

**České vysoké učení technické v Praze**  
**Fakulta strojní**



**Návrh tandemového úložného prostoru  
pro snížení emisí CO<sub>2</sub> osobních vozidel**

**Diplomová práce**

Vedoucí práce:  
**Ing. Jakub Filipský**

Zpracoval:  
**Bc. Martin Vostatek**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vostatek** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **382402**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh tandemového úložného prostoru pro snížení emisí CO<sub>2</sub> osobních vozidel**

Název diplomové práce anglicky:

**Design of a tandem storage space for lower CO<sub>2</sub> emissions of passenger road vehicles**

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši pasivních prvků ovlivňujících úplav ke snížení aerodynamického odporu osobních vozidel; navrhňte zařízení z aerodynamického hlediska; upravte návrh s ohledem na design; proveďte aerodynamickou optimalizaci pomocí dostupných CFD nástrojů; pomocí numerické simulace zhodnoťte přínos na emise CO<sub>2</sub>

Seznam doporučené literatury:

Hucho, W.: Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering, 2014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jakub Filipický, 12112**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **26.10.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

**28.4.2017**  
Datum převzetí zadání

**Hubatich**  
Podpis studenta

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem tandemového úložného prostoru pro osobní automobil. Práce obsahuje rešerši aerodynamiky vozidel se zaměřením na úplav, návrh tandemového úložného prostoru, CFD výpočty modelu úložného prostoru a zhodnocení výsledků. Hlavním výsledkem práce jsou numerické simulace navržených úložných prostorů a posouzení přínosu úložného prostoru ke snížení emisí CO<sub>2</sub> osobních vozidel.

## **Klíčová slova**

Aerodynamika, osobní vozidlo, CFD, CO<sub>2</sub> emise, úložný prostor

## **Abstract**

This diploma thesis deals with a design of tandem storage for passenger cars. Thesis includes summary of road vehicles aerodynamics with a focus on dead water region, tandem storage design, CFD computations of tandem storages and evaluation of the results. Main results of this thesis are computed simulations of tandem storages and evaluation of improvements in terms of decreasing CO<sub>2</sub> emissions.

## **Keywords**

Aerodynamics, passenger road vehicle, CFD, CO<sub>2</sub> emissions, tandem storage space

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta strojní

© 2014 Martin Vostatek. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na ČVUT v Praze, Fakultě strojní.  
Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami  
o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským.

## **Bibliografická citace**

VOSTATEK, Martin. *Návrh tandemového úložného prostoru pro snížení emisí CO<sub>2</sub> osobních automobilů*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. 58 str.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem práci zpracoval samostatně a výhradně s použitím zdrojů uvedených v seznamu použité literatury a na základě konzultací se svým vedoucím Ing. Jakubem Filipským a konzultantem ze Škoda Auto, a.s. Ing. Vojtěchem Jakubcem.

V Praze dne 14. srpna 2017

.....

Bc. Martin Vostatek

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jakubu Filipskému, konzultantovi Ing. Vojtěchu Jakubcovi, meshátorovi Ing. Petru Škráškovi, oddělení EBW ve Škoda Auto, a.s. a všem, kteří mě podporovali.

## Seznam zkratek a použitých symbolů

CFD	Computational Fluid Dynamics (počítačová mechanika tekutin)
MIRA	Motor Industry Research Association
PID	Property ID (identifikátor vlastností)
SPZ	Státní poznávací značka

$A$	$[m^2]$	čelní plocha vozidla
$a_\infty$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost zvuku
$c_D$	[-]	koeficient odporu
$c_L$	[-]	koeficient vztlaku
$c_M$	[-]	koeficient klonivého momentu
$c_N$	[-]	koeficient stáčivého momentu
$c_R$	[-]	koeficient klopivého momentu
$c_Y$	[-]	koeficient boční síly
$D$	$[N]$	odporová síla
$E_D$	$[J]$	energie
$k$	$[\frac{g \text{ CO}_2}{g \text{ nafty}}]$	měrné emise CO <sub>2</sub>
$l$	$[m]$	charakteristický rozměr
$L$	$[N]$	vztlaková síla
$m_{100}$	$[l/100km]$	spotřeba paliva
$m_{pe}$	$[g \cdot kWh^{-1}]$	měrná efektivní spotřeba nafty
$M$	$[Nm]$	klonivý moment
$Ma$	[-]	Machovo číslo
$N$	$[Nm]$	stáčivý moment
$\nu$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	kinematická viskozita
$p$	$[Pa]$	statický tlak
$P_D$	$[W]$	výkon
$R$	$[Nm]$	klopivý moment
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$\rho_{air}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota vzduchu
$\rho_{nafta}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota nafty
$V_\infty$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost proudění
$Y$	$[N]$	boční síla

# 1 Obsah

1	Obsah.....	8
2	Úvod .....	10
3	Aerodynamika .....	11
3.1	Aerodynamika vozidel.....	11
3.1.1	Síly působící na vozidlo.....	13
3.1.2	Tlak působící na vozidlo .....	15
3.1.3	Opor vzduchu .....	16
3.2	Aerodynamika ve vývoji vozidel .....	18
3.3	CO2 emise vozidel.....	19
4	Rešerše pasivních prvků ovlivňujících úplav .....	20
4.1	Tvar karoserie .....	20
4.2	Tvarové detaily ovlivňující úplav .....	23
4.2.1	Zadní spoiler .....	23
4.2.2	Difuzor .....	24
4.2.3	Sklon zadního okna a C sloupků.....	25
4.2.4	Prodloužení zádě „Boat-tailing“ .....	25
5	Aerodynamický návrh zařízení .....	28
5.1	Výběr vhodného vozu .....	28
5.2	Idea návrhu úložného prostoru .....	29
5.3	Metodika .....	30
5.3.1	Odstranění nepotřebné geometrie .....	31
5.3.2	Zaslepení otvorů.....	32
5.3.3	Objemová síť v okolí vozidla .....	33
5.4	Tvorba tandemového úložného prostoru .....	35
6	Úprava návrhu směrem k designu .....	37



7	Aerodynamická optimalizace pomocí dostupných CFD nástrojů .	38
7.1	Výchozí varianta V001 .....	38
7.2	Varianta V258 po intuitivních úpravách .....	38
7.3	Vliv charakteristických rozměrů na odpor .....	39
7.3.1	Vliv délky úložného prostoru na odpor soupravy .....	39
7.3.2	Vliv výšky úložného prostoru na odpor soupravy .....	41
7.3.3	Vliv šířky úložného prostoru na odpor soupravy .....	43
7.3.4	Vliv úhlu boků úložného prostoru na odpor soupravy .....	44
7.3.5	Vliv úhlu střechy úložného prostoru na odpor soupravy..	46
7.3.6	Vliv úhlu dna úložného prostoru na odpor soupravy .....	48
8	Numerická analýzy přínosu na emise CO <sub>2</sub> .....	50
8.1	Spotřeba paliva na překonání aerodynamického odporu .....	50
8.1.1	Aerodynamická síla při jízdě konstantní rychlostí.....	50
8.1.2	Výkon potřebný k pokrytí aerodynamických ztrát .....	51
8.1.3	Spotřeba paliva na 100km .....	51
8.2	Emise CO <sub>2</sub> k překonání aerodynamického odporu .....	51
8.2.1	Měrné emise CO <sub>2</sub> .....	52
8.2.2	Produkce emisí na překonání aerodynamického odporu..	52
8.3	Snížení emisí přidáním tandemového prostoru .....	53
9	Zhodnocení výsledků .....	53
10	Závěr .....	54
11	Seznam použitých literárních zdrojů .....	55
12	Seznam obrázků .....	57
13	Seznam tabulek .....	58
14	Seznam grafů .....	58

## 2 Úvod

Motorová vozidla mají důležitou roli v našem životě. Prakticky každý dnes vlastní nebo užívá vozidlo. Počet vozidel na silnicích stále roste a s tím je více zatěžováno životní prostředí, na které má největší negativní dopad produkce emisí CO<sub>2</sub>. Málokdo ví, že spálením 1 litru paliva (nafty nebo benzínu) je vyprodukováno přibližně 2,5kg CO<sub>2</sub>. Proto se čím dál více zpřísňují emisní normy, které musí nové automobily splňovat.

Snížení emisí je možné docílit snížením aerodynamického odporu vozidla, který je při vyšších rychlostech dominantní odporovou silou, která působí na vozidlo a významně se tudíž podílí na produkci emisí CO<sub>2</sub>. Snižování aerodynamického odporu se díky tomu stalo v průběhu let nedílnou součástí vývoje vozidel.

Aerodynamická studie prováděná na úložném prostoru je srovnána s existujícími parametry samotného vozidla. Byla provedena citlivostní analýza v závislosti na několika parametrech a úspora emisí, které se přidáním úložného prostoru podařilo dosáhnout, je více než  $5 \frac{g CO_2}{km}$ .

Tandemový úložný prostor se jeví jako vhodná alternativa střešního nosiče, protože na rozdíl od něj snižuje spotřebu.

Před případným uvedením na trh by bylo nutné ještě upravit designový návrh, konstrukci, upevnění na vozidlo a prověřit maximální využitelnou nosnost, aero-akustické jevy a podobné.

## 3 Aerodynamika

Aerodynamika je část mechaniky tekutin, která se zabývá řešením problémů týkajících se obtékání a pohybu těles v proudu vzduchu. Aerodynamiku můžeme rozdělit na vnitřní, která se zabývá prouděním uvnitř zkoumaných objektů (potrubí, lopatkové stroje, chlazení a další) a na vnější, která se zabývá obtékáním okolo různých tvarů. Vnější aerodynamika se nejvíce uplatňuje při vývoji letadel, automobilů, vlaků ale i při návrhu budov nebo mostů. [2] [10] [11]

Proudění vzduchu označujeme za relativní, protože nezáleží, zda proudí vzduch okolo obtékaného předmětu, nebo je tomu naopak. Ve většině aplikací se nakonec jedná o kombinaci pohybu předmětu v pohybujícím se vzduchu. Takovou úlohu můžeme díky zmíněné relativitě výhodně převést na obtékání stacionárního předmětu. Tato analogie je běžně uplatňovaná při experimentálním prověřování vnější aerodynamiky v aerodynamických tunelech. [10] [11]

### 3.1 Aerodynamika vozidel

Aerodynamika vozidel se dělí do tří částí

1. Obtékání okolo karoserie vozidla
2. Průtok karoserií vozidla
3. Průtok pohonnou jednotkou

První dvě části spolu úzce souvisí, protože průtok motorovým prostorem ovlivňuje vnější obtékání vozidla. Obě části by měly být uvažovány společně. V určitých případech ale záměrně odstraňujeme motorový prostor jako přijatelné zjednodušení, které nemá zásadní vliv na vnější obtékání (např. při návrhu vnějších tvarů karoserie).

Naopak průtok uvnitř motoru, převodovky a dalších částí pohonného ústrojí neovlivňuje vnější obtékání a patří spíše do termodynamiky. [2]

Pokud mluvíme o aerodynamice vozidel, každý si hned vybaví aerodynamický odpor, který se stal téměř synonymem pro tuto oblast zájmu. Musíme si ale uvědomit, že aerodynamika skrývá mnohem více. Důležité vlastnosti vozidla ovlivněné aerodynamikou jsou uvedeny v Tabulce 3.1. [2]

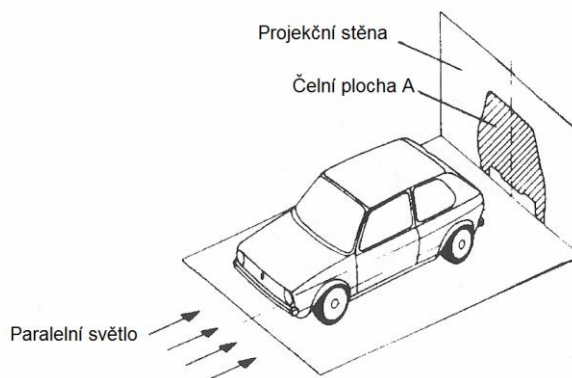
Tabulka 3.1 Hlavní vlastnosti vozidla ovlivněné aerodynamikou [2]

Chlazení	Výkon	Komfort	Stabilita	Viditelnost
Motoru Převodovky Brzd Kondenzátoru	Spotřeba Emise Max. rychlost Akcelerace	Ventilace Topení Klimatizace Hlučnost	Směrová stabilita Vztlak Citlivost na boční vítr	Špinění Ostřikovače Stěrače

Aerodynamický odpor, stejně jako ostatní součásti výsledné síly, narůstá s druhou mocninou rychlosti vozidla  $V$  (při zanedbání změn silových účinků vlivem změny Reynoldsova čísla). Vzorec pro výpočet aerodynamického odporu je dán Rovnicí (3.1).

$$D = \frac{1}{2} c_D A \rho V_\infty^2 \quad (3.1)$$

Kde  $c_D$  je bezrozměrný koeficient odporu,  $A$  je čelní plocha vozidla [ $m^2$ ],  $\rho$  je hustota vzduchu [ $kg \cdot m^{-3}$ ] a  $V_\infty$  je rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]. Čelní plocha  $A$  je určena průmětem vozidla ve směru jízdy viz Obrázek 3.1. **Error! Reference source not found.**

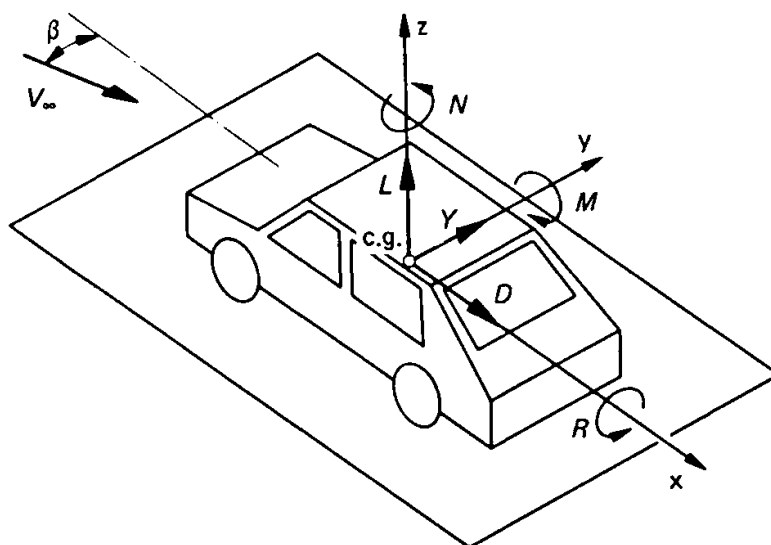


Obrázek 3.1 Definice čelní plochy vozidla [2]

Aerodynamický odpor je tedy dobře definován v závislosti na velikosti vozidla, která je určena čelní plochou, a aerodynamickém koeficientu  $c_D$ , který určuje tvarovou kvalitu obtékání.

### 3.1.1 Síly působící na vozidlo

Síly i momenty působící na vozidlo jsou definovány ve směrech shodných se souřadnicovým systémem vozidla a s působištěm v jeho těžišti viz Obrázek 3.2.



Obrázek 3.2 Síly a momenty působící na vozidlo [2]

Již zmíněnou dominantní silou je aerodynamický odpor **D (Drag)**, který působí proti směru pohybu. Síla **L (Lift)** působící vzhůru snižuje přítlak pneumatik a negativně tím ovlivňuje ovladatelnost vozu. Třetí boční síla **Y (side force Y axis)** se projevuje při silném bočním větru, nebo při průjezdu zatáčkou a vychyluje vozidlo z přímočarého pohybu.

Působící momenty jsou klonivý moment **M (pitching Moment)** vyvolávající změnu rozložení sil mezi přední a zadní nápravu, klonný moment **R (Rolling)** a stáčivý moment **N (yawing)**.

Zejména při numerických výpočtech, nebo za speciálních jízdních podmínek může nastat zjednodušený případ tzv. „symetrické obtékání“, které je definováno nulovým bočním větrem ( $\beta = 0$ ).

Za předpokladu symetrické geometrie vozidla jsou síla  $Y$  a momenty  $R$ ,  $N$  nulové. [2]

Silové i momentové složky výsledného vektoru jsou na konkrétním vozidle zjišťovány měřením v aerodynamickém tunelu buď kompletního vozidla, nebo jeho modelu v odpovídajícím měřítku.

Pro modely v měřítkách je nutné vzít v úvahu Reynoldsův zákon o podobnosti. Když je dosaženo stejného Reynoldsova čísla (Rovnice 3.2) pro skutečné vozidlo i pro model, bude výsledek měření nezávislý na velikosti. Z toho vyplývá, že čím je menší model, tím musí být vyšší rychlost proudění. Omezením je zde maximální rychlost, při které je proudění ještě silně podzvukové. Jinak by došlo k porušení podobnostního zákona stlačitelného proudění, které vyžaduje konstantní Machovo číslo (Rovnice 3.3) pro oba případy. [2]

$$Re_l = \frac{V_\infty l}{\nu} \quad (3.2)$$

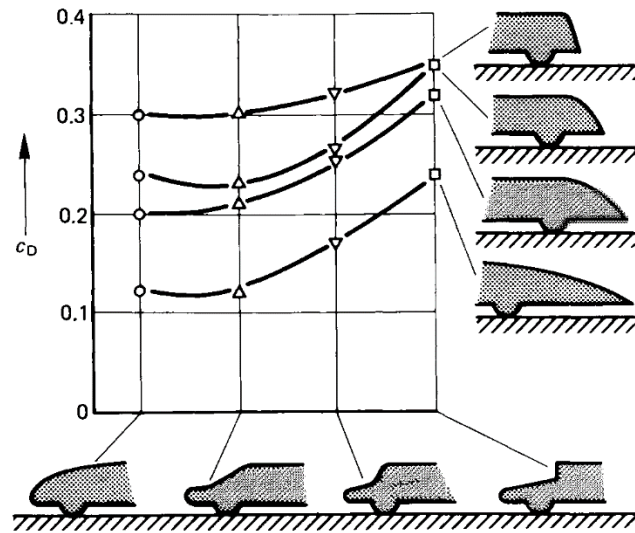
$$Ma_\infty = \frac{V_\infty}{a_\infty} \quad (3.3)$$

Výsledek bude nezávislý na reálné velikosti měřeného vozu, pokud navrhne bezrozměrné parametry podobně jako koeficient odporu. Rozepsané definice koeficientů jsou uvedeny v Tabulce 3.2.

*Tabulka 3.2 Bezrozměrné koeficienty [2]*

$c_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A}$	$c_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A}$	$c_Y = \frac{Y}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A}$
Koeficient odporu	Koeficient vztlaku	Koeficient boční síly
$c_M = \frac{M}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A l}$	$c_R = \frac{R}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A l}$	$c_N = \frac{N}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A l}$
Koeficient klonivého momentu	Koeficient klopivého momentu	Koeficient stáčivého momentu

Pro představu je na Obrázku 3.3 uveden přehled hodnot odporového koeficientu pro různé typy vozidel. Díky tomu lze získat hrubý odhad parametru  $c_D$  už při prvním pohledu na vozidlo.

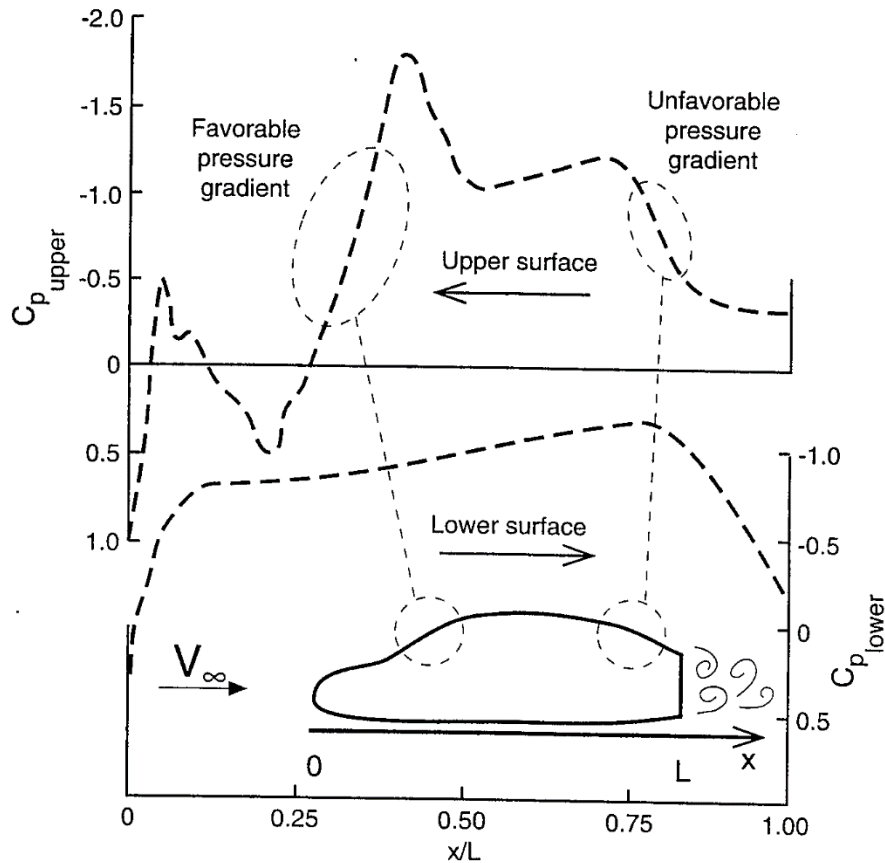


Obrázek 3.3 Vliv hlavních tvarových parametrů vozu na odporový koeficient a jejich interakce [2]

### 3.1.2 Tlak působící na vozidlo

Rozložení tlakového koeficientu v podélné ose vozidla je zobrazeno na Obrázku 3.4. Proud vzduchu je zpomalen v oblasti předního nárazníku a tím vzniká přetlak brzdící vozidlo. Na kapotě a střeše je vzduch urychlen, klesá statický tlak a tím vzniká vztlak podobně jako na leteckém profilu. [2] [12]

V zadní části vozu se proudění zpomaluje a tlak opět stoupá. Vlivem disipace energie a odtržení proudění za vozidlem ale není hodnota tlaku nikdy zcela obnovena na hodnotu před vozidlem. Důsledkem toho je aerodynamický odpor. [12]



Obrázek 3.4 Tlak působící na vozidlo [12]

### 3.1.3 Opor vzduchu

Při malých rychlostech je odpor vzduchu relativně malý, ale již při rychlosti okolo 70 km/h se stává dominantní energetickou ztrátou jedoucího vozidla. Jeho vliv je nepopíratelně velmi důležitý z ekonomického hlediska. Zvyšuje totiž ztatečně spotřebu a snižuje maximální dosažitelnou rychlost. Největší vliv na něj mají tvar, povrch a rozměry karoserie. [2] [6]

Odpor vzduchu můžeme rozdělit na 4 základní složky:

- Tvarový odpor
- Indukovaný odpor
- Třecí odpor
- Vnitřní odpor



**Tlakový odpor** vozidla vzniká na základě rozdílných tlaků na povrchu karoserie. Jedná se o součet statického tlaku po celém povrchu vozidla. Kladný statický tlak (přetlak) vzniká na čelních plochách a záporný (podtlak) vzniká v úplavu. Důsledkem obojího je tvarový odpor. [2] [14]

**Třecí odpor** vzniká díky viskozitě vzduchu a působí v mezní vrstvě. Rozdíl rychlosti vzduchu na povrchu karoserie a na konci mezní vrstvy generuje smykové napětí, jehož výslednicí je třecí nebo také tzv. plošný odpor. Třecí odpor lze významně snížit, snížením drsnosti. Tvoří jen velmi malou část aerodynamického odporu jedoucího vozidla. [12]

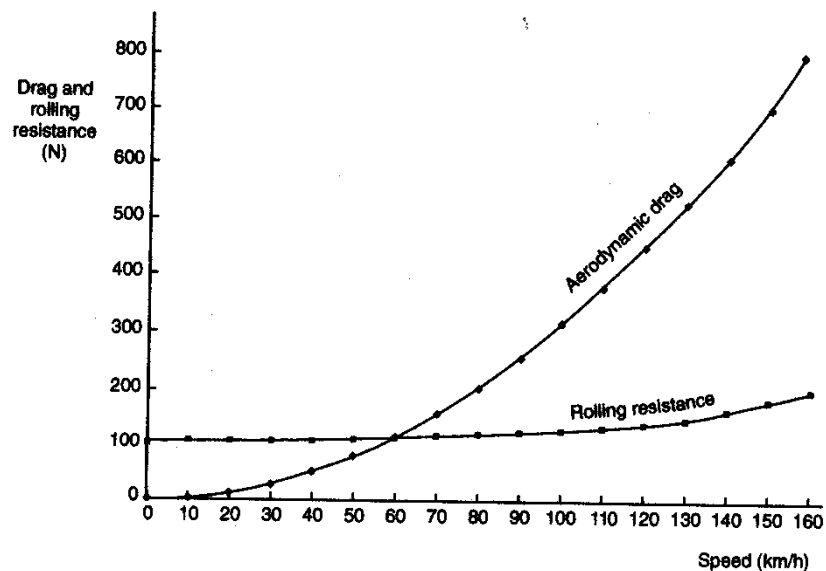
**Indukovaný odpor** je důsledkem tvorby vzdušných vírů zejména v úplavu vozidla nebo za ostrými hranami. Také se díky rozdílnému tlaku pod vozidlem, na jeho boku a nad ním tvoří takzvané boční víry, které zvyšují indukovaný odpor. [13]

**Vnitřní odpor** vzniká při průtoku vzduchu karoserií vozidla, zejména maskou, chladičem, motorovým prostorem, kabinou vozu i dalšími méně významnými místy. [2] [13]

Na odporu vzduchu se také podílí odpor rotujících kol (cca 5%) a odpor tvarových detailů karoserie. Ten nebývá zpravidla vysoký, ale při nevhodné geometrii může dosahovat vysokých hodnot. [2] [6] [13]

### 3.2 Aerodynamika ve vývoji vozidel

Aerodynamický odpor patří u konvenčních vozidel k jedné z největších energetických ztrát a je potřeba mu věnovat velkou pozornost již v raném stadiu vývoje vozidla. U středně velkého vozidla jedoucího  $140\text{ km/h}$  činí aerodynamický odpor přibližně 60 % celkového odporu. Dlouhou dobu se cílilo snižování odporu zejména kvůli zvýšení maximální dosažitelné rychlosti. To se ale časem proměnilo a dnes je důležitější provozní ekonomika a snižování emisí vozidel. [2] [12]



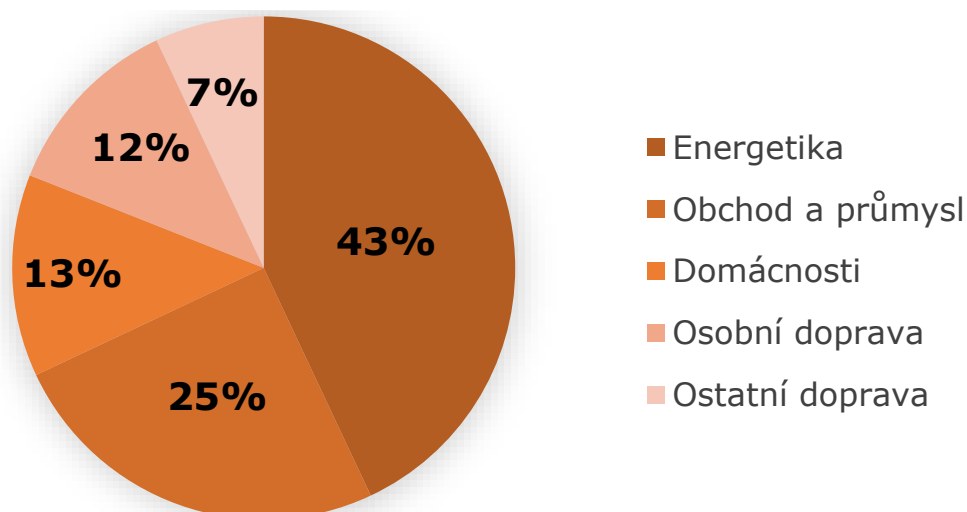
Graf 3.1 Srovnání aerodynamického a valivého odporu [18]

Při vývoji je čelní plocha dána kategorií, do které vozidla spadá a soustředíme se tedy na správně vytvarování karoserie vedoucí ke snížení odporového koeficientu  $c_D$ . [2]

### 3.3 CO<sub>2</sub> emise vozidel

Každým rokem jsou na automobilky kladeny přísnější restrikce v podobě emisních norem. Současně je některým vozům nesplňujícím emisní požadavky v Německu zakázán vjezd do vnitřních částí měst a u nás se o podobném zákazu také uvažuje.

Německá vláda trvá na svém požadavku ke snížení celkových emisí CO<sub>2</sub> o 40% ve srovnání z rokem 1990, což je teprve její první cíl. Lze předpokládat, že podobné a ještě přísnější nařízení budou následovat, dokud emise CO<sub>2</sub> neklesnou na velmi nízké nebo nulové hodnoty. [17]



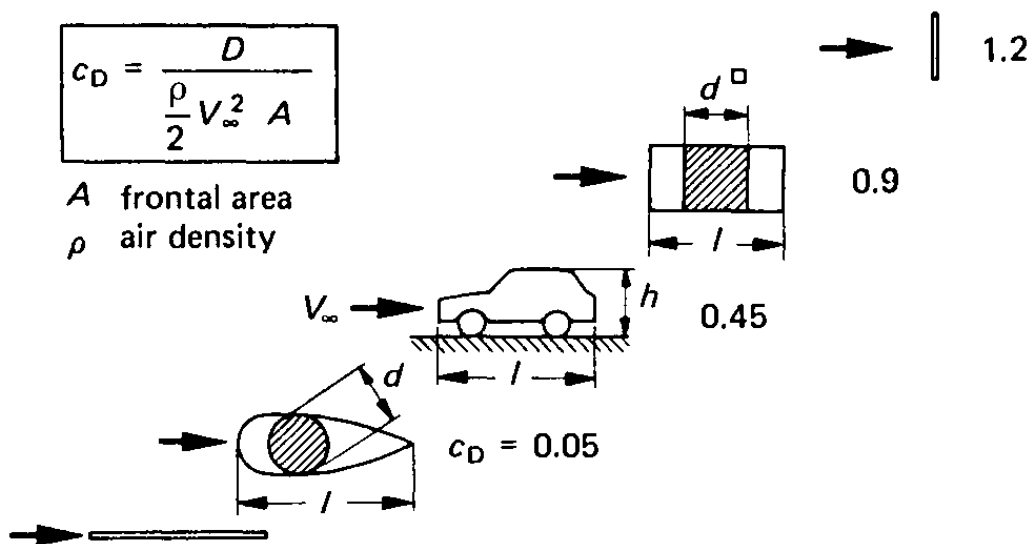
Graf 3.2 CO<sub>2</sub> emise v Německu 2008

Z Grafu 3.2 je patrné, že podíl automobilové dopravy je pouze 12%, ale pokud k nim připočteme i ostatní dopravu, ve které se jedná hlavně o kamiony, autobusy a vlaky, dostaneme se již na 19%. To je prostor, ve kterém určitě lze dosáhnout významného zlepšení.

Obdobná situace je ve většině Evropských státech. Odvíjí se totiž od velikosti země, hustoty osídlení a množství vozidel ve vztahu k obyvatelstvu. Například v Americe je ale situace trochu jiná. Díky větším vzdálenostem mezi městy je podíl dopravního sektoru na emisích CO<sub>2</sub> znatelně vyšší, než v Evropě. [17]

## 4 Rešerše pasivních prvků ovlivňujících úplav

Tvarové složitosti osobních vozidel vytváří komplikované vírové struktury, které spolu vzájemně interagují. Proto je těžké předpovědět aerodynamický odpor vozidel, i když máme hluboké teoretické znalosti. Také nejsme schopni vytvořit analytický popis závislosti odporu na geometrii vozu ani na základě mnoha provedených experimentálních měření. Na Obrázku 4.1 je při srovnání standardních tvarů a jednoduchého vozu názorně vidět rozdíl tvarové složitosti a koeficientů odporu  $c_D$ .



Obrázek 4.1 Srovnání odporu vozu a jiných těles [2]

Přesto lze vysledovat na jednotlivých prvcích karoserie určité tvary a detaily, které napomáhají zlepšit nebo naopak výrazně zhoršit aerodynamiku.

### 4.1 Tvar karoserie

Celkový tvar karoserie osobního automobilu předurčuje jeho vlastnosti ve všech směrech (obtékání, odpor, ovladatelnost, citlivost na boční vítr a další).

Podle tvaru zádě dělíme tvary karoserií na 4 základní typy:

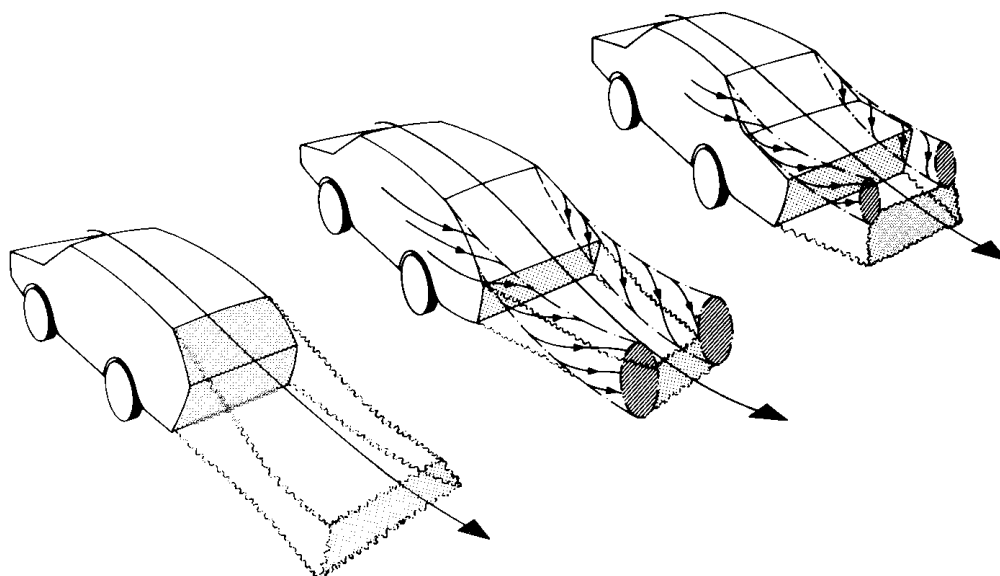
- Sedan
- Liftback
- Kombi
- Hatchback

**Sedan** je konvenční typ automobilu s prostorem pro přepravu až 5 cestujících (včetně řidiče) a menším odděleným prostorem pro zavazadla. Zadní sklo se směrem k zádi svažuje pod velkým úhlem. Karoserie je často označována jako „tří-prostorová“ (motorový prostor, prostor pro posádku, zavazadlový prostor).

**Liftback** je typ karoserie podobný sedanu, ale zadní sklo klesá pod menším úhlem a je součástí pátých dveří, což poskytuje snadnější ukládání zavazadel.

**Kombi** je karoserie zaměřená na velký zavazadlový prostor, který není oddělený. Střecha je po celé délce vozidla ve stejné výši a páté dveře s ní svírají úhel téměř 90°. Už tak velký zavazadlový prostor lze sklopením nebo úplným vyjmutím zadní řady sedadel ještě dodatečně zvětšit. Naopak u některých osobních vozů typu kombi můžeme do zavazadlového prostoru umístit třetí řadu sedadel (většinou 2 ks) a zvýšit tím přepravní kapacitu na 7 cestujících.

**Hatchback** vzhledem připomíná krátký vůz kombi nebo sedan bez kufu. Krátká karoserie s velmi strmým zadním sklem, které je součástí pátých dveří se v poslední době těší velké oblibě. Vozidla tohoto typu bývají i třídveřová.



Obrázek 4.2 Obtékání okolo různých typů karoserie [2]

Nejznámější a nejpoužívanější náhrady typů karoserie jsou referenční modely MIRA<sup>1</sup>. Modely, které vytvořila tato firma pro počítačové simulace a měření, jsou vhodným referenčním základem. Bylo na nich provedeno již spoustu testování, nastavení výpočetního software a lze je přiřadit k jednotlivým typům karoserie, které se vyskytují mezi osobními vozy. [3]

MIRA modely jsou:

**Squareback** je typický vůz kombi. Dlouhý model se svislým zadním sklem. K tomuto modelu lze přiřadit i karoserii hatchback.

**Fastback** má oproti notchbacku splývavé zadní sklo a odpovídá karoserii liftback nebo některým sportovním vozům. Dříve to byl velice oblíbený tvar sériově vyráběného vozidla.

**Notchback** odpovídá starším vozidlům typu sedan a limuzína.

**Pick-up** je vůz s jednou řadou sedadel a otevřeným nákladním prostorem, který ale není primárně určen k přepravě osob. Na Obrázku 4.2 jako jediný není vyobrazen.

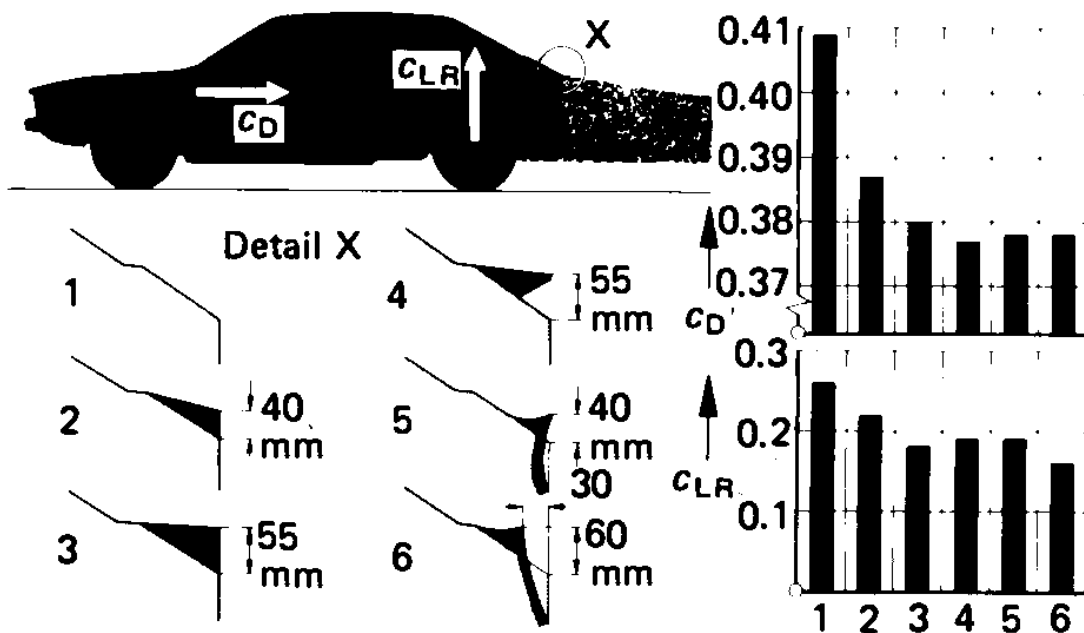
<sup>1</sup> HORIBA MIRA Ltd. je britská firma zabývající se měřením automobilů. Zkráceně jen MIRA – Motor Industry Research Association

## 4.2 Tvarové detaily ovlivňující úplav

### 4.2.1 Zadní spoiler

Zadní spoiler bývá umístěn na konci vrchní části karoserie. U vozidel typu sedan je umístěn na horní hraně kufru nebo nad ní a u karoserií hatchback a kombi je na konci střechy.

Primární funkcí zadního spoileru je snižovat vztlak na zadní nápravě vozidla. Tvarově se jedná o křídlo se záporným úhlem náběhu, které vytváří přítlak v zadní části vozu místo vztlaku (jak je tomu u letadel). V závislosti na tvaru a umístění zadního spoileru se mění i koeficient odporu. Z Obrázku 4.3 je vidět, že nelze předem určit, jestli se budou koeficienty snižovat nebo zvyšovat. [2]



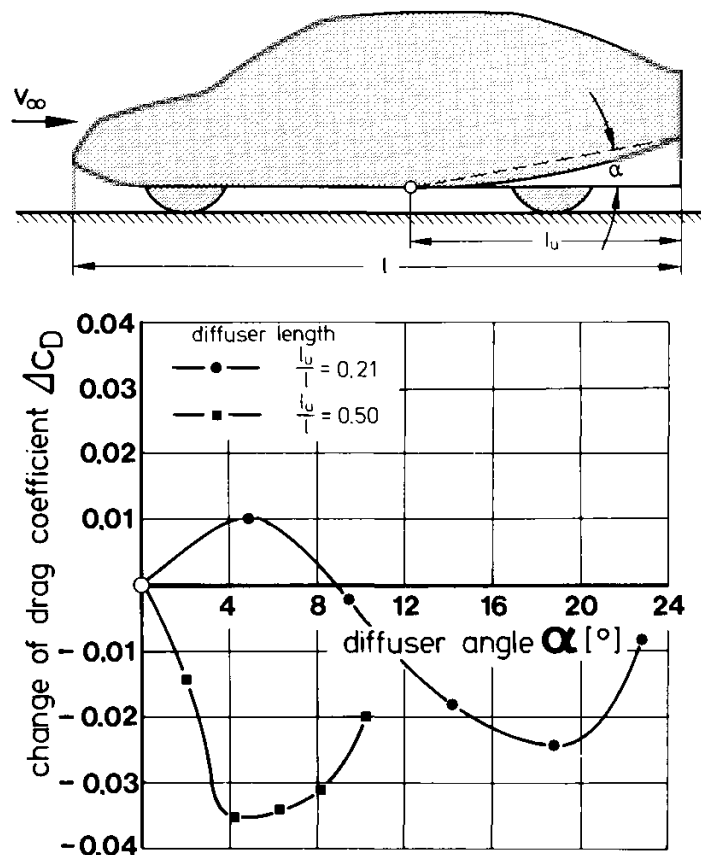
Obrázek 4.3 Vývoj zadního spoileru na vozidle VW Scirocco [2]

#### 4.2.2 Difuzor

Difuzor je součástí podvozku a nachází se v jeho zadní části. Zvýšení zadní části podvozku si můžeme všimnout téměř na všech osobních vozidlech.

Difuzor je rozšiřující se kanál mezi vozovkou a podvozkem vozidla. Pod vozidlem je vlivem urychlování proudu vzduchu nižší tlak v okolí. Difuzor tento tlakový rozdíl na konci podvozku vyrovnává, čímž přispívá ke snížení turbulencí v úplavu. [2]

Vliv délky a úhlu difuzoru na koeficient odporu je na Obrázku 4.4.



Obrázek 4.4 Vliv délky a úhlu difuzoru na koeficient odporu [2]

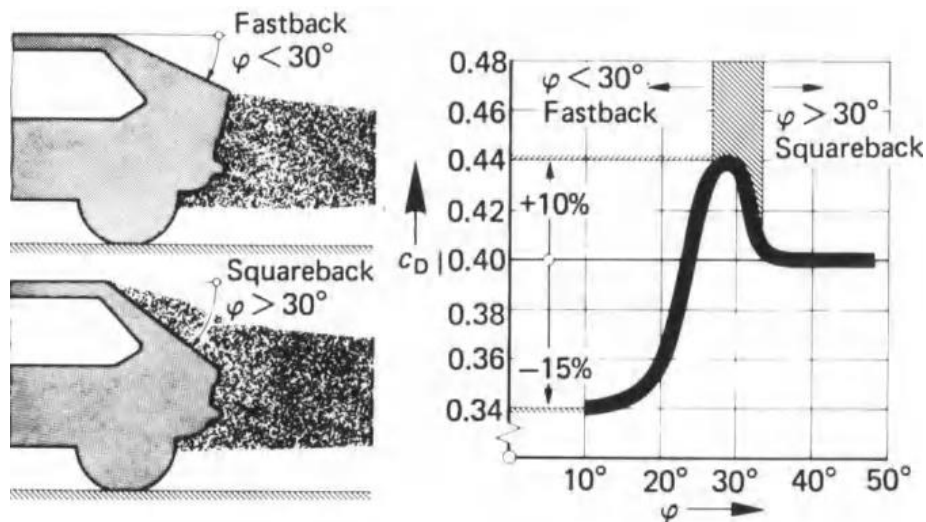


### 4.2.3 Sklon zadního okna a C sloupků

Zadní sklo je na každém vozidle. Aby nedocházelo k nestabilnímu proudění a aero-akustickým jevům, je potřeba zajistit jeho správné obtékání.

Pro vozidla kombi a hatchback je úhel odklonu zadního skla od střechy poměrně veliký (více než  $50^\circ$ ). Na konci střechy nebo na pomocném střešním spoileru dochází k úplnému odtržení proudění. Pro vozidla sedan a liftback je ale důležité si dát pozor na úhel okolo  $30^\circ$ . Při tomto úhlu je proudění nestabilní a odporový koeficient skokově narůstá mezi hodnotami úhlu  $20 - 30^\circ$  viz Obrázek 4.5. [2]

Řešením při výrobě vozidel, u kterých je požadován sklon zadního okna v kritickém rozmezí  $20 - 30^\circ$ , je přidání dostatečně dlouhého střešního spoileru, který zajistí odtržení vzduchu

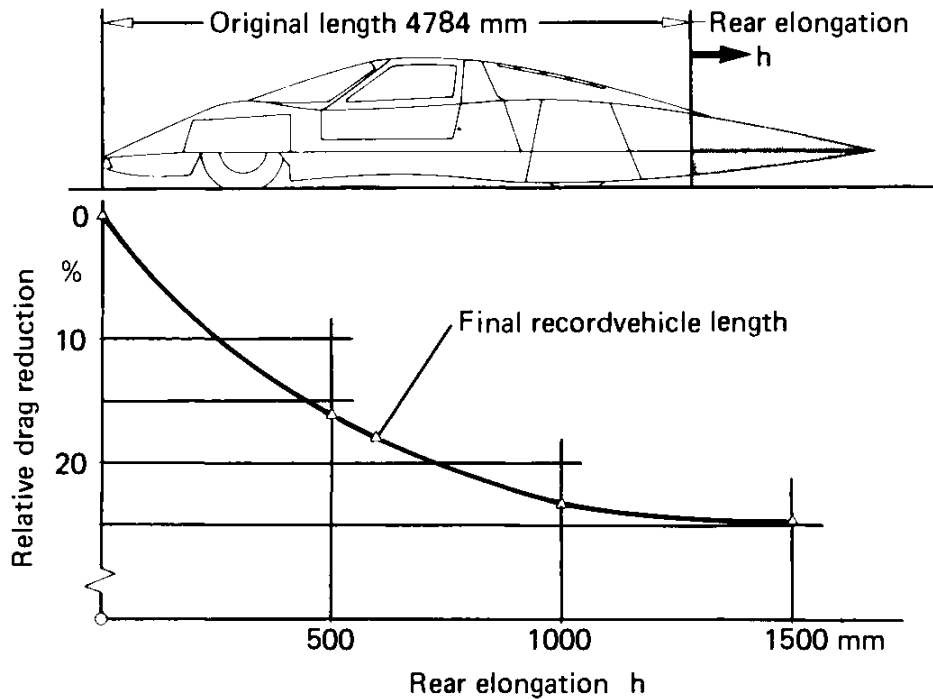


Obrázek 4.5 Vliv úhlu zadního okna na odporový koeficient [2]

### 4.2.4 Prodloužení zádě „Boat-tailing“

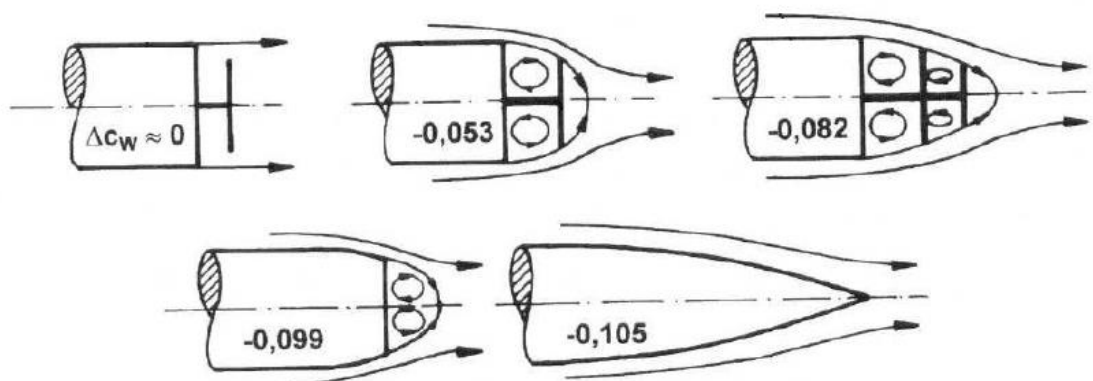
O podobnost vozidla s leteckým profilem se snažili výrobci vozů už ve 40. letech 19. století. Prostor zužující se zádě je ale špatně využitelný a proto od něj bylo upuštěno. Alespoň v takové podobě, která je zřejmá na první pohled.

Přesto se na vozidlech projevuje protahováním střechy do střešního spoileru, zužováním a protahováním celé karoserie (viz Obrázek 4.6) a také je stěžejním prvkem vozidel překračující rekordní rychlosti.



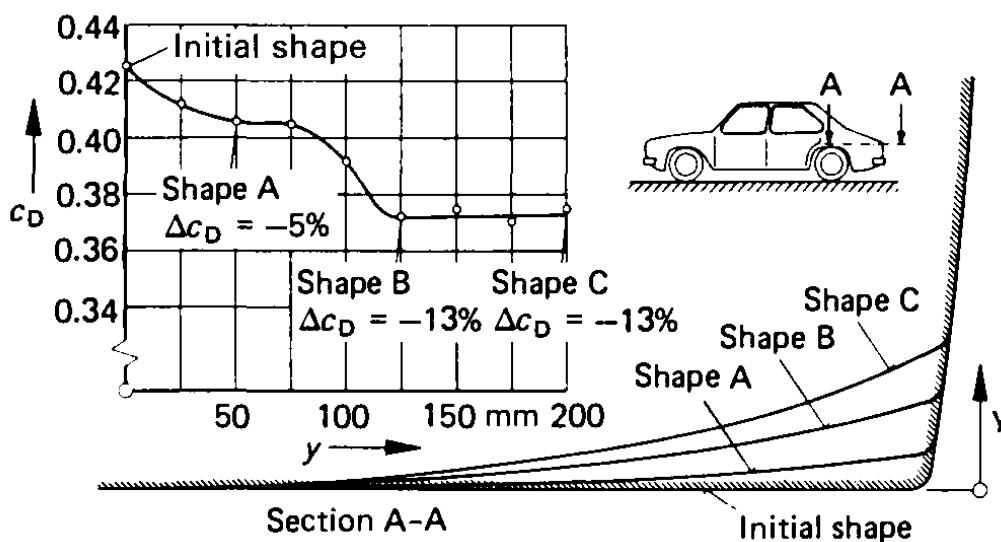
Obrázek 4.6 Vliv boat-tailingu na snížení odporu vozidla [2]

Mair ve své studii dokázal, že prodloužením obyčejného válce viz Obrázek 4.7 obtékaného ve směru jeho osy lze dosáhnout zlepšení  $\Delta c_D = -0,1$ . [18]



Obrázek 4.7 Snížení odporu válce pomocí boat-tailingu [19]

Aplikace boat-tailingu v praxi je zobrazena na Obrázku 4.8. Zadní část karoserie je zužována z původně téměř hranatého tvaru. Zlepšení o 5% bylo dosaženo už při posunutí hrany o pouhých 50 mm ke středu vozidla a o 13% při posunutí o 100 mm.



Obrázek 4.8 Vliv zužování karoserie na odporový koeficient [2]

## 5 Aerodynamický návrh zařízení

Úplav za vozidlem produkuje aerodynamický odpor a pokud se ho podaří zmenšit, zlepší se obtékání vozu a jeho odporový koeficient. Vyplněním úplavu tandemovým úložným prostorem, který bude protažením karoserie, se tvar vozidla blížící se obdélníku změní v kapkovitý tvar. Takové tary karoserií byly běžné ve 40. letech 19. století, ale kvůli značnému prodloužení vozidla a špatné využitelnosti zadního prostoru od nich bylo upuštěno.

### 5.1 Výběr vhodného vozu

Návrh tandemového úložného prostoru bude vázán na jednu konkrétní karoserii vozidla. Takové vozidlo je potřeba vybrat s ohledem na záměr zvýšit úložný prostor a zároveň snížit emise CO<sub>2</sub>. Vozy vyšší třídy poskytují samy o sobě velký zavazadlový prostor a stejně na tom jsou i karoserie typu kombi. Vhodnější bude tedy volit vůz ze střední nebo nižší třídy s malým zavazadlovým prostorem ve variantě sedan nebo hatchback.

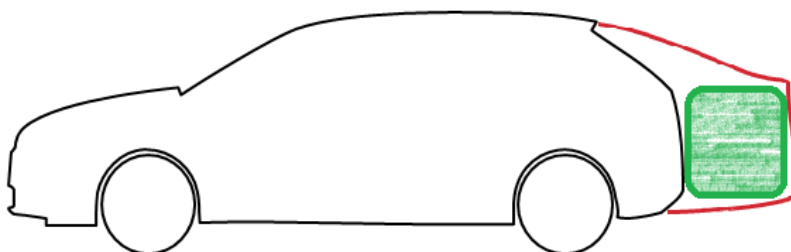
Současně by neměl být vůz příliš malý (např. Škoda Citigo), aby měl tandemový úložný prostor smysl pro použití na dovolenou namísto střešního boxu. Při delších trasách jede vozidlo vyšší rychlostí, která kvadraticky zvyšuje aerodynamický odpor. To poskytuje prostor pro větší energetickou úsporu a menší emise CO<sub>2</sub>.

Těmto požadavkům velmi dobře vyhovuje vůz Škoda Fabia v krátké verzi hatchback, která je ze střední třídy vozidel s malým kufrem a je často využíván rodinami i na delší trasy.

## 5.2 Idea návrhu úložného prostoru

Tandemový úložný prostor bude umístěn v zadní části karoserie. Připevnění na tažné zařízení, obdobně jako je tomu u nosičů kol, se jeví jako optimální. Snadná a rychlá montáž je velkou výhodou.

Při rešerši pasivních prvků ovlivňujících úplav byly zjištěny tvarové detaily, které zlepšují aerodynamiku. Stěžejním bodem pro návrh je tzv. *boat-tailing*, který protahuje obrysy vozidla a současně zmenšuje plochu průřezu kolmou na směr jízdy. Díky tomu se posune místo odtržení proudění a zmenší se plocha zádě, na kterou působí podtlak brzdící vozidlo.



Obrázek 5.1 Umístění úložného prostoru za vozidlo

Tandemový úložný prostor musí být celý schovaný za vozidlem a musí plynule navazovat na tvar karoserie, tím bude zajištěno vhodné obtékání. Proudnice v ideálním případě přilnou k povrchu úložného prostoru.

## 5.3 Metodika

Vstupní data byla převzata z dat poskytnutých firmou Škoda Auto, a.s. a jednalo se o výrobní stav modelové řady Škoda Fabia III, rok výroby 2015, ve verzi hatchback (krátká verze) o rozměrech:

Délka: 3992 mm

Šířka: 1732 mm

Výška: 1467 mm

Rozvor: 2470 mm

Objem zavazadlového prostoru: 330l [9]



Obrázek 5.2 Základní rozměry vozidla Škoda Fabia III [7]

Formát převzatých dat byl \*.ansa a výjimečně \*.obj (objekt –to byly většinou tvarově složité součásti nepotřebné k analýze vnějšího obtékání vozidla, např. motor, převodovka, chladicí potrubí, vnitřní prolisy světlometů, část výfuku v mot. prostoru, odhlučnění kapoty a další).

Díly dodané ve formátu OBJ jsou díly, které jsou tvarově velice složité, a zachování geometrie u nich nemá pro účely vývoje

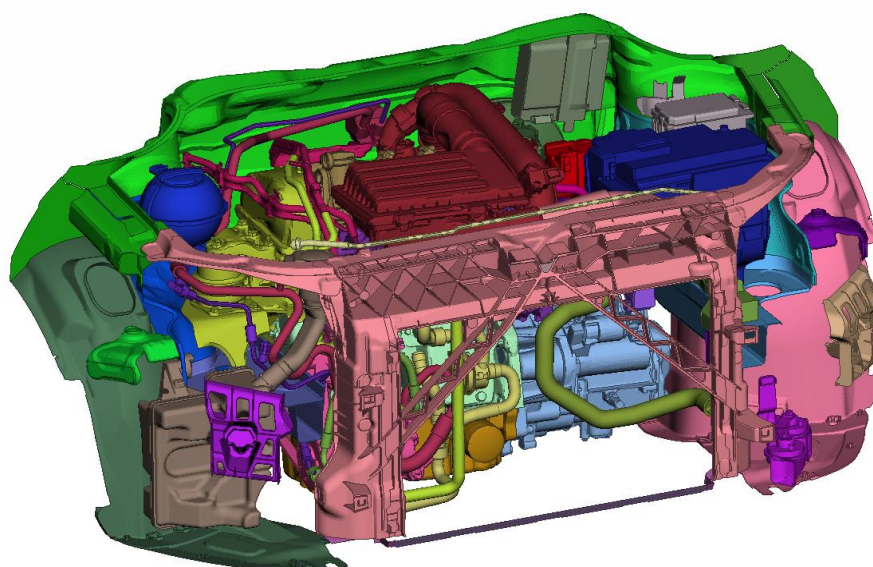
aerodynamiky žádný smysl. Formát ANSA je oproti tomu velmi vhodný pro další úpravy, protože zachovává geometrii prvků.

### 5.3.1 Odstranění nepotřebné geometrie

Formát výchozích dat předurčil k úpravám geometrie vozu software ANSA v16.2.3. Jedná se o velmi sofistikovaný, ale zároveň intuitivní program pro tvorbu a úpravu geometrie, síťování, analýzu a další úpravy modelů.

Importovaná geometrie zahrnovala všechny detaily vozidla, tak jak je skutečně sériově vyráběno. Protože cílem práce byl návrh tandemového úložného prostoru za vozidlo s ohledem pouze na vnější aerodynamiku vozidla, bylo vhodné se nejdříve zbavit nepodstatných detailů a vnitřních částí vozidla, které nebudou mít na výpočet znatelný vliv. Jejich ponechání v modelu by pouze prodlužovalo výpočetní čas, zejména tvorbou sítě.

Všechny díly, které nezasahovaly do povrchu vozidla nebo jeho částí, byly z modelu odebrány. Jednalo se o celý motor a interiér vozidla.



Obrázek 5.3 Čelní pohled do motorového prostoru

### 5.3.2 Zaslepení otvorů

Přijatelným zjednodušením je odstranění motorového prostoru, který nebude mít na studii úložného prostoru významný vliv. Proto je nutné zaslepit všechny otvory, kterým by mohl vzduch zatéci do oblasti v okolí motoru.

Pomocí funkcí *Project* byly vytvořeny okrajové křivky a pomocí *Faces > New > Planar* nebo *Fitted plane* byly vytvořeny plochy, které překryly všechny nežádoucí otvory. Spolu s tím byl zakryt i tovární znak vozidla.

Na následujících obrázcích je možné srovnat model bez zalepených otvorů a model po zalepení masky vozu.



Obrázek 5.4  
Nezalepený model



Obrázek 5.5  
Zalepený model

Tak jako na masce vozu byly vyhledány a zalepeny i ostatní otvory (u předních stěračů, na podvozku, u zadních podběhů a další. Po ruční kontrole byla v programu ANSA spuštěna kontrola na zatečení. Po volbě výchozího bodu, ze kterého ANSA testuje, kde je hranice prostoru, se vyznačí proudnice možného zatečení (pokud nějaké existují). Díky tomu lze jednoduše identifikovat ještě otevřené malé otvory.

Tímto způsobem objevené otvory byly zalepeny a zkontrolovaný model (viz Obrázek 5.6) lze použít jako vstup do výpočetního software.





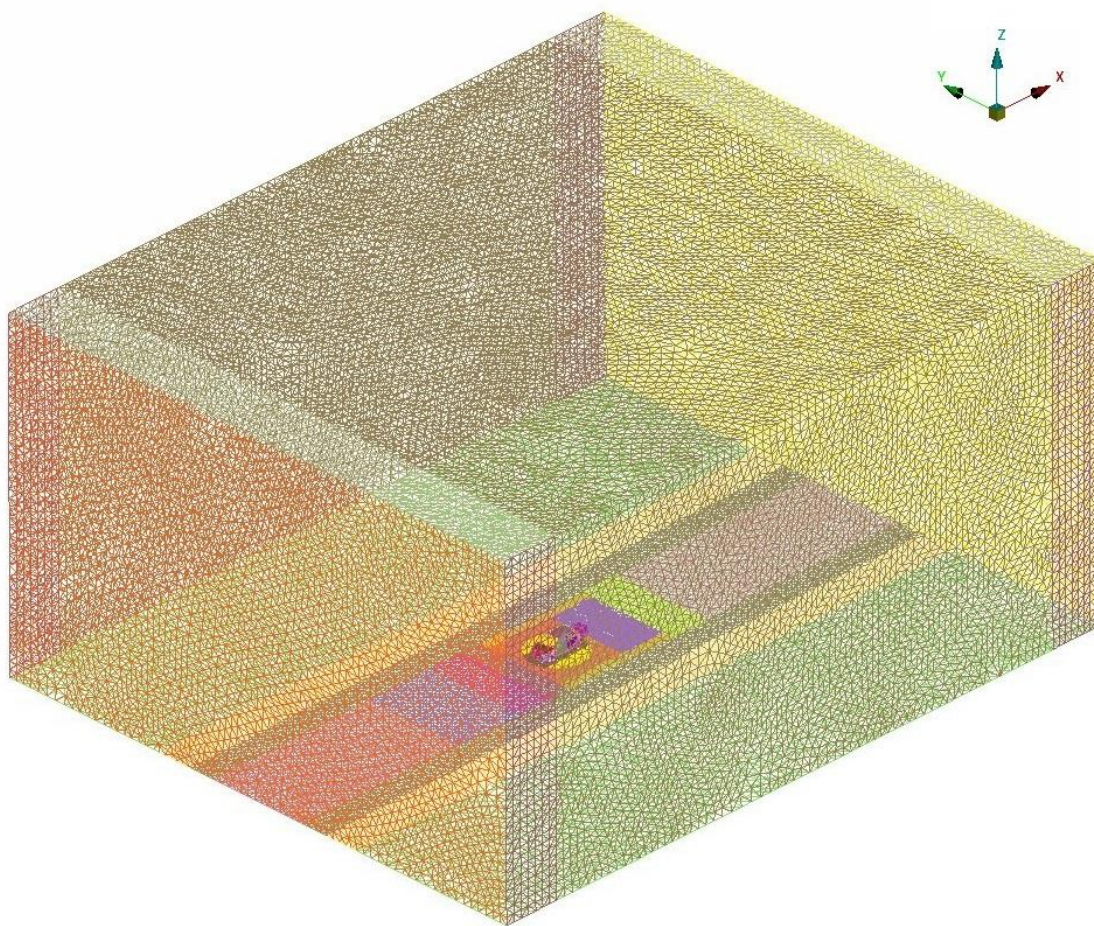
Obrázek 5.6 Zalepená karoserie vozu

V programu ANSA je také možné vytvořit výpočetní síť pomocí příkazů *Mesh Generation > Free (Element type: Tria)* (Trojúhelníková povrchová síť se volitelnou délkou strany) a následně jí použít jako vstup do výpočetního programu. V tomto případě bylo ale využito standardů firmy Škoda a generování sítě zajistil program OpenFOAM. Ten byl také použit i pro samotnou CFD simulaci.

### 5.3.3 Objemová síť v okolí vozidla

Okolo vozidla je vytvořena objemová síť prvků, na jejíž základě bude vypočteno proudění vzduchu v dostatečně velkém prostoru. Tím se rozumí takový rozměr, kde je proudění již jen minimálně ovlivněno vloženým objektem (vozidlem).

Celá výpočetní oblast s graficky rozlišenými oblastmi různé hustoty sítě je zobrazena na Obrázku 5.7.



*Obrázek 5.7 Objemová výpočetní síť*

Do výpočtu byly přidány všechny komponenty vozu a program OpenFOAM je identifikuje na základě jejich PID<sup>2</sup>u. Tím je v okolí každého dílu vytvořena správná velikost výpočetních elementů. Síť se hodně liší v závislosti na místě. Na příklad v blízkosti povrchu vozu mají elementy vhodný tvar pro výpočet mezní vrstvy, blízko auta a na důležitých místech je síť velice jemná a ve velké vzdálenosti od vozu je síť naopak hrubší. To vytváří kompromis mezi přesností a časovou náročností výpočtu.

Model v této podobě poslouží jako referenční výpočet, se kterým bude možné srovnat zlepšení nebo zhoršení aerodynamiky celé soupravy (včetně tandemového úložného prostoru).

---

<sup>2</sup> PID – Property ID, zajišťuje jednoznačnou identifikaci prvku, která slouží k nastavení správných výpočetních proměnných

## 5.4 Tvorba tandemového úložného prostoru

Jako hranice rozměrů, které by model neměl překračovat, byly zvoleny rozměry zadní části vozidla. Při jejich překročení by úložný prostor zasahoval do volného proudu vzduchu. Důsledkem by bylo skokové navýšení aerodynamického odporu. Maximální délka byla zvolena s ohledem na maximální prodloužení celé soupravy, kdy ještě není významně narušen uživatelský komfort vozu.

Max. rozměry úložného prostoru

Šířka: 1700 mm

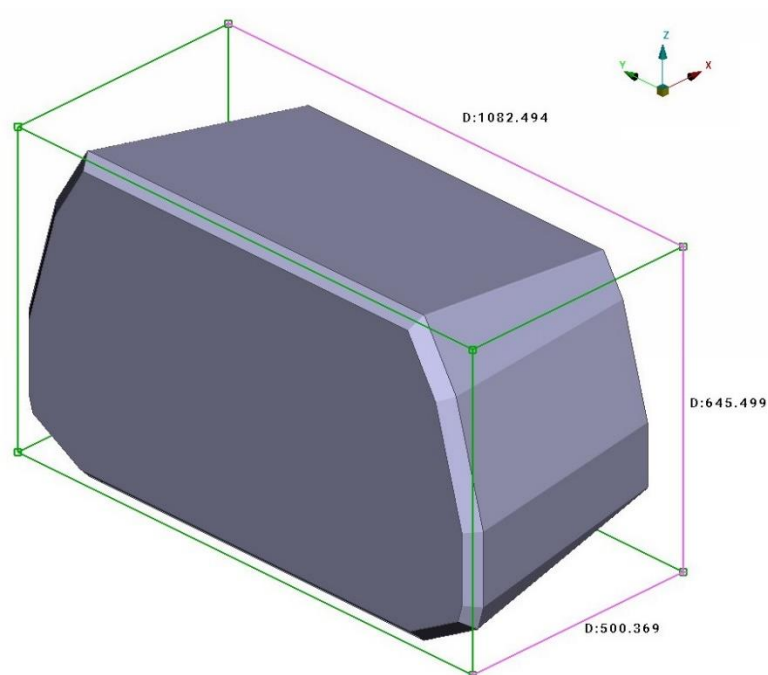
Výška: 1000 mm

Délka: 700 mm

Ještě před tvorbou prvního modelu byly brány v potaz designové návrhy (viz kapitola 6) a zároveň požadavek na snížení aerodynamického odporu. Pro první model byl navrhnut úložný prostor vyplňující část úplavu a to ještě takový, aby nezasahoval přes zadní světlometry.

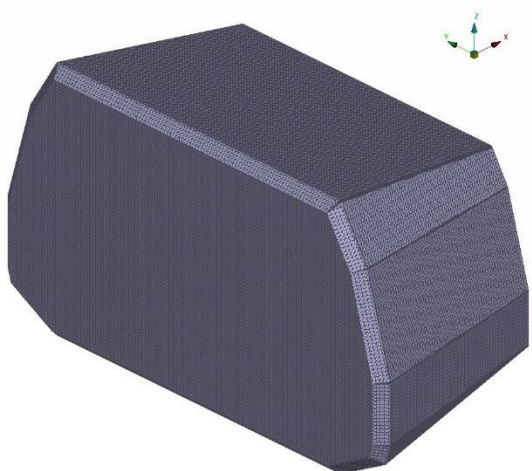
Výchozím bodem pro tvorbu modelu byl konec tažného zařízení. Tam bude úložný prostor připojen k vozidlu. V příčné rovině *Surface> Plane* byl vytvořen náčrt a z něj plocha pomocí *Faces> New*. Tento nárys byl vytažen, aby vytvořil 3D objekt a dále zkosen a zaoblen pomocí *Surface> Extrude, Surface> Fillet a Dach*.

Takto vytvořený model je na Obrázku 5.8 i s okótovanými maximálními rozměry. Zelené hrany tvoří nejmenší kvádr okolo úložného prostoru.



*Obrázek 5.8 Základní tvar úložného prostoru*

Plochy úložného prostoru byly vysítovány třia prvky, kterých bylo celkem 19 328. Povrchová síť je zobrazena na Obrázku 5.9.



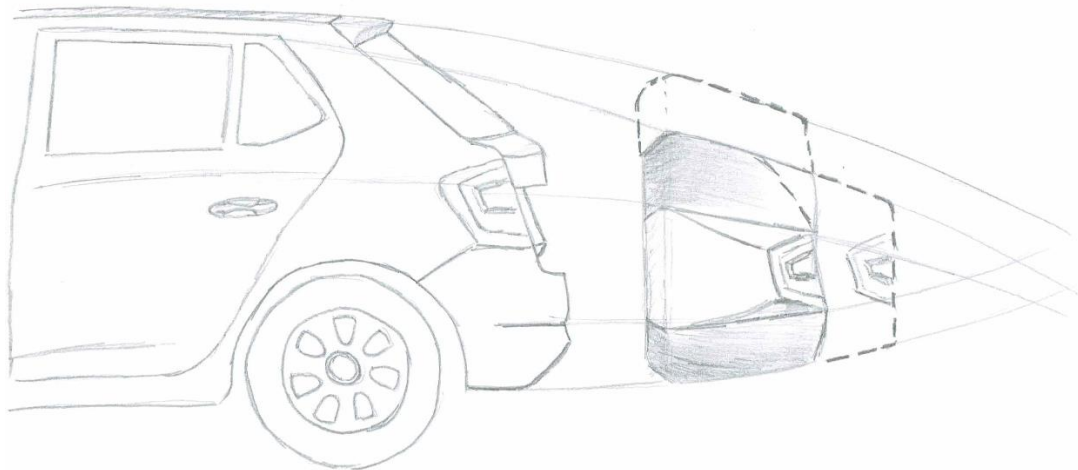
*Obrázek 5.9 Vysítovaný úložný prostor*



## 6 Úprava návrhu směrem k designu

Již při prvních návrzích úložného prostoru byl brán v úvahu design. Vizuální stránka komerčních produktů má totiž nezanedbatelný vliv na jejich tržní potenciál. Žádná výjimka se v tomto ohledu automobilů ani jejich příslušenství netýká. Vývojový inženýr proto musí myslet i na tento aspekt při tvorbě prototypů.

Pro úložný prostor vytvářený na míru jednomu vozu je tedy rozhodující sladění jeho tvaru s tvarem karoserie vozu. Vzhled celku musí působit dojmem vyvolávající souhru. Toho lze docílit společnými liniemi a podobnými prvky viz Obrázek 6.1.



*Obrázek 6.1 Skica úložného prostoru*

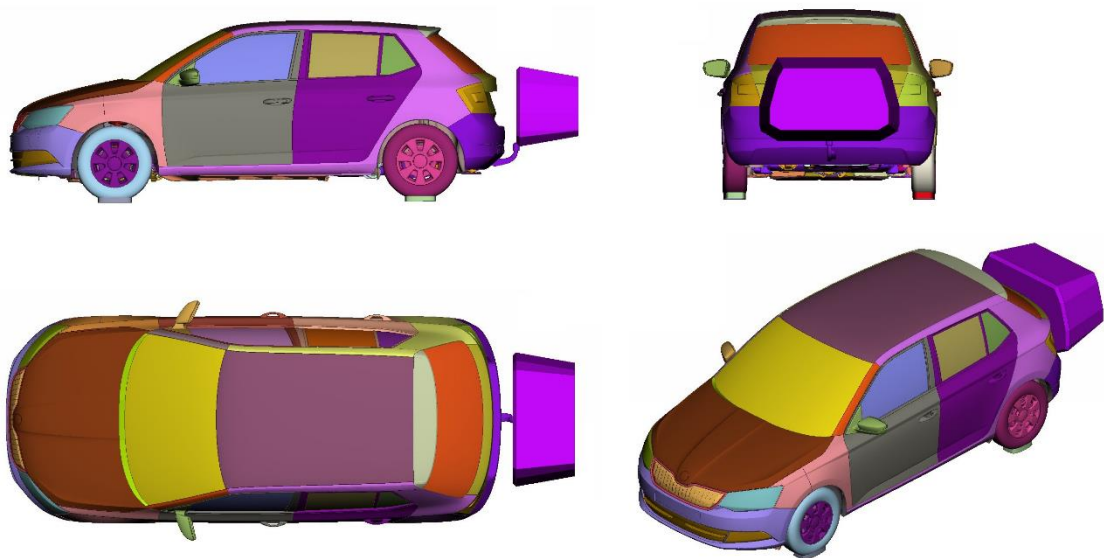
Obrázky jsou podkladem pro finální doladění úložného prostoru. To bude zahrnovat přidání všech potřebných prvků pro splnění zákonných nařízení. Může se jednat například o rámeček pro SPZ, vlastní zadní světlomety, reflexní prvky a další. Velikost a jejich umístění by mělo záviset na samostatné designové studii.

## 7 Aerodynamická optimalizace pomocí dostupných CFD nástrojů

Cílem diplomové práce bylo navrhnutí úložného prostoru s potenciálem na snížení aerodynamického odporu a emisí CO<sub>2</sub>. Proto byl jako reference zvolen CFD výpočet samostatného vozidla.

### 7.1 Výchozí varianta V001

První testovaná varianta V001 (Obrázek 7.1) byla vhodně umístěna do úplavu vozu, ale na aerodynamiku vozu neměla téměř žádný vliv.  $\Delta c_D^{V001} = -0,0007$  nepřináší žádné zlepšení, ale zvětšuje zavazadlový prostor o cca 250 *litrů*.



Obrázek 7.1 První testovaná varianta V001

### 7.2 Varianta V258 po intuitivních úpravách

Na základě vizuální analýzy obtékání, bylo provedeno hodně úprav původních rozměrů. Mezi největší z nich patřilo rozšíření přední části, zúžení šířky na zádi a zmenšení výšky na zádi. Vzhledově byl tvar úložného prostoru zachován (hlavní linie se nezměnily), jen více navazoval na vozidlo a lépe kopíroval obtékání v oblasti úplavu.

Varianta V258 po těchto rozměrových úpravách poskytuje významné snížení aerodynamického odporu vozidla. Tvar této varianty úložného prostoru zlepšuje odporový koeficient o  $\Delta c_D^{V258} = -0,015$ .

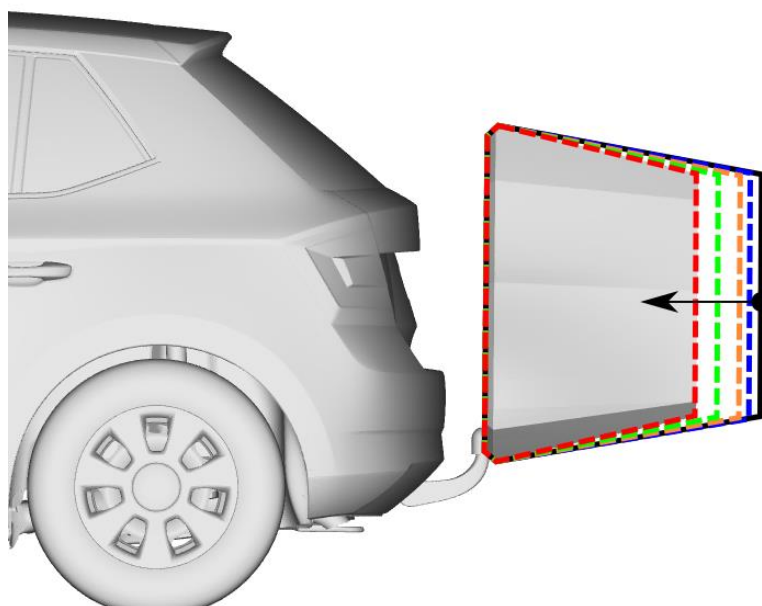
### **7.3 Vliv charakteristických rozměrů na odpor**

Pro objektivní rozhodnutí o konečných rozměrech úložného prostoru je vhodné zjistit, jaké rozměry mají na aerodynamiku velký vliv a jaké lze naopak libovolně měnit bez negativních dopadů na odpor soupravy. Jako vhodné parametry pro analýzu se jeví hlavní rozměry (délka, šířka, výška) a úhly zkosení (z vrchu, zespod a z boků).

Proto byl dosavadní model upraven v programu ANSA pomocí morphovacích nástrojů. Model byl obalen a rozdělen do morphovacích boxů. Vrcholy těchto boxů ležely v důležitých bodech (většinou rohy úložného prostoru). Zavedení parametrů zjednoduší stejný typ úpravy. Využity byly funkce *Morphing* > *Slide* / *Translate*.

#### **7.3.1 Vliv délky úložného prostoru na odpor soupravy**

Délka výchozí varianty V258 byla na hranici zvolených maximálních rozměrů. Proto zjišťování závislosti na délce bylo pouze zkracováním. S ohledem na velikost zavazadel byl nejkratší úložný prostor dlouhý 500 mm (varianta V304). Varianty jsou barevně vyznačeny na Obrázku 7.2.



Obrázek 7.2 Úprava délky úložného prostoru

Každý z upravených modelů byl znovu zadán k CFD výpočtu. Výsledky simulací byly vyhodnoceny a zpracovány do Tabulky 7.1.

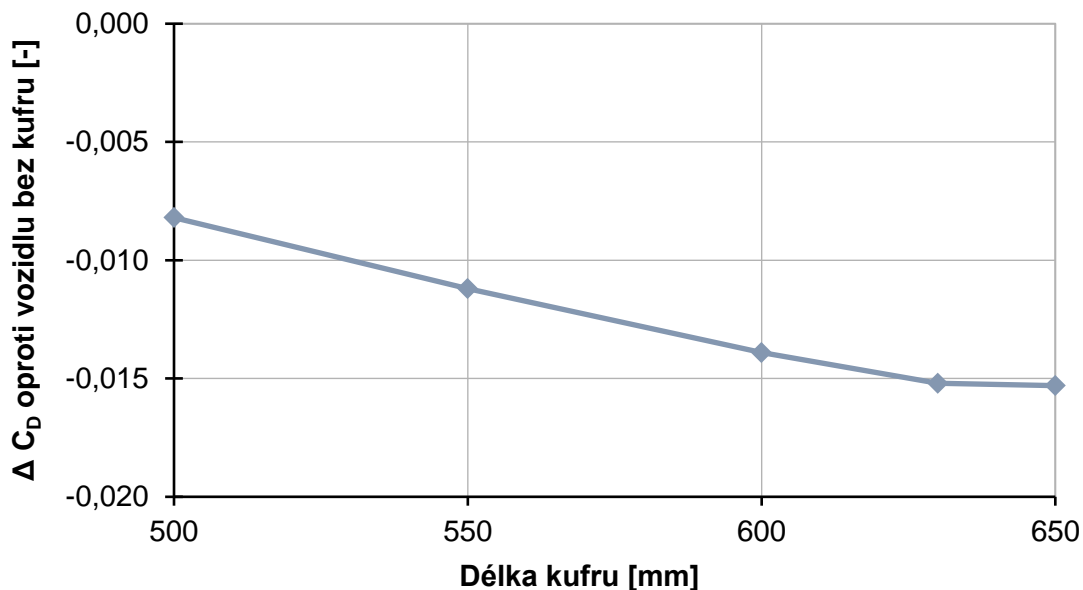
Tabulka 7.1 Přehled zlepšení  $c_D$  - závislost na délce

Varianta	Délka [mm]	$\Delta c_D$ [-]
V258	650	-0,0153
V301	630	-0,0152
V302	600	-0,0139
V303	550	-0,0112
V304	500	-0,0082

Ze srovnání koeficientů  $c_D$  všech variant vyplývá, že delší úložný prostor je aerodynamicky přínosnější. Při pohledu na Graf 7.1 je ale vidět, že to platí jen do určité délky (cca 630 mm). Další prodlužování pak má čím dál menší efekt.

To by ale také mohlo poukazovat na nedostatečné zkosení (zmenšení průřezu) úložné prostoru, při větších délkách.

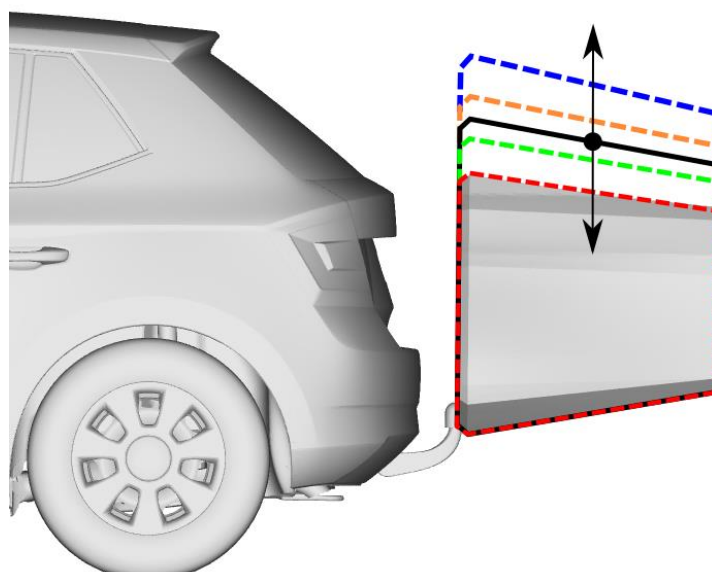




Graf 7.1 Změna  $c_D$  v závislosti na délce úložného prostoru

### 7.3.2 Vliv výšky úložného prostoru na odpor soupravy

Vrchní část varianty úložného prostoru V258 není prodloužením střechy vozidla. Proto je zde očekáván velký přínos. Testována bude změna výšky v obou směrech. Při zvětšení bude zakryt výhled zadním oknem. To ničemu nebrání, protože plně naložený zavazadlový prostor nebo připojený větší přívěs mají stejný následek. Pro zmenšení je vhodným důvodem například menší váha úložného prostoru.

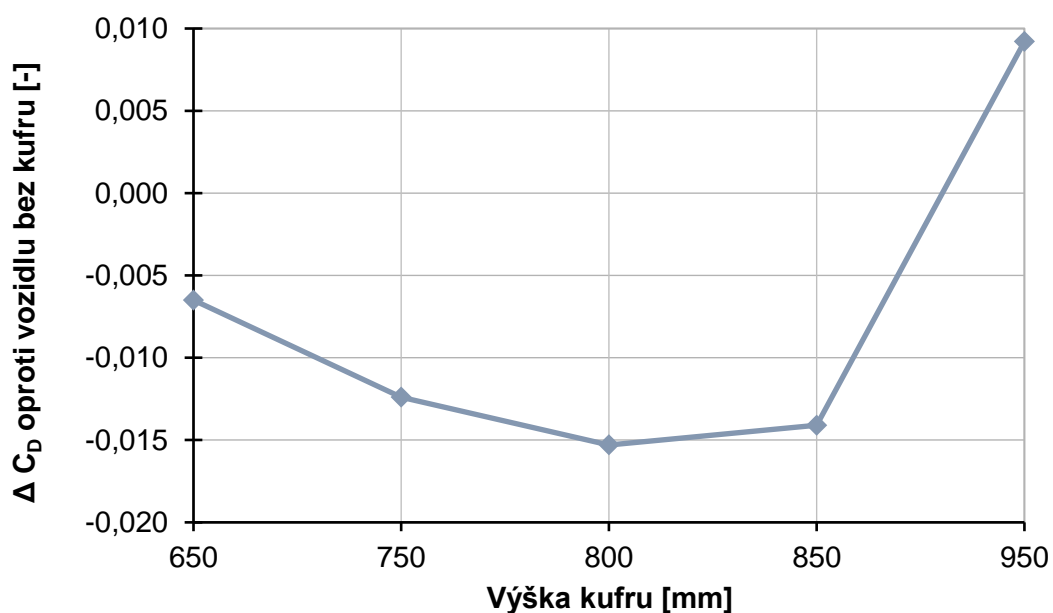


Obrázek 7.3 Úprava výšky úložného prostoru

V Tabulce 7.2 jsou uvedeny výsledky simulací. Vhodná výška úložného prostoru je v rozmezí 780 – 850 mm. Při této výšce je již z 50 % zakryt výhled zadním sklem. Pro zachování výhledu by bylo vhodné zvolit variantu V313, která poskytuje menší, ale pořád relativně dobrý aerodynamický přínos.

Tabulka 7.2 Přehled zlepšení  $c_D$  - závislost na výšce

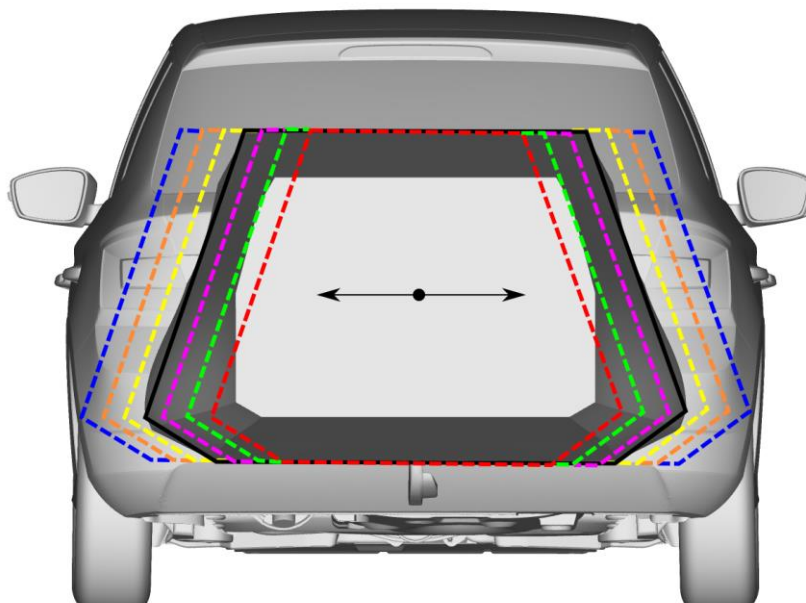
Varianta	Výška [mm]	$\Delta c_D$ [-]
V311	950	0,0092
V312	850	-0,0141
V258	800	-0,0153
V313	750	-0,0124
V314	650	-0,0065



Graf 7.2 Změna  $c_D$  v závislosti na výšce úložného prostoru

### 7.3.3 Vliv šířky úložného prostoru na odpor soupravy

Výchozí šířka úložného prostoru byla volena tak, aby nezakrývala zadní světlometry. Úložný prostor by poté nemusel mít svoje vlastní světlometry, ale pouze SPZ. Tím se zjednoduší a zlevní jeho výroba. Nevýhodou takového řešení může být nedostatečná šířka pro vhodné tvarování úplavu.



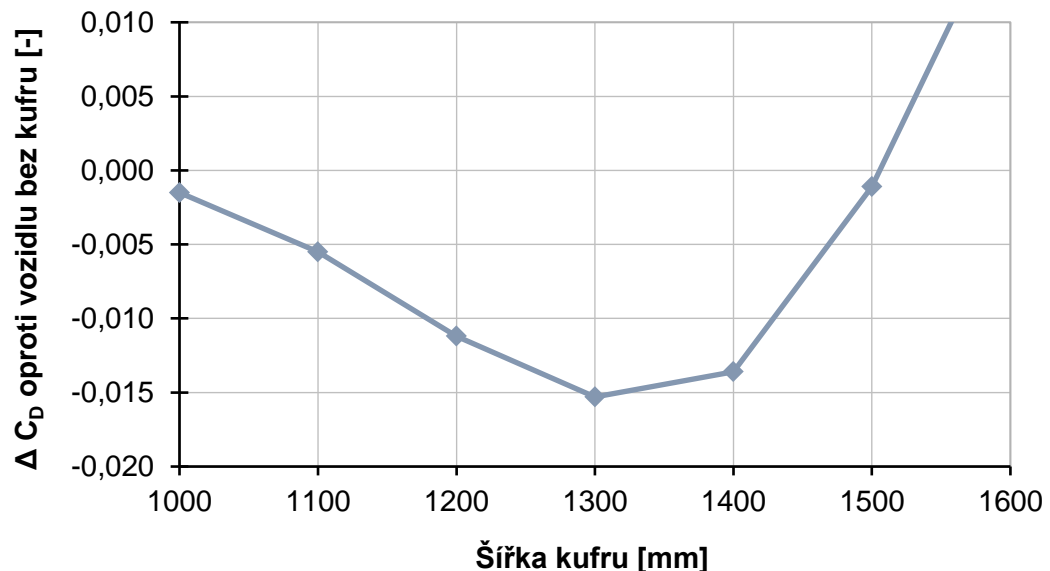
Obrázek 7.4 Úprava šířky úložného prostoru

Změny odporového koeficientu pro různé šíře úložného prostoru odstupňované po 100 mm jsou uvedeny v Tabulce 7.3.

Tabulka 7.3 Přehled zlepšení  $c_D$  - závislost na šířce

Varianta	Šířka [mm]	$\Delta c_D$ [-]
V321	1000	-0,0015
V322	1100	-0,0055
V323	1200	-0,0112
V258	1300	-0,0153
V324	1400	-0,0136
V325	1500	-0,0011
V326	1600	0,0183

Z grafu je zřejmé, že šíře větší než  $1400\text{ mm}$  zasahuje mimo úplav vozu a narušuje jinak neovlivněné proudění. Největšího přínosu dosahuje výchozí varianta V258. Jakékoliv změny v šířce mají negativní dopad na odporový koeficient. Doporučená šíře je tedy  $1300\text{ mm}$  a má již zmíněnou výhodu, že nezakrývá zadní světlometry.

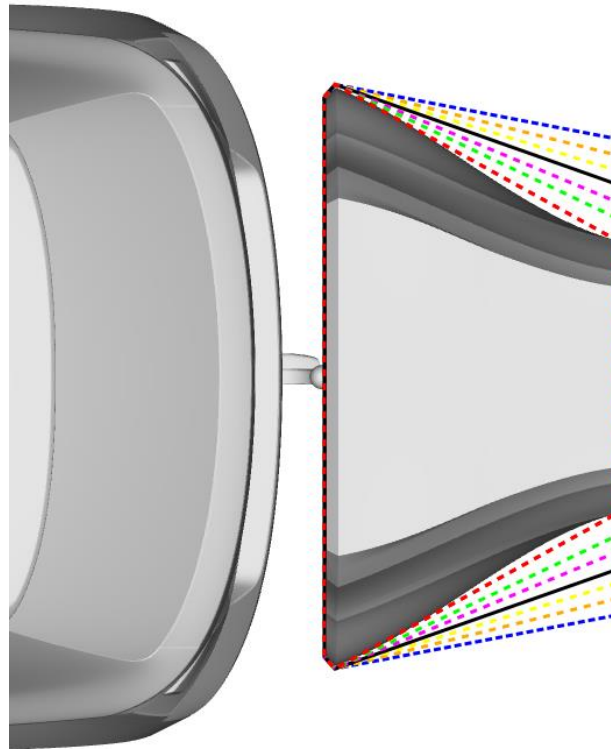


Graf 7.3 Změna  $c_D$  v závislosti na šířce úložného prostoru

#### 7.3.4 Vliv úhlu boků úložného prostoru na odpor soupravy

Změna úhlu na všech stěnách úložného prostoru mění zadní plochu, na kterou působí podtlak v úplavu a tím snižuje výslednou sílu působící na vozidlo. To funguje, pokud odtržený proud vzduchu znovu přilne k povrchu úložného prostoru.

Testování citlivosti na úhel zkosení bočních stěn bylo provedeno v rozmezí  $1 - 20^\circ$ . Úhel je v každé horizontální rovině jinak velký. Pro tuto analýzu byla zvolena rovina měření úhlu uprostřed úložného prostoru (ve výšce  $400\text{ mm}$  od nejnižší hrany úložného prostoru).

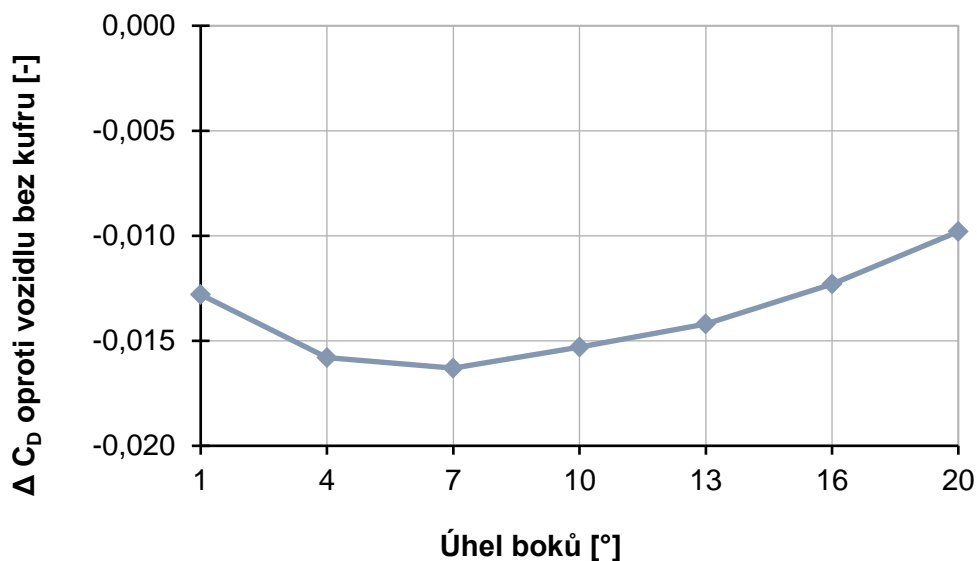


Obrázek 7.5 Úprava úhlu boků úložného prostoru

V Tabulce 7.6 je vidět, že aerodynamický koeficient  $c_D$  není příliš citlivý na úhel boků. Nejvhodnější je varianta V343 s úhlem  $7^\circ$ . Protože se úhel zkosení boků se nejeví jako významný parametr, bylo by vhodné upřednostnit využitelnost prostoru, která bude větší při menším úhlu zkosení boků.

Tabulka 7.4 Přehled zlepšení  $c_D$  - závislost na úhlu boků

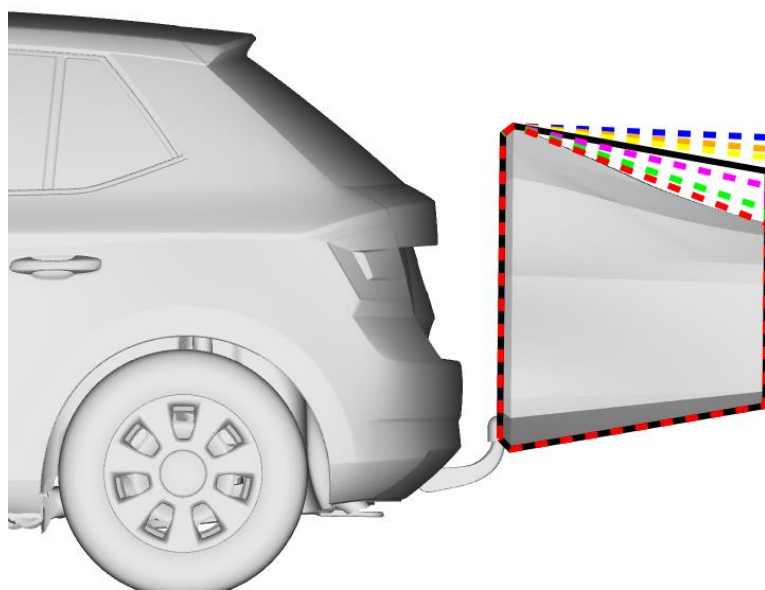
Varianta	Úhel boků [°]	$\Delta c_D$ [-]
V341	1	-0,013
V342	4	-0,016
V343	7	-0,016
V258	10	-0,015
V344	13	-0,014
V345	16	-0,012
V346	20	-0,010



Graf 7.4 Změna  $c_D$  v závislosti na úhlu boků úložného prostoru

### 7.3.5 Vliv úhlu střechy úložného prostoru na odpor soupravy

Pro střechu úložného prostoru volíme rozmezí testovaných úhlů stejné jako pro úhel zkosení boků.



Obrázek 7.6 Úprava úhlu střechy úložného prostoru

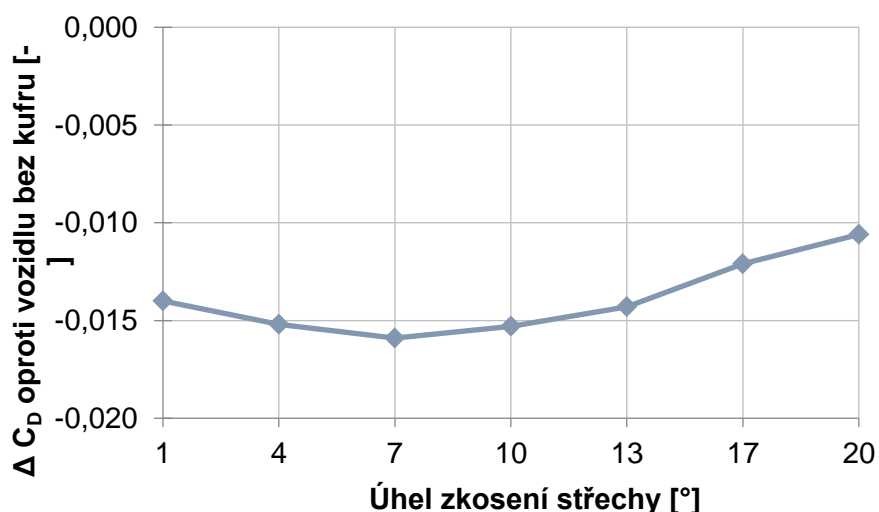
Při úhlech 1 – 13° nedochází téměř k žádné změně. Maximální rozdíl koeficientu odporu u těchto variant jsou pouze 2 tisíceiny  $\max(\Delta c_D^{1-13^\circ}) = 0,002$ . Stejně jako u bočnic bude nejvýhodnější volit variantu s malým úhlem, kvůli využitelnosti prostoru.

Tabulka 7.5 Přehled zlepšení  $c_D$  - závislost na úhlu střechy

Varianta	Úhel střechy [°]	$\Delta c_D$ [-]
V351	1	-0,014
V352	4	-0,015
V353	7	-0,016
V258	10	-0,015
V354	13	-0,014
V355	17	-0,012
V356	20	-0,011

Pravděpodobně z důvodu malé výšky úložného prostoru je ovlivnění odporového koeficientu úhlem střechy ještě menší než u úhlu boků. Také je důležité si uvědomit, že vzdálenost střechy vozidla a střechy úložného prostoru je větší než v případě bočnic. To by mohl být také důvod menší citlivosti.

Pokud by došlo z nějakého důvodu ke zvýšení úložného prostoru, je nutné provést znovu citlivost na úhel střechy. Mohla by se totiž výrazně lišit.

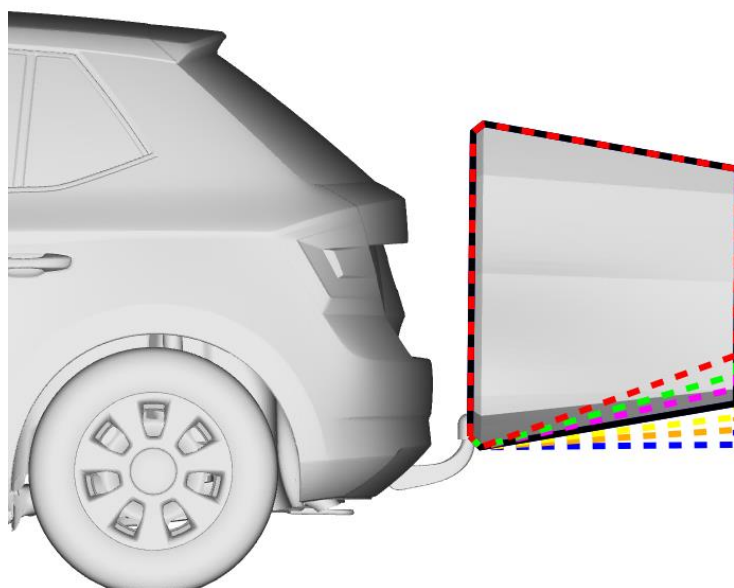


Graf 7.5 Změna  $c_D$  v závislosti na úhlu střechy úložného prostoru

### 7.3.6 Vliv úhlu dna úložného prostoru na odpor soupravy

Úhel dna úložného prostoru se chová jako difusor. Zpomaluje urychlené proudění opouštějící prostor pod vozidlem a vyrovnává rozdíl tlaků. Proudění je ale více rozrušeno vírem za zadními koly.

Rozmezí úhlů je shodné jako v předchozích případech 1 – 20°. Obrázek 7.7 znázorňuje testované varianty.



Obrázek 7.7 Úprava úhlu dna úložného prostoru

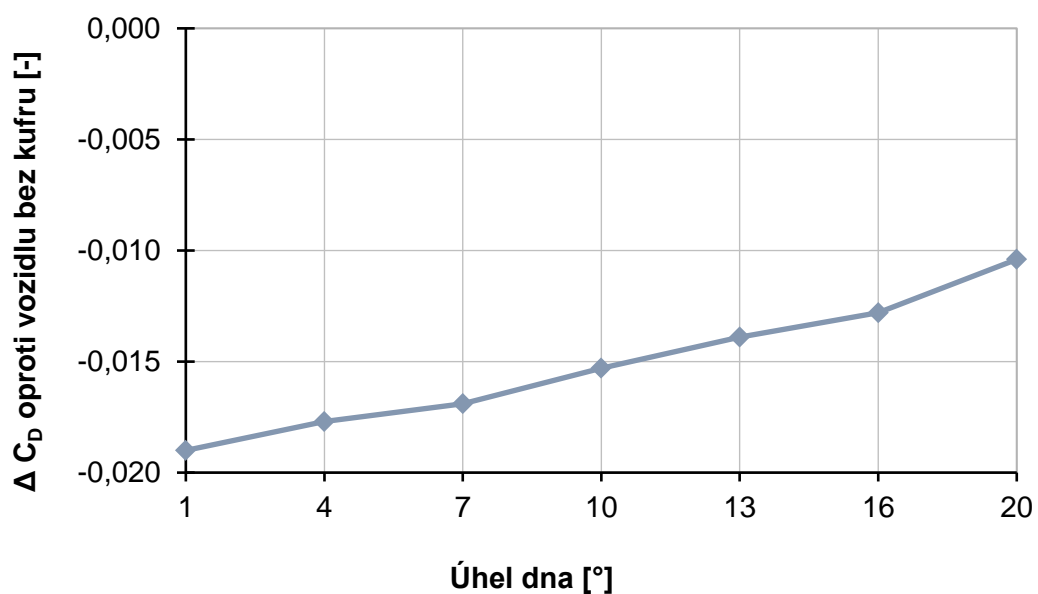
Výsledek citlivosti je u úhlu dna překvapivý. V celé testované oblasti je citlivost téměř lineární a nenabývá nikde svého maxima ani minima. V Tabulce 7.6 je vidět, že přibližně každé 2° zmenšeného úhlu dna přináší zlepšení parametru  $c_D$  o  $-0,001$ .

Pro konečný tvar úložného prostoru by bylo vhodné navrhnout vodorovné dno a případně ještě otestovat vliv vzdálenosti úložného prostoru od vozovky. Možná by nižší umístění mělo ještě větší aerodynamický přínos.



Tabulka 7.6 Přehled zlepšení  $c_D$  - závislost na úhlu dna

Varianta	Úhel dna [°]	$\Delta c_D$ [-]
V361	1	-0,019
V362	4	-0,018
V363	7	-0,017
V258	10	-0,015
V364	13	-0,014
V365	16	-0,013
V366	20	-0,010



Graf 7.6 Změna  $c_D$  v závislosti na úhlu dna úložného prostoru

## 8 Numerická analýza přínosu na emise CO<sub>2</sub>

Produkováno emise CO<sub>2</sub> lze předpovědět na základě známých parametrů vozidla a spalování paliva v motoru. Na emisích se podílí všechny jízdní odpory. Pro zjištění snížení emisí CO<sub>2</sub> přidáním tandemového úložného prostoru bude počítáno pouze s aerodynamickou silou působící při konstantní rychlosti. To odpovídá účelu použití úložného prostoru na velké vzdálenosti. Protože hmotnost úložného prostoru se nepředpokládá větší než maximálně několik desítek kg, bude její vliv na emise zanedbán.

### 8.1 Spotřeba paliva na překonání aerodynamického odporu

Pro výpočet byla zvolena diesellová varianta motorizace vozu 1.9 TDI 78kW. Údaje potřebné k výpočtu:

Součinitel odporu [9]  $c_D^{ref} = 0,321$

Čelní plocha vozu  $A = 2,1 \text{ m}^2$

Cestovní rychlost  $V_\infty = 140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 38,89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Ostatní konstanty nezávislé na volbě vozu:

Hustota vzduchu (při 15°C) [8]  $\rho_{air} = 1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Hustota nafty  $\rho_{nafta} = 840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Měrná efektivní spotřeba nafty  $m_{pe} = 180 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$

#### 8.1.1 Aerodynamická síla při jízdě konstantní rychlostí

Aerodynamickou sílu působící na vozidlo, které se pohybuje konstantní rychlostí po rovné vozovce, vypočteme ze vzorce (8.1).

$$D = \frac{1}{2} c_D A \rho_{air} V_\infty^2 \quad (8.1)$$

Pro náš případ byla vypočtena síla 544,5 N.

$$D^{ref} = \frac{1}{2} 0,321 * 2,1 * 1,225 * 38,89^2 = 544,5 N$$

### 8.1.2 Výkon potřebný k pokrytí aerodynamických ztrát

Této síle odpovídá při cestovní rychlosti  $V$  výkon dle rovnice (8.3)

$$P_D = D \cdot V \quad (8.2)$$

$$P_D = \frac{1}{2} c_w A \rho_{air} V_{\infty}^3 \quad (8.3)$$

S dosazenými hodnotami

$$P_D^{ref} = \frac{1}{2} 0,321 * 2,1 * 1,225 * 38,89^3 = 24283,3 W = 24,3 kW$$

### 8.1.3 Spotřeba paliva na 100km

Energii potřebná k pohonu vozidla byla získána z vypočteného výkonu  $E_D = P_D \cdot t$  a dosazena do rovnice (8.4), která udává spotřebu paliva vztaženou na 100 km. [4] [5]

$$m_{100} = \frac{E_D \cdot m_{pe}}{d \cdot \rho_{nafta}} = \frac{P_D \cdot m_{pe}}{V \cdot \rho_{nafta}} \quad (8.4)$$

Dráhová spotřeba paliva je:

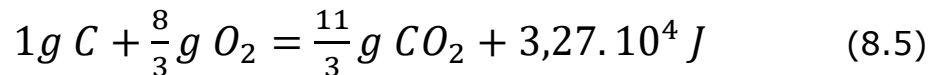
$$m_{100} = \frac{24,3 * 180}{140 * 840} 100 \frac{kW \cdot \frac{g}{kWh}}{\frac{km \cdot g}{h \cdot l}} = 3,72 \frac{l}{100km}$$

## 8.2 Emise CO<sub>2</sub> k překonání aerodynamického odporu

Produkováno CO<sub>2</sub> emise jsou přímo úměrné spotřebě paliva. Z chemické reakce spalování nafty je možné určit měrné emise CO<sub>2</sub>. Ty udávají množství vyprodukovaného plynu při spálení 1 g paliva.

### 8.2.1 Měrné emise CO<sub>2</sub>

Výpočet měrných emisí  $k$  vychází ze stechiometrické rovnice spalování uhlíku (8.5). Při spalování v motoru je produktem také voda ve formě páry. [4] [5]



Protože nafta obsahuje jen 86,1 % uhlíku je hodnota konstanty  $k$  úměrně zmenšena. Spálením 1 g nafty tedy vznikne:

$$k = 0,831 \frac{11}{3} g CO_2 = 3,047 \frac{g CO_2}{g nafty}$$

### 8.2.2 Produkce emisí na překonání aerodynamického odporu

Ze známé dráhové spotřeby paliva  $m_{100}$  a měrných emisí  $k$  lze snadno určit emise CO<sub>2</sub> vztahované na 1 km ujeté vzdálenosti.

$$emise CO_2 = k \frac{\rho_{nafta} \cdot m_{100}}{100} \quad (8.6)$$

$$emise CO_2 = 3,047 \frac{840 \cdot 3,72}{100} \cdot \frac{g CO_2}{g nafty} \frac{kg}{m} \frac{l}{100 km} = 95,1 \frac{g CO_2}{km}$$

Teoretická hodnota emisí vyprodukovaných jen k pokrytí aerodynamických ztrát při jízdě konstantní rychlostí 140 km.h<sup>-1</sup> je 95,1  $\frac{g CO_2}{km}$ . Jak je možné vyčíst z technických parametrů vozu, jsou skutečné emise i konstanta  $k$  nepatrně vyšší než teoretické hodnoty. Celkové udávané emise pro vůz Škoda Fabia III, 1.9 TDI, 78 kW jsou 129  $\frac{g CO_2}{km}$  pro kombinovanou spotřebu (menší průměrná rychlost než 140 km.h<sup>-1</sup>). I přes to je ale vidět, že aerodynamický odpor při dlouhých cestách významně přispívá k produkci emisí a tudíž je nutné ho co nejvíce snižovat.

### 8.3 Snížení emisí přidáním tandemového prostoru

Největšího zlepšení koeficientu odporu celé soupravy bylo dosaženo u varianty V361 a to  $\Delta c_D = -0,019$ . Po přepočtení emisí CO<sub>2</sub> pro variantu V361 dochází k předpokládanému zlepšení na  $89,5 \frac{g CO_2}{km}$ .

To odpovídá zlepšení aerodynamiky a snížení emisí o 6%. Kombinací navrhovaných rozměrů by teoreticky mohlo dojít k ještě větší úspoře. Tyto varianty je ještě nutno prozkoumat a doplnit úložný prostor o všechny prvky (SPZ, světla,...).

## 9 Zhodnocení výsledků

Podle studie, kterou provedl Mair [19] by mohl v ideálním případě boat-tailing úložného prostoru dosáhnout zlepšení  $\Delta c_D = -0,080$ . Musíme si ale uvědomit, že Mair provedl testování na jednoduchém válci a dimenzoval i vzdálenosti desek za válcem. Oproti tomu karoserie vozu je tvarově velmi složitá a mezera mezi vozidlem a úložným prostorem není konstantní.

Návrh a citlivostní analýza úložného prostoru dokázala, že jeho vhodným umístěním do úplavu osobního vozidla, je možné snížit aerodynamický odpor vozu, spotřebu paliva a emise CO<sub>2</sub>.

Rozšířením výpočtu o další varianty a jejich kombinace by bylo možné prokázat ještě větší snížení odporu vozidla. Vhodné by bylo otestovat úložný prostor i na jiných karoseriích a zjistit, zda nelze vytvořit tvar, který by přispíval ke snížení odporu u více vozidel.

Pro další posouzení by bylo vhodné provést ekonomickou a designovou studii. Na základě návrhu úložného prostoru včetně tvarových detailů, konstrukce a výrobní ceny by bylo možné rozhodnout o jeho uvedení na trh.

## 10 Závěr

V diplomové práci byla nejdříve provedena rešerše pasivních prvků ovlivňujících úplav vozidla ke snížení aerodynamického odporu. Pomocí vhodně vybraných pasivních prvků z rešerše byl proveden návrh aerodynamického úložného prostoru s potenciálem snížit odpor celé jízdní soupravy (vozidlo + úložný prostor).

S ohledem na design byl vytvořen 3D model úložného prostoru. Na celé jízdní soupravě byly pomocí dostupných CFD nástrojů zjišťovány odporové koeficienty a přínosy různých tvarových úprav. Pro zjištění vhodných rozměrů úložného prostoru byla provedena citlivostní analýza 6-ti hlavních parametrů (délka, výška, šířka, úhel boků, střechy a dna). Byly doporučeny vhodné rozměry a další možné testované parametry.

Pro nejpřínosnější variantu byla provedena numerická analýza snížení emisí CO<sub>2</sub>, která prokázala snížení emisí o  $5 \frac{g \text{ CO}_2}{km}$  a zvětšila zavazadlový prostor o cca 250 *litrů*.

Aerodynamická studie prokázala, že je na osobních vozidlech prostor pro snížení jejich odporu a je nutné se jím zabývat již v raném stádiu návrhu vozidel.

## 11 Seznam použitých literárních zdrojů

- [1] JANALÍK, Jaroslav. *Obtékání a odpor těles* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2017-08-04]. ISBN 978-80-248-1911-2
- [2] HUCHO, Wolf-Heinrich. *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. 4<sup>th</sup> ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, c1998. ISBN 978-07-68000290
- [3] LE GOOD, G. M., GARRY K. P. *On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics*. SAE: 2004. DOI: 10.4271/2004-01-1308
- [4] MACEK, Jan. *Spalovací motory I*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-036181-1.
- [5] KOŽUŠEK, Josef. *Teorie spalovacích motorů*. Praha: SNTL, 1971
- [6] KOVANDA, B., KOVANDA J. *Aerodynamika vozidel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, Praha 1999, ISBN 80-01-01942
- [7] DUCHOŇ, Jiří. *Škoda Fabia (SK260) – Potřetí a nejlépe*. [online]. *Automobil Revue* 2015 [cit. 2017-07-13]. Dostupné z: [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/predstavuje-me/skoda-fabia-sk260-potreti-a-nejlepe\\_43602.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/predstavuje-me/skoda-fabia-sk260-potreti-a-nejlepe_43602.html)
- [8] *U.S. standard atmosphere, 1976*. [online] National Oceanic and Atmospheric [sic] Administration: for sale by the Supt. of Docs., U.S. Govt. Print. Off., 1976. [cit. 2017-08-02]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770009539.pdf>
- [9] *Katalog Fabia* [online]. [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: <http://www.skoda-auto.cz/sitecollectiondocuments/skoda-auto/ke-stazeni/fabia-katalog.pdf>
- [10] BROŽ, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02347-8
- [11] DRÁBKOVÁ, S. a kol.: *Mechanika tekutin*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2007. ISBN 978-80-248-1508-4
- [12] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0-8376-0142-8

- [13] HILLARD J.C., SPRINGER G.S. *Fuel Economy in Road Vehicles Powered by Spark Ignition Engines*. New York: Springer US, 1984. ISBN 978-0-306-41438-1
- [14] SCIBOR-RYLSKI, A.J. *Road Vehicle Aerodynamics*. London: Pentech Press, 1984. ISBN 978-0-727-31805-3.
- [15] HAMMACHE M., BROWAND F. *On the Aerodynamics of Tractor-Trailers*. 2004 In: McCALLEN R., BROWAND F., ROSS J. (eds) *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, vol. 19. Berlin: Springer, 2004. ISBN 978-3-642-53586-4
- [16] SOVRAN G., MOREL T., MASON T. (eds). *Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*. New York: Springer US, 1978. ISBN 978-1-4684-8436-6
- [17] THOM, Rudolf W. *Does our economy system works without individual mobility? What are we doing to sustain this important key element?.* 2011 In: 11th Stuttgart International Symposium. *Automotive and engine technology, vol. 2*. FKFS, Stuttgart, 2011. ISBN 978-3-8348-1561-3
- [18] BARNHARD, R.H. *Road Vehicle Aerodynamic Design: An Introduction*. 2<sup>nd</sup> ed. MechAero Publishing, 2001. ISBN 978-0954073404
- [19] MAIR, W.A., *Drag-reducing techniques for axi-symmetric bluff bodies*. 1978 In: [16] Sovran et al.



## 12 Seznam obrázků

Obrázek 3.1 Definice čelní plochy vozidla [2] .....	12
Obrázek 3.2 Síly a momenty působící na vozidlo [2] .....	13
Obrázek 3.3 Vliv hlavních tvarových parametrů vozu na odporový koeficient a jejich interakce [2] .....	15
Obrázek 3.4 Tlak působící na vozidlo [12] .....	16
Obrázek 4.1 Srovnání odporu vozu a jiných těles [2] .....	20
Obrázek 4.2 Obtékání okolo různých typů karoserie [2] .....	22
Obrázek 4.3 Vývoj zadního spoileru na vozidle VW Scirocco [2] .....	23
Obrázek 4.4 Vliv délky a úhlu difuzoru na koeficient odporu [2] .....	24
Obrázek 4.5 Vliv úhlu zadního okna na odporový koeficient [2] .....	25
Obrázek 4.6 Vliv boat-tailingu na snížení odporu vozidla [2] .....	26
Obrázek 4.7 Snížení odporu válce pomocí boat-tailingu [19] .....	26
Obrázek 4.8 Vliv zužování karoserie na odporový koeficient [2] .....	27
Obrázek 5.1 Umístění úložného prostoru za vozidlo .....	29
Obrázek 5.2 Základní rozměry vozidla Škoda Fabia III [7] .....	30
Obrázek 5.3 Čelní pohled do motorového prostoru .....	31
Obrázek 5.4 Nezalepený model .....	32
Obrázek 5.5 Zalepený model .....	32
Obrázek 5.6 Zalepená karoserie vozu .....	33
Obrázek 5.7 Objemová výpočetní síť .....	34
Obrázek 5.8 Základní tvar úložného prostoru .....	36
Obrázek 5.9 Vysítovaný úložný prostor .....	36
Obrázek 6.1 Skica úložného prostoru .....	37
Obrázek 7.1 První testovaná varianta V001 .....	38
Obrázek 7.2 Úprava délky úložného prostoru .....	40
Obrázek 7.3 Úprava výšky úložného prostoru .....	41
Obrázek 7.4 Úprava šířky úložného prostoru .....	43
Obrázek 7.5 Úprava úhlu boků úložného prostoru .....	45
Obrázek 7.6 Úprava úhlu střechy úložného prostoru .....	46
Obrázek 7.7 Úprava úhlu dna úložného prostoru .....	48

## 13 Seznam tabulek

Tabulka 3.1 Hlavní vlastnosti vozidla ovlivněné aerodynamikou [2]	12
Tabulka 3.2 Bezrozměrné koeficienty [2] .....	14
Tabulka 7.1 Přehled zlepšení $c_D$ - závislost na délce .....	40
Tabulka 7.2 Přehled zlepšení $c_D$ - závislost na výšce .....	42
Tabulka 7.3 Přehled zlepšení $c_D$ - závislost na šířce .....	43
Tabulka 7.4 Přehled zlepšení $c_D$ - závislost na úhlu boků .....	45
Tabulka 7.5 Přehled zlepšení $c_D$ - závislost na úhlu střechy .....	47
Tabulka 7.6 Přehled zlepšení $c_D$ - závislost na úhlu dna .....	49

## 14 Seznam grafů

Graf 3.1 Srovnání aerodynamického a valivého odporu [18] .....	18
Graf 3.2 CO <sub>2</sub> emise v Německu 2008 .....	19
Graf 7.1 Změna $c_D$ v závislosti na délce úložného prostoru .....	41
Graf 7.2 Změna $c_D$ v závislosti na výšce úložného prostoru .....	42
Graf 7.3 Změna $c_D$ v závislosti na šířce úložného prostoru .....	44
Graf 7.4 Změna $c_D$ v závislosti na úhlu boků úložného prostoru .....	46
Graf 7.5 Změna $c_D$ v závislosti na úhlu střechy úložného prostoru ..	47
Graf 7.6 Změna $c_D$ v závislosti na úhlu dna úložného prostoru .....	49