

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zlepšení aerodynamických vlastností tahače

*(Improvement of the Truck Aerodynamics)*

Praha 2018

Autor: Ondřej Ballada

Vedoucí: prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.

Tímto prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny, které jsem k vytvoření využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním. Práce je vyhotovena pod vedením prof. Ing. Jiřího Nožičky, CSc.

Dne 06.08.2018

Ondřej Ballada

.....

Poděkování bych rád věnoval profesoru Ing. Jiřímu Nožičkovi, CSc.<sup>1</sup> za jeho cenné rady, pozitivní kritiku a pomoc při psaní této bakalářské práce. A Ing. Jakubu Suchému za spolupráci na praktické části.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc., vedoucí Ústavu mechaniky tekutin a energetiky, FS ČVUT v Praze

<sup>2</sup> Ing. Jakub Suchý, doktorand Ústavu mechaniky tekutin a energetiky, FS ČVUT v Praze

**Název práce:** Zlepšení aerodynamických vlastností kamionu  
**Autor:** Ondřej Ballada  
**Rok:** 2018  
**Studijní program:** B2342 Teoretický základ strojího inženýrství  
**Obor studia:** 2301R000 Bezoborový studijní program  
**Ústav:** Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky  
**Vedoucí bakalářské práce:** prof. Ing. Jirí Nožička, CSc.  
**E-mail vedoucího práce:** Jiri.Nozicka@fs.cvut.cz  
**Bibliografické informace:** počet stran 32; počet obrázků 18 počet tabulek 6; počet grafů 3; počet příloh 2

### **Abstrakt:**

Obsah této bakalářské práce se zaměřuje na obtékání zadní části nákladního tahače bez návěsu s následným návrhem tvarové úpravy pro snížení aerodynamického odporu. Analýza obtékání byla provedena v aerodynamickém tunelu Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojího, ČVUT v Praze. Použitý model tahače byl převzat od Ing. Sulitky Ph.D., jenž ho použil ve své disertační práci *Aerodynamická optimalizace dopravních prostředků*. Stejně ale jako většina prací tohoto typu se soustředí na celou soupravu. Tím je myšlen tahač s návěsem. K získání výsledků byla vybrána experimentální metoda vizualizace proudění pomocí kouře a vyhodnocení sil pomocí aerodynamických vah.

Při vypracování jednotlivých kapitol se autor práce zaměřuje nejprve na analýzu nákladní dopravy jako celku a po úvodu uvádí základní teorii mechaniky tekutin. Následuje úsek, který pojednává o tahačích samotných, a směřuje až k samotné praktické části, jejíž výsledky jsou zhodnoceny v závěru. Nejprve byla provedena analýza aerodynamiky pro samotný tahač a na základě výsledků a teoretických poznatků již získaných, se navrhla optimální tvarová úprava.

Autor v závěru bere v úvahu i možnosti praktického využití, které získal kontaktováním několika spedičních firem, jež poskytly cenné údaje i náhled zkušeného řidiče kamionu.

V případě příznivého výsledku by byla možnost tuto myšlenku dále rozvíjet v podobě dalšího zařízení. Při jízdě tahače bez návěsu, za účelem snížení spotřeby, by dosažení ideálního tvaru mohlo být realizováno sklopením, nafouknutím, nebo jakoukoli jinou mechanickou realizací. Při měření bylo skutečně dosaženo snížené odporového součinitele, avšak četnost jízdy samotného tahače je tak nízká, že jakákoli investice je nerentabilní.

**Abstract:**

The content of this bachelor thesis focuses on the flowing of the rear part of the heavy truck without a semi-trailer, followed by modification of the shape modification to reduce aerodynamic drag.

Analysis of the convection was carried out in the aerodynamic tunnel of the Faculty of Mechanical Engineering U12112. The truck model used was taken over by Ing. Sulitka Ph.D., who used it in his dissertation work *Aerodynamic optimization of transport means*. But like most works of this type, they focus on the whole set. That means truck with a semi-trailer. To obtain the results, an experimental method of visualizing the flow through smoking and the evaluation of forces using aerodynamic weights was chosen.

In the elaboration of individual chapters, the author of the work after the introduction and the basic theory of fluid mechanics focuses first on the analysis of the haulage as a whole. This is followed by the section dealing with the trucks themselves and is directed to the practical part itself, the results of which are evaluated at the end. First, an aerodynamic analysis was conducted for the truck itself, and based on the results and the theoretical knowledge already acquired, optimal shape adjustments were proposed.

Finally, the author took into account the possibilities of practical use made by contacting several forwarding companies that provided valuable data and insight to the experienced truck driver.

In the event of a positive result, this idea could be further developed in the form of another device. When achieving the ideal shape when riding a semi-trailer without a semi-trailer, they could be flipped, blown, or any other mechanical design to achieve the ideal shape. Indeed, the measured resistance has been reduced, but the number of driving truck itself is so low that any investment is unrealistic.

**Klíčová slova:**

Aerodynamika, Aerodynamický tunel, Nákladní automobil, Součinitel odporu, Nákladní Doprava, Tvarové úpravy, Aerodynamický tvar, Vizualizace proudění

**Keywords:**

Aerodynamics, Aerodynamic tunnel, Truck, Coefficient of resistance, Haulage, Shaping, Aerodynamic shape, Flow visualization

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	7
1 Motivace práce .....	8
1.1 Možnosti využití .....	8
1.2 Cíl práce .....	9
1.3 Aerodynamika .....	9
1.4 Proudění .....	10
1.5 Aerodynamický odpor.....	11
1.6 Mezní vrstva.....	12
2 Současný stav kamionové dopravy .....	13
2.1 Tahače minulosti .....	13
2.2 Moderní trendy a budoucnost tahačů .....	14
2.2.1 Závodní kamiony .....	16
2.3 Aerodynamika kamionu .....	18
2.3.1 Základní rozdělení.....	18
2.3.2 Aerodynamika bez návěsu .....	19
3 Praktická část .....	19
3.1 Zařízení na vyhodnocení (aerodynamický tunel).....	20
3.2 Měřený model .....	20
3.3 Vyhodnocení aerodynamiky .....	21
3.4 Návrh tvarových úprav dle teorie.....	23
3.5 Praktické ověření aerodynamiky s návrhem tvarovou úpravou .....	24
3.6 Nejistoty měření .....	26
3.7 Porovnání .....	29
4 Závěr .....	30
5 Seznam použité literatury.....	31
6 Seznam obrázků .....	32
7 Seznam tabulek .....	32
8 Seznam grafů.....	32
9 Seznam přílohy .....	32

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
$\rho$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota
$c$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	rychlost
$A$	$[\text{m}^2]$	plocha
$H$	$[\text{m}]$	výška
$p$	$[\text{Pa}]$	tlak
$g$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	gravitační zrychlení
$F_D$	$[\text{N}]$	odporová síla
$F_S$	$[\text{N}]$	boční síla
$F_L$	$[\text{N}]$	vztlaková síla
$c_D$	$[1]$	odporový součinitel
$c_S$	$[1]$	odporový součinitel bočních sil
$c_L$	$[1]$	součinitel vztlaku
$Re$	$[1]$	Reynoldsovo číslo
$L_{ch}$	$[\text{m}]$	charakteristický rozměr
$\nu$	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
$\delta$	$[\text{m}]$	tloušťka mezní vrstvy

# 1 Motivace práce

Nákladní automobilová doprava tvoří jeden ze základních pilířů logistických služeb. Oproti železniční a lodní dopravě má jak mnoho výhod, tak i řadu nedostatků. S neustále se zvyšující hustotou silničních komunikací bude ještě několik desítek let tvořit páteř přepravy z místa A do místa B. Avšak pořád je možné najít část prostoru pro zlepšení. Toto okno se uvedená práce pokusí udělat zase o něco menší. Tím není myšleno vytvoření složitého softwaru, který by vyhodnotil ideální logistiku dopravy. Tento pohled bude přinejmenším techničtější. Konkrétně v případě, kdy je tahač nucen uskutečnit jízdu bez návěsu.

## 1.1 Možnosti využití

Efektivnost logistických služeb je bezpochyby jedna z nejzásadnějších cest k úspěchu. Například: Zákazník si najme spediční firmu, která má vyzvednout zboží v Amsterdamu. Pro vyšší efektivnost nepojede do Holandska nenaložený tahač, ale firma naloží tahač něčím, co může vyložit například v Eindhovenu. Takto se dá vnímat efektivnost využití.

Bohužel ne vždy je to možné na sto procent. Příkladem může být autorovo letní působení ve firmě F.X. Meiller ve Slaném, kde se vyrábí, respektive montují, mimo jiné velké nákladní přívěsy, návěsy a třístranné sklápěče osazením podvozku. Jednoduše poté, co se návěs vyrobí, si v drtivé většině případů pro výrobek nepřijede rovnou zákazník, ale spediční firma, která jej distribuuje přímo zákazníkovi. Spedice, tedy tahač, jenž přijede bez návěsu.

Celý tento proces, kdy tahač jede bez zátěže, je neefektivní. A to nám nabízí otázku, jestli by se nad tím v dnešní době, ve které se neustále více řeší globální oteplování, minimalizace nákladů a co nejvyšší zvýšení efektivnosti, nechtělo zamyslet. Převedením do extrému by ušetření paliva snížilo náklady na provoz, což by zase mohlo vést k nižším cenám převáženého zboží.



## 1.2 Cíl práce

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou aerodynamického obtékání tahače bez návěsu a následnému návrhu tvarové úpravy, případně konstrukci zařízení, které by tohoto tvaru dosáhlo z důvodu zlepšení obtékání tahače s následkem snížení spotřeby paliva. Například přimontováním určitého zařízení na rám, které by se v případě, že řidič pojedle delší vzdálenost, mohlo nafouknout, sklopit, právě do optimálního tvaru tak, aby se nezměnila funkčnost vozidla.<sup>3</sup>



Obr. 1 - Upřesnění tématu bakalářské práce  
- <http://www.interfracht.com.ua/en/avtopark>

## 1.3 Aerodynamika

Aerodynamika je vědní obor, který zkoumá pohyb těles ve vzduchu. Síly, které při tomto pohybu vznikají. Jevy a síly se chovají obdobně i při změně pohybu, tj. když těleso stojí a vzduch se pohybuje. Díky tomu je možné provádět různá měření na stojícím modelu s pohybujícím se vzduchem.

<sup>3</sup> Zařízení by bylo možné využít nejen v případě nezapřažení návěsu, ale i po připojení přívěsu, či užitkovému automobilu s korbou. Tím by však samozřejmě vznikla otázka, zda by to nebylo spíše kontraproduktivní. Avšak to by bylo nutné podrobit detailnějšímu zkoumání, což přesahuje rámec této práce.

Aerodynamiku zpravidla rozdělujeme na:

- teoretickou (klasickou),
- experimentální
- praktickou

Už v roce 1776 sepsal holandský vědec Daniel Bernoulli ve své knize *Hydrodynamica* mimo jiné, dva hlavní zákony, ze kterých vycházíme dodnes. [1]

Jedná se o:

- a) Zákon kontinuity (zákon spojitosti průtoku)

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 \quad (1.3-1)$$

- b) Bernoulliho zákon vyjádřený měrnými energiemi

$$gy + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} = g \cdot H = konst. \quad (1.3-2)$$

V případě, že je těleso nastaveno ke směru proudu nesymetricky, pak vzniká obecná aerodynamická síla  $F$ . Tu je možné rozložit na dílčí složky – sílu odporovou, vztlakovou a boční. [2]

Odporová síla  $F_D = c_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A \quad (1.3-3)$

Boční síla  $F_z = c_z \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A \quad (1.3-4)$

Vztlaková síla  $F_y = c_y \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A \quad (1.3-5)$

## 1.4 Proudění

V případě nákladního automobilu laminární vrstva turbulizuje velmi záhy po začátku obtékání tělesa. Z toho důvodu tato práce bude uvažovat pohyb pouze v oblasti turbulentního proudění. Pro určení oblasti proudění se využívá podobnostní Reynoldsovo číslo  $Re = \frac{c \cdot L_{ch}}{\nu}$ , které udává poměr sil setrvačných a sil třecích působících na těleso. V tomto případě je možné považovat za charakteristický rozměr celkovou délku vozidla.

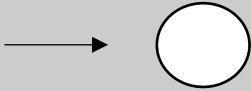
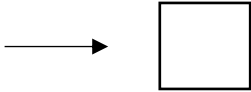
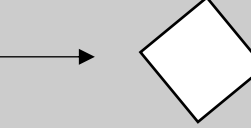



## 1.5 Aerodynamický odpor

Celkový aerodynamický odpor, který působí na těleso, se skládá z několika dílčích složek. Hlavní část tvoří odpor tvarový, třecí, indukovaný, interakční a vlnový. Pro tuto práci jsou nejdůležitější odpor tvarový (jinak nazývaný také čelní či tlakový), případně odpor třecí.

**Tvarový odpor** vzniká při obtékání jakéhokoli tělesa v důsledku snížení rychlosti před a zvýšením rychlosti za tělesem (*úplav*), což se projevuje změnou velikosti tlaku. Rozdílem tlaků vzniká právě tvarový odpor, jehož velikost je dána změnou hybnosti. Vhodným tvarováním lze upravit bod odtržení mezní vrstvy a tím odpor snížit. [1] [3]

**Třecí odpor** je způsoben smykovým namáháním mezi kapalinou a povrchem tělesa. [4]

Pro nákladní automobil a jiná tupá tělesa je tlakový odpor dominantní. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty součinitele odporu různých tvarů při rovinném obtékání.

Tvar		Koeficient odporu
<b>Kruhová deska</b>		1,12
<b>Čtversková deska</b>		1,1
<b>Hranol</b>		1,53
<b>Deska se zaoblenými hranami</b>		0,67
<b>Válec</b>		1,2
<b>Těleso minimálního odporu</b>		0,045

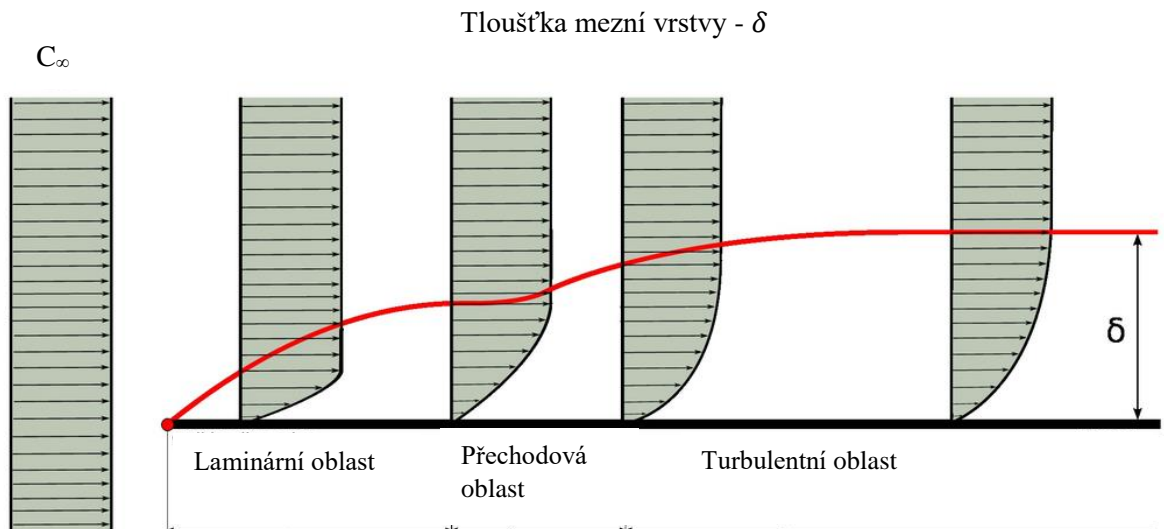
Tabulka 1 - Koeficient odporu [2]

## 1.6 Mezní vrstva

Pokud proudění viskózní tekutiny probíhá při velkých Reynoldsových číslech vztažených k charakteristickému délkovému rozměru systému  $L$  (např. průměr trubice, délka aerodynamické tělivity profilu křídla) a k charakteristické rychlosti  $c_{char}$  (střední rychlost v průřezu trubice, rychlost nabíhajícího proudu na obtékané těleso)  $Re = c_{char}L/\nu \geq 10\,000$ , projevuje se vliv viskóznosti jen v tenké vrstvě tekutiny v těsné blízkosti obtékané stěny zvané **mezní vrstva**. [2, s. 147]

Za tělesem, kde se smísí rychlosti ovlivněné, respektive neovlivněné viskózností vzniká úplav. Toto vyrovnávání rychlostí a směru částic můžeme označit jako turbulence. [1] [3]

Na obrázku č. 2 je možné vidět, jak se mění velikost rychlosti v závislosti na kolmé vzdálenosti od povrchu. Rychlostní profil je samozřejmě závislý na typu proudění. V případě turbulentního proudění má mezní vrstva vyšší třecí odpor, avšak není tak náchylná k odtržení. [3]



Obr. 2 - Rychlostní profil v mezní vrstvě

- <https://www.cfdsupport.com/OpenFOAM-Training-by-CFD-Support/node279.html>

Jako bod přechodu označujeme místo, kde se mezní vrstva laminárního proudění mění v mezní vrstvu turbulentní. Z logiky věci vychází, že se snažím, aby byl co nejdále od náběžné hrany. [3]

## 2 Současný stav kamionové dopravy

Obsahem této kapitoly jsou podkapitoly, jež se zaměřují např. na historii a moderní trendy kamionové dopravy, základní teoretické poznatky z oblasti aerodynamiky. Dále se soustřeďuje na tahače samotné.

### 2.1 Tahače minulosti

Nákladní kamionová doprava nemění svou podstatu již řadu desítek let. Vpředu umístění tahač s ostře tvarovanou kabinou, velký dieselový motor mezi nápravami. Za tahač se připojí návěs, do kterého se naloží velké množství nákladu. Funguje to relativně dobře už léta. To by ale nebyl člověk člověkem, aby se nepokusil o změnu. Zde je uvedeno jen pár nejzajímavějších pokusů, které měly přinést revoluci. [5]

Jedním z nich je koncept Steinwinter 2040, který byl představen na frankfurtském autosalonu roku 1983. Díky tomuto konceptu kabiny bylo možné zvětšit přepravní prostor právě na maximální dovolenou délku soupravy. Kabina byla polohována pod přední částí návěsu. Viz obrázek č. 3.

Tahač měl výšku 1 170 mm a ve standardním dvounápravovém provedení byl rozvor přesně tři metry a délka 6,5 metru. [5]



Obr. 3 - Steinwinter 2040

-<http://www.autoforum.cz/fascinace/tento-supersport-mezi-tahaci-mel-prepsat-historii-kamionu-nezmenil-nic/>

Další z vybraných konceptů je stroj nazývaný MAZ – 200 Perestrojka. Tento sovětský vynález byl světu ukázán v roce 1988 v Paříži. Zásadní změnou je zde fakt, že nemůže jezdit bez návěsu. Má pouze jednu nápravu a k návěsu se namísto podvozkem připojoval kabinou. K zatáčení sloužil modul, který neměl natáčecí kola, ale otáčel se celý. Tím se zvětšil přepravní prostor, jelikož se eliminoval nevyužívaný prostor. To zlepšilo i aerodynamické vlastnosti. [6]



Obr. 5- MAZ – 2000

-<http://www.autoforum.cz/fascinace/maz-2000-perestrojka-sovetsky-pokus-o-revolucni-kamion-vedl-do-slepe-ulicky/obrazek/30>



Obr. 4 – natočený modul MAZ – 2000

--<http://www.autoforum.cz/fascinace/maz-2000-perestrojka-sovetsky-pokus-o-revolucni-kamion-vedl-do-slepe-ulicky/>

*K pohonu byl vybrán 11,9litrový řadový šestiválec MAN D2866, který dával 290 koní a posílal je na kola přes dvanáctistupňovou převodovku s automatickým řazením. Maximální rychlost byla asi 120 km/h a váha konstrukce byla 12 tun a užitečná hmotnost dvounápravového návěsu byla 21 tun [6]*

Avšak ani jeden z výše zmíněných prototypů nedosáhl sériové výroby. Ať už za to mohla horší ovladatelnost, pád Sovětského svazu, či nedostatek financí. Jsou to nejspíš jen slepé vývojové uličky.

## 2.2 Moderní trendy a budoucnost tahačů

Jak výrobcům, tak zákazníkům jde zejména o tyto body:

- spotřeba paliva
- poměr cena/výkon
- provozní náklady
- praktičnost

Výzkumem aerodynamiky se podniky začaly významněji zabývat počátkem 70. let 20. století zejména z důvodu energetické krize. Do té doby se znalosti opíraly téměř výhradně o měření aerodynamických vlastností na osobních automobilech. Jedna z prvních detailnějších studií velkých dopravních prostředků je výsledkem spolupráce mezi firmou MAN a Výzkumným institutem dopravy motorů ve Stuttgartu (Německo). [7]

Díky výsledkům těchto a navazujících výzkumů se zajistilo zlepšení vlastností jízdní soupravy pomocí aplikování dalších dílčích prvků. Viz obrázek č. 6. Každý z prvků má určitý podíl na celkovém zlepšení. Díky těmto tvarovým úpravám je možnost snížení odporu. Tím se šetří energie motoru s následkem ušetření paliva. Při aplikování nejúčinnějších zařízení pro snížení odporu vzduchu, je možné dosáhnout výsledku až  $\Delta C_D = 36\%$ , při rychlosti 80 km/h. To odpovídá snížení spotřeby o 16%. [7]



Obr.6 - Tvarově upravený tahač s přívěsem - <http://aerodyneuk.com/truck-aerodynamics/>

Další z možností k dosažení výše zmíněných bodů je zapojení hned několika návěsů za jeden tahač tzv. „road trains“. Ve většině evropských zemích se maximální délka jízdní soupravy pohybuje okolo 18 metrů. Tyto kolosy však běžně dosahují až 50 metrů. Silniční vlaky je možné vidět zejména na silnicích v Austrálii a USA.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Dobové silniční vlaky údajně posloužily jako inspirace Zemi šelem V tomto románu od Julese Verna hrdinové cestovali Indii v soupravě, kterou tvořily dva obytné vozy a tahač v podobě mechanického slona na parní pohon.



Obr. 7 - Silniční vlak

-<https://www.acdodavky.cz/cz/clanky/ridici-silnicnich-vlaku.html>

Velký potenciál představuje elektrifikace. Scania AB ve Švédsku testuje první prototypy kříženců mezi trolejbusy a kamiony na tzv. eHighway. Viz obr. 9

Poněkud odlišnou cestou se vydala společnost Tesla Motors. Ta představila koncept plně elektrického tahače Tesla Semi. Ten nejen že by mohl být poháněn elektromotory, ale nabízí i určitou formu autonomního řízení. Zda se některý z těchto způsobů masově rozšíří nelze ještě říci.



Obr. 8 - Tesla Semi

-<https://www.acdodavky.cz/cz/clanky/ridici-silnicnich-vlaku.html>



Obr. 9 - Prototyp jedoucí na eHighway

-<https://www.scania.com/group/en/worlds-first-electric-road-opens-in-sweden/>

### 2.2.1 Závodní kamiony

Samostatnou kapitolu tvoří závodní kamiony. Existují speciály určené na nejnáročnější závody rallye, které se zaměřují zejména na funkčnost a spolehlivost a překonání překážek. Další skupinou jsou závodní speciály na okruh. Tam je možné najít techniku srovnatelnou s technikou monopostů formule 1. Tyto race trucky disponují ohromným výkonem.



Za zmínku určitě stojí vůz švédské společnosti Volvo Group s názvem Volvo Iron Knight, který v roce 2015 pokořil dva rychlostní rekordy ve zrychlení na 500 m a 1000 m. S motorem o výkonu 2400 koní a hmotností 4,5 tuny dokázal při testech dosáhnout rychlosti až 276 kilometrů za hodinu. [8] Oproti běžnému tahači se kromě prvotřídní pohonné techniky liší i v kapotáži, která pomáhá jeho aerodynamickým vlastnostem. Je možné si všimnout bočních difuzorů, tvarovaných zadních blatníků a předního spodního spoileru.



Obr. 11 - The Iron Knight

<https://hum3d.com/3d-models/volvo-the-iron-knight-truck-2016/>



Obr. 10– Volvo závodní truck

<https://hum3d.com/3d-models/volvo-the-iron-knight-truck-2016/>

Dalším zajímavým faktem ze světa kamionového motorismu a pro ČVUT v Praze obzvlášť je spolupráce v roce 2004 na pokusu o překonání rychlostní hranice 300 km/h se závodním tahačem české stáje Buggyra. Spolupráce spočívala ve studii zmenšeného a zjednodušeného modelu v měřítku 1:13,5. Díky tvarovému přepracování části kabiny a opatření zadě dutinovým prodloužením se zúžením bylo na modelu dosaženo snížení odporu až o 16,3 %, přičemž největší podíl mělo právě prodloužení zadě. Podíl této složky byl až 9 %. Toto číslo se ve výchozí variantě mohlo ještě zvýšit, jelikož model neměl udělány dutiny podběhů, či detail podvozku. <sup>5</sup> [7]

Na rozdíl od jiných motoristických sportů obsahují závody tahačů mimo jiné jedno neobvyklé pravidlo. Které bylo původně zavedeno z důvodu bezpečnosti, ale dnes je vnímáno spíše jako přežitek. Jezdci totiž nesmějí během závodů překročit maximální rychlost 160 km/h. To naštěstí ale nijak této disciplíně neubírá na divácké atraktivitě. Minimální hmotnost závodního tahače je 5,5 tuny, dokonce je i předepsáno rozdělení hmotnosti na přední a zadní nápravu. [9]

---

<sup>5</sup> Dne 12.2.2004 bylo s tímto upraveným speciálem na dálnici ve Spojených arabských emirátech jízdou s letným startem dosaženo v té době rekordní rychlosti 281,7 km/h. Bohužel při pokusu o hranici 300 km/h se vyskytla technická závada.

## 2.3 Aerodynamika kamionu

Bez návěsu je spotřeba logicky menší, ale aerodynamické obtékání vozu je konstruováno primárně tak, že se počítá s tím, že je tahač neustále zapřažen. O optimalizaci aerodynamických vlastností nákladního automobilu bylo již sepsáno poměrně mnoho publikací. Ale v drtivé většině případů se optimalizuje celá souprava, tedy tahač s návěsem jako celek.

Mezi nejzásadnější aerodynamické úpravy tahače patří aplikace střešního deflektoru, bočních křídel a kapotáž kol s úpravou blatníků. Jako další je možné uvažovat tvarování bočních zrcátek, velikost pneumatik, či speciální lak.

### 2.3.1 Základní rozdělení

Tato práce se soustředí na tahač samotný. V zásadě je možné ve světě vidět dvě základní siluety tahačů. Laicky nazývaný tahač „s nosem“, tedy ten, který má pření nápravu a motor před kabinou. Druhým typem je „bez nosu.“ Tak se neoborně říká tahači, jenž má hnací ústrojí nad přední nápravou a pod podlahou kabiny.

Tahač „s nosem“ nabízí mimo jiné lepší chlazení motoru, rovnoměrné rozložení váhy, možnost většího prostoru v kabině a díky tomu, že je před řidičem větší deformační zóna, také bezpečí pro řidiče. Zásadní důvod, proč v Evropě nejedí takové skvosty jako jinde ve světě jsou dány ze zákona. Jelikož je u nás dle legislativy maximální délka jízdní soupravy dána na hranici 16,5 m pro soupravu s návěsem, nebo 18,75 m pro nákladní soupravu. Tím pádem se snaží dopravci mít zároveň co nejobjemnější přepravní prostor v souladu s legislativou. Z těchto důvodů si jednoduše řečeno nemohou dovolit mít 1 – 1,5 m dlouhý předeek tahače.



Obr. 13 – Tahač „s nosem“

-<https://hum3d.com/3d-models/peterbilt-379-tractor-truck-1987/>

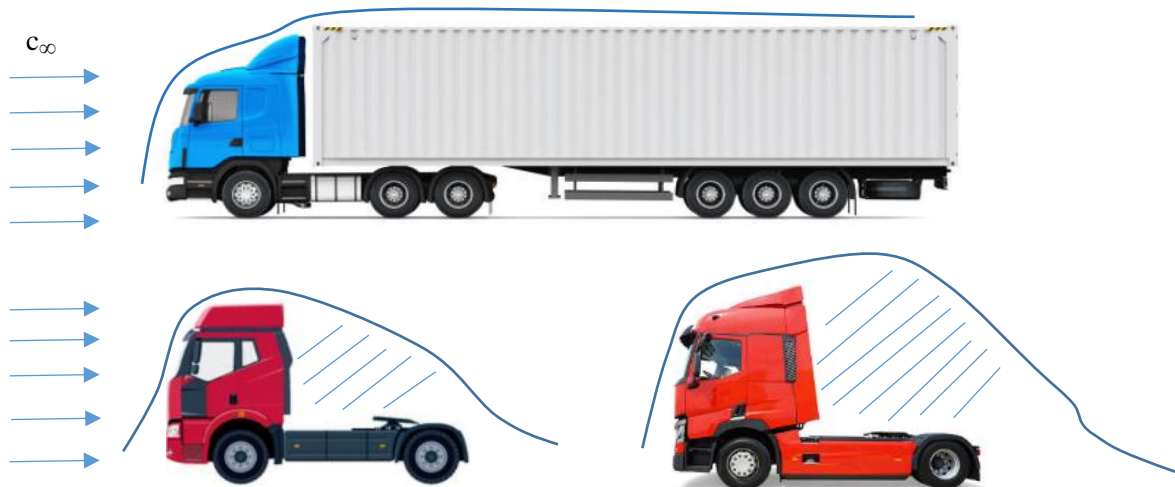


Obr. 12– Tahač „bez nosu“

<https://hum3d.com/3d-models/mercedes-benz-arocs-tractor-truck-2013>

## 2.3.2 Aerodynamika bez návěsu

Výrobci nabízejí širokou škálu výrobních verzí, které se liší např. v počtu náprav nebo velikostí kabiny pro případné přespání. Zajímavý je z pohledu aerodynamiky aplikovaný střešní deflektor. Ten má nepochybně podíl na celkovém aerodynamickém odporu tahače. V případě, kdy jede tahač bez návěsu, tak je deflektor spíše na škodu. Deflektor zvětšuje obtékanou plochu. A jelikož se proudnice nemohou navázat na návěs, vznikající úplav bude větší. Což je schematicky naznačeno na následujícím obrázku. Tím se nabízí další možnost zkoumání rozdílných vlastností samotného tahače s deflektorem a bez něj.<sup>6</sup>



Obr. 14 - Problematika střešního deflektoru

<https://www.istockphoto.com/photos/clip-art-of-way-go?excludenudity=true&sort=mostpopular&mediatype=photography&phrase=clip%20art%20of%20way%20go>

<https://www.istockphoto.com/photos/semi-truck-profile?excludenudity=true&sort=mostpopular&mediatype=photography&phrase=semi%20truck%20profile>

## 3 Praktická část

Základem praktické části je experimentální výzkum na zmenšeném modelu. Experiment byl prováděn v aerodynamickém tunelu Ústavu 12112 pomocí základní metody vizualizací kouřem a měřením za použití aerodynamických vah. Díky těmto vizualizacím je možné relativně přesně analyzovat aerodynamické vlastnosti měřeného modelu. Díky aerodynamickým vahám je možné získat informace o silách odporových, vzlakových a bočních. Tyto výsledky byly zpracovány v programu MATLAB. Fotografie experimentu vizualizace kouřem ukazují chování proudnic a mezní vrstvy.

<sup>6</sup> Základní siluety běžných tahačů jsou uvedeny v příloze 1

### *3.1 Zařízení na vyhodnocení (aerodynamický tunel)*

*„Aerodynamické tunely jsou zařízení, v nichž se uměle vytváří proud vzduchu požadované rychlosti.*

*Podle účelu experimentu se používá různých druhů aerodynamických tunelů: pro nízké rychlosti, pro podzvukové rychlosti pro nadzvukové rychlosti, pro změnu hustoty vzduchu, pro speciální účely.*

*Podle konstrukce lze tunely dělit na dvě skupiny: s otevřeným okruhem (proudem) a uzavřeným okruhem.*

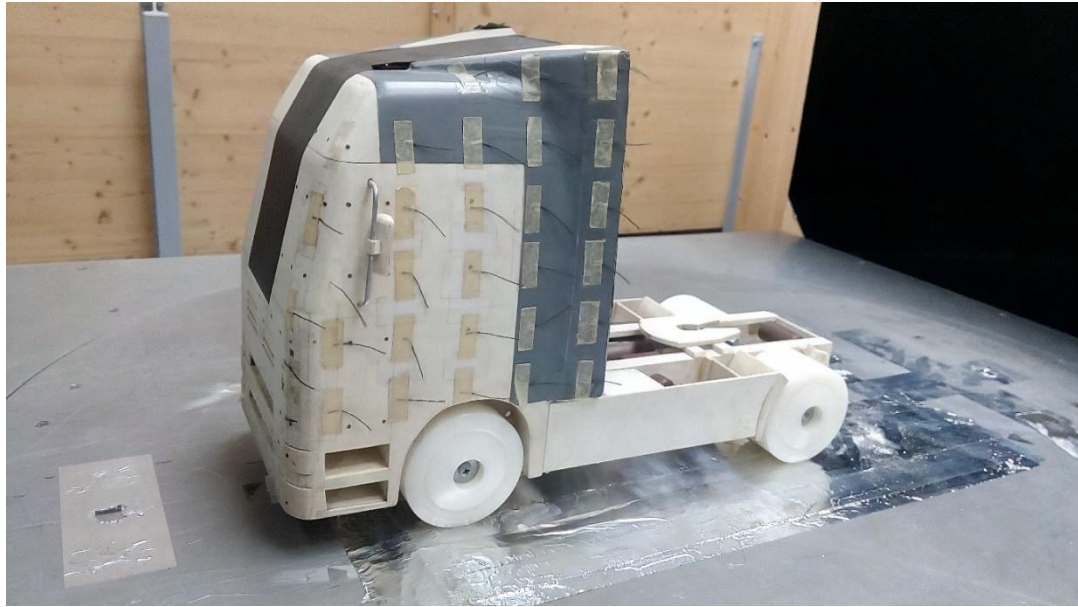
*U nadzvukových tunelů rozlišujeme dále tunely s dlouhodobým a krátkodobým (přerušovaným) chodem.“*

[3, s. 112]

V případě použitého tunelu Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky ČVUT se jedná o typ s uzavřeným oběhem. Měřicí prostor je však otevřený pro snadnější manipulaci s modely. Pro zvýšení účinnosti a snížení ztrát jsou v kolenech aplikovány lopatky a síta před dýzou, které pomáhají stabilizovat rychlostní pole. Podrobný popis použitých aerodynamických vah lze nalézt v bakalářské práci *Měření vlastností aerodynamického tunelu* od Egora Sorokina. [10]

### *3.2 Měřený model*

Měřený model byl převzat od Ing. Matěje Sulitky Ph.D, jenž ho použil k experimentu ve své disertační práci [7]. Jedná se zjednodušený model, který vychází z tahače typu Mercedes-Benz ACTROS se střešní nástavbou kabiny a rozvorem 3 900 mm vyrobený v měřítku 1:15.

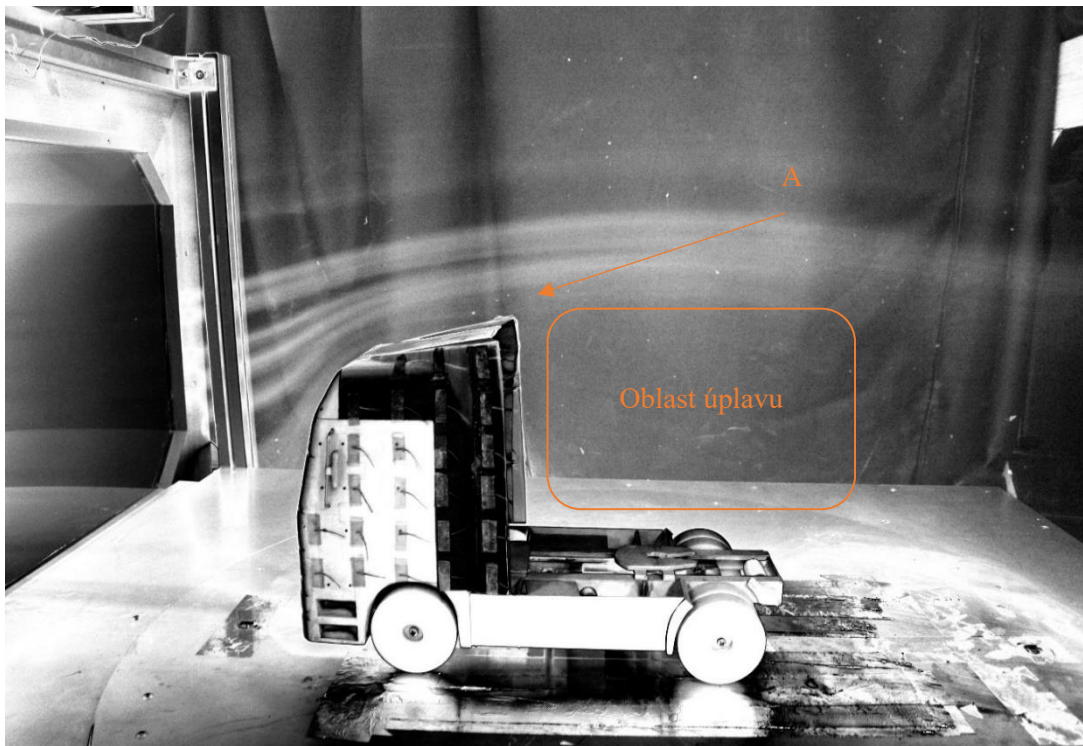


Obr. 15 - Model měřeného tahače

Zdroj – Autor

Model má již z předchozího měření boční a střešní křídlo. Na boční straně jsou přilepené kousky bavlnek. Ty nám ukazují směr proudění. Na druhou stranu způsobují mírnou asymetrii, která pravděpodobně způsobí boční sílu. Viz výsledky měření.

### 3.3 Vyhodnocení aerodynamiky



Obr. 16 - Vizualizace kouřem

Zdroj – Autor

Metoda vizualizace pracuje na principu odpařování safexového nátěru naneseného na odporovém drátu, který je připojen na zdroj napětí. Díky tomu je možné sledovat chování proudnic. Na následujícím obrázku je možné vyhodnotit přibližný bod odtržení (*BOD A*) a oblast vzniku úplavu. Rychlost proudění v tunelu byla nastavena na velmi nízké hodnoty pro lepší zachycení chování kouře. V běžných provozních rychlostech se proudnice mohou lišit.

Vizualizace byla provedena pouze v jedné rovině. V rovině kolmé na ležící desku. Dle očekávání je nejvýraznější změna směru proudnic v přední části tahače. Ty se zhušťují nad střechou obtékaného tahače. Za kabinou již není možné podrobnější sledování proudící tekutiny. Avšak z teoretické části lze poměrně s jistotou říci, že zde je oblast, kde se tvoří úplav. K další analýze se použily aerodynamické váhy. Díky tomu bylo možné určit dynamické síly působící na tahač: sílu vztlakovou, odporovou a boční. Hodnoty velikosti sil získané při různých rychlostech měření jsou uvedeny v tabulce 2.

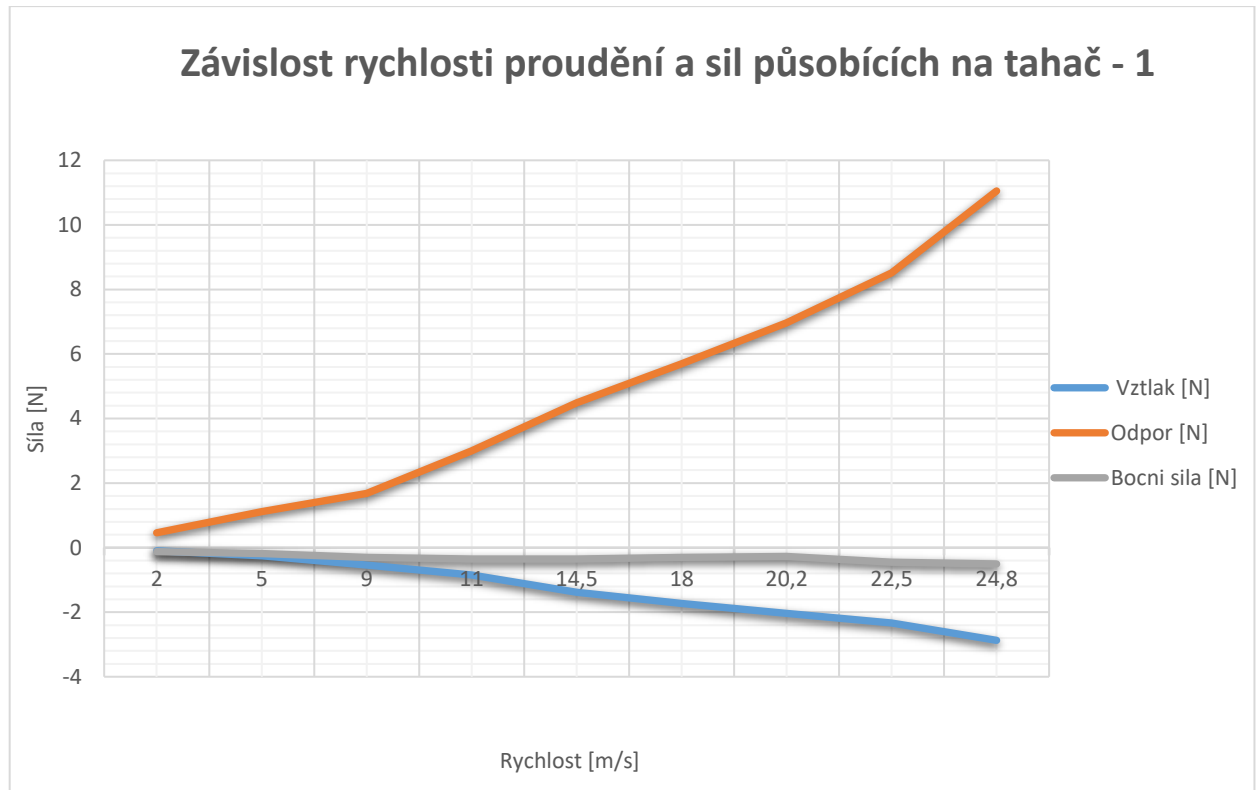
Pro lepší porovnání získaných výsledků je vhodné vyjádřit z rovnic 1.3–3 až 1.3–5 součinitele, které by měly být konstantní pro všechny měřené rychlosti. Úprava bude provedena pouze v jednom případě. Zbylé dva jsou naprosto obdobné.

$$F_D = c_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A \Rightarrow c_D = \frac{2 F_D}{\rho \cdot c^2 \cdot A} \quad (3.3-1)$$

<i>Rychlost proudění [m/s]</i>	<i>Vztlak [N]</i>	<i>Odpor [N]</i>	<i>Boční síla [N]</i>	<i>c<sub>L</sub>[1]</i>	<i>c<sub>D</sub>[1]</i>	<i>c<sub>S</sub>[1]</i>
2	-0,05724	0,189871	-0,09148	-0,66021	2,189977	-9,44066
5	-0,09697	0,460176	-0,12300	-0,17895	0,849229	-2,03096
9	-0,25504	1,111955	-0,18442	-0,14527	0,633349	-0,93985
11	-0,54420	1,677237	-0,2988	-0,2075	0,639514	-1,01937
14,5	-0,85077	3,003527	-0,35337	-0,18669	0,659077	-0,69379
18	-1,37954	4,490795	-0,35569	-0,19644	0,639468	-0,45317
20,2	-1,72621	5,694249	-0,30159	-0,19518	0,643835	-0,30511
22,5	-2,03965	6,970077	-0,27656	-0,18588	0,635204	-0,22551
24,8	-2,33496	8,508598	-0,45193	-0,17515	0,638257	-0,30332

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty - I

Grafické znázornění naměřených hodnot je vykresleno v následujícím grafu.



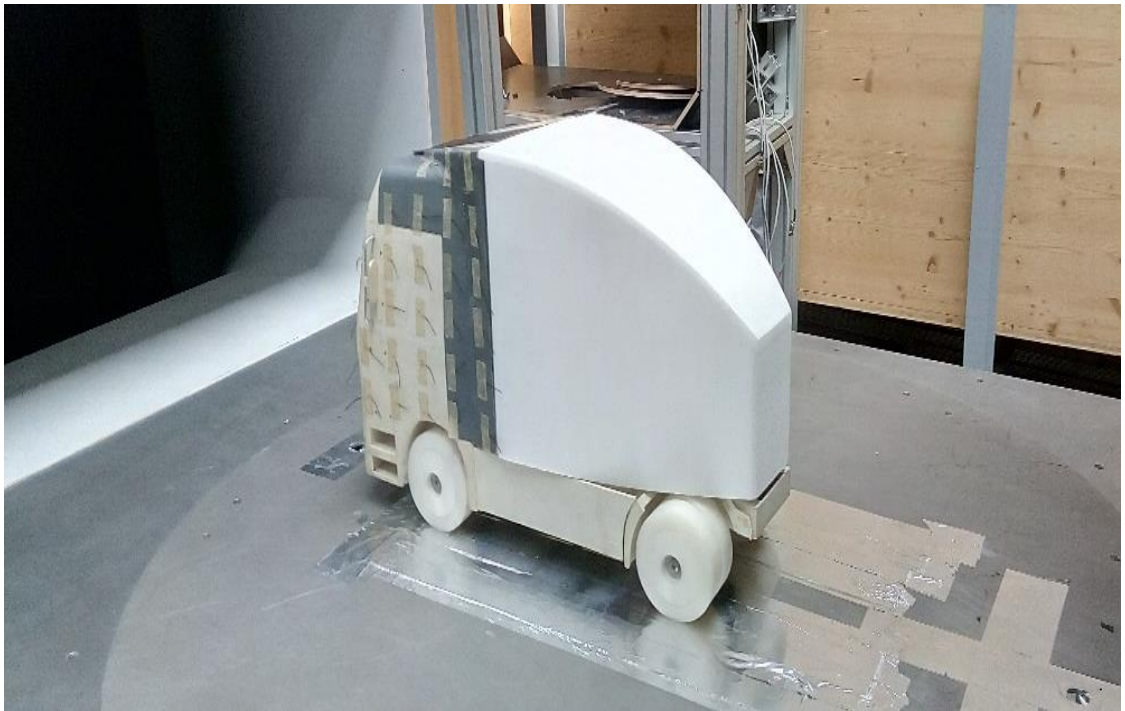
Graf 1 - Závislost rychlosti proudění a sil působících na tahač - 1

Je patrné, že odporová síla při vyšších rychlostech roste. Boční síla je téměř zanedbatelná, avšak nenulová, což odpovídá asymetrii měřeného modelu (přidělané bavlnky). Tyto hodnoty odpovídají teoretickým předpokladům.

Pokud je vztlaková síla záporná, pak hovoříme o přítlaku. Síla postupně stoupá, tedy je úměrná zvýšení rychlosti a generuje přítlak. Je sice možné očekávat spíše sílu vztlakovou, ale poloha tahače a další nejistoty měření nám výsledek přinejmenším ovlivnily.

### 3.4 Návrh tvarových úprav dle teorie

Tvarová úprava, navržená dle dosavadních poznatků získaných z mechaniky kontinua, se pokusí snížit tvarový odpor tím, že zmenší prostor pro vytvoření úplavu a oddálí bod odtržení mezní vrstvy. Tím by se dle odhadů autora mohl při úspěšném měření odporový koeficient snížit o hodnotu blížíci se 15 %.



Obr. 17– Detail tvarové úpravy Zdroj – Autor

Vyústěním byla výroba nástavby (obr. 17), která se pevně připevnila k tahači.<sup>7</sup>

### *3.5 Praktické ověření aerodynamiky s návrhem tvarové úpravy*

Po připojení nástavby byly provedeny totožné experimenty jako v předchozí části. Tedy vizualizace kouřem a měření sil pomocí aerodynamických vah. Zajímavé je zejména porovnání obou výsledků.

---

<sup>7</sup> Výkres nástavby je uveden v příloze 2





Obr. 18 - Vizualizace kouřem 2 Zdroj – Autor

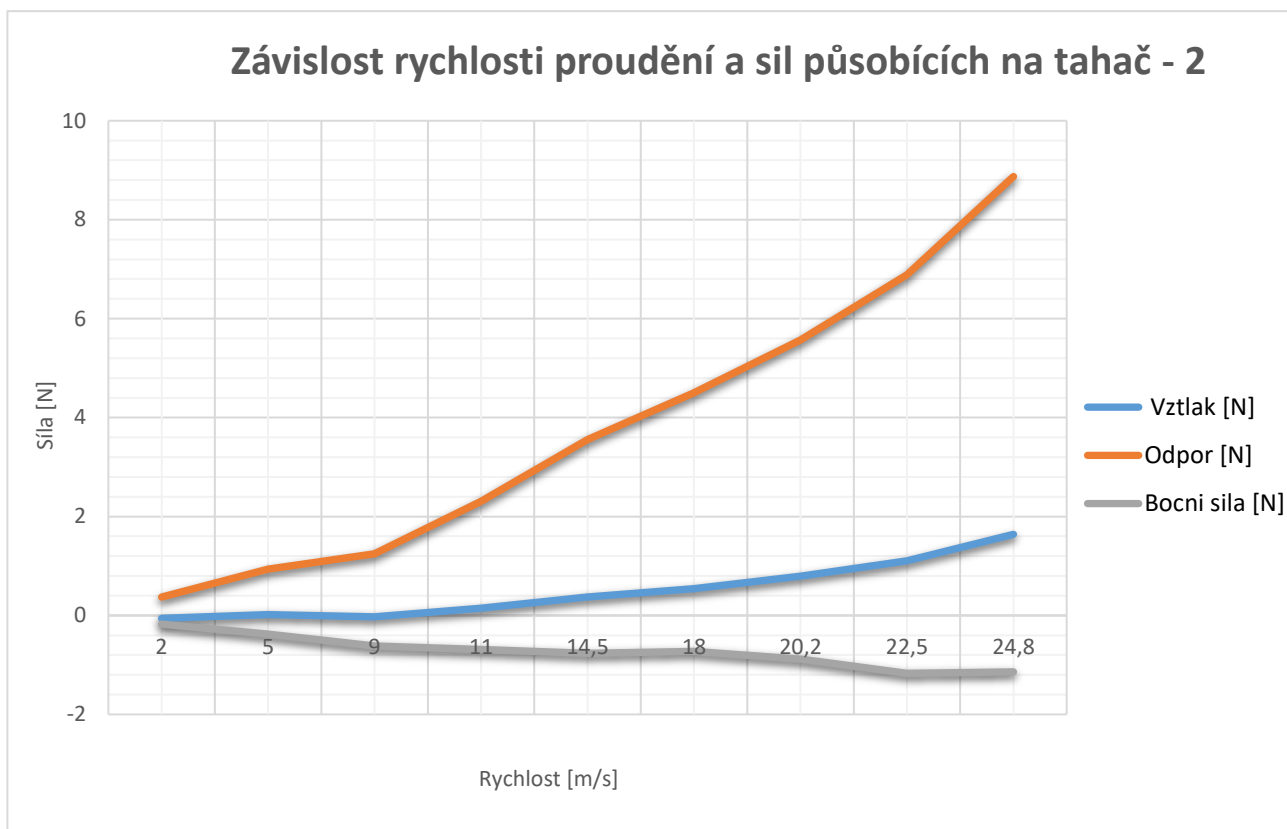
Z obrázku je patrné, že nastavba změnila polohu oblasti úplavu směrem k zadní části tahače. U bodu odtržení autor předpokládal znatelnější posunutí k zadní části vozu. To se však nepotvrdilo.

Získané hodnoty z měření sil při stejných rychlostech v tunelu a následného vyjádření aerodynamických součinitelů jsou uvedené v tabulce 3.

Tabulka 3 – Naměřené hodnoty -2

Rychlost proudění [m/s]	Vztlak [N]	Odpor [N]	Boční síla [N]	$c_L[1]$	$c_D[1]$	$c_s[1]$
2	-0,018080	0,170812	-0,0273	-0,20854	1,97015	-2,81734
5	-0,057820	0,371956	-0,17504	-0,10670	0,68642	-2,89024
9	0,017851	0,935642	-0,37933	0,010168	0,53292	-1,93316
11	-0,024960	1,248412	-0,61752	-0,00952	0,47600	-2,1067
14	0,149292	2,306941	-0,68894	0,03276	0,50622	-1,35264
18	0,375612	3,553953	-0,76622	0,053485	0,50606	-0,97621
20,2	0,541234	4,499154	-0,72592	0,061196	0,50870	-0,73438
22,5	0,794455	5,568913	-0,88272	0,072401	0,50751	-0,71977
24,8	1,106504	6,884485	-1,16980	0,083002	0,51642	-0,78514

Vykreslení hodnot sil z měření je znázorněno v grafu č. 2. Jako v předchozím případě má dle očekávání největší podíl působících sil síla odporová. Minimální boční síla a lehce rostoucí vztlaková síla.



Graf 2 - Závislost rychlosti proudění a sil působících na tahač - 2

### 3.6 Nejistoty měření

Za nejzásadnější nejistotu měření můžeme považovat velikost modelu v poměru ke skutečnosti a s tím spojené přepočty. Další chyby mohou být spojené s nepohyblivou deskou. Ta tím pádem nedokáže plně nahradit vozovku. A v poslední řadě mechanické upevnění modelu a jeho výroba.

Vzhledem k tomu, že ze tří měřených sil měla nejzásadnější vliv síla odporová, budou následné výpočty prováděny pouze s touto silou, respektive odporovým součinitelem  $c_D$ , který je vhodnější pro porovnání obou výsledků.

Měření sil probíhalo pomocí tenzometrů typu *L6D Load Cell*. Silové měření probíhalo pomocí tří tenzometrů s maximální kapacitou 3 kg, přičemž zatížení jednoho tenzometru odpovídá přibližně jedné třetině výsledné hodnoty. Výrobce udává přesnost 0,023 % maximálního rozsahu.

Absolutní chyba:

$$u_{FA} = \frac{\frac{0,023}{100} \cdot 30}{\sqrt{3}} = 0,004 \text{ N} \quad (3.6-1)$$

Relativní chyba je rovna:

$$u_{FR} = 3 \cdot \frac{0,004}{F_i} = \text{výsledky jsou uvedeny v tabulce číslo 4.} \quad (3.6-2)$$

$F_1[N]$	$F_2 \text{ bez}[N]$	$u_{FR1}[I]$	$u_{FR2}[I]$	$u_{FR1}[\%]$	$u_{FR2}[\%]$
0,17081	0,18987	0,070253	0,063201	7,025268	6,32008
0,37196	0,46018	0,032262	0,026077	3,226188	2,607698
0,93564	1,11196	0,012825	0,010792	1,282542	1,07918
1,24841	1,67724	0,009612	0,007155	0,961221	0,715462
2,30694	3,00353	0,005202	0,003995	0,520169	0,39953
3,55395	4,4908	0,003377	0,002672	0,337652	0,267213
4,49915	5,69425	0,002667	0,002107	0,266717	0,210739
5,56891	6,97008	0,002155	0,001722	0,215482	0,172165
6,88449	8,5086	0,001743	0,00141	0,174305	0,141034

Tabulka 4 Nejistoty měřených sil

Z tabulky je patrné, že měření při nízkých rychlostech má vysokou nepřesnost. A proto je pro porovnání výsledků nevhodné, až zavádějící.

Nejistota rychlostního měření se získá obdobným způsobem, s rozdílem nepřímého měření. Nejprve je proto nutné určit rozdíl tlaků. Podle rovnice (3.6–3). Zařízení na jeho snímání měří s přesností 0,2 % maximálního rozsahu, který je roven deseti palcům vodního sloupce. Po přepočtu tedy 2540 Pa.

$$\Delta p = \frac{c^2 \cdot \rho}{2} \quad (3.6-3)$$

Absolutní chyba:

$$u_{pA} = \frac{\frac{0,2}{100} \cdot 2540}{\sqrt{3}} = 2,93 \text{ Pa} \quad (3.6-4)$$

Relativní chyba je rovna:

$$u_{pR} = \frac{2,93}{p_i} = \text{výsledky jsou uvedeny v tabulce číslo 5.} \quad (3.6-5)$$

Pokud se z rovnice (3.3-1) vyjádří rychlost, pak nejistota rychlosti tohoto měření po zanedbání nejistoty měření hustoty vzduchu bude odpovídat [11]:

$$u_{CR}[\Delta p^k] = k \cdot \Delta p^{k-1} \cdot u_{\Delta pR} = 0,5 \cdot \Delta p^{0,5-1} \cdot u_{\Delta pR} \quad (3.6-6)$$

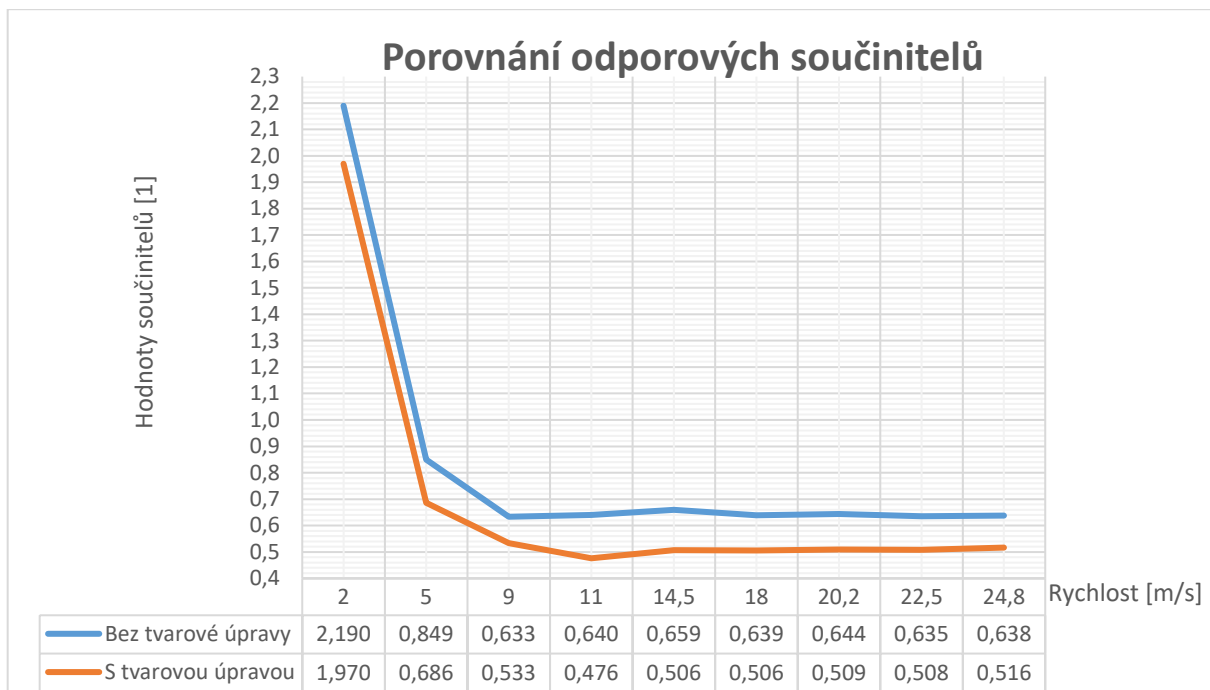
Pro výsledky z této rovnice po dosazení odpovídajících hodnot viz níže.

Rychlost proudění [m/s]	$\Delta p$ [Pa]	$u_{\Delta pR}$ [1]	$u_{pR}$ [%]	$u_{CR}$ [1]	$u_{CR}$ [%]
2	2,55	1,150172	115,0172	0,360133	36,01329
5	15,9375	0,184028	18,40276	0,023049	2,304851
9	51,6375	0,056799	5,679863	0,003952	0,395208
11	77,1375	0,038022	3,802222	0,002165	0,216459
14,5	134,0344	0,021882	2,188199	0,000945	0,094504
18	206,55	0,0142	1,419966	0,000494	0,049401
20,2	260,1255	0,011275	1,127509	0,00035	0,034954
22,5	322,7344	0,009088	0,908778	0,000253	0,025293
24,8	392,088	0,00748	0,748031	0,000189	0,018889

Tabulka 5 – Nejistoty 2

Bohužel kvůli neznámým nejistotám A/D převodníku není možné určit správnou odchylku měření pro odporový součinitel. Je však patrné, že při nižších rychlostech je odchylka měření velmi vysoká a nejpřesnější měření je při rychlosti 24,8 m/s.

Pro přesnější porovnání výsledků hodnot naměřených bez tvarové úpravy a s tvarovou úpravou se určí ještě statistická nejistota typu A ( $u_{a1}, u_{a2}$ ). V oblasti, kdy je předpokládán odporový součinitel za konstantní. Z grafu číslo 3 je celkem patrné, že tento předpoklad nastává přibližně po překročení 9 m/s, což odpovídá spočteným nejistotám. (3.3-1)



Graf 3 - Porovnání odporových součinitelů

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{7} (0,633 + 0,640 + 0,659 + 0,639 + 0,644 + 0,635 + 0,638) = 0,641 \quad (3.6-1)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{7} (0,533 + 0,476 + 0,506 + 0,506 + 0,509 + 0,508 + 0,516) = 0,508 \quad (3.6-2)$$

$$u_{a1}' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_1)^2}{n(n-1)}} = 0,021$$

$$u_{a1} = k \cdot u_{a1}' = 1,3 \cdot 0,021 = 0,027 \quad \Rightarrow \quad c_{D1} = 0,641 \pm 0,027 \quad (3.6-3)$$

$$= u_{a2}' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_2)^2}{n(n-1)}} = 0,041$$

$$u_{a1} = k \cdot u_{a1}' = 1,3 \cdot 0,041 = 0,053 \quad \Rightarrow \quad c_{D2} = 0,508 \pm 0,053 \quad (3.6-4)$$

### 3.7 Porovnání

V obou případech je boční síla téměř zanedbatelná. V případě nástavby je samozřejmě vyšší, neboť samotná výroba i připojení na model bylo nedokonalé.

Překvapující bylo zjištění, že tahač bez návěsu generuje přítlačnou sílu. V druhém případě je již síla vztlaková, tedy opačného směru a zároveň je poloviční. Pravděpodobně je to dáno tím, že v oblasti pro vytvoření úplavu se zároveň generují zpětné víry s přítlačným účinkem.

Pokud jde o silové měření, tak nejzásadnější síla – tedy odporová je z výsledků po aplikování nastavby znatelně menší. Zatímco v prvním případě je  $F_D$  přibližně rovna 8,5 N, tak v druhém případě – díky provedené úpravě – síla  $F_D$  nedosahuje ani 7 N, a to při stejné rychlosti obtékání téměř 25 m/s. Výhodnější pro porovnání je však odporový součinitel. Ten při nejvyšší rychlosti, kde je chyba měření nejmenší v první případě dosáhl velikosti  $c_{D1} = 0,638$  a po úpravě  $c_{D2} = 0,516$ . Nejistotu těchto hodnot nelze přesně určit. Proto se stanoví dle předchozích výpočtů a kvalifikovaného odhadu na 2,5 %. V takovém případě jsou hodnoty uvedeny v tabulce číslo pět.

<b><math>c_D</math></b>	
Bez úpravy	Po úpravě
<b>0,638 ± 0,016</b>	<b>0,516 ± 0,013</b>

*Tabulka 6 - Hodnoty součinitele*

To znamená, že aplikací tvarové nastavby je možné dosáhnout  $\Delta c_D \approx 19 \%$ .

Po aplikaci tvarové úpravy bylo očekáváno větší posunutí bodu odtržení ve směru proudnic. Oddálení bodu odtržení však vizualizace neukázala v takové míře, v jaké bylo očekáváno.

## 4 Závěr

Byly provedeny dva typy pokusů v aerodynamickém tunelu Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky. Nejprve pro tahač bez návěsu. Následně byla navržena tvarová úprava, za účelem snížení spotřeby. Ta byla vyrobena a přilepena k tahači, přičemž se oba typy pokusů opakovaly. Díky tomu se zjistilo snížení odporového součinitele  $c_D$  přibližně o 19 %, který má zásadní vliv na spotřebu paliva. Tím pádem, pokud by jel samotný tahač, dalo by se aplikovat zařízení, které by dosáhlo právě navrženého tvaru, což by snížilo spotřebu paliva. Avšak důležité je si uvědomit, v jaké míře jezdí nepřipojený tahač. Dle mého průzkumu je tato četnost velmi nízká ( $\approx 0,1 \%$  ročního nájezdu vozidla) a investice do zařízení takového typu je tím pádem nevratná.

## 5 Seznam použité literatury

- [1] PÍCHA, Bohumil. *Aerodynamika nízkých a vysokých rychlostí*. 1. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1987.
- [2] NOŽIČKA, Prof. *Mechanika tekutin*. První. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02865-8.
- [3] JANSA, Karel. *Základy aerodynamiky a mechaniky letu*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1979.
- [4] HÅKANSSON, CHRISTOFFER a MALIN LENNGREN. *CFD Analysis of Aerodynamic Trailer Devices for Drag Reduction of Heavy Duty Trucks*. Sweden, 2010. Master's Thesis. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg.
- [5] BEDNÁŘ, Marek. Tento supersport mezi tahači měl přepsat historii kamionů, nezměnil nic. *Autoforum.cz* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/fascinace/tento-supersport-mezi-tahaci-mel-prepsat-historii-kamionu-nezmenil-nic/>
- [6] BEDNÁŘ, Marek. MAZ-2000 Perestrojka: sovětský pokus o revoluční kamion vedl do slepé uličky. *Autoforum.cz* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/fascinace/maz-2000-perestrojka-sovetsky-pokus-o-revolucni-kamion-vedl-do-slepe-ulicky/>
- [7] SULITKA, Matěj. *Aerodynamická optimalizace dopravních prostředků*. Praha, 2004. Disertační práce. ČVUT.
- [8] KOTTÁS, Hugo. Volvo Iron Knight (2016) je nejrychlejším tahačem světa. *Autoweb* [online]. Praha, 2016 [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <https://www.autoweb.cz/volvo-iron-knight-2016-je-nejrychlejsim-tahacem-sveta/>
- [9] Buggyra. *O autíčkách* [online]. Valašské Meziříčí, b.r. [cit. 2018-07-29]. Dostupné z: <http://svoboda.oa-vm.cz/nas-tym/>
- [10] SOROKIN, Egor. *Měření vlastností aerodynamického tunelu*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Vít Štorch.
- [11] NOVÁK, Jiří. Základy teorie chyb a zpracování fyzikálních měření. *WebFyzika* [online]. b.r. [cit. 2018-08-01]. Dostupné z: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/teoriechyb.pdf>

## 6 Seznam obrázků

Obr. 1 - Upřesnění tématu bakalářské práce .....	9
Obr. 2 - Rychlostní profil v mezní vrstvě .....	12
Obr. 3 - Steinwinter 2040.....	13
Obr. 4 - natočený modul MAZ – 2000.....	14
Obr. 5 - MAZ – 2000 .....	14
Obr. 6 - Tvarově upravený tahač s přívěsem .....	15
Obr. 7 - Silniční vlak.....	16
Obr. 8 - Tesla Semi .....	16
Obr. 9 - Prototyp jedoucí na eHighway .....	16
Obr. 10 - Volvo závodní truck .....	17
Obr. 11 - The Iron Knight .....	17
Obr. 12 - Tahač „bez nosu“.....	18
Obr. 13 - Tahač „s nosem“.....	18
Obr. 14 - Problematika střešního deflektoru .....	19
Obr. 15 - Model měřeného tahače.....	21
Obr. 16 - Vizualizace kouřem 1 .....	21
Obr. 17 - Detail tvarové úpravy .....	24
Obr. 18 - Vizualizace kouřem 2 .....	25

## 7 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Koeficient odporu [2] .....	11
Tabulka 2 - Naměřené hodnoty -1 .....	22
Tabulka 3 - Naměřené hodnoty -2 .....	25
Tabulka 4 - Nejistoty měřených sil .....	27
Tabulka 5 - Nejistoty 2.....	28
Tabulka 6 - Hodnoty součinitele.....	30

## 8 Seznam grafů

Graf 1 - Závislost rychlosti proudění a sil působících na tahač - 1 .....	23
Graf 2 - Závislost rychlosti proudění a sil působících na tahač - 2 .....	26
Graf 3 - Porovnání odporových součinitelů .....	29

## 9 Seznam přílohy

Příloha 1 – Základní siluety tahačů.....	33
Příloha 2 – Výkres nástavby.....	35



# Příloha 1 – Základní siluety tahačů

			<a href="https://hum3d.com/3d-models/mercedes-benz-atron-chassis-truck-2011/">https://hum3d.com/3d-models/mercedes-benz-atron-chassis-truck-2011/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/peterbilt-579-tractor-truck-2012/">https://hum3d.com/3d-models/peterbilt-579-tractor-truck-2012/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/peterbilt-379-tractor-truck-1987/">https://hum3d.com/3d-models/peterbilt-379-tractor-truck-1987/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/ford-sterling-a9500-tractor-truck-2006/">https://hum3d.com/3d-models/ford-sterling-a9500-tractor-truck-2006/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/mack-pinnacle-day-cab-tractor-truck-2011/">https://hum3d.com/3d-models/mack-pinnacle-day-cab-tractor-truck-2011/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/international-9600-tractor-truck-1994/">https://hum3d.com/3d-models/international-9600-tractor-truck-1994/</a>

			<a href="https://hum3d.com/3d-models/hyundai-xcient-p410-tractor-truck-2013/">https://hum3d.com/3d-models/hyundai-xcient-p410-tractor-truck-2013/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/western-star-4900-sf-sleeper-cab-tractor-truck-2008/">https://hum3d.com/3d-models/western-star-4900-sf-sleeper-cab-tractor-truck-2008/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/western-star-5700xe-day-cab-tractor-truck-2014/">https://hum3d.com/3d-models/western-star-5700xe-day-cab-tractor-truck-2014/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/western-star-4700-sb-day-cab-tractor-truck-2011/">https://hum3d.com/3d-models/western-star-4700-sb-day-cab-tractor-truck-2011/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/peterbilt-335-he-tractor-truck-2008/">https://hum3d.com/3d-models/peterbilt-335-he-tractor-truck-2008/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/iveco-stralis-500-tractor-truck-2012/">https://hum3d.com/3d-models/iveco-stralis-500-tractor-truck-2012/</a>
			<a href="https://hum3d.com/3d-models/iveco-stralis-tractor-truck-2012/">https://hum3d.com/3d-models/iveco-stralis-tractor-truck-2012/</a>

## Příloha 2 – Výkres nástavby

