jízdy ve skupině na koeficient vztlaku.

Aerodyn. koeficienty [-] První vůz		CL1					
				CLF1		CLR1	
Samotný vůz	E	-0,189		-0,143		-0,046	
	F	-0,026		-0,108		0,082	
	N	-0,046		-0,103		0,057	
jízda skupiny	E x E	-0,184	(+0,005)	-0,142	(+0,001)	-0,042	(+0,004)
	F x F	-0,026	(0)	-0,109	(-0,001)	0,083	(+0,001)
	N x N	-0,044	(+0,002)	-0,103	(0)	0,059	(+0,002)
jízda za Estatebackem	E x E	-0,184	(+0,005)	-0,142	(+0,001)	-0,042	(+0,004)
	E x F	-0,186	(+0,003)	-0,143	(0)	-0,044	(+0,002)
	E x N	-0,186	(+0,003)	-0,142	(+0,001)	-0,044	(+0,002)
Aerodyn. koeficienty [-] Druhý vůz		CL2					
				CLF2		CLR2	
jízda skupiny	E x E	-0,138	(+0,051)	-0,095	(+0,048)	-0,044	(+0,002)
	F x F	0,036	(+0,062)	-0,137	(-0,029)	0,173	(+0,091)
	N x N	0,044	(+0,090)	-0,108	(-0,005)	0,152	(+0,095)
jízda za Estatebackem	E x E	-0,138	(+0,051)	-0,095	(+0,048)	-0,044	(+0,002)
	E x F	-0,005	(+0,021)	-0,065	(+0,043)	0,060	(-0,022)
	E x N	-0,021	(+0,025)	-0,060	(+0,043)	0,039	(-0,018)

7 VÝSLEDKY METODY K-OMEGA

Pro výpočet pomocí metody k-omega byla vybrána verze Notchback, jelikož by v případě optimálního odtržení proudu druhého vozu přinesla největší pokles jeho aerodynamického odporu. Simulovala se jízda samotného vozu a poté dvou vozů za sebou. Fyzický čas simulace byl 6 s, přičemž data z poslední sekundy jsou uložena do historie simulace a následně průměrována. Důvodem jsou vyšší rozdíly minim a maxim sledovaných hodnot ve srovnání s metodou k-epsilon díky jinému turbulentnímu modelu v blízkosti vozu a stěn. Tab. 20 udává minimální, průměrné a maximální hodnoty výsledných aerodynamických koeficientů.

Tab. 20: Hodnoty aerodynamických koeficientů. Vůz Notchback, metoda k-omega.

Aerodyn. koeficienty [-]	časové hodnoty	C_{D1}	C_{L1}	C_{My1}	C_{D2}	C_{L2}	C_{My2}
N	minimální	0,194	-0,176	-0,131			
	průměrné	0,214	-0,090	-0,085			
	maximální	0,233	-0,013	-0,029			
N x N	minimální	0,198	-0,171	-0,120	0,158	-0,120	-0,147
	průměrné	0,212	-0,084	-0,089	0,183	-0,013	-0,091
	maximální	0,234	-0,013	-0,056	0,210	0,102	-0,024

7.1 POROVNÁNÍ METOD K-EPSILON A K-OMEGA

7.1.1 ČASOVÁ NÁROČNOST SIMULACE

Metoda k-omega byla časově náročnější o 60 % oproti metodě k-epsilon. V Tab. 21 je porovnání časové náročnosti obou metod. Počet hodin vyjadřuje množství času potřebného pro simulaci jedné sekundy simulace s využitím jednoho jádra procesoru. Na vyšší čas u metody k-omega má největší vliv kromě vyšší náročnosti turbulentního modelu také rychlost zápisu disku při ukládání historie výsledků pro nastavené plochy a řezy. U metody k-epsilon ukládání historie nebylo nastaveno z důvodu nízkých rozdílů sledovaných hodnot v průběhu simulace. Výpočet probíhal na stanici s velikostí paměti RAM 64 GB a s 12 fyzickými jádry procesoru. Počet využitých logických jader procesoru se během výpočtu měnil podle aktuálního využití stanice a pohyboval se v rozmezí 20 a 23. Např. pro simulaci varianty N x N k-omega po dobu 6 sekund to znamenalo 343 hodin výpočtu.

Tab. 21: Výpočetní náročnost simulace dvou vozů.

Metoda	Výpočetní čas jádra CPU pro 1 s simulace
k-epsilon	807 h
k-omega	1 314 h

7.1.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ METOD

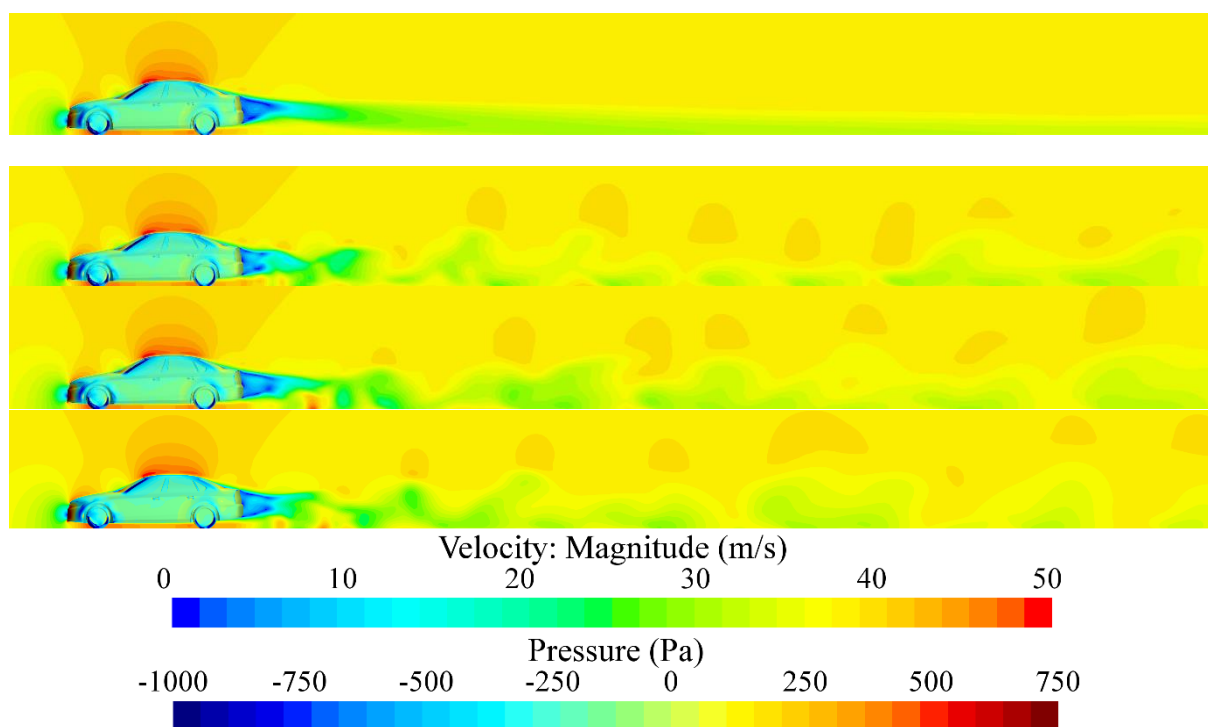
Tab. 22 porovnává zprůměrované výsledky obou metod s výsledkem koeficientu odporu získaného při experimentu. Podle teorie je metoda k-omega k určení hodnot odporu vozu vhodnější a toto tvrzení bylo při simulaci potvrzeno. Metoda k-epsilon predikuje ustálenější proudění kvůli jednoduššímu modelování turbulence kolem povrchu vozu, čímž je hodnota odporu výrazně podhodnocena.

Tab. 22: Porovnání metod k-epsilon a k-omega s experimentem.

Aerodyn. koeficienty [-]	Metoda	C_{D1}	C_{L1}	C_{My1}	C_{D2}	C_{L2}	C_{My2}
N	experiment	0,232	-	-			
	k-omega	0,214	-0,090	-0,085			
	k-epsilon	0,197	-0,046	-0,080			
N x N	k-omega	0,212	-0,084	-0,089	0,183	-0,013	-0,091
	k-epsilon	0,194	-0,044	-0,081	0,193	0,044	-0,130

7.2 JÍZDA SAMOTNÉHO VOZU

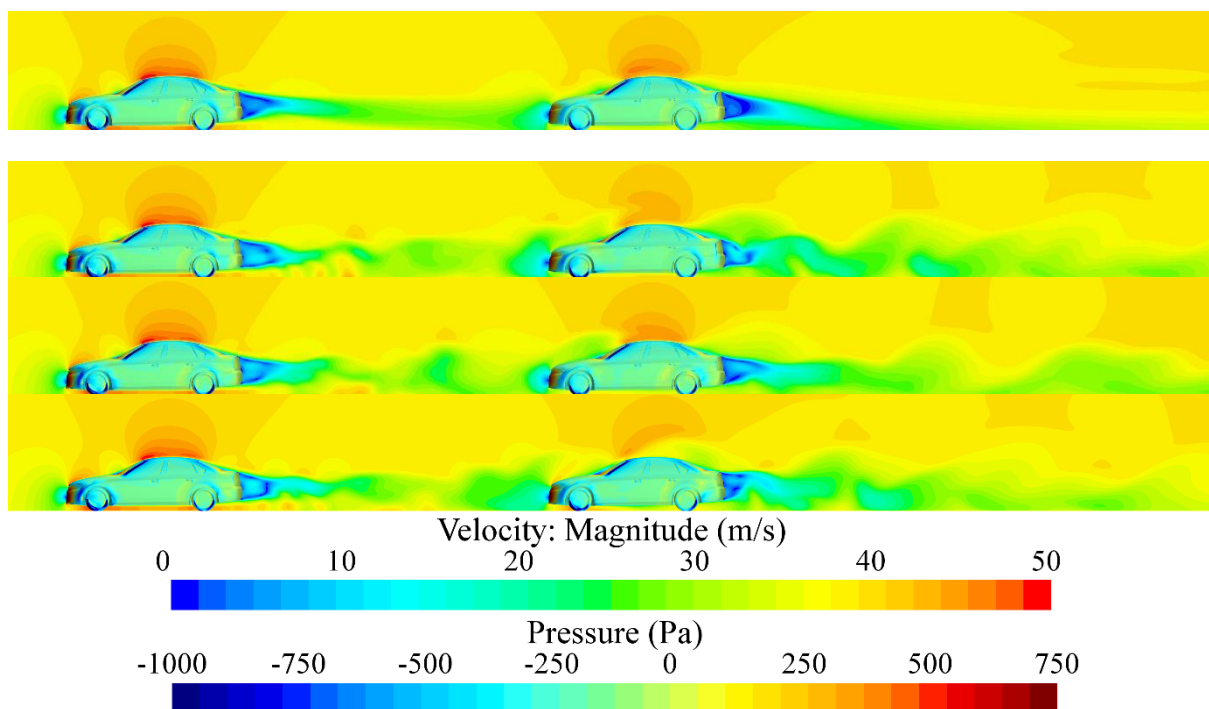
Na Obr. 43 je porovnáno rychlostní pole v ose symetrie vozu pro metodu k-epsilon nahoře spolu se třemi rychlostními poli pro minimální, průměrné a maximální hodnoty odporu vozu pro metodu k-omega dole. Proudění za vozem u metody k-epsilon je ustálené a v čase téměř neměnné. Použití jiného modelu turbulence v blízkosti vozu u metody k-omega vede k nestabilní tvorbě úplavu za vozem. Zvýšení hodnot odporu u metody k-omega odpovídá předpokladům a souvisí s větším odtržením proudu za předními koly a zadní částí karoserie.



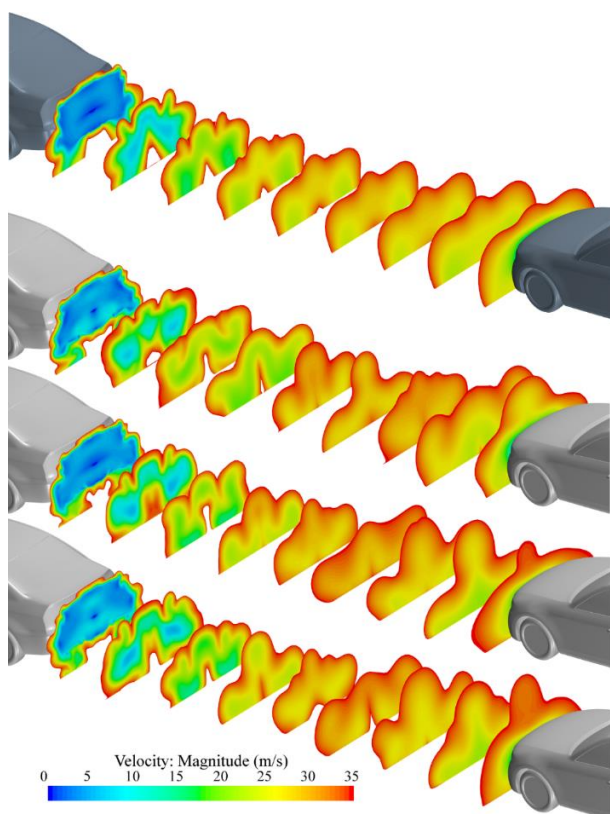
Obr. 43: Rychlostní pole pro $Y = 0 \text{ mm}$, samotný vůz N. Nahoře: Tvar úplavu za vozem pro průměrnou hodnotu C_D , metoda k-epsilon. Dole: Tvar úplavu za vozem pro minimální, průměrnou a maximální hodnotu C_D , odshora, metoda k-omega.

7.3 JÍZDA VE SKUPINĚ

Při simulaci jízdy dvou Notchbacků pomocí metody k-omega se podařil potvrdit předpoklad snížení odporu prvního vozu skupiny vůči hodnotě odporu při jízdě samotného vozu. Odpor druhého vozu při metodě k-omega dosahuje ještě nižších hodnot než u metody k-epsilon. Z Obr. 44 a Obr. 45 je zřejmé, že úplav za prvním vozem u metody k-omega zasahuje druhý vůz v oblasti kapoty a čelního skla více než metoda k-epsilon. Porovnání řezů úplavu pro jízdu samotného vozu Notchback a jízdní skupiny je v příloze 15 a 16.



Obr. 44: Nahoře — tvar úplavu za vozem pro průměrnou hodnotu odporu druhého vozu. Varianta $N \times N$, metoda k-epsilon. Dole — tvar úplavu za vozem pro minimální, průměrnou a maximální hodnotu odporu druhého vozu. Varianta $N \times N$, metoda k-omega.



Obr. 45: Nahoře — řezy rychlostních polí pro průměrné hodnoty koeficientu odporu c_D pro druhý vůz. Nestacionární proudění, metoda k-epsilon. Dole — řezy rychlostních polí pro minimální, průměrné a maximální hodnoty koeficientu odporu c_D pro druhý vůz, odshora. Nestacionární proudění, metoda k-omega.

Křivka kumulativního odporu zobrazená v příloze 14 se u použitých metod liší v oblasti odtržení proudu za předními koly a v zadní části vozu, kde u metody k-omega dochází ke stejnému jevu navýšení odporu v zadní části již při jízdě samotného vozu, avšak později než u metody k-epsilon. Odlišné odtržení proudu je zřejmé i z Obr. 46. Větší úplavy metody k-omega mají za následek zvýšení odporu prvního vozu, tvorbu vyššího úplavu za prvním vozem a snížení odporu přední kapoty a čelního skla vozu druhého. Zvýšení odporu zadní části druhého vozu na odtrhové hraně není tak kritické jako u metody k-epsilon a nastává později. U metody k-omega došlo ze všech variant k největšímu snížení koeficientu odporu druhého vozu o $\Delta c_D = 0,031$.



Obr. 46: Zobrazení úplavy pomocí izoploch koeficientu celkového tlaku pro $c_{Pt} = 0$. Metoda k-epsilon (nahore) a k-omega (dole).

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo sestavení CFD modelů karosářských kombinací vozu DrivAer a posouzení vlivu jednotlivých karosářských variant na interakci vozidel při společné jízdě. Výsledkem diplomové práce je 9 připravených modelů pro jízdu dvou vozů, zahrnujících veškeré kombinace, a dále 3 modely pro jízdu samotného vozu včetně připravených scén k vyhodnocení aerodynamických charakteristik pro případnou navazující studii.

Během práce bylo nutné optimalizovat geometrii a síť pro požadované výpočetní nároky. Pomocí turbulentního modelu Realizable k-epsilon byla provedena simulace pro 8 variant. Kvůli analýze vlivu použitého turbulentního modelu proběhly 2 simulace pomocí metody SST k-omega. Při porovnání výsledků simulace s experimentálními daty se ověřilo vhodné nastavení parametrů výpočtu a sítě, kdy se povedlo s ohledem na zjednodušení fyzikálního problému zachovat trend vlivu zádi vozu na jeho celkový aerodynamický odpor.

Výsledky simulace při použití turbulentního modelu k-epsilon ukazují u variant Estateback a Notchback pozitivní vliv společné jízdy jak na druhý vůz, nacházející se v úplavu vozu prvního, tak i na vůz vedoucí. K největšímu zlepšení došlo u varianty Estateback, kde se koeficient odporu prvního vozu snížil o $\Delta C_D = 0,004$ a u druhého vozu o $\Delta C_D = 0,009$ ve srovnání s jízdou samotného vozu. Nízký tvar úplavu za vozem Notchback a Fastback způsobuje odlišné proudění podél střechy a boků druhého vozu, což ovlivňuje funkci odtrhových hran. Změna odtržení proudu v zadní části karoserie vozu Fastback vede až ke zvýšení koeficientu odporu o $\Delta C_D = 0,008$ oproti jízdě samotného vozu.

Metoda k-omega byla v diplomové práci použita nad rámec zadání pouze ke srovnání výsledků obou metod a k ověření podhodnocení výsledků odporu u metody k-epsilon. Pro hlubší zhodnocení výsledků by bylo nutné opět provést srovnání s experimentálními daty u všech karosářských variant. Hodnoty odporu získané pomocí metody k-omega u samotného vozu jsou k hodnotám experimentu blíže než hodnoty metody k-epsilon za cenu podstatně vyššího výpočetního času. Metoda k-omega lépe řeší oblast proudění v blízkosti vozu a dochází zde k většímu odtržení proudu za vozem. Zvýšený úplav za vozem Notchback má na rozdíl od metody k-epsilon za následek lepší obtékání druhého vozu a snížení jeho odporu. Koeficient odporu druhého vozu se při použití metody k-omega snížil o $\Delta C_D = 0,031$ oproti jízdě samotného vozu, kdežto u metody k-epsilon pouze o $\Delta C_D = 0,004$.

Při výpočtu došlo ke značnému zjednodušení geometrie, a proto by bylo vhodné na práci při použití vyššího výpočetního výkonu navázat. Jako užitečné se jeví porovnat výsledky kompletního vozu s přeléváním úplavu za vozem oproti výsledkům s využitím symetrie. Detailní podlaha vozu povede ke zhoršení proudění mezi vozem a vozovkou, a tím k dalšímu snížení úplavu za vozem. Díky připraveným kombinacím modelu se také nabízí optimalizace parametru rozestupu vozů či simulace větší jízdní skupiny. Vzhledem k zásadnímu vlivu odtrhových hran vozu Fastback a Notchback na jejich odpor je důležité zaměřit další výzkum na optimalizaci těchto prvků s ohledem na jízdu ve skupině, případně se zde otevírá prostor pro nasazení aktivních aerodynamických prvků zadní části autonomních vozů využívajících metody platooningu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Navier–Stokes Equation. In: *Clay Mathematics Institute* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.claymath.org/millennium-problems/navier–stokes-equation>
- [2] ANDERSON, John David. *Fundamentals of aerodynamics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, c2011. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. ISBN 978-0-07-339810-5.
- [3] The drag coefficient. In: *National Aeronautics and Space Administration* [online]. Cleveland: NASA Glenn Research Center [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/dragco.html>
- [4] KOVANDA, Bohuslav a Jan KOVANDA. *Aerodynamika vozidel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-1942-X.
- [5] ALVES, Rodrigo Mendes a Odenir de ALMEIDA. Validation of Experimental and Numerical Techniques for Flow Analysis over an Ahmed Body. *International Journal of Engineering Research and Applications* [online]. 2017, 7(4), 63-71 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.9790/9622-0704036371. ISSN 22489622. Dostupné z: http://www.ijera.com/papers/Vol7_issue4/Part-3/J0704036371.pdf
- [6] HUCHO, Wolf-Heinrich, ed. *Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering*. Cambridge: University Press, 1990. ISBN 0-408-01422-9.
- [7] AHMED, S. R., G. RAMM a G. FALTIN. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE Transactions* [online]. 1984, 93(2), 473-503 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: www.jstor.org/stable/44434262.
- [8] SCHÜTZ, Thomas, ed. *Hucho - Aerodynamik des Automobils* [online]. 6. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. DOI: 10.1007/978-3-8348-2316-8. ISBN 978-3-8348-1919-2.
- [9] NASCAR will look into the “locking bumpers” rule for bump drafting. In: *Racing News* [online]. 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://racingnews.co/2018/02/20/nascar-will-look-into-the-locking-bumpers-rule/>
- [10] JANSSEN, Robbert a kol. Truck platooning : Driving the future of transportation. In: *Semantic Scholar* [online]. Delft: TNO Mobility and Logistics, 2015 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Truck-platooning-%3A-Driving-the-future-of-Janssen-Zwijnenberg/8c06e8e2b7c15e9e186a254bda6c6adad83bad61>
- [11] IOZSA, D., C. STAN a L. ILEA. Study on the Influence of the Convoy Rolling over Aerodynamic Resistance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, 252 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1088/1757-899X/252/1/012035. ISSN 1757-8981. Dostupné z:

- <http://stacks.iop.org/1757-899X/252/i=1/a=012035?key=crossref.c5321b69fe47a0d16e039c8579f42211>
- [12] Zákon č. 361/2000 Sb. In: *Zákony pro lidi* [online]. Zlín: AION CS, 2010 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-361>
- [13] STRAKA, Jan a Jana FABIÁNOVÁ. Ročenka nehodovosti na pozemních komunikacích v České republice v roce 2018. In: *Policie ČR* [online]. Praha: Ředitelství služby dopravní policie Policejního prezidia České republiky, 2019 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.policie.cz/clanek/statistika-nehodovosti-900835.aspx?q=Y2hudW09Mw%3d%3d>
- [14] ABDEL AZIM, Ahmed F. a Ahmed F. ABDEL GAWAD. A Flow Visualization Study of the Aerodynamic Interference Between Passenger Cars. In: *SAE 2000 World Congress* [online]. Zagazig: Zagazig University, 2000, 2000-03-06, s. - [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.4271/2000-01-0355. ISSN 0148-7191. Dostupné z: <https://www.sae.org/content/2000-01-0355/>
- [15] ABDEL GAWAD, Ahmed F. Aerodynamics of Vehicles Through Driving Tunnels - Experimental Study of Interference and Drag Reduction. In: *SAE 2001 World Congress* [online]. Zagazig: Zagazig University, 2001, 2001-03-05, s. - [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.4271/2001-01-1044. ISSN 0148-7191. Dostupné z: <https://www.sae.org/content/2001-01-1044/>
- [16] LAMMERT, Michael P., Adam DURAN, Jeremy DIEZ, Kevin BURTON a Alex NICHOLSON. Effect of Platooning on Fuel Consumption of Class 8 Vehicles Over a Range of Speeds, Following Distances, and Mass. *SAE International Journal of Commercial Vehicles* [online]. 2014, 7(2), 626-639 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.4271/2014-01-2438. ISSN 1946-3928. Dostupné z: <https://www.sae.org/content/2014-01-2438/>
- [17] VOHRA, Vasudev, Mohamed WAHBA, Goekhan AKARSLAN, Rui NI a Sean BRENNAN. An Examination of Vehicle Spacing to Reduce Aerodynamic Drag in Truck Platoons. In: *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 1-6 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1109/VPPC.2018.8604977. ISBN 978-1-5386-6203-8. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8604977/>
- [18] MITRA, Debojyoti a Asis MAZUMDAR. Pollution control by reduction of drag on cars and buses through platooning. *International Journal of Environment and Pollution* [online]. 2007, 30(1), 90-96 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1504/IJEP.2007.014504. ISSN 0957-4352. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=14504>
- [19] ZABAT, Michael, Stefano FRASCAROLI, Frederick BROWAND a kol. *Drag Measurements on a Platoon of Vehicles*. Berkeley: University of California, 1994. ISSN 1055-1425. Dostupné také z: <https://escholarship.org/uc/item/7pp0r0hn>

- [20] WATKINS, Simon a Gioacchino VINO. The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* [online]. Victoria: RMIT University, 2007, 8 August 2007, (96), 1232-1239 [cit. 2020-03-30]. ISSN 0167-6105. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610507001687>
- [21] GNATOWSKA, Renata a Marcin SOSNOWSKI. The influence of distance between vehicles in platoon on aerodynamic parameters. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2017, (180) [cit. 2020-03-30]. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818002030>. Dostupné z: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2018/15/epjconf_efm2018_02030.pdf
- [22] CHAMBERS, Joseph R. *Modeling flight: The role of dynamically scaled free-flight models in support of NASA's aerospace programs*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 2010. ISBN 978-0-16-084633-5.
- [23] Toyota Motorsport wind tunnel helps automotive engineers design faster high-performance cars with sophisticated built-in PIV system. In: *Toyota-motorsport* [online]. 2010 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://www.toyota-motorsport.com/media/tmg/Tecplot_PIV.pdf
- [24] ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. In: *AFS ENEA* [online]. 2009 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm
- [25] STAR CCM+ Users Manual. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://thesteveportal.plm.automation.siemens.com>
- [26] What is non conformal mesh in CFD? In: *Quora* [online]. 5 December 2016 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-non-conformal-mesh-in-CFD>
- [27] CHAWNER, John. See our grid for aeroacoustic simulations at the BANC-III Workshop. In: *Pointwise* [online]. 2014, June 9, 2014 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://blog.pointwise.com/2014/06/09/aerodynamic-optimization-with-pointwise-and-friendship-framework/>
- [28] Basics of Y Plus, Boundary Layer and Wall Function in Turbulent Flows. In: *LearnCAx* [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/basics-of-y-plus-boundary-layer-and-wall-function-in-turbulent-flows>
- [29] Near wall treatment. In: *Ansys Student Community* [online]. 25 May 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://studentcommunity.ansys.com/thread/neat-wall-tratment/>
- [30] Codes. *CFD Online* [online]. 5 March 2020 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.cfd-online.com/Wiki/Codes>

- [31] Comparing CFD Software. *Resolved Analytics* [online]. 26 September 2018 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-cfd-software>
- [32] SHAHARUDDIN, Nur Haziqah a kol. Flow simulations of generic vehicle model SAE type 4 and DrivAer Fastback using OpenFOAM. *Journal of advanced research in fluid mechanics and thermal sciences* [online]. Selangor: AKADEMIA BARU PUBLISHING (M) SDN BHD, c2017, (37), 18-31 [cit. 2020-03-30]. ISSN 2289-7879. Dostupné z: http://www.akademiabaru.com/doc/ARFMTSV37_N1_P18_31.pdf
- [33] LE GOOD, Geoffrey M. a Kevin P. GARRY. On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics. In: *SAE Technical Paper 2004-01-1308, 2004* [online]. 2004 [cit. 2020-03-30]. DOI: <https://doi.org/10.4271/2004-01-1308>. ISBN 0-7680-1319-4. ISSN 0148-7191.
- [34] ČAVOJ, Ondřej. *Výpočet aerodynamických charakteristik vozidla s vybočením*. Brno, 2012. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55347. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Vančura.
- [35] DrivAer Model. In: *Chair of Aerodynamics and Fluid Mechanics TUM* [online]. Munich [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <http://www.aer.mw.tum.de/en/research-groups/automotive/drivaer/>
- [36] LANFRIT, Marco. Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT. In: *Southampton* [online]. 9 Februar 2005 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/Ext_Aero_Best_Practice_Ver1_2.pdf
- [37] *How to know how much RAM will be needed for a Simulation CFD analysis?* [online]. In: . 2 November 2014 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/sfdarticles/sfdarticles/How-to-know-how-much-RAM-will-be-needed-for-a-Simulation-CFD-analysis.html>
- [38] SOARES, Renan Francisco, Andrew KNOWLES, Sergio GOÑALONS OLIVES, Kevin GARRY a Jennifer HOLT. *On the Aerodynamics of an Enclosed-Wheel Racing Car: An Assessment and Proposal of Add-On Devices for a Fourth, High-Performance Configuration of the DrivAer Model* [online]. In: . 2018, 2018-04-03, s. - [cit. 2020-04-03]. DOI: 10.4271/2018-01-0725. Dostupné z: <https://www.sae.org/content/2018-01-0725/>
- [39] HEFT, Angelina I., Thomas INDINGER a Nikolaus A. ADAMS. *Introduction of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations* [online]. In: . 2012, 2012-04-16, s. - [cit. 2020-04-03]. DOI: 10.4271/2012-01-0168. Dostupné z: <https://www.sae.org/content/2012-01-0168/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\overrightarrow{A_V}$	[m·s ⁻²]	Objemové zrychlení
A	[m ²]	Referenční plocha, plocha průmětu vozu
B	[-]	Poměr blokace
c_B	[-]	Koeficient aerodynamického odporu svislé zádi vozu
c_D	[-]	Koeficient aerodynamického odporu
c_{D0}	[-]	Koeficient aerodynamického odporu, jízda samotného vozu
c_{D1}	[-]	Koeficient aerodynamického odporu prvního vozu skupiny
c_{D2}	[-]	Koeficient aerodynamického odporu druhého vozu skupiny
c_{Da}	[-]	Akumulovaný koeficient aerodynamického odporu
C_f	[-]	Povrchové tření na desce
c_K	[-]	Koeficient aerodynamického odporu čelní plochy
c_L	[-]	Koeficient vztlaku
c_{L1}	[-]	Koeficient vztlaku prvního vozu skupiny
c_{L2}	[-]	Koeficient vztlaku druhého vozu skupiny
c_{LF}	[-]	Koeficient vztlaku přední nápravy
c_{LF1}	[-]	Koeficient vztlaku přední nápravy prvního vozu skupiny
c_{LF2}	[-]	Koeficient vztlaku přední nápravy druhého vozu skupiny
c_{LR}	[-]	Koeficient vztlaku zadní nápravy
c_{LR1}	[-]	Koeficient vztlaku zadní nápravy prvního vozu skupiny
c_{LR2}	[-]	Koeficient vztlaku zadní nápravy druhého vozu skupiny
c_{My}	[-]	Koeficient klonivého momentu
c_{My1}	[-]	Koeficient klonivého momentu prvního vozu skupiny
c_{My2}	[-]	Koeficient klonivého momentu druhého vozu skupiny
c_{Pt}	[-]	Koeficient celkového tlaku
c_R	[-]	Koeficient třecího odporu
c_S	[-]	Koeficient aerodynamického odporu skloněné zádi vozu
$c_{x,y,z}$	[-]	Aerodynamický koeficient
F_x	[N]	Aerodynamický odpor
F_y	[N]	Aerodynamická boční síla
F_z	[N]	Aerodynamický vztlak
F_{zp}	[N]	Vztlková síla na přední nápravě
F_{zz}	[N]	Vztlková síla na zadní nápravě

k	[J]	Kinetická energie turbulentních fluktuací
l	[m]	Charakteristický rozměr
L	[m]	Délka vozu
M_x	[Nm]	Moment klopení
M_y	[Nm]	Moment klonění
M_z	[Nm]	Moment stáčení
p_d	[Pa]	Dynamický tlak
p_s	[Pa]	Statický tlak
p_{tot}	[Pa]	Celkový tlak
r	[-]	Radiální složka válcového souřadného systému
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S_{IN}	[m ²]	Vstupní plocha tunelu
t	[s]	Čas
T	[m]	Rozchod kol vozu
u^+	[-]	Bezrozměrná rychlost
U_τ	[m·s ⁻¹]	Smyková rychlost
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost, rychlost proudění, rychlost vozu
v'	[m·s ⁻¹]	Fluktuační složka rychlosti
v_∞	[m·s ⁻¹]	Rychlost nerozrušeného proudu
v_{AVE}	[m·s ⁻¹]	Středěná rychlost
v_V	[m·s ⁻¹]	Rychlost větru
W	[m]	Rozvor kol vozu
x	[m]	Rozestup vozidel
X	[m]	Souřadnice kartézského souřadného systému
y	[m]	Výška první buňky sítě na povrchu tělesa
Y	[m]	Souřadnice kartézského souřadného systému
y^+	[-]	Bezrozměrná vzdálenost od stěny
z	[-]	Axiální složka válcového souřadného systému
Z	[m]	Souřadnice kartézského souřadného systému

ε	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}]$	Míra disipace turbulentní energie
η	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	Dynamická viskozita
η_t	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	Turbulentní viskozita
θ	$[-]$	Tangenciální složka válcového souřadného systému
ν	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Kinematická viskozita
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota
τ	$[\text{Pa}]$	Tečné napětí
τ_R	$[\text{Pa}]$	Reynoldův tenzor napětí
τ_w	$[\text{Pa}]$	Smykové napětí
ω	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Specifická míra disipace turbulentní energie

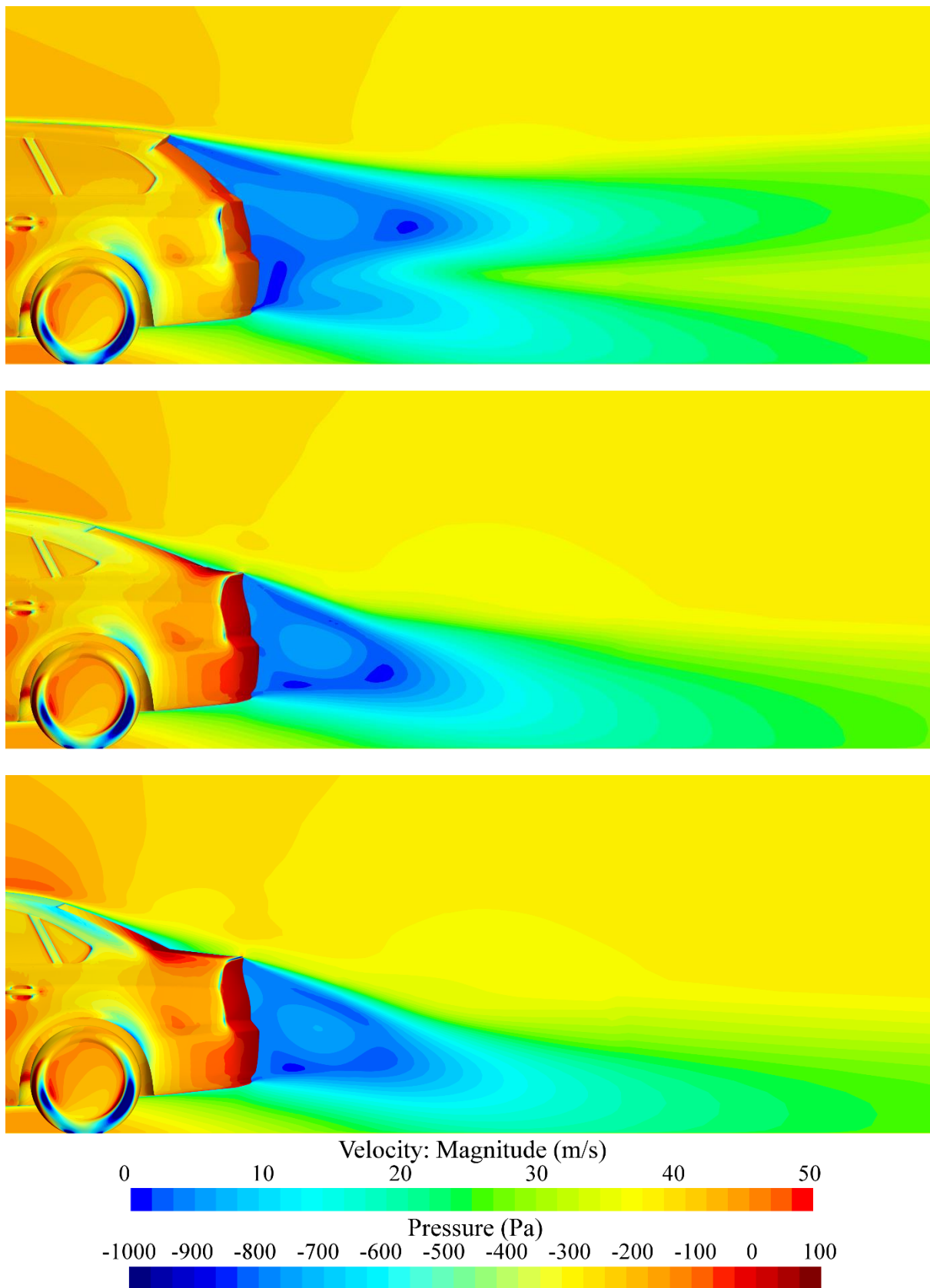
ACC	<i>Adaptive Cruise Control</i>
CACC	<i>Cooperative Adaptive Cruise Control</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DES	<i>Detached Eddy Simulation</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
E	<i>Estateback</i>
EVM	<i>Eddy Viscosity Model</i>
F	<i>Fastback</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
iges	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MIRA	<i>Motor Industry Research Association</i>
N	<i>Notchback</i>
N–S	<i>Navier–Stokes</i>
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier–Stokes</i>
RSM	<i>Reynold Stress Model</i>

SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SGS	<i>Sub-Grid Scale</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
step	<i>Standard for the Exchange of Product model data</i>
stl	<i>Stereolithography</i>
TUM	<i>Technische Universität München</i>
URANS	<i>Unsteady Reynolds Averaged Navier–Stokes</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>

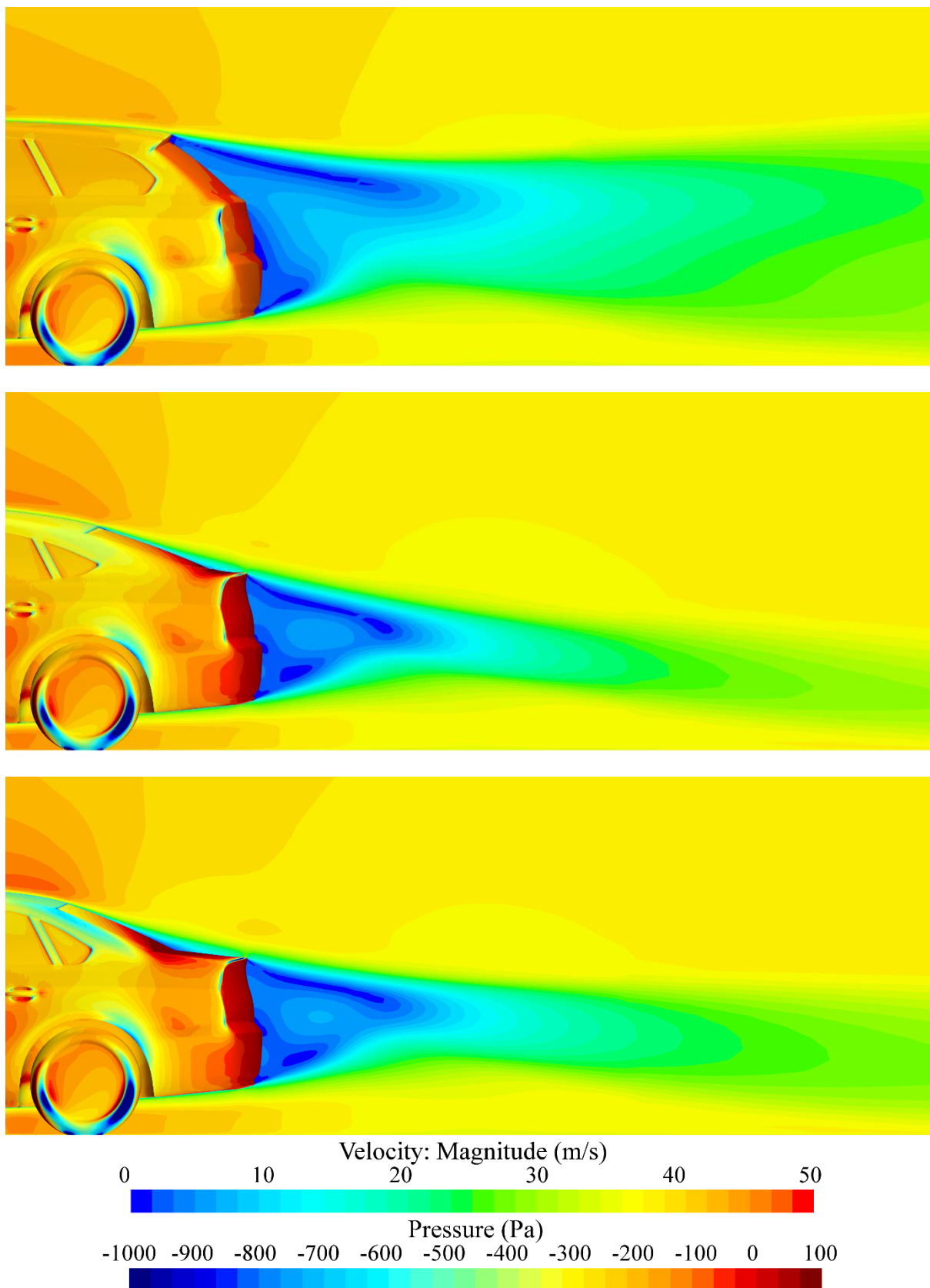
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Úplav vozů E, F, N při samostatné jízdě. Řez $Y = 300$ mm.	I
Příloha 2: Úplav vozů E, F, N při samostatné jízdě. Řez $Y = 0$ mm.	II
Příloha 3: Úplav za vedoucími vozy E, F, N při jízdě ve skupině. Řez $Y = 300$ mm.	III
Příloha 4: Úplav za vedoucími vozy E, F, N při jízdě ve skupině. Řez $Y = 0$ mm.	IV
Příloha 5: Jízda za vozem E, F, N v pořadí odshora. Řez $Y = 300$ mm.	V
Příloha 6: Jízda za vozem E, F, N v pořadí odshora. Řez $Y = 0$ mm.	VI
Příloha 7: Tvar úplavů všech kombinací. Řez $Y = 300$ mm.	VII
Příloha 8: Tvar úplavů všech kombinací. Řez $Y = 0$ mm.	VIII
Příloha 9: Tvar úplavů všech kombinací, detail. Řez $Y = 300$ mm.	IX
Příloha 10: Tvar úplavů všech kombinací, detail. Řez $Y = 0$ mm.	X
Příloha 11: Horní pohled na úplav mezi vozy E x E, F x F, N x N v pořadí odshora. Řez $Z = 450$ mm.	XI
Příloha 12: Úplav za druhým (nahore) a prvním (dole) vozem, verze E x E, F x F, N x N odshora. Řez $Z = 450$ mm.	XII
Příloha 13: Kumulativní koeficient odporu vozu c_{Da} koeficient odporu c_D , varianty E x E, E x F, E x N.	XIII
Příloha 14: Kumulativní koeficient odporu vozu c_{Da} a koeficient odporu c_D , varianty N x N k-epsilon a k-omega.	XIV
Příloha 15: Řezy rychlostních polí pro minimální, průměrné a maximální hodnoty koeficientu odporu c_D pro samotný vůz. Nestacionární proudění, metoda k-omega.	XV
Příloha 16: Řezy rychlostních polí pro minimální, průměrné a maximální hodnoty koeficientu odporu c_D pro druhý vůz. Nestacionární proudění, metoda k-omega.	XVI

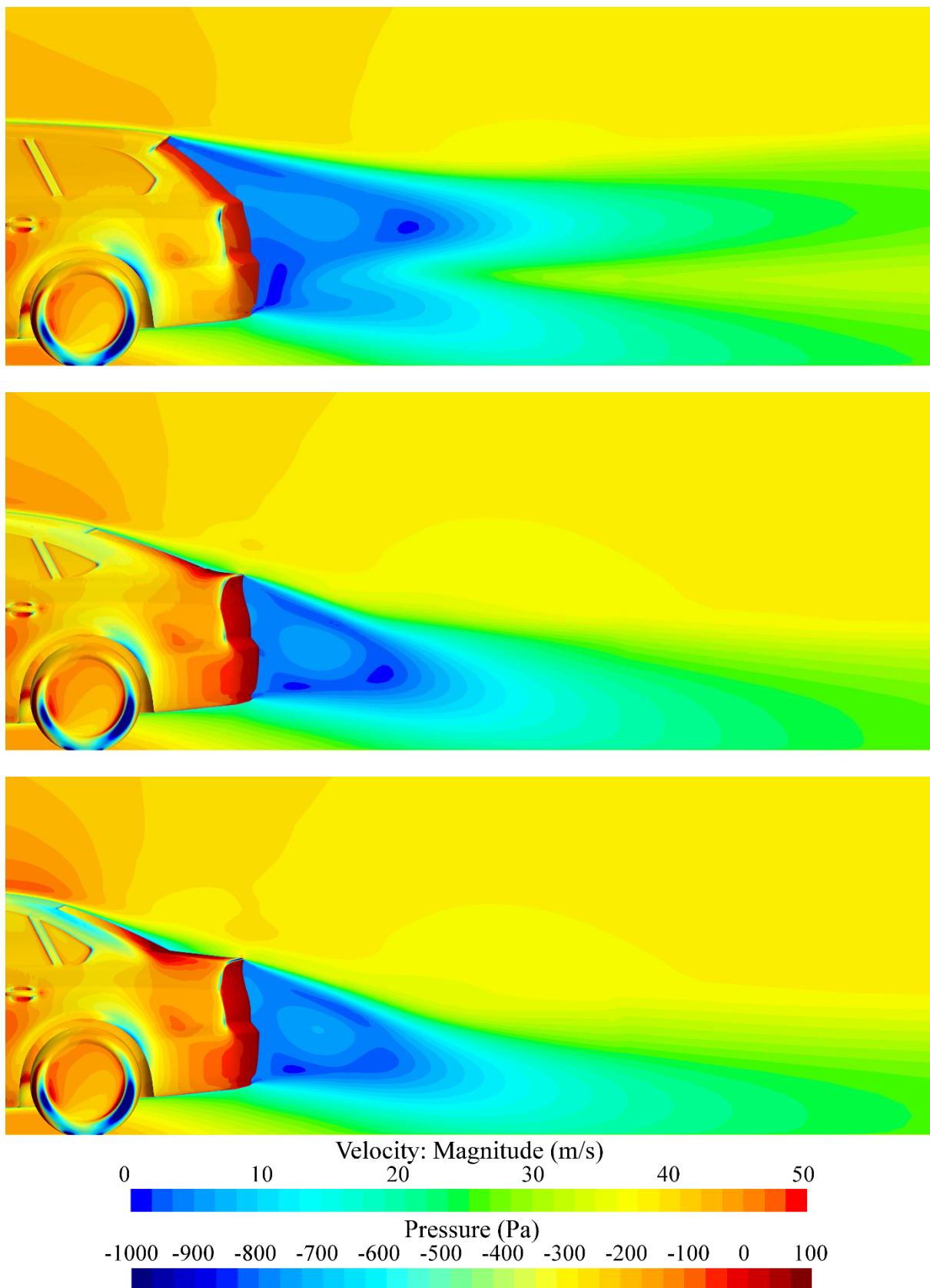
PŘÍLOHY PRÁCE



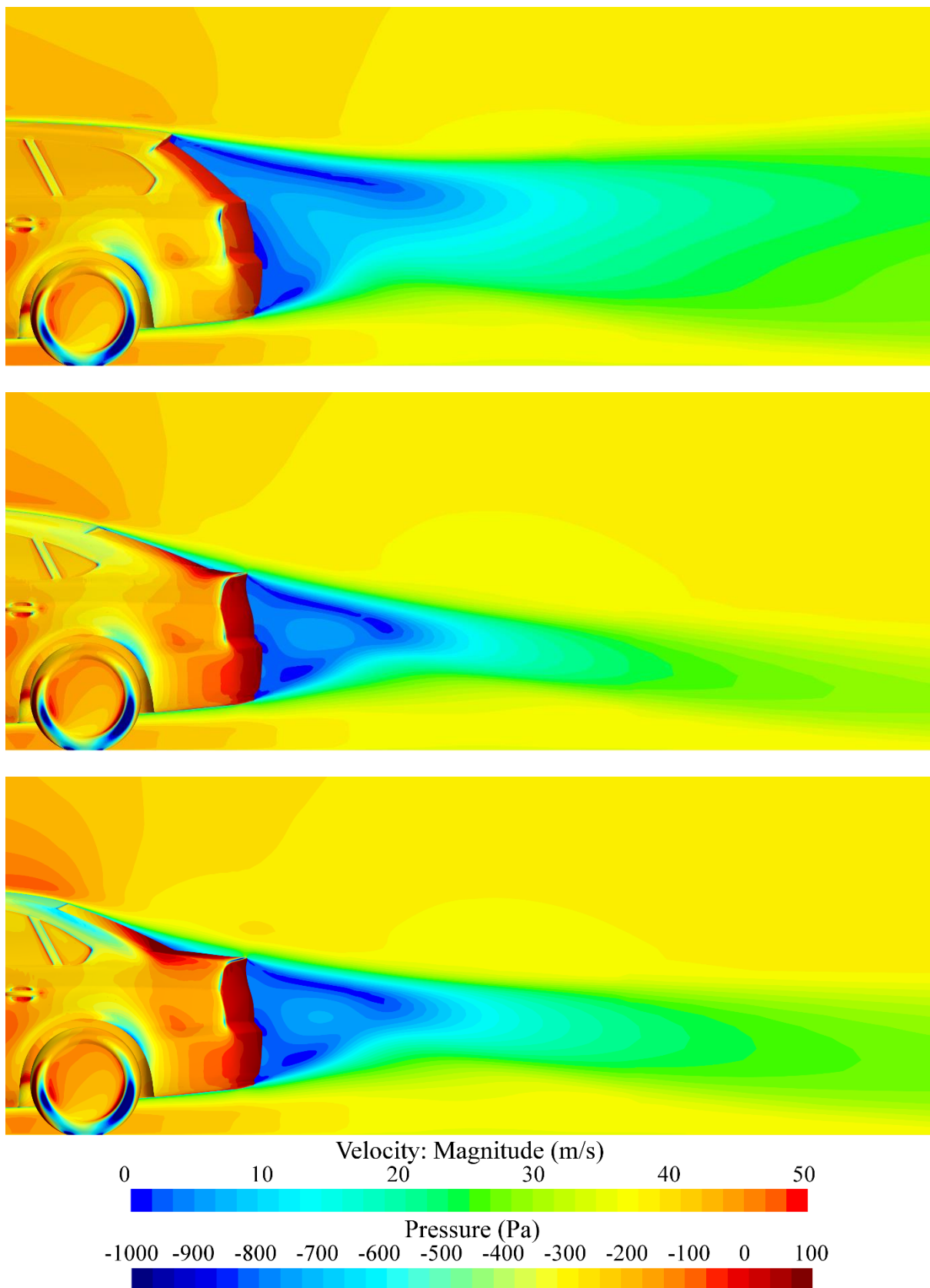
Příloha 1: Úplav vozů E, F, N při samostatné jízdě. Řez Y = 300 mm.



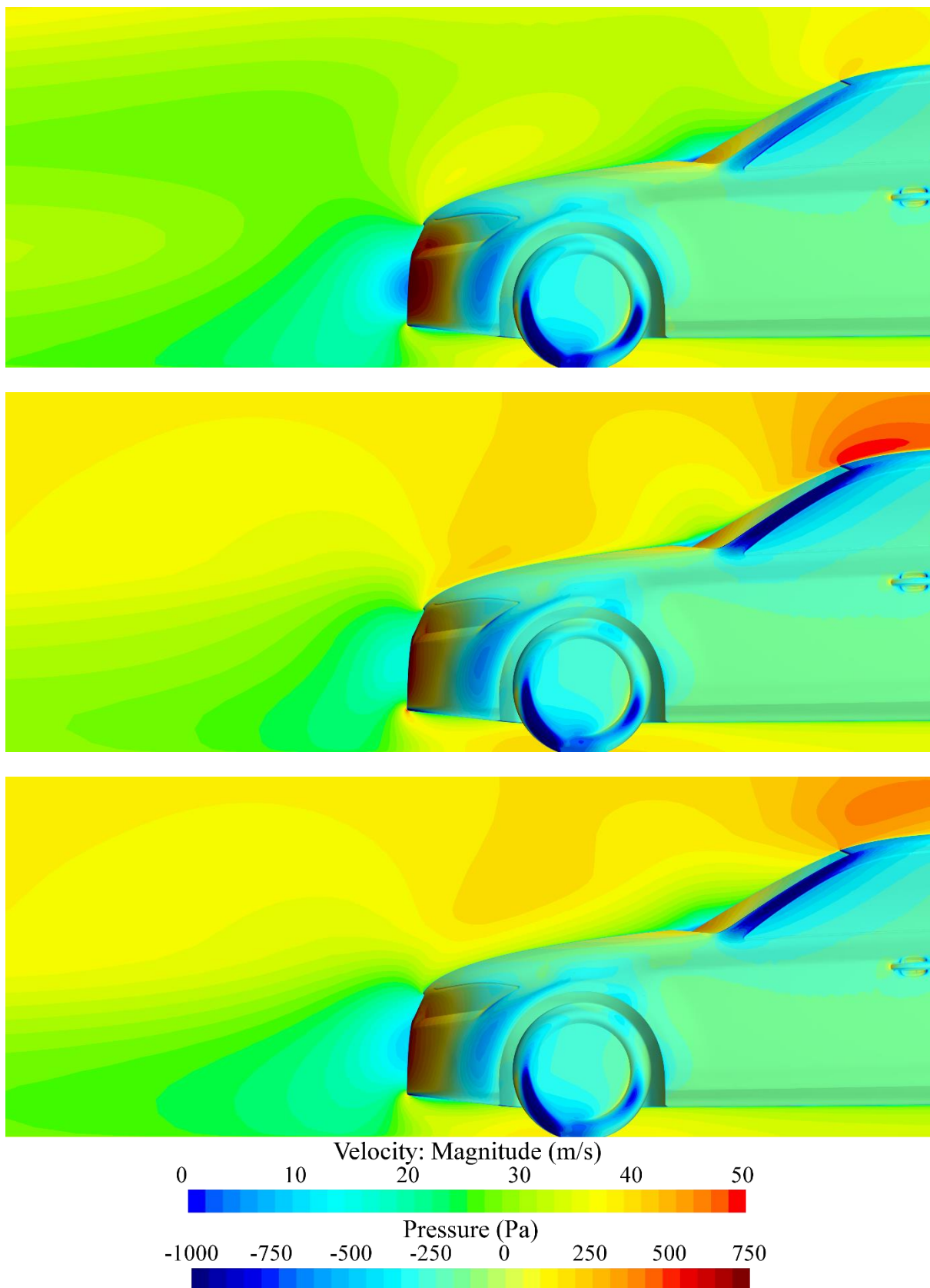
Příloha 2: Úplav vozů E, F, N při samostatné jízdě. Řez Y = 0 mm.



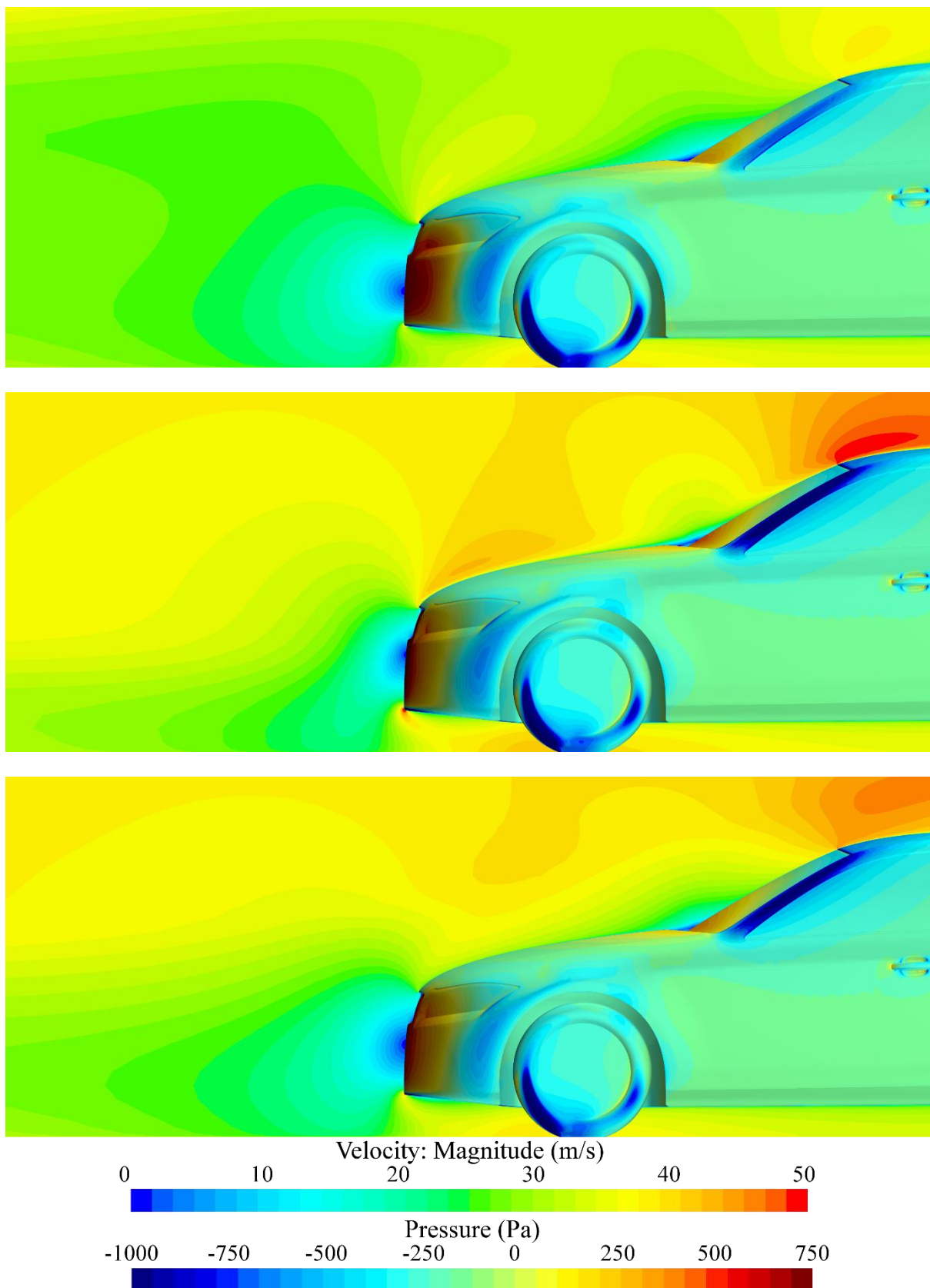
Příloha 3: Úplav za vedoucími vozy E, F, N při jízdě ve skupině. Řez Y = 300 mm.



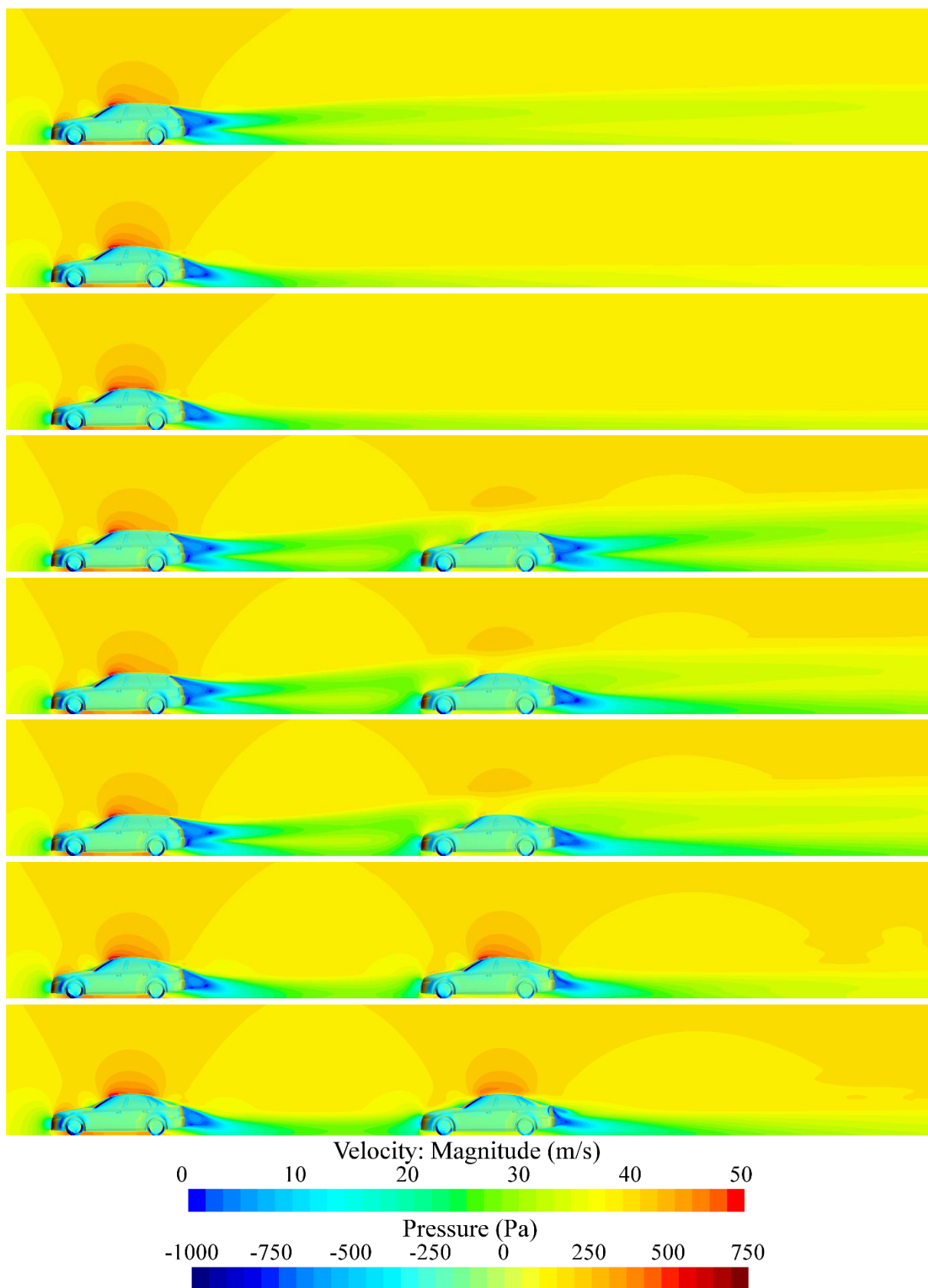
Příloha 4: Úplav za vedoucími vozy E, F, N při jízdě ve skupině. Řez $Y = 0$ mm.



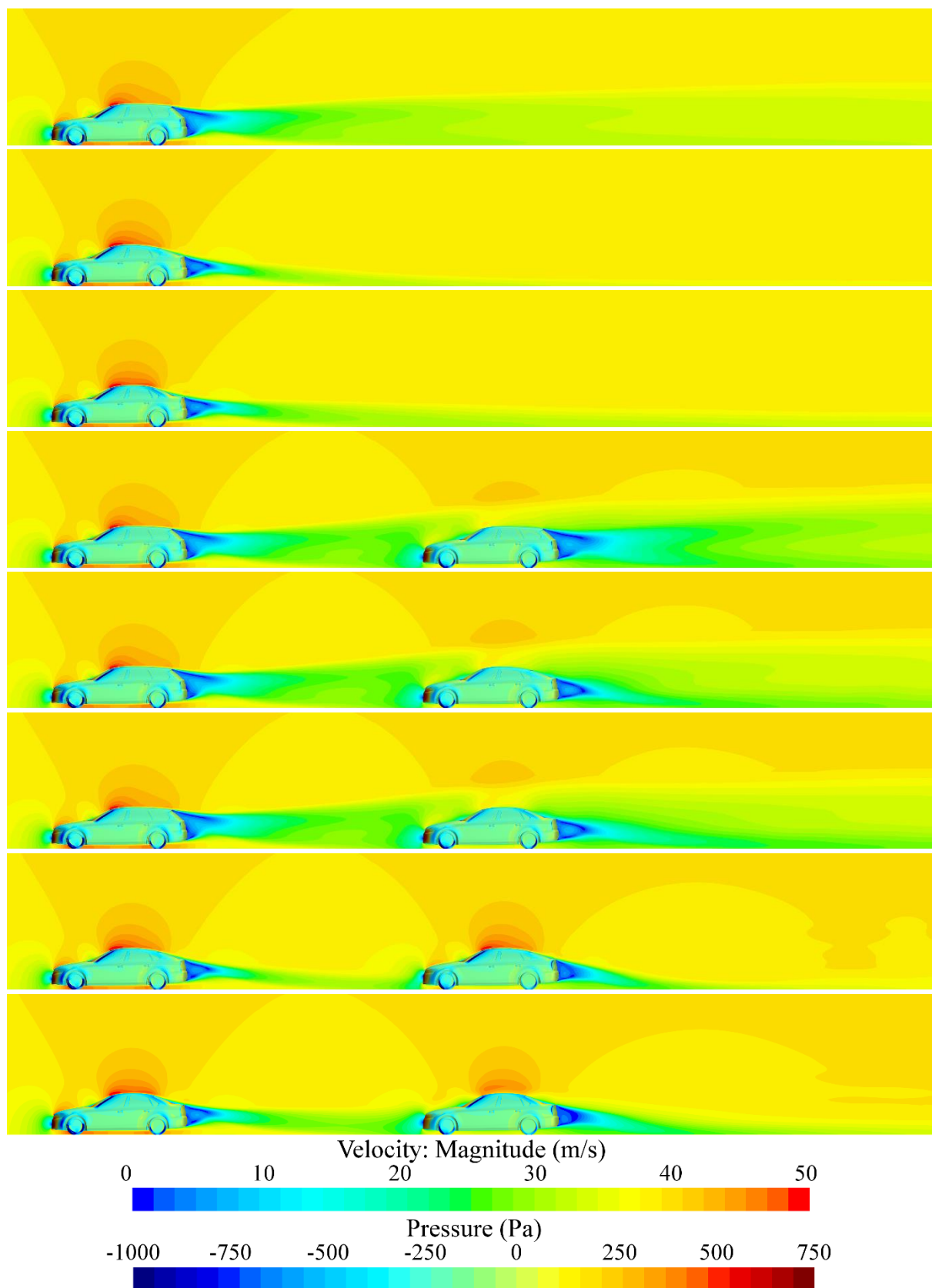
Příloha 5: Jízda za vozem E, F, N v pořadí odshora. Řez Y = 300 mm.



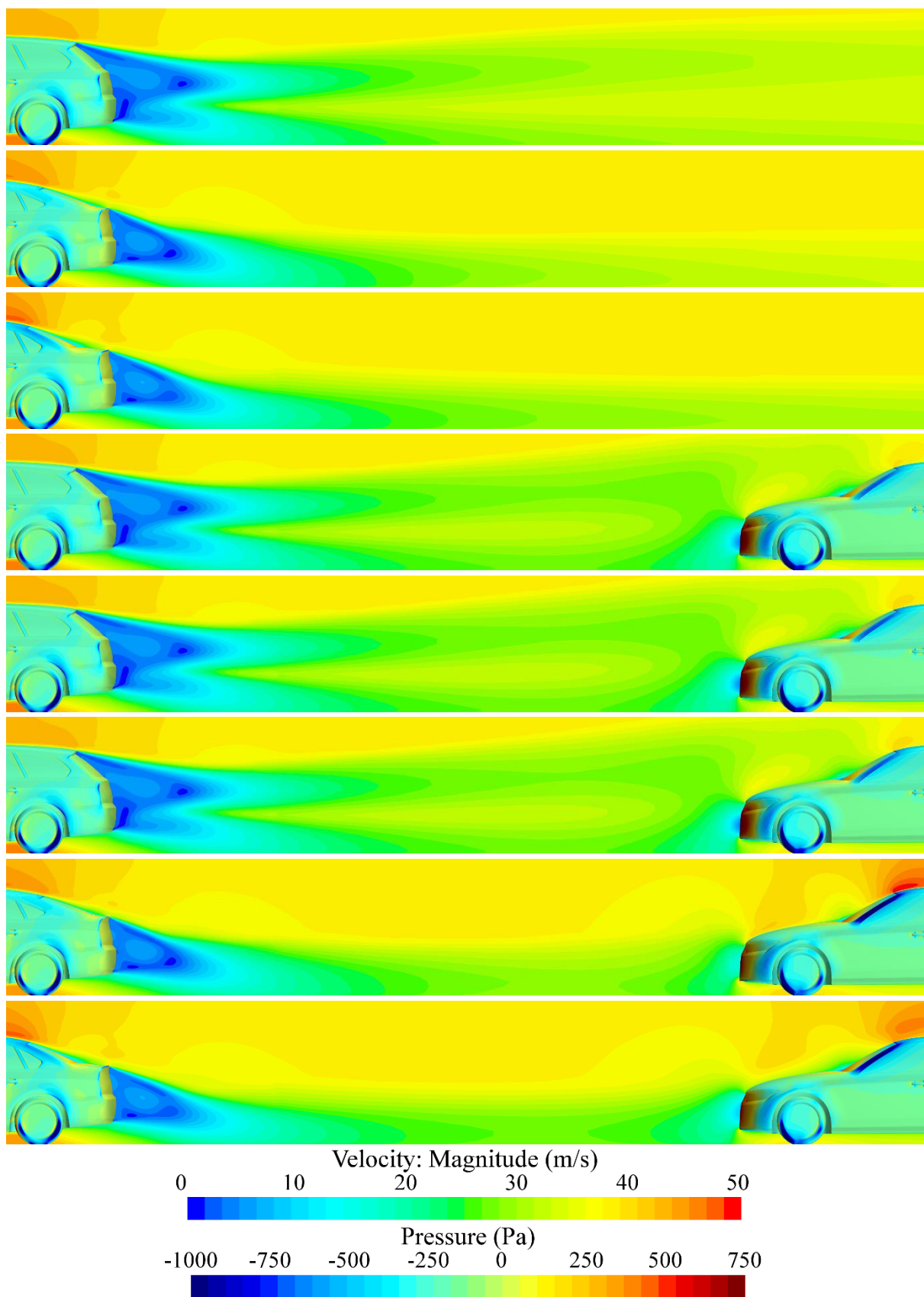
Příloha 6: Jízda za vozem E, F, N v pořadí odshora. Řez $Y = 0$ mm.



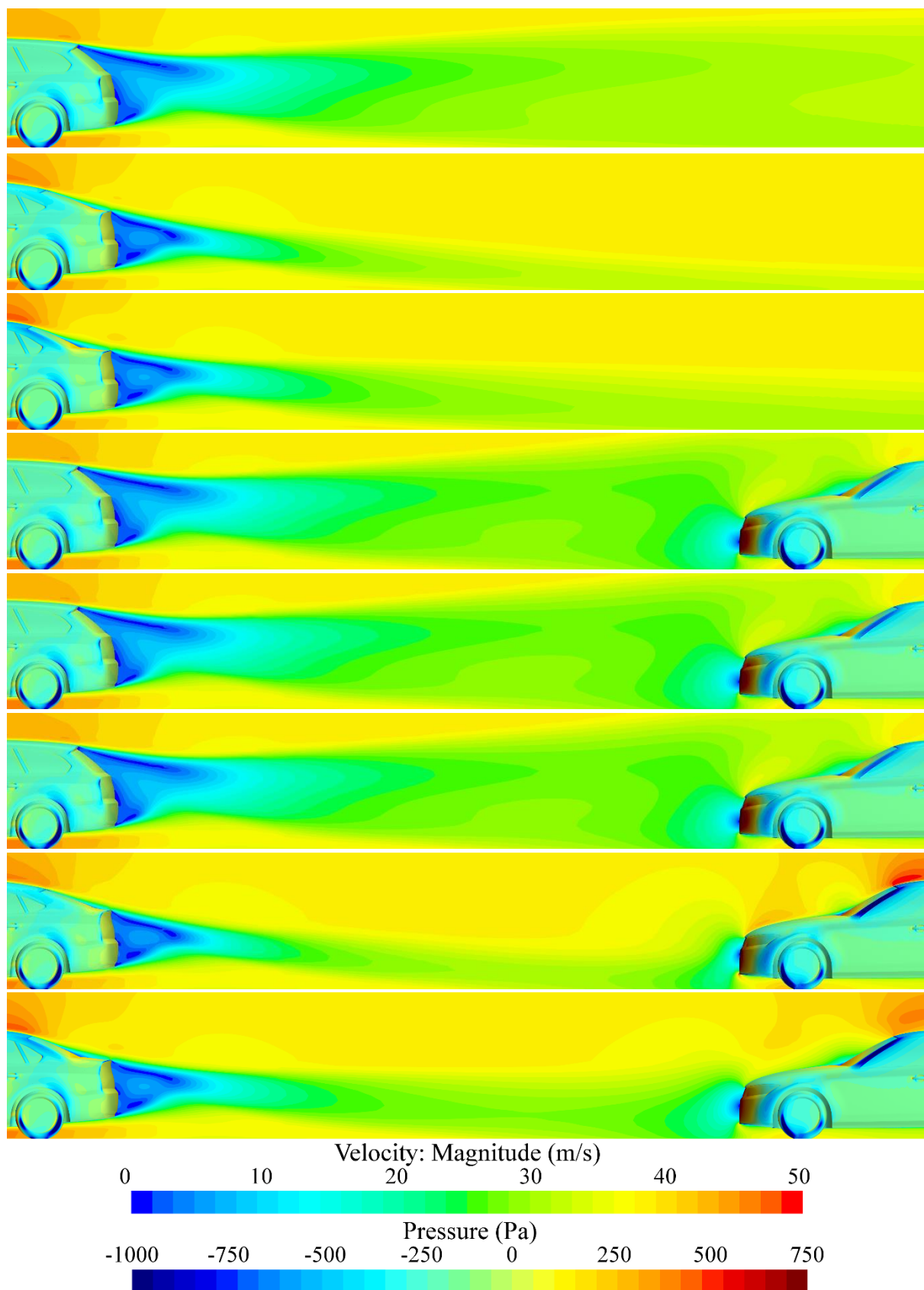
Příloha 7: Tvar úplavů všech kombinací. Řez Y = 300 mm.



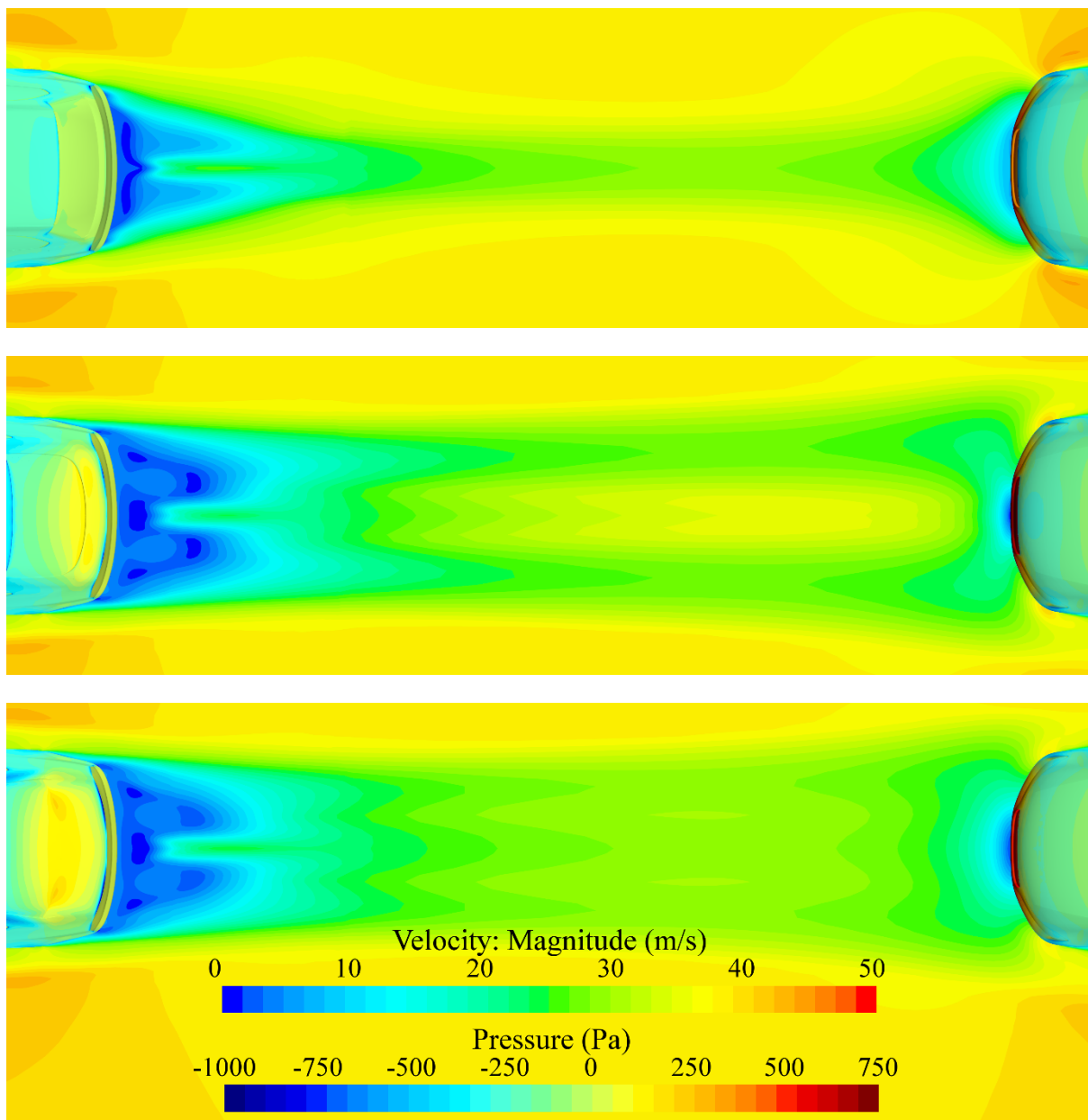
Příloha 8: Tvar úplavů všech kombinací. Řez $Y = 0$ mm.



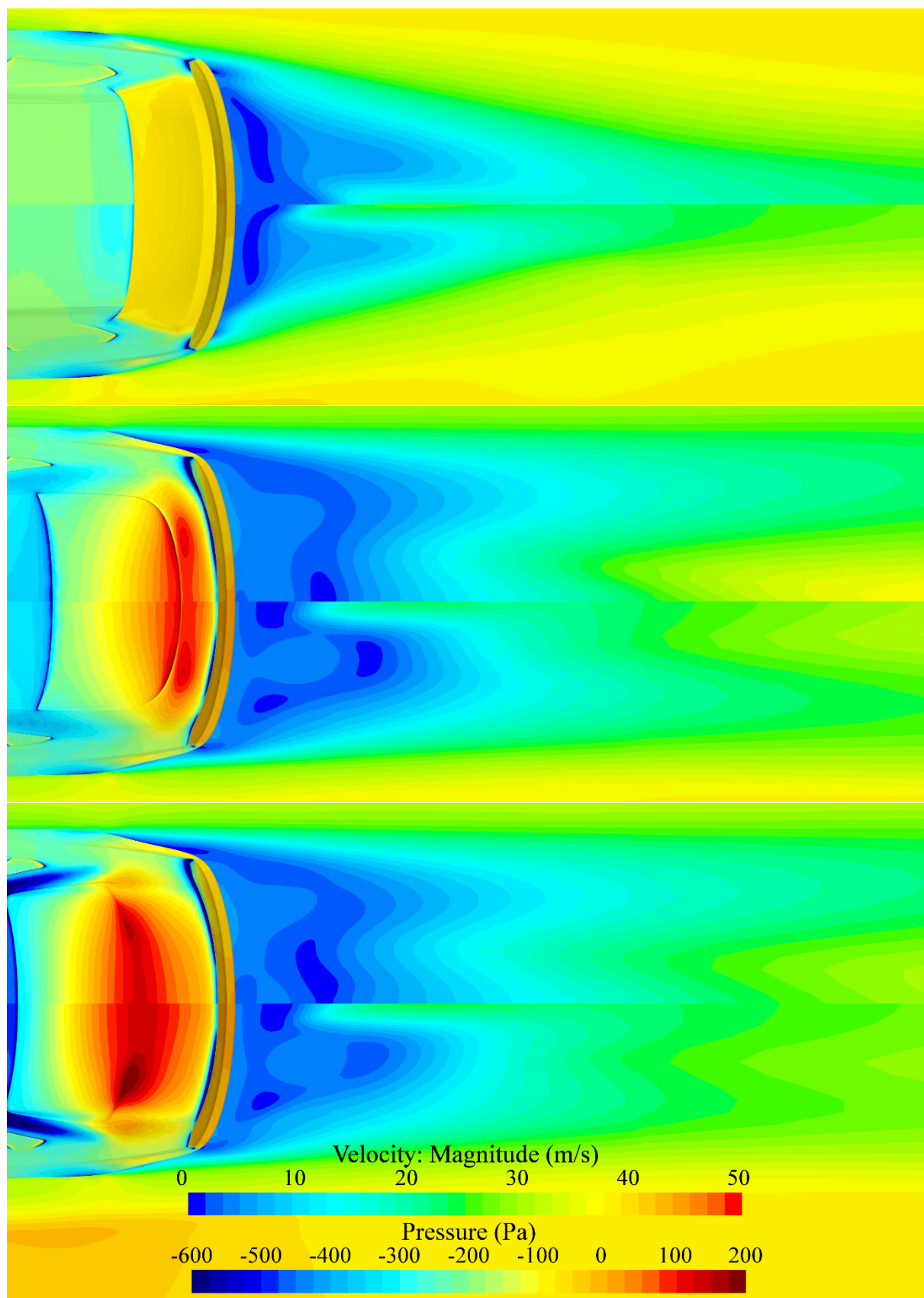
Príloha 9: Tvar úplavů všech kombinací, detail. Řez Y = 300 mm.



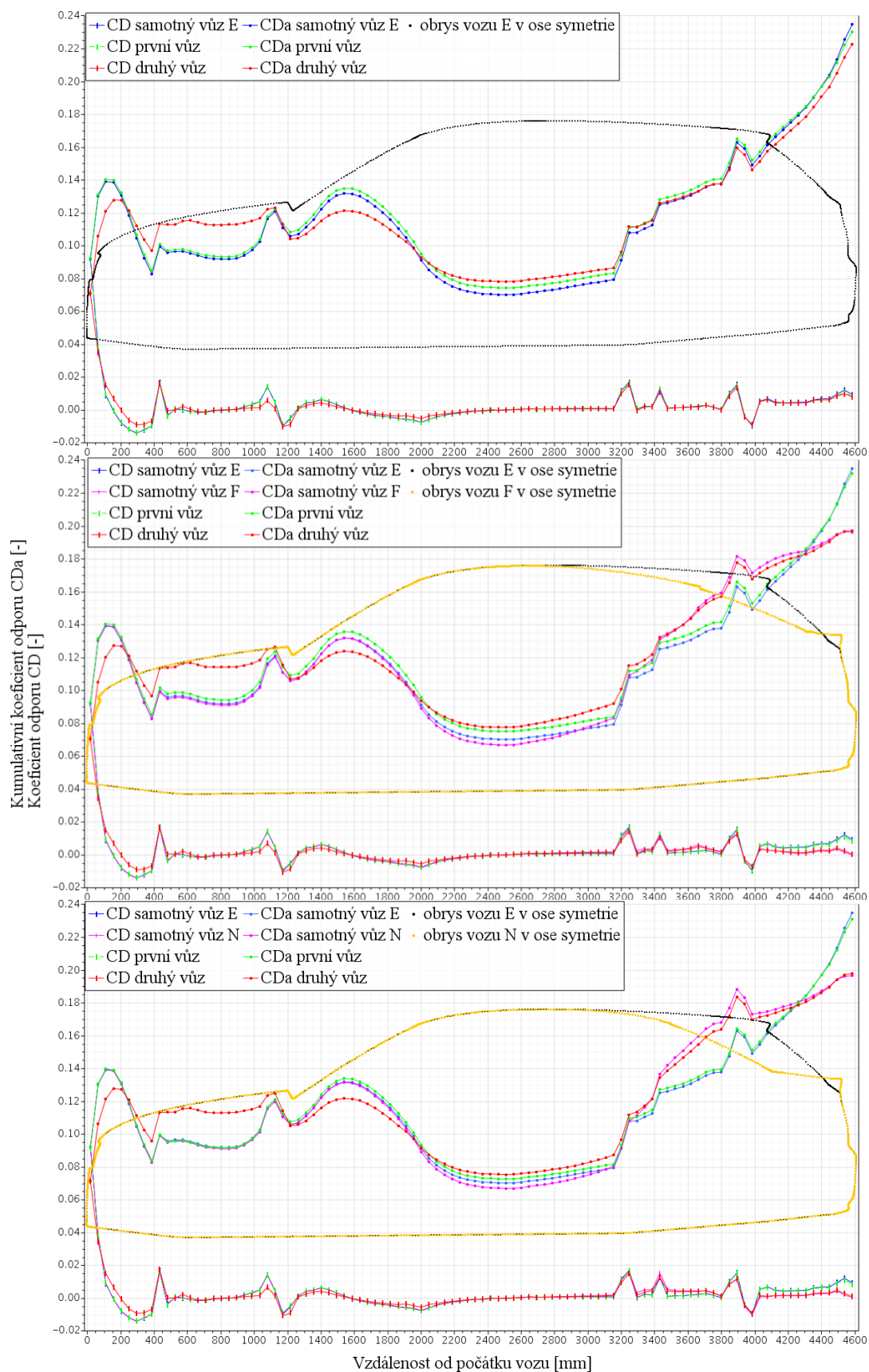
Příloha 10: Tvar úplavů všech kombinací, detail. Řez $Y = 0$ mm.



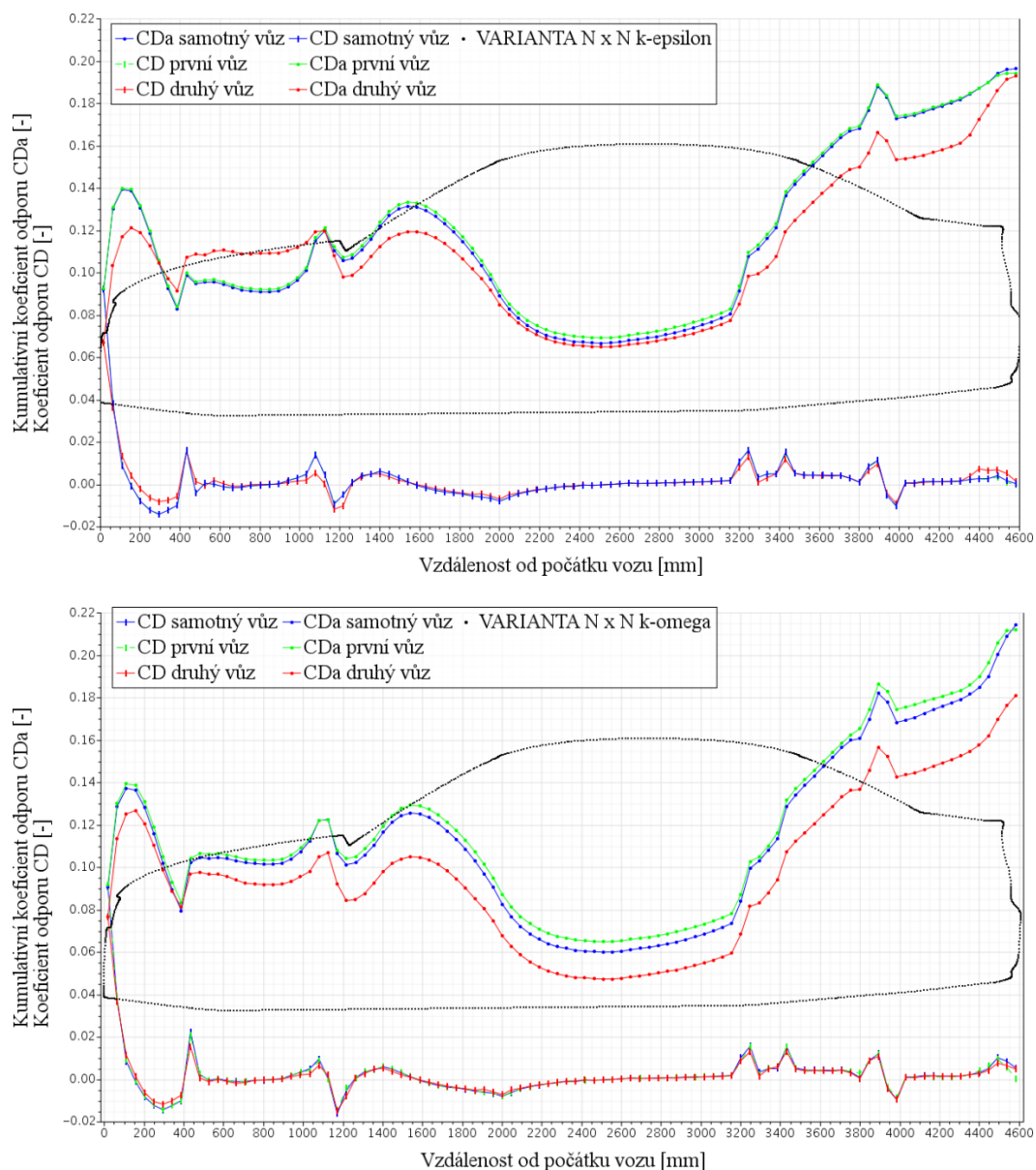
Příloha 11: Horní pohled na úplav mezi vozy $E \times E$, $F \times F$, $N \times N$ v pořadí odshora. Řez $Z = 450$ mm.



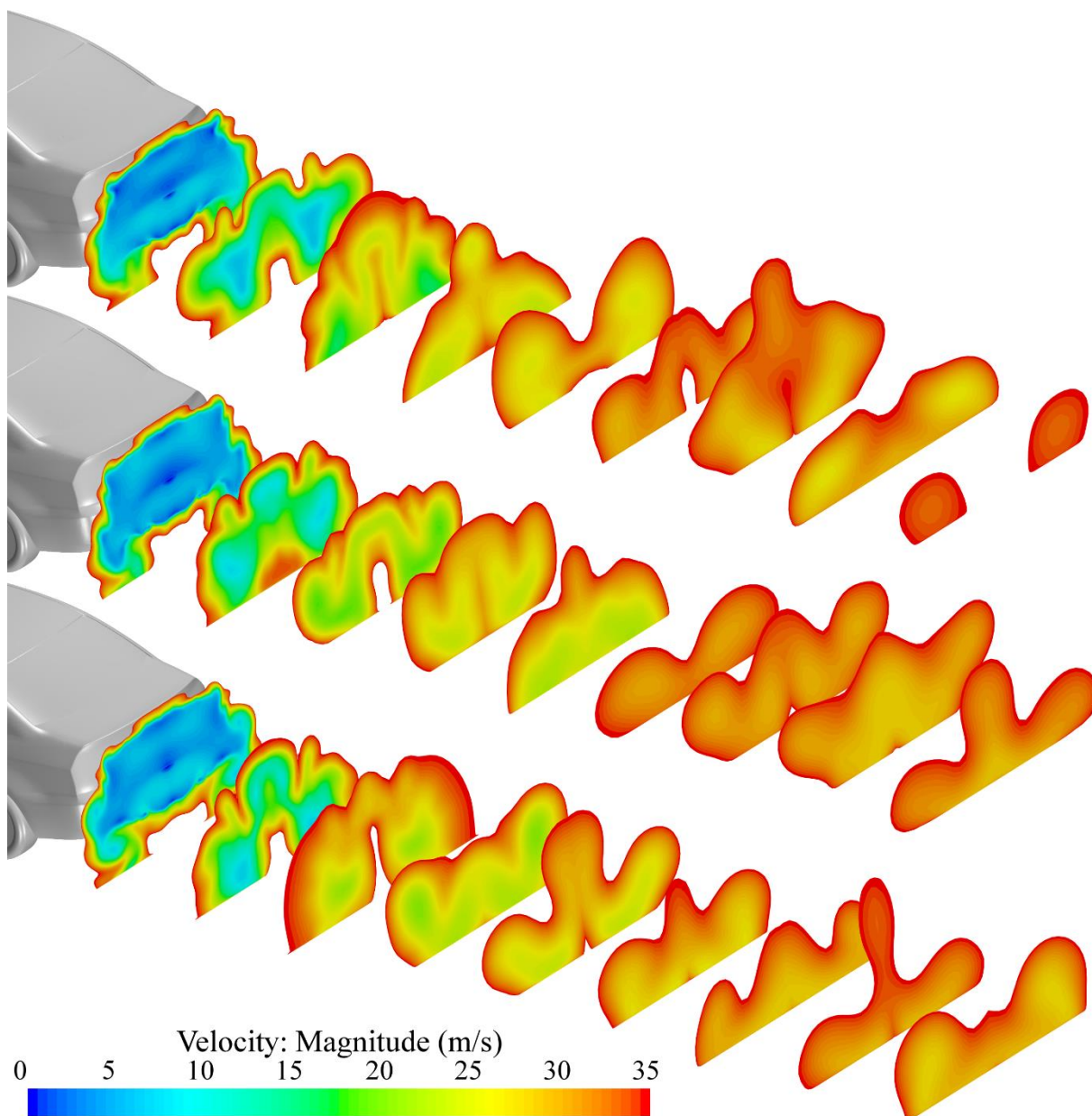
Příloha 12: Úplav za druhým (nahore) a prvním (dole) vozem, verze $E \times E$, $F \times F$, $N \times N$ odshora. Řez $Z = 450$ mm.



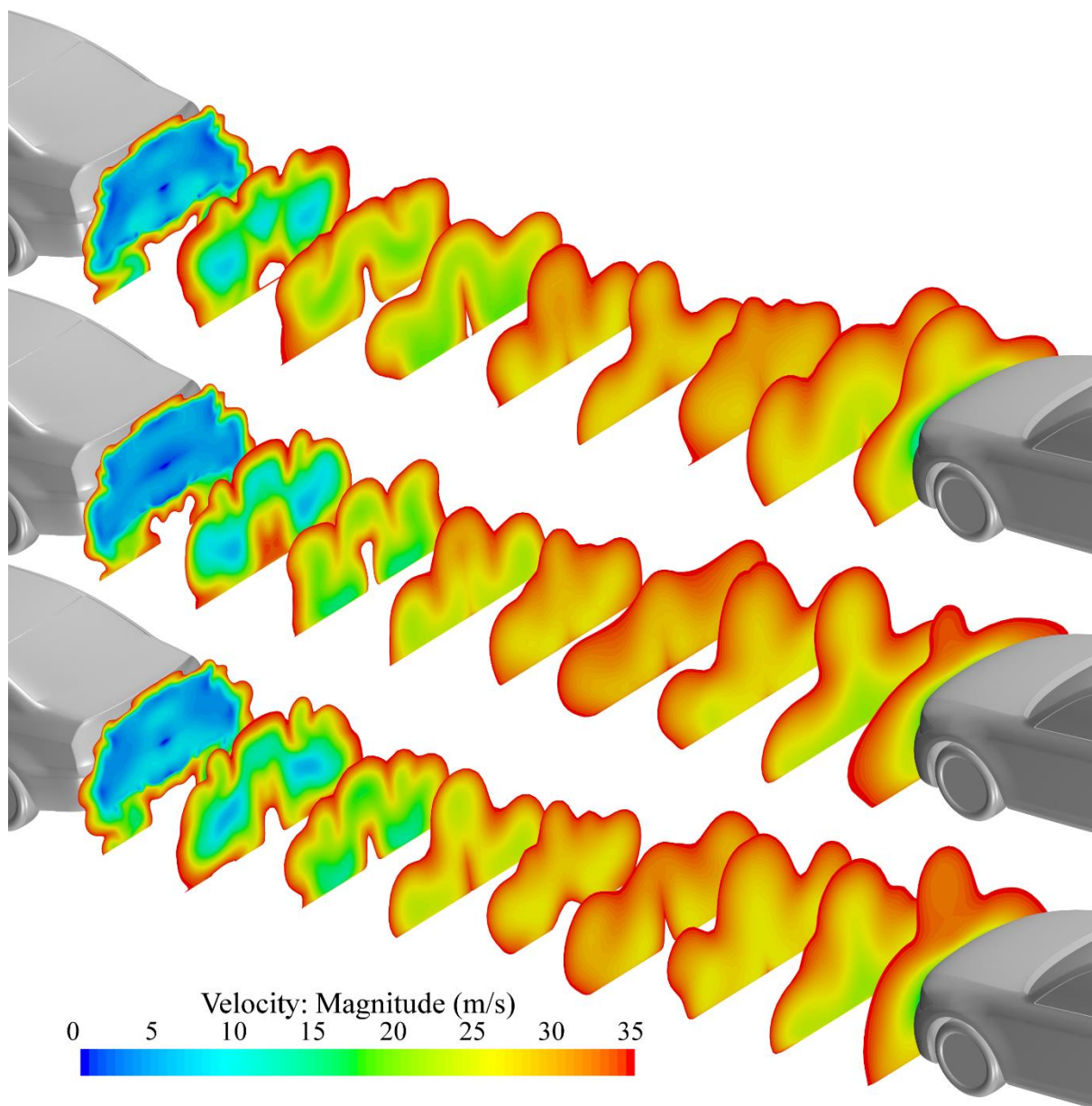
Příloha 13: Kumulativní koeficient odporu vozu CD_a koeficient odporu CD , varianty E x E, E x F, E x N.



Příloha 14: Kumulativní koeficient odporu vozu C_{Da} a koeficient odporu C_D , varianty $N \times N$ k-epsilon a k-omega.



Příloha 15: Řezy rychlostních polí pro minimální, průměrné a maximální hodnoty koeficientu odporu c_D pro samotný vůz. Nestacionární proudění, metoda k-omega.



Příloha 16: Řezy rychlostních polí pro minimální, průměrné a maximální hodnoty koeficientu odporu c_D pro druhý vůz. Nestacionární proudění, metoda k - ω .