



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## AERODYNAMICKÉ TUNELY PRE AUTOMOBILY

WIND TUNNELS FOR AUTOMOBILES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ARNOLD GROSS

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ ČAVOJ



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/14

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Arnold Gross

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Aerodynamické tunely pro automobily**

v anglickém jazyce:

### **Wind tunnels for automobiles**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis konstrukce a vybavení aerodynamických tunelů určených pro automobily.

Cíle bakalářské práce:

1. Základní rozdělení aerodynamických tunelů a popis sekcí, ze kterých jsou sestaveny.
2. Uvedení vybraných parametrů, které jsou při návrhu tunelů pro automobily sledovány.
3. Příklady specifického vybavení tunelů pro automobily.
4. Příklady vybraných tunelů s uvedením základních parametrů.

Seznam odborné literatury:


- [1] HUCHO, W-H. et al Aerodynamics. Springer handbook of experimental fluid mechanics [online]. Online-Ausg. Berlin: Springer Science Business Media, 2007, s. 1043-1155. ISBN 978-3-540-30299-5.
- [2] HUCHO, W-H. Aerodynamics of road Vehicles. 4 ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998, 918 s. ISBN 07-680-0029-7.
- [3] Wind Tunnel International [online]. Dostupné z:  
[http://issuu.com/magazineproduction/docs/wti\\_issue\\_2\\_2010\\_ezine](http://issuu.com/magazineproduction/docs/wti_issue_2_2010_ezine)
- [4] WALL, A. Simulating the Volvo Cars Aerodynamic Wind Tunnel with CFD [online]. Göteborg, 2013 [cit. 2013-11-12]. Dostupné z:  
<http://studentarbeten.chalmers.se/publication/179897-simulating-the-volvo-cars-aerodynamic-wind-tunnel-with-cfd>. Master's thesis. Chalmers University of Technology.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Čavoj

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 7.11.2013



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan



## ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou aerodynamických tunelov pre automobily. Daná práca sa zaoberá základným rozdelením aerodynamických tunelov a popisom sekcií, z ktorých pozostáva. Následne sa zameriava na vybrané parametre, ktoré sú pri návrhu aerodynamických tunelov pre automobily najviac sledované a na príkladoch vysvetlené špecifické vybavenia tunelov pre zvýšenie efektivity a využiteľnosti súčasných aerodynamických tunelov. Záverečná časť sa zaoberá príkladmi vybraných tunelov s uvedením základných parametrov.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

aerodynamika, automobil, tunel, parameter

## ABSTRACT

The bachelor thesis focuses on wind tunnels for automobiles. The first part of the bachelor thesis refers to the basic division of wind tunnels and to the main description of each section, which consists of. Then focuses to the monitoriest selected paramatres which are necessary for designing cars. The next part refers to the most efficient and the most important parts of the wind tunnels.el. The final part refers to examples of selected tunnels with specifyied basic parameters.

## KEYWORDS

aerodynamics, automobile, tunnel, parameter





## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

GROSS, A. *Aerodynamické tunely pre automobily*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 46 s. Vedúci diplomovej práce Ing. Ondřej Čavoj.







## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Ondřej Čavoj a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 20. mája 2014

.....

Arnold Gross





## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem Ing. Ondřejovi Čavojovi za pomoc a metodickú kontrolu, usmerňovanie a vedenie pri bakalárskej práci.

Arnold Gross



## OBSAH

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.....	1
Úvod.....	14
1 Základné rozdelenie aerodynamických tunelov a popis sekcií, z ktorých sú postavené..	15
1.1 Základné rozdelenie aerodynamických tunelov .....	15
1.1.1 Rozdelenie aerodynamických tunelov podľa spôsobu prevádzky.....	15
1.1.2 Rozdelenie aerodynamických tunelov podľa meracieho priestoru .....	16
1.2 Popis sekcií, z ktorých sú aerodynamické tunely postavené .....	17
1.2.1 Testovacia oblasť.....	18
1.2.2 Prvý difúzor .....	19
1.2.3 Rohy .....	20
1.2.4 Oblasť ventilátora.....	20
1.2.5 Tryska.....	21
1.2.6 Chladenie aerodynamických tunelov.....	21
2 Uvedenie vybraných parametrov, ktoré sú pri návrhu tunelov pre automobily sledované	23
2.1 Testovacia oblasť .....	23
2.1.1 Plocha pohyblivého pásu a otočnej podlahy.....	23
2.2 Kvalita prúdiaceho vzduchu .....	24
2.2.1 Veľkosť ventilátora a jeho vibrácie a hlučnosť .....	25
2.3 Rohové lopatky a redukovanie turbulentného prúdenia .....	26
2.4 Vplyv prvého a druhého difúzora na rýchlosť a tlak prúdenia .....	27
3 Príklady špecifického vybavenia tunelov pre automobily.....	28
3.1 Tepelný výmenník .....	28
3.2 Pohyblivý pás v testovacej oblasti .....	28
3.2.1 Pininfarina .....	29
3.2.2 BMW Aerolab .....	30
3.3 Aerodynamika pri otáčaní kolies .....	30
3.3.1 Prúdenie v okolí kolies .....	30
3.3.2 Laserová anemometria PIV (Particle Image Velocity).....	31
3.4 Variabilná tryska.....	33
4 Príklady vybraných tunelov s uvedením základných parametrov .....	34
4.1 Klimatický aerodynamický tunel Mercedes- Benz.....	34
4.1.1 Reálne podmienky testovania za každého počasia .....	34
4.1.2 Od mierneho prúdenia cez orkán k arktickým mrazom a snežným búrkam .....	35
4.1.3 Hasiaca technika.....	35



4.1.4	Účinnosť .....	36
4.2	Aerodynamický tunel od Volvo Car Corporation.....	36
4.2.1	Testovanie nového modelu Volvo C30 .....	36
4.2.2	Reálne správanie sa vozidla počas jazdy pri zatáčaní .....	36
4.2.3	Aerodynamika a reálna spotreba .....	38
4.3	Aerodynamický tunel od Toyoty .....	39
4.3.1	Pokrok v aerodynamickom tunely v roku 2011.....	40
4.3.2	Inováciami k splneniu limitov .....	41
4.3.3	Technické parametre aerodynamického tunelu .....	41
	Záver.....	43
	Zoznam použitých skratiek a symbolov .....	46



## ÚVOD

Každý automobil, s ktorým sa stretávame a vidíme na našej planéte každý deň má určitý tvar v závislosti k využitiu. Niektoré automobily majú iné priority ako tie ďalšie, a teda prispôbené k obtekaniu vzduchom a následnému zníženiu aerodynamického odporu. No iné zas k preprave osôb či materiálu. Každý automobil je vyvíjaný za účelom zvýšenia efektivity využiteľnosti a zníženia nákladov na prevádzku. K jedným z najvýraznejších aspektov patrí aj aerodynamika vozidiel, ktorá je vyvíjaná v aerodynamických tuneloch. Ich cieľom je zistenie najlepších kriviek pri zachovaní autenticity vozidla k ďalším modelovým radám ako aj k značke. Aerodynamika sa na finančnej prevádzke vozidla podieľa vyše 50% podielom a to už aj pri jazdách okolo 100 km/h ide väčšina energie na prerážanie vzduchu.

Prvotná časť sa zaoberá rozdelením a popisom aerodynamických tunelov pre automobily. Hlavné rozdelenie je na aerodynamické tunely uzavreté a otvorené. Medzi najčastejšie využívaný typ aerodynamického tunelu v automobilovom priemysle sa radí uzavretý typ z dôvodu simulácie aj vyšších rýchlostí. Práca sa ďalej zameriava na vybrané parametre pri rôznych druhoch tunelov, ktoré sú pri aerodynamických tuneloch pre automobily požadované a sledované pre ďalšie zefektívnenie výskumu v aerodynamike. Následne sa práca zameriava aj na špecifické vybavenie tunelov pre automobily a ich účinky v praxi a ďalšie príklady vybraných tunelov s uvedením základných parametrov.



# 1 ZÁKLADNÉ ROZDELENIE AERODYNAMICKÝCH TUNELOV A POPIS SEKCIÍ, Z KTORÝCH SÚ POSTAVENÉ

Dlhoročné pátranie za zlepšením životnej úrovne a vylepšeniach zaviedlo ľudstvo aj do sveta fyziky a obtekania telies vzduchom. Mnohoročný výskum priviedol novátorstvo až ku dnešným typom aerodynamických tunelov. Rôzne rozdiely v ich konštrukciách delia aerodynamické tunely podľa spôsobu prevádzky, usporiadania meracieho priestoru atď. [4]

## 1.1 ZÁKLADNÉ ROZDELENIE AERODYNAMICKÝCH TUNELOV

Základné rozdelenie aerodynamických tunelov [4]:

### 1, podľa spôsobu prevádzky na tunely

- a) so stálym chodom
- b) s prerušovaným chodom

### 2, podľa meracieho priestoru na tunely

- a) s otvoreným meracím okruhom
- b) s uzatvoreným meracím priestorom

### 3, podľa rýchlosti prúdenia vzduchu na tunely:

- a) **nízkorýchlostné**- rýchlosť prúdiaceho vzduchu v aerodynamickom tunely je natoľko nízka, že nedochádza k jeho stlačeniu.
- b) **vysokorýchlostné**- rýchlosť prúdiaceho vzduchu je dokonca možné pozorovať ako jej vplyvy stlačenia
- c) **podzvukové**- rýchlosť prúdiaceho vzduchu je pozorovateľná ako jej vplyv pri stlačení no rýchlosť vzduchu prúdením neprekonáva rýchlosť zvuku
- d) **nadzvukové**- rýchlosť prúdiaceho vzduchu presahuje rýchlosť zvuku

### 4, podľa orientácie osy prúdenia na tunely:

- a) so zvislou osou
- b) s vertikálnou osou

### 1.1.1 ROZDELENIE AERODYNAMICKÝCH TUNELOV PODĽA SPÔSOBU PREVÁDZKY

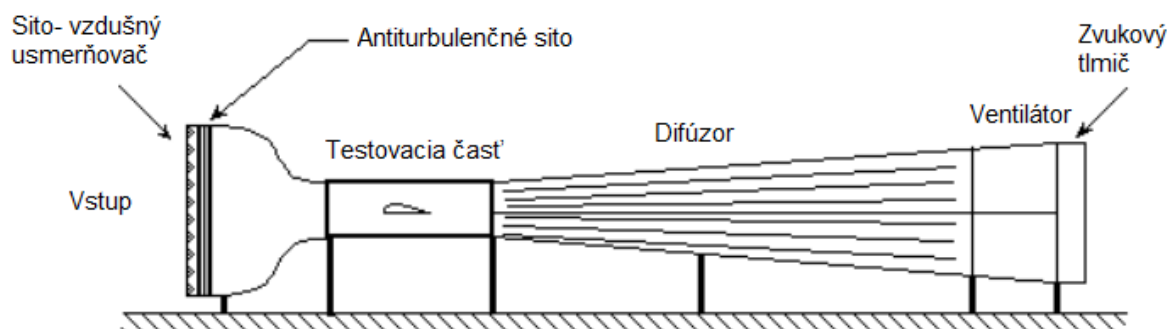
Vývoj aerodynamických tunelov so stálym chodom bol vynútený potrebou neustáleho prúdenia a obtekania vzduchom. Ide hlavne o simuláciu pohybujúceho sa automobilu v určitej rýchlosti, kedy sa skúma spôsob obtekania detailne každej časti vozidla. [4]



Pre nadzvukové testovanie lietadiel boli vyvinuté aerodynamické tunely s prerušovaným chodom. Hlavným dôvodom prerušovaného chodu je zvýšenie tlaku v pretlakovej nádrži. Následná expanzia do tunelu simuluje nadzvukového obtekania. Tento spôsob má veľmi krátkodobý efekt, keďže pretlaková nádrž má obmedzený objem.[4]

### 1.1.2 ROZDELENIE AERODYNAMICKÝCH TUNELOV PODĽA MERACIEHO PRIESTORU

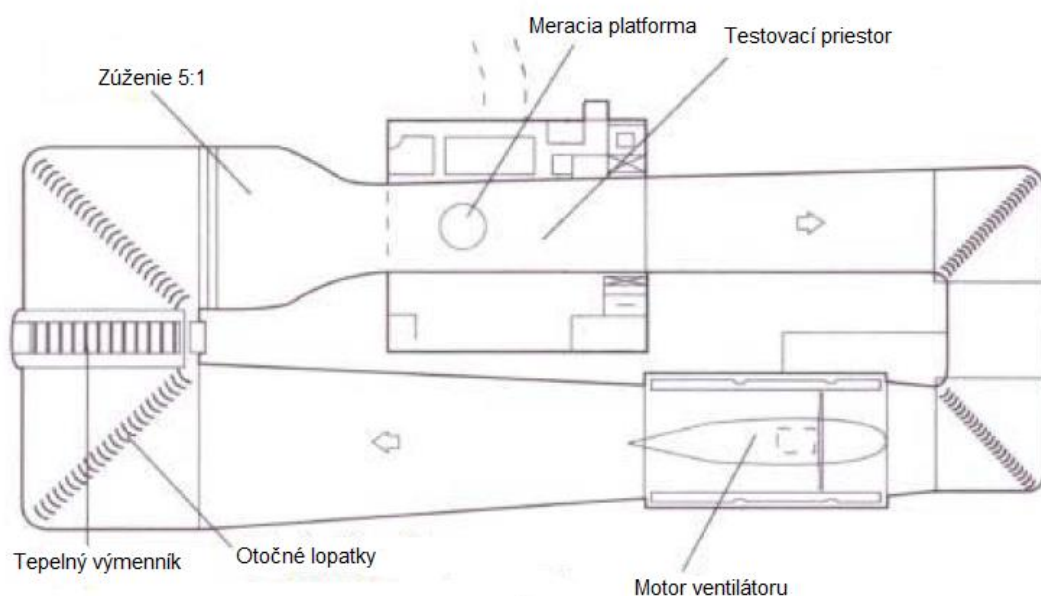
Eiffelov typ aerodynamického tunelu. Je to najjednoduchší aerodynamický tunel s otvoreným meracím okruhom. Hlavnou výhodou daného typu aerodynamického tunelu je cena, teda finančné náklady na výstavbu a bezpochyby sem patrí aj jeho využiteľnosť so skúmaním s dymom či výfukovými plynmi, ktoré by sa pri uzavretom meracom okruhu mohli vracat'. No aj tento typ aerodynamického tunelu má svoje nevýhody ako umiestnenie tunelu či je v uzavretom priestore alebo vonku kde naň vplýva vietor a môže to spôsobovať nadmernú hlučnosť rotoru ventilátoru prípadne to môže viesť až k porušeniu hlukových limitov uzákonených v Európskom parlamente. Teda najvhodnejšie miesto je sa dá pokladať uzavretý priestor s izbovou teplotou pretože pri nižších teplotách v okolí tunelu a jeho spustení dôjde podľa fyzikálnych zákonov k veľkému zníženiu teploty. No a ďalšou negatívnou vlastnosťou daného tunelu je aj energetická náročnosť pre dosiahnutie porovnateľného výkonu s uzavretým meracím okruhom. Celková vhodnosť daného typu je teda v uzavretých priestoroch so stálymi teplotami a v menších veľkostiach ako v skutočnosti.[1]



Obr. 1 Eiffelov typ aerodynamického tunelu s otvoreným meracím okruhom [5]

Druhý typ aerodynamického tunelu s uzavretým meracím okruhom je najviac rozšíreným druhom z aerodynamických tunelov. Má omnoho nižšie energetické požiadavky a hlavne naň nevpływajú okolité poveternostné podmienky vetra, a teda je menej hlučný. Nápor vetra v tunely je aj ďaleko jednoduchšie ovládateľný. Jeho výstavba je možná ako v horizontálnom smere tak aj vo vertikálnom, ktorý zaberá ďaleko menej miesta. Medzi hlavné nevýhody sa radí vyššia cena a potrebné väčšie finančné prostriedky na výstavbu. Ďalším nevhodným javom vznikajúcim na základe trenia vzduchu o steny tunelu je aj nárast teploty a pri použití dymu aj jeho hromadenie pri dlhodobom testovaní. S dymom sa bojovať nedá, no ale narastajúca teplota je odbúrateľným faktorom inštalovaním výmenníkov tepla pre reguláciu teploty alebo inštalovaním vzduchových výmenníkov do stien tunelu ako to je aj znázornené na Obr. 2.[1]

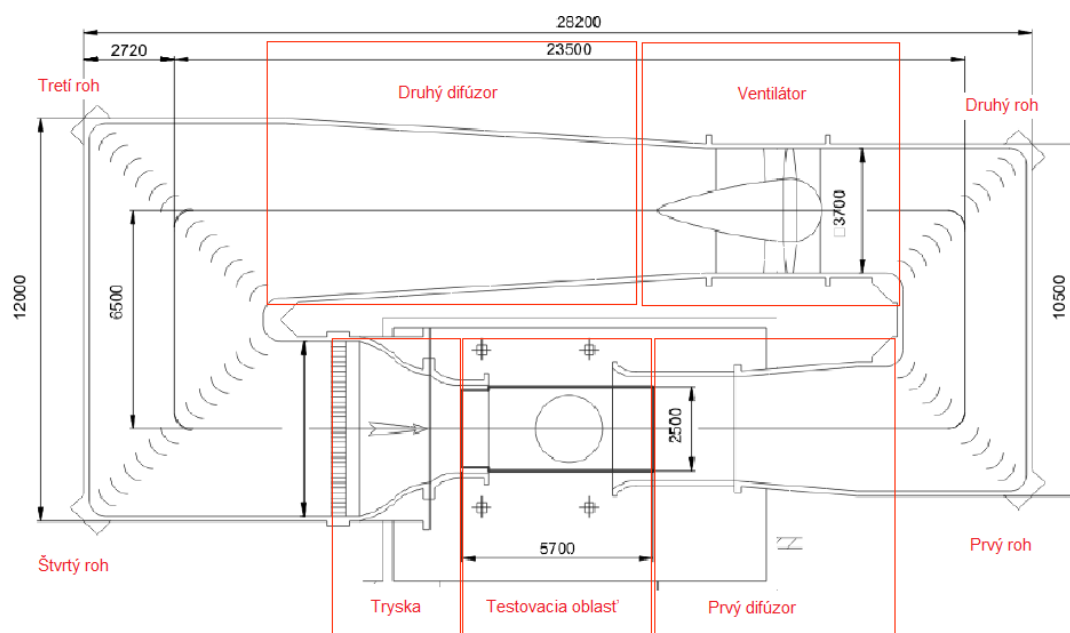




Obr. 2 Aerodynamický tunel s uzavretým meracím okruhom [5]

## 1.2 POPIS SEKCIÍ, Z KTORÝCH SÚ AERODYNAMICKÉ TUNELY POSTAVENÉ

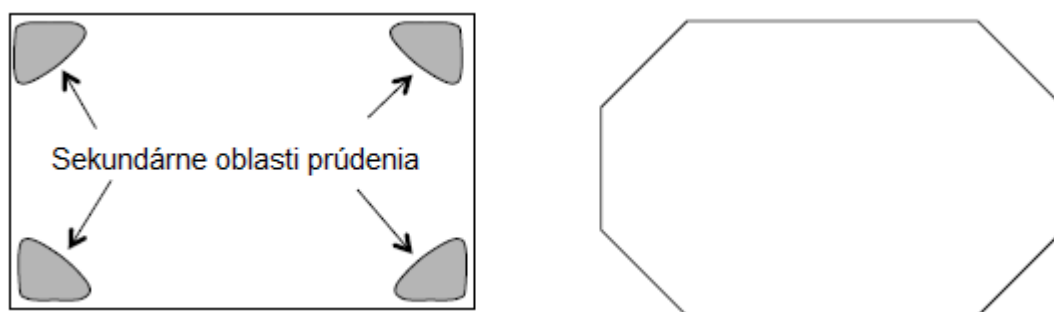
Aerodynamický tunel sa skladá z veľkého množstva častí a sekcií. No medzi tie hlavné časti patrí testovacia časť na konkrétne testovanie s najväčším vstupom do tunelu a to aj z dôvodu upevnení a prístupu daného vozidla. Hneď za ňou nasleduje prvý difúzor, ktorý zväčšuje priemer tunelu a teda znižuje rýchlosť prúdiaceho vzduchu v tunely, za ktorým pokračuje prvý roh s natáčacími lopatkami a ešte ďalšie 3 rohy. No ešte pred ústím aerodynamického tunelu je ventilátor a ďalší difúzor k ďalšiemu nárastu priemeru tunela, po ktorom je už iba tryska.[5]



Obr. 3 Popis sekcií aerodynamického tunelu[5]

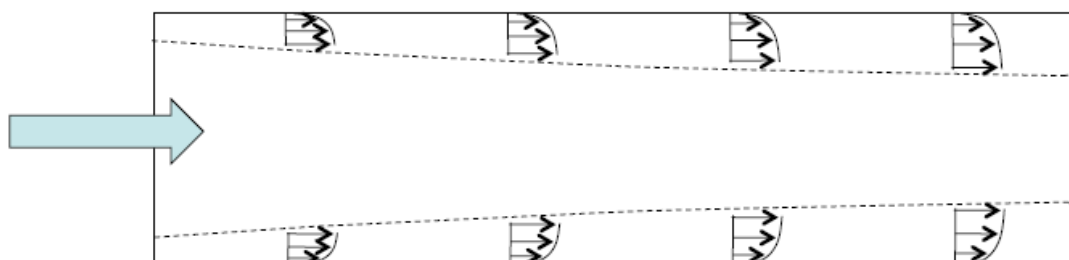
### 1.2.1 TESTOVACIA OBLASŤ

Hneď v úvode je potrebné podotknúť, že tvar testovacej oblasti nijako neovplyvňuje aerodynamické straty v tunely. Či už je ten tvar okrúhly, eliptický alebo štvorcový, alebo akéhokoľvek ľubovoľného tvaru, nemá to vplyv. I keď to takto zo začiatku vyzerá, že tvar testovacej oblasti nemá na nič vplyv, tak predsa je tu jedna stránka veci, a to cena stavby aerodynamického tunelu a požadovaná výkonnosť aerodynamického tunelu. Najobvyklejšími tvarmi sú osemuholník a obdĺžnik pre automobily. Tvar osemuholník v testovacej oblasti je vhodnejšia pre použitie z dôvodu minimalizácie sekundárnych prúdových strát v rohoch obdĺžnika, ako to je aj vyjadrené na Obr. 4. [5]



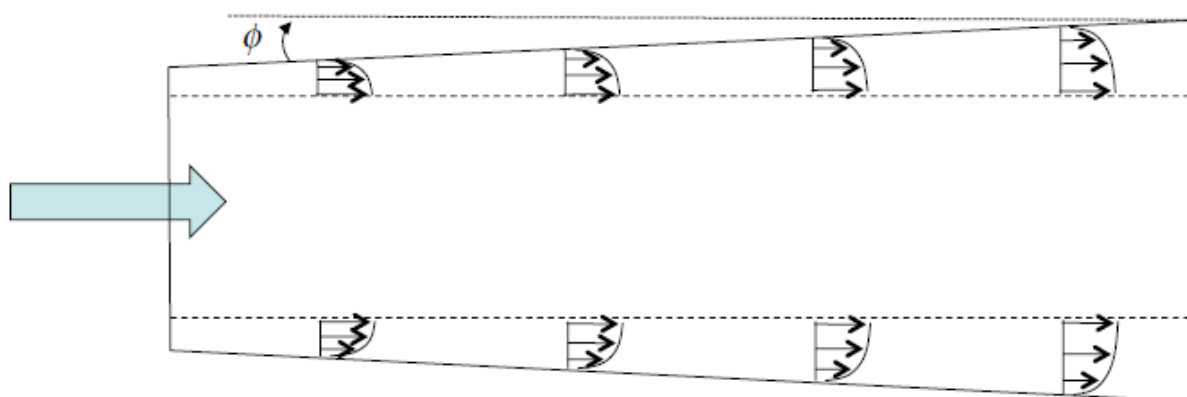
Obr. 4 Sekundárne oblasti prúdenia v testovacej oblasti[5]

Medzná oblasť pri odbornejšom pohľade nie je však úplne rovná, a to z toho dôvodu že medzná hranica rastie čím je dlhšia aj testovacia oblasť pričom sa znižuje jej efektívna plocha a vzrastá rýchlosť a klesá tlak Obr.5. [5]



Obr. 5 Bočný pohľad na testovaciu oblasť so zvýšením rýchlosti prúdenia a znížením tlaku [5]

Aby sme predišli vyššie spomínanému problému vo väčšine prípadov medzných oblastí s narastajúcou vzdialenosťou sa mení aj ich šírka. Presná hodnota daného uhlu, ktorá je často vyberaná je  $\phi=0,5^\circ$ , Obr.6. [5]



Obr. 6 Bočný pohľad na testovaciu oblasť so zväčšením plochy [5]

Základnými parametrami testovacej oblasti sú dĺžka, ktorá je obvykle navrhovaná ako identická dĺžka, prípadne dvojnásobná dĺžka hlavného rozmeru. Teda rozmery testovacej časti obdĺžnikového tvaru sú 6m x 4m a dĺžka je 6m až 12m. Z dôvodu dokázateľných strát v testovacej oblasti mala by byť čo najkratšia ako to je len možné. Ďalej tam musia byť adekvátne veľké okná, či osvetlenie, ale aj otvory pre trubky, či káble a iné. [5]

### 1.2.2 PRVÝ DIFÚZOR

Aerodynamické tunely vo všeobecnosti môžu mať všade rovnaký priemer pri priečnom reze, avšak výkonové straty závisia aj od rýchlosti vzduchu pohybujúceho sa tunelom. Takže platí, že pre zníženie rýchlosti prúdenia vzduchu v jednotlivých častiach tunelu kde neprebiehajú testy sa užíva difúzor. Na základe zníženej rýchlosti prúdenia vzduchu tunelom narastá tlak, čo spôsobuje nežiaduci efekt tlakového spádu. To môže spôsobiť rozdeľovanie prúdenia na stenách, čo ďalej môže spôsobovať vibrácie, zvýšené straty, stúpajúcu alebo oscilačnú rýchlosť letu v testovacej časti, či oscilačnú záťaž ventilátora. Aby sa predišlo takejto separácii, používajú sa dva difúzory, ktoré zväčšia danú oblasť maximálne na faktor 5 alebo 6. [5]



### 1.2.3 ROHY

V mnohých prípadoch aerodynamických tunelov s uzavretým meracím okruhom majú rohy  $90^\circ$  uhol no používajú sa aj  $180^\circ$  uhly. Tie sú ďalej napájané konštantnými oblastami. No aby sa predišlo stratám, v rohoch sú inštalované otočné lopatky, ktoré sú ľubovoľne nastaviteľné aby sa zabezpečil kvalitný prietok vzduchu podľa požiadaviek testu. [5]



NASA 16 Foot Transonic Tunnel Turning Vanes  
NASA Langley Research Center 5/1/1990 Image # EL-1996-00006

*Obr. 7Otočné lopatky v rohu aerodynamického tunelu NASA Langley Research Center[3]*

### 1.2.4 OBLASŤ VENTILÁTORA

Ventilátor je primárnym producentom prúdenia vzduchu pričom najväčšiu efektivitu dosahujú pri najvyšších otáčkach. Ventilátor sa nachádza v časti tunelu za druhým rohom. Nevhodným umiestnením ventilátoru je časť s najväčším priemerom tunelu, a taktiež ďalším nevhodným umiestnením je hneď za prvým difúzorom. Pri testoch môže dôjsť aj k odletu polámaných častí a to taktiež by mohlo viesť k poškodeniu ventilátoru čo je ďalším dôvodom umiestnenia ventilátoru až za druhým rohom. Časť ventilátoru je dvakrát, prípadne trikrát väčšia ako



testovacia oblasť pričom motor je obvykle zamontovaný vo vnútri gondoly. No takéto uloženie motoru aj požaduje chladenie motoru. Štandardnými rozmermi gondoly sú 30- 40% z dĺžky je priemer.[5]



*Obr. 8 Aerodynamický tunel- Univerzita obrany v Brne [6]*

### **1.2.5 TRYSKA**

Hlavnou úlohou trysky v aerodynamickom tunely je zrýchlenie prúdenia vzduchu z nízko- stratovej oblasti do testovacej časti. Ako každá iná časť tunela, má aj tryska svoje nežiaduce efekty, medzi ktoré sa radia aj rozdielne tlaky na vstupe a výstupe z trysky pričom pri kontrakcii môže dochádzať k oddeľovaniu hraničných vrstiev. Aby sme tomu dokázali predísť stačí opatrne navrhnuť geometriu trysky. Taktiež môže dôjsť k sekundárnemu prúdeniu v rohoch obdĺžnikového prierezu trysky. No tento problém sekundárneho prúdenia je veľmi ľahko odstrániteľný vytvorením osemuholníkovej trysky na výstupe. Až vďaka nástupu počítačovej techniky do aerodynamických tunelov bolo možné tieto problémy riešiť a následne odstrániť. [5]

### **1.2.6 CHLADENIE AERODYNAMICKÝCH TUNELOV**

Hlavnou energetickou stratou v prúdení vzduchu je teplo, ktoré je produkované ventilátorom. Toto teplo narastá aj so zvyšovaním prietoku v tunely a stráca sa všade do okolia a môže dochádzať aj ku nadmerným teplotám, a teda nežiaducim, pre testovanie. Aby sme zabránili



prehrievaniu tunela býva ochladzovaný prúdom vody na vonkajší obal tunelu, vodné chladenie otáčajúcich sa lopatiek, či vodou ochladzovaný chladič v najväčšej časti tunela. Ďalšou formou chladenia je aj vzduchový výmenník, ktorý neustále zamieňa ohriaty vzduch v tunely za chladnejší vzduch z okolia. [5]



## 2 UVEDENIE VYBRANÝCH PARAMETROV, KTORÉ SÚ PRI NÁVRHU TUNELOV PRE AUTOMOBILY SLEDOVANÉ

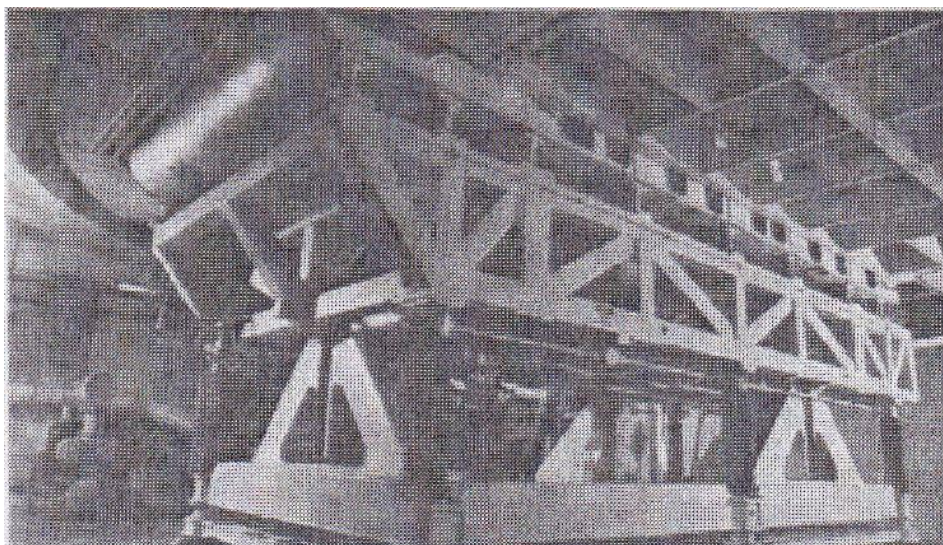
Pre čo najväčšiu efektivitu a vývoj aerodynamických tunelov je potrebné už dopredu vedieť na aký výskum má daný tunel slúžiť. Či sa bude jednať o testovanie zmenšených modelov automobilov ale pôjde o reálne veľkosti áut či dodávok. Tento poznatok predurčuje ďalej rôzne parametre pri výstavbe aerodynamických tunelov ako sú napríklad veľkosť testovacej plochy, či priemer ventilátora a celého systému potrubia pre prúdenie vzduchu, ako aj veľkosť trysiek.[10]

### 2.1 TESTOVACIA OBLASŤ

Veľkosť testovacej oblasti závisí od množstva parametrov a požiadaviek jednotlivých testov. Množstvo neuzatvorených aerodynamických tunelov má oddeliteľné časti bez difúzorov, veľmi flexibilné nastavenia. Východová tryska musí byť uchytená ak silový faktor je kritický. Široká škála použitia umožňuje množstvo rôznych testov. Pre tunely určené na testovanie uchytených modelov v testovacej časti, veľkosť a tvar sú väčšinou vytvárané na základe požadovaných testov. Najčastejší tvar je obdĺžnik. Najčastejší materiál používaný na vytvorenie stien testovacej oblasti pre menšie modely sa používa preglejka.[20]

#### 2.1.1 PLOCHA POHYBLIVÉHO PÁSU A OTOČNEJ PODLAHY

Pri navrhovaní testovacej oblasti sa vychádza hlavne z rozlohy, teda veľkosti, pohyblivého pásu pod automobilmi, kde sa simuluje prúdenie vzduchu pod podvozkom. Keďže daný pohyblivý pás musí byť univerzálny pre všetky druhy modelov danej značky automobilov aj jeho dĺžka či šírka musí byť postačujúca pre každý model. V aerodynamickom centre v meste Concord v Severnej Karolíne sa zamerali pri výstavbe aerodynamického tunelu predovšetkým na využitie pre širokú škálu použitia v komerčnej sfére. Preto je tu zvolený pohyblivý pás s dĺžkou 8,9 m a šírkou 3,2 m aby bolo možné testovať automobily pre súťaž série Nascar ale aj bežné modely vozidiel. Pre čo najdokonalejšiu simuláciu je vyvedená vzdušná tryska pred prednou časťou pásu na celú šírku. Daný pohyblivý pás je konštrukčne zapracovaný do otočnej podlahy, a to z toho dôvodu aby bolo možné skúmať správanie automobilu pri bočných nárazoch vetra, či bočnom vetre počas jazdy. Celá otočná podlaha má možnosť natočenia  $\pm 8^\circ$  do oboch strán. Značka Volvo zameraná na bezpečnosť vozidiel skúma aj silnejšie veterné prúdenie na bočný profil vozidla čo dosiahli zlepšením natočenia testovacej oblasti na  $\pm 30^\circ$  a priemerom otočnej podlahy až 6600 mm. [12]



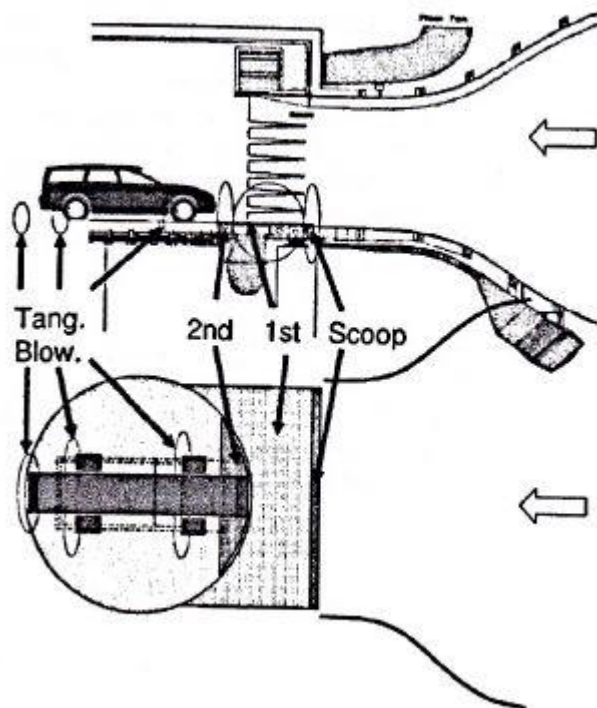
*Obr. 9 Pohyblivá pás v aerodynamickom tunely v meste Concord, Severná Karolína[25]*

## 2.2 KVALITA PRÚDIACEHO VZDUCHU

Kvalita a rýchlosť prúdiaceho vzduchu sú ovplyvnené Bernoulliho zákonom, kde pri vzrastajúcej rýchlosti prúdenia vzduchu narastá aj teplota vzduchu. Smer prúdenia v okolí modelu môže byť dokonca aj ovplyvnená aerodynamickým tvarom a povrchom modelu. Tlakové rozloženie vzduchu v okolí modelu je merané malými dierkami s manometrami, ktoré sa nachádzajú v celom okolí modelu prúdiaceho vzduchu. Celistvosť prúdiaceho vzduchu, prietokové zaoblenie, a intenzita turbulentného prúdenia sa merajú pri maximálnej rýchlosti v oblasti predného nárazníka, tak zvané prúdové pole. Teda pre testovanie vozidiel v aerodynamickom tunely je podstatné aby prúdiaci vzduch bol takmer identický s prúdením vzduchu pri jazde automobilu na vozovke. V aerodynamickom tunely dochádza presne k opačnému javu kedy vozidlo je stabilné a vzduch prúdi v jeho okolí. [10]

K docieleniu takmer ideálneho správania sa prúdového poľa sú inštalované rôzne trysky pred vozidlom v testovacej časti až po zužovaciú trysku pred testovacou oblasťou, ktorá ovplyvňuje v neposlednom rade aj rýchlosť prúdenia vzduchu a teda aj jej veľkosť je možné rôzne nastavovať v niektorých prípadoch. Plocha zužovacej trysky sa pohybuje v priemere okolo 17 metrov štvorcových plochy prúdiaceho vzduchu. Ďalšie vzdušné trysky sa nachádzajú pred a za vozidlom. Pre simuláciu prúdenia vzduchu za vozidlom sú inštalované trysky na tangenciálne prúdenie vzduchu. Ich vplyv simuluje turbulentné vírenie vzduchu za vozidlom. Veľkosť otvoru prvých trysiek je 5 mm, o niečo menšie sú trysky v druhom rade s otvorom o priemere 2 mm. Trysky na tangenciálne prúdenie sú o rozmeroch od 0,6 m do 1 m v druhom rade.[25][26]





Obr. 10 Chéma vzdušných trysiek v testovacej oblasti [26]

### 2.2.1 VEĽKOSŤ VENTILÁTORA A JEHO VIBRÁCIE A HLUČNOSŤ

Väčšina uzavretých aerodynamických tunelov je poháňaná prúdovými ventilátormi, ktoré produkujú statický tlak, ktorý narastá v jednom bode okruhu ako kompenzácia absolútnym tlakovým stratám vo zvyšku okruhu. Existuje veľké množstvo ventilátorov pre tunely pre pokrytie rôznych požiadaviek. Ľahko zaťažované ventilátory, ktoré majú zvyčajne vysoký pomer obvodovej rýchlosti na axiálnu rýchlosť, a vysokou relatívnou rýchlosťou lopatiek ventilátora produkujú požadovaný nárast tlaku s pomerne malou plochou čepelí lopatiek a vyzerajú veľmi podobne ako letecké vrtule. Avšak ventilátory s vysokými otáčkami produkujú veľké množstvo vibrácií, ak prúdenie vzduchu nie je konštantné. Najčastejšie dochádza k nárazovým vlnám v rozpätí rýchlostí od 150 do 200 m/s prúdenia vzduchu, čo ďalej spôsobuje hlučnosť a vibrácie ventilátora. Práve z týchto dôvodov sa v dnešnej dobe používajú ventilátory s čo najnižšou rýchlosťou ako je to možné, nie viac ako dva až trikrát rýchlejšie ako axiálna rýchlosť, a nastavenia lopatiek je teda jednotnejšie a hustejšie pri sebe. [21]

Pretože je dôležité zachovať neustále prúdenie vzduchu v aerodynamickom tunely bez turbulencií, či nárazových vzduchových vln v okruhu, priemer hlavnej gondoly ventilátora je zvyčajne menšia ako priemer ventilátora a len málokedy prekročí pomer 0,5-0,6 priemeru ventilátora. V uzavretých tuneloch sú ventilátory zvyčajne montované po prúde prúdenia vzduchu za druhým rohom s dvojnásobne väčším priestorom ako testovacia oblasť a niekedy



aj viac. Toto umiestnenie ventilátora optimalizuje potrebnú rýchlosť ventilátora a redukuje to vibrácie. Má to samozrejme aj praktický význam pre prípad nejakých odletujúcich častí z testovaného modelu sú tie časti zachytávané v prvom a druhom rohu aerodynamického tunela a nepoškodí sa tým ventilátor.[21]

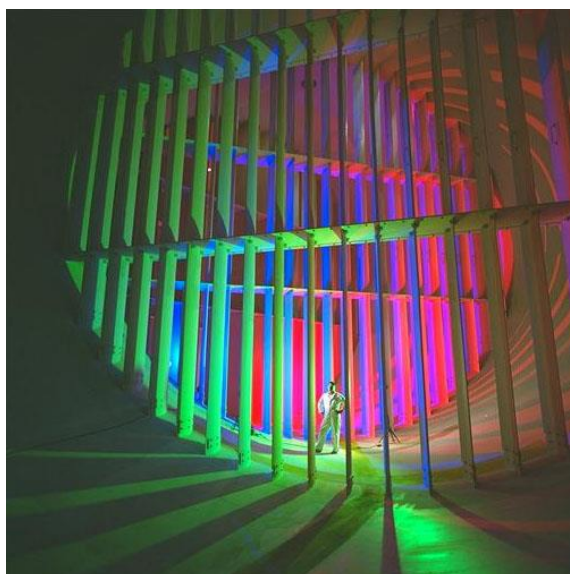
Aj ventilátor sa podieľa na kvalite prúdiaceho vzduchu a pri navrhovaní veľkosti je potrebné sa pozerat' na rýchlosť prúdiaceho vzduchu tunelom a stratám v rohoch. Tento parameter nám ďalej udáva ako má byť navrhnutý ventilátor s akou výkonnosťou motora a dĺžkou lopatiek aby dosahoval požadovaných parametrov. Značka automobilov Volvo pri inovácii svojho aerodynamického tunela sa zamerala aj na tento parameter kde došlo k zvýšeniu rýchlosti prúdiaceho vzduchu na 250 km/h pri ploche testovacej oblasti 27 metrov štvorcových. Pre takýto nárast rýchlosti bol aj vymieňaný ventilátor na výkon 5 MW.[12]



Obr. 11 NASA Ames výskumné centrum[21]

### 2.3 ROHOVÉ LOPATKY A REDUKOVANIE TURBULENTNÉHO PRÚDENIA

Uzavreté aerodynamické tunely potrebujú rohy s usmerňovačmi prúdenia vzduchu k ovplyvneniu smeru prúdenia vzduchu bez toho aby vznikalo turbulентné prúdenie. Najčastejšie používané zahnutie rohov je 90° vybavené so zahnutými lopatkami alebo inými ďalšími zariadeniami k zahnutiu prúdenia bez väčších problémov. Tvary lopatiek vnútorných a vonkajších stien sú vyberané podľa lopatiek. Uchytenie lopatiek sa mnohokrát nazýva "kaskádou". Niektoré aerodynamické tunely majú až 180 stupňové zahnutie rohov s lopatkami po celej dráhe zatočenia tunelu alebo so separovanými ventilátormi pracujúcimi v rôznych intervaloch, ale sú náročné na výstavbu a je u nich iba jedna výhoda, ktorou je veľký tlak v tunely. [19]



*Obr.12 Rohové lopatky v NASA Ames výskumnom centre [19]*

## 2.4 VPLYV PRVÉHO A DRUHÉHO DIFÚZORA NA RÝCHLOSŤ A TLAK PRÚDENIA

Prvý difúzor je časť tunelu, ktorá s narastajúcou dĺžkou zväčšuje svoj priemer a druhý difúzor presne naopak. S narastajúcim priemerom v difúzore sa zvyšuje tlak prúdiaceho vzduchu a znižuje rýchlosť, či kinetická energia. Difúzory, či už prvý alebo druhý, fungujú teda na princípe Bernoulliho rovnice. No pre zaistenie ich funkcie musí byť správne navrhnutá testovacia oblasť, inak pri príliš dlhej časti strácajú svoje opodstatnenie, keďže väčšina kinetickej energie sa uvoľní do priestoru v testovacej oblasti. Úplne ideálny tvar je obzvlášť náročné vybudovať, no pri jeho docelení sa efektívnosť tunela násobí. Až 95 percent kinetickej energie prúdiaceho vzduchu využívaného v aerodynamických tuneloch sa tvorí na základe difúzorov.[22]



*Obr.13 Typický difúzor s expanzívny charakterom[22]*



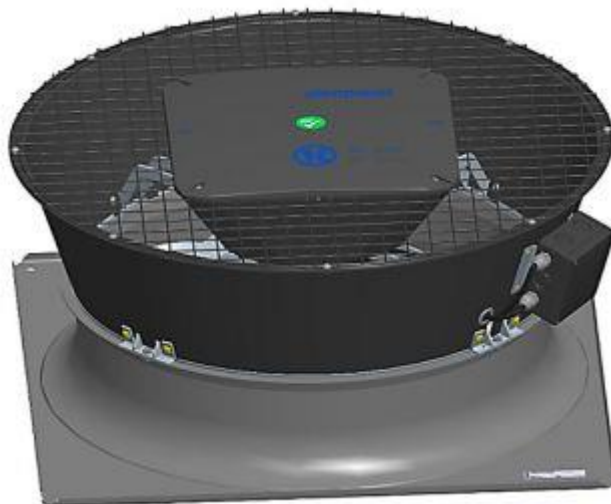
## 3 PRÍKLADY ŠPECIFICKÉHO VYBAVENIA TUNELOV PRE AUTOMOBILY

### 3.1 TEPELNÝ VÝMENNÍK

Tepelný výmenník slúži v aerodynamickom tunely ako rozptyľovač stratového tepla. Pre zvýšenie efektivity odvodu tepla sú na výmenníkoch inštalované ventilátory. Ich jednoznačný vplyv je okamžite citeľný ako pri hlučnosti, ale má dopad aj na životnosť celkového systému. Pasívnou novinkou na ventilátoroch je difúzor, ktorý úspešne usmerňuje radiálne prúdenia čím sa aj znižujú aerodynamické straty, ktoré vznikajú za ventilátorom. [10]

Celková teplota v tunely a stabilná teplota je veľmi dôležitý faktor. Preto množstvo tepla musí byť odvádzané pravidelne, ktoré určuje nevyhnutný prietok vzduchu ventilátorom a následne cez tepelný výmenník. Hlavným parametrom pre efektivitu práce a následný minimálny príkon elektriny je správna voľba pri výbere veľkosti a typu ventilátora. Hlučnosť ventilátora ovplyvňuje spätné prúdenie na lopatkách, ktorému je potrebné sa vyhnúť správnosťou voľby veľkosti ventilátora a difúzora. [10]

Firma ebm-papst vyvinula, a teda aj znížila straty za ventilátorom, použitím AxiTop-u. Daná súčiastka funguje na princípe rozdielu tlakov, pričom musí byť vyšší ako tlaková strata výmenníka. Väčšinou je vzduch za ventilátorom rozptýlený do okolia. Účinnosť ventilátora je zvyšovaná premenou kinetickej energie prúdiaceho vzduchu z ventilátora na statický tlak, ktorý ďalej zvyšuje generovaný tlak obehového kola. Týmto opatrením je zachovaný prietok za znížených otáčok, čím sa navyše znižuje aj hlučnosť. Pri identickom príkone je možné zvýšiť prietok ventilátorom, znížiť hlučnosť alebo usporiť elektrickú energiu. [10]



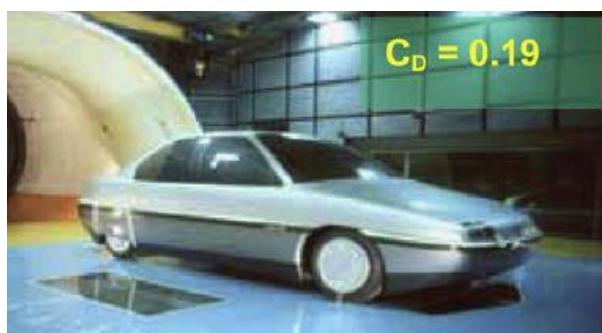
Obr. 14 ventilátor tepelného výmenníka [10]

### 3.2 POHYBLIVÝ PÁS V TESTOVACEJ OBLASTI



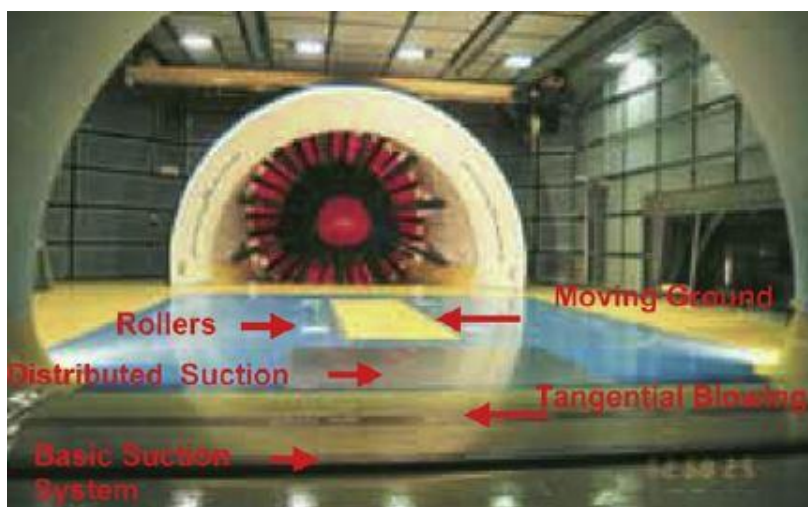
### 3.2.1 PININFARINA

Prvým človekom, komu sa pripisuje prvenstvo v objavení redukovaní aerodynamického odporu na základe použitia pohyblivého pásu pod testovaným vozidlom je práve Pininfarina. Jeho prvý návrh na zmenu nastal v roku 1990, kedy prišiel s prototypom auta, u ktorého znížil aerodynamický odpor  $C_d = 0.19$  na polovicu voči štandardne predávaným autám  $C_d = 0.35$ . Jeho poznatky priniesli, že väčšinu aerodynamického odporu tvorí podvozok a prúdenie vzduchu v okolí kolies. No všetky úpravy, ktoré boli vykonané v aerodynamickom tunely neboli totožné a využiteľné aj v praxi. Preto v roku 1992 bol zavedený pohyblivý pás v aerodynamickom tunely pre simuláciu pohybujúcej sa cesty ako nevyhnutnosť pre ďalší posun vývoja do budúcnosti.[26]



Obr. 15 Návrh vozila podľa Pininfarina[26]

Správna simulácia prúdenia vzduchu pod vozidlom je veľmi dôležitá, a to nielen z dôvodu vylepšenia podvozkových častí, ale aj z dôvodu že podvozková oblasť môže byť často menená bez nutnosti zmien celkového dizajnu auta. No a ďalším vylepšením je priame prúdenie vzduchu pod vozidlo, ktoré obyčajne znižuje pozdĺžne prúdenie, a preto zmeny optimalizujú tvar a veľkosť spojlerov.[26]



Obr. 16 Návrh plochy v testovacej oblasti[26]



### 3.2.2 BMW AEROLAB

Aerodynamický tunel, ktorý sa považuje za najmodernejší v Európe bol spustený do prevádzky v decembri roku 2007. Tento aerodynamický tunel od značky BMW sa nachádza v Mníchove. [17]

Pre simulovanie a testovanie aerodynamiky počas predbiehania a súbežnej jazdy dvoch vozidiel vedľa seba, vyvinula automobilka BMW aj pohyblivý pás, ktorý sa nachádza v testovacej oblasti pod testovaným objektom a pripomína prúdenie a obtekanie vzduchu v oblasti podvozku a kolies. Jeho šírka je 3,2 m a 9 m dlhý. Dokonca je tu možné zistiť aj pôsobiace sily na model vozidla pri rôznych vychýleniach ako sú zmena svetlej výšky vozidla alebo zmena geometrie kolies. Dané testy na modeloch vozidiel je možné robiť v dôsledku zachovania teórie podobnosti, a teda je to priamo možné aj aplikovať na reálne autá. Aby všetko bolo zachované tak ako to má byť a neboli pri reálnych vozidlách nejaké odchýlky a rozdiely od testovaných modelov, je potrebné aby modely boli v pomere 1:2 a aj rýchlosť ofukovania modelov v tunely musí zodpovedať danému pomeru, a teda musí byť dvojnásobná. To znamená že pre simulovanie rýchlosti 150 km/h pre vozidlá je pre modely v tunely nutná rýchlosť prúdenia až 300 km/h. [11][16][17]



Obr. 17 Testovacia oblasť v BMW Aerolab[16]

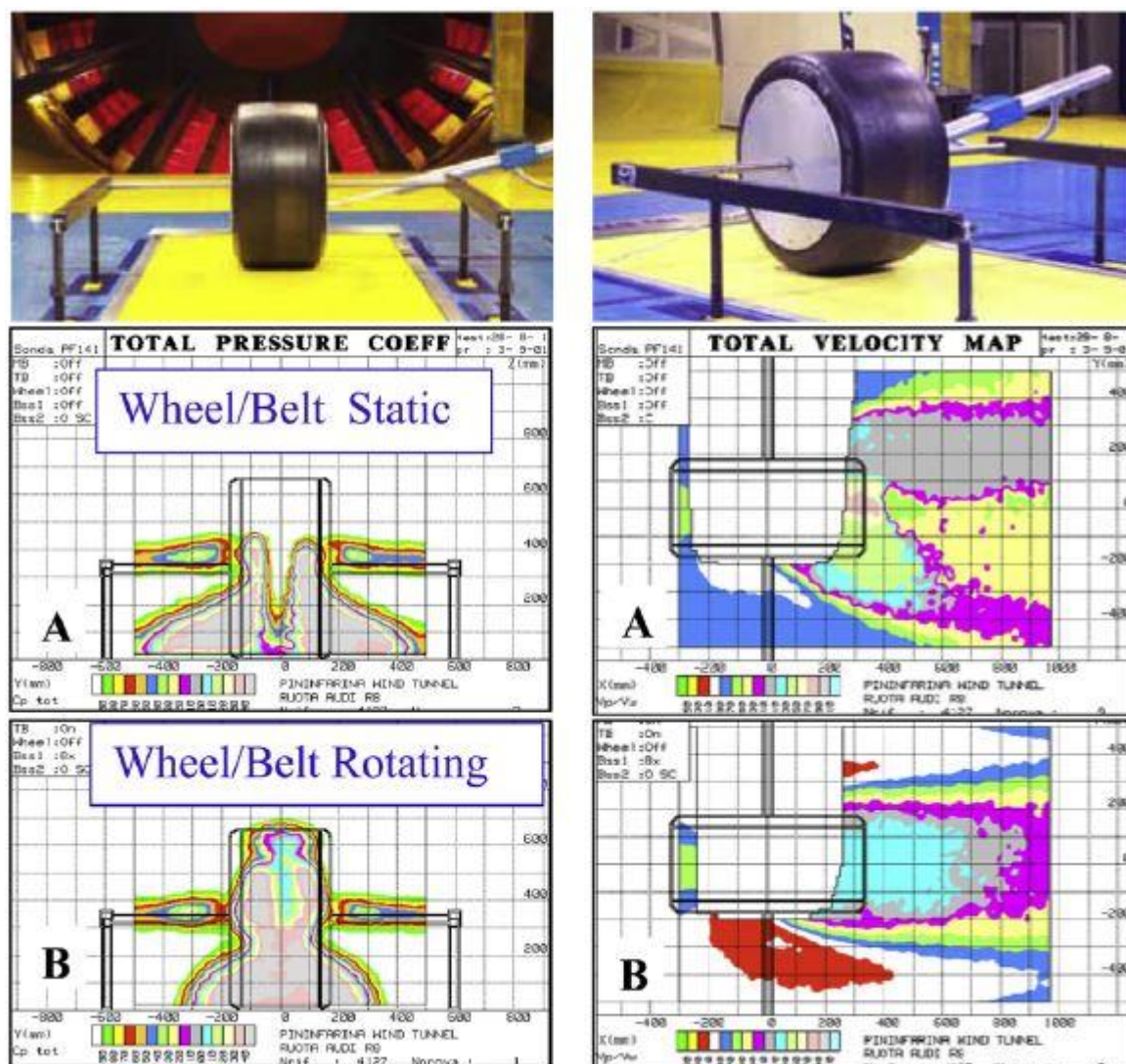
### 3.3 AERODYNAMIKA PRI OTÁČANÍ KOLIES

Ako je podstatná aerodynamika v oblasti podvozku, tak je dôležitá aj aerodynamika v oblasti krútiacich sa kolies vozidiel, keďže horná časť kolesa sa otáča proti smeru pohybu vozidla.[26]

#### 3.3.1 PRÚDENIE V OKOLÍ KOLIES



Prúdenie vzduchu sa v okolí kolies mení. Porovnáme si to na príklade prúdenia vzduchu za kolesom 20 mm nad zemou za 2 podmienok statických kolies a otáčajúcich kolies ako je vidieť v Obr. 13 z Cogotti (2001). Avšak zmena poľa prúdenia je dôležitá pre kolesá aj osobných áut. Mapy prúdenia v oblasti kolies nám ukazujú rozdiel, ktorý je v hornej časti predného kolesa v oboch podmienkach statických a otáčajúcich kolies. Spodná časť kolesa má rovnaký smer pohybu ako smer prúdenia. Relatívna rýchlosť kolesa je nulová v bode dotyku so zemou a prudko stúpa so vzrastajúcou výškou bodu na kolese. Ako výsledok toho je uhol prúdenia vzduchu je menší bližšie ku kolesu, no uhol je rozdielny u každého kolesa.[26]



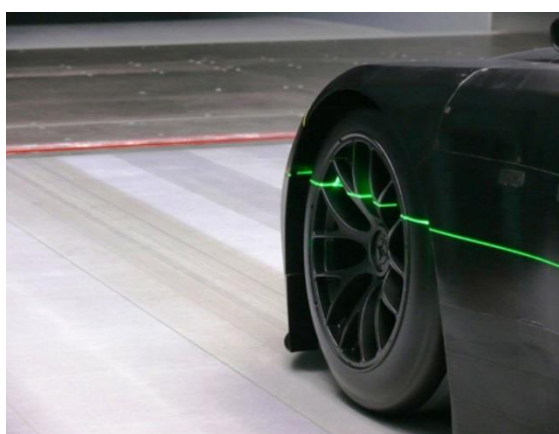
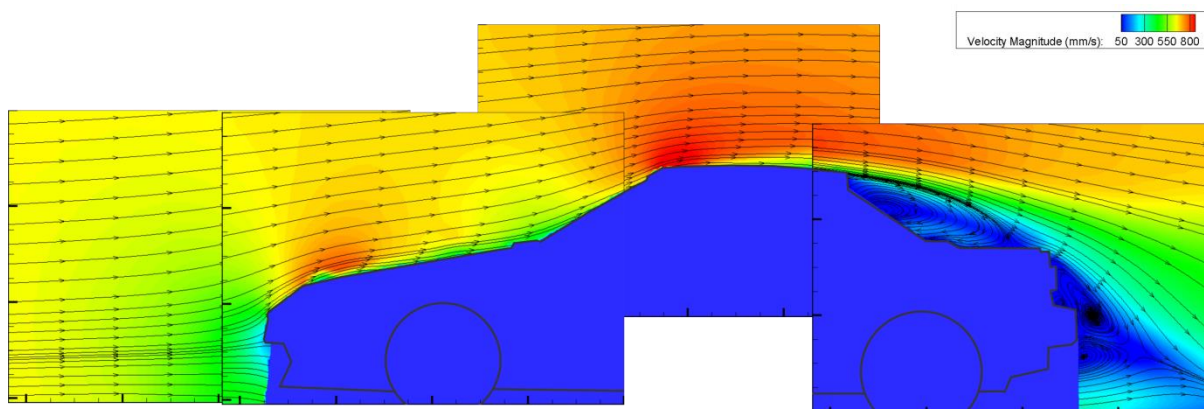
Obr.18 (A) statická podlaha a koleso, (B) rotujúce koleso s pohyblivou zemou [26]

### 3.3.2 LASEROVÁ ANEMOMETRIA PIV (PARTICLE IMAGE VELOCITY)

Snímanie laserovou anemometriou v aerodynamických tuneloch je jednou z posledných novinek v aerodynamických tuneloch. Je to optická metóda, ktorá využíva pre vizualizáciu obtekania. Už pár desiatok rokov sa používa pre okamžité meranie rýchlostí a súvisiacich vlastností tekutín. Na základe viacerých inovácií je možné pozorovať vzduchové prúdenie v dvojrozmernom reze, ale aj v trojrozmernom priestore. Táto technológia umožňuje



vizualizáciu takmer identického obtekania, ktoré sa vyskytuje v tunely, ale bez toho aby priamo ovplyvňoval samotné prúdenie merané inžiniermi. Pri takomto meraní je do aerodynamického tunelu najprv vháňaný vzduch s časticami, ktoré je možné sledovať na základe laserov. Častice musia mať hustotu vzduchu, ktorou sú aj unášané, inak by to sledovanie nemalo identické správanie s reálnymi jazdami. Častice v podstate vyzerajú ako vzdušná hmla. Pri takomto meraní je kamera natočená kolmo k rovine pozorovaného priestoru prúdenia a po zaplnení tunelu časticami sú zhasnuté všetky svetlá. Následne prichádzajú lasery, ktoré na svietia skúmané časti automobilu čím dôjde k vytvoreniu dvojrozsmernej roviny. Pomocou dvoch vysokorýchlostných kamier sú jednotlivé obrázky rozdelené na pravoúhle oblasti. Pre každú z týchto vyhodnocovaných plôch je na základe korelačných techník určený jeden vektor, ktorý simuluje priemerný posun všetkých častíc vo vnútri pozorovanej plochy. Delením tohto posunu v určitom čase medzi dvomi pozorovaným obrázkami sú vektory posunu konvertované do mapy nespracovaných rýchlostných vektorov. Následne sa aplikujú kontrolné algoritmy na nespracované mapy a v nich vyhľadávajú a odstraňujú extrémne hodnoty, ktorými sú chybné vektory. Konečnou hodnotou sú nové vektorové mapy, z ktorých je možná ďalšia analýza s výsledkom vytvárania prúdnic a poľa vírov. Výskumníci na základe takejto vybavenosti majú možnosť vytvárať veľmi spomaleným prehrávaním obrázkov zistiť vzdialenosť, ktorá za daný časový úsek unášané častice prešli, a teda veľmi ľahko zmerať rýchlosť a smer prúdenia. Danou technológiou je možné študovať a pozorovať akékoľvek prúdenie vznikajúce v okolí automobilov.[23]



Obr.19 Testovanie laserovou technikou [23]





### 3.4 VARIABILNÁ TRYSKA

Kontrakčná tryska sa nachádza za štvrtým rohom pred testovacou oblasťou. Jej hlavnou výhodou je možnosť nastavenia plochy prúdiaceho vzduchu cez trysku, čo umožňuje využitie pre rôzne veľkosti automobilov od športových modelov cez SUV až po dodávky.. Jej dĺžka je 5 m dlhá a nastaviteľná plocha na výstupe sa pohybuje od 18 metrov štvorcových do 25 metrov štvorcových. Možnosť nastavenia požadovanej plochy je dôležitá pre simuláciu reálnych podmienky pre rôznych typov vozidiel. No pri maximálnom otvorení trysky nie sú dosahované tak vysoké rýchlosti prúdenia vzduchu ako pri testovaní športových vozidiel a taktiež tlak prúdenia vzduchu je nižší pri športových vozidlách ako pri dodávkach. [28]



## 4 PRÍKLADY VYBRANÝCH TUNELOV S UVEDENÍM ZÁKLADNÝCH PARAMETROV

### 4.1 KLIMATICKÝ AERODYNAMICKÝ TUNEL MERCEDES- BENZ

Pre značku Mercedes- Benz, ako aj pre mnohé iné, je pri vývoji nových modelov dôležité financovanie vývoja. Pre zredukovanie veľkého množstva testovacích jazd v rôznych odľahlých kútoch sveta od Nórskej zimy až po horúčavou zaliate Údolie smrti v USA boli aj upravované a vyvíjané aerodynamické tunely pre automobily v Sindelfingene, kde postavili dva tuneli v jednej hale pre simuláciu extrémnych teplôt na púšťach až po sibírske mrazy.[8]



Obr. 21 Testovanie za rôznych klimatických podmienok[8]

#### 4.1.1 REÁLNE PODMIENKY TESTOVANIA ZA KAŽDÉHO POČASIA

Testovacia výkonnosťná škála aerodynamických tunelov má širokú škálu záberu, testovanie môže prebiehať od enormných chladov mínus 40 stupňov Celzia až do plus 60 stupňov Celzia spolu so suchým púštnym prúdením vzduchu, ale aj s vlhkosťou subtropických oblastí s prudkým dažďom či jemným mrholením, krupobitím až po snehovú búrku. Ku klimatickým podmienkam patrí aj slnečné žiarenie, ktoré je možné regulovať od prudkého slnečného svitu v čase poludnia, alebo oblačné počasie ako aj simulácia pri vjazdoch do tunela pri jazde.[8]

Hlavným využitím takéhoto aerodynamického tunelu je na testovanie rôznych dielov a funkcií automobilov a ich reakcií pri náhlych zmenách. Testujú sa chladiace okruhy vozidiel, ako aj samotné chladiče, či vykurovanie a chladenie kabíny vozidla pre pasažierov. Medzi skúmané parametre patria aj viditeľnosť cez bočné okná a funkcia stieračov počas nepriaznivých podmienok počasia. Dokonca je možné aj zistenie zanášania nasávacieho potrubia počas zimného obdobia snehom rozvíreným predchádzajúcim autom pri jazde na cestách. No najväčšou výhodou týchto tunelov je možnosť ľubovoľnej opakovateľnosti v akomkoľvek ročnom období bez nutnosti cestovania po celom svete. No všetky tieto pokusy by neboli možné bez perfektnej izolácie veľkoplošných skiel, cez ktoré je každý pokus pozorovaný a presne regulovaný.[8]

Pre simuláciu ciest sú v testovacej oblasti inštalované štyri valce s priemerom necelých dvoch metrov, kde je zase možné skúmať reálne reakcie vozidiel s náhomom na všetky štyri kolesá. Maximálna trakcia na jednu valcovú stojku je 12 000 N. Pre testovanie bŕzd zase valce



vyvinú aj odpor simulujúci dlhé zjazdy z horských priesmykov a kopcov pre letných teplotách. [8]



Obr. 22 Testovanie v chladnovzdušnom tunely[8]

#### 4.1.2 OD MIERNEHO PRÚDENIA CEZ ORKÁN K ARKTICKÝM MRAZOM A SNEŽNÝM BÚRKAM

Každá jedna turbína v oboch aerodynamických tuneloch od Mercedes- Benz vytvára skutočné podmienky na základe požiadaviek k testu sa to dá regulovať, či to má byť mierne pofukovanie, alebo orkán s prudkým dažďom. V maximálnom výkone je možné vyvinúť rýchlosť aj 200km/h. Na základe fyzikálnych zákonov je možné túto rýchlosť regulovať aj veľkosťou prierezu difúzoru. Pre najnovší Mercedes- Benz SLS AMG je to sedem metrov štvorcových a zase pre Mercedes- Benz Sprinter dvanásť metrov štvorcových. Bežne sa však využíva osem metrov štvorcových. V teplovzdušnom, ale aj v chladnovzdušnom tuneli je možné regulovať vlhkosť prúdenia od 5 do 95 percent.[8]

Teplotná škála chladnovzdušného tunela je od mínus 40 stupňov Celzia do plus 40 stupňov Celzia s možnosťou zrážok až 80 litrov na meter štvorcový za hodinu. Tento tunel je ešte aj vybavený možnosťou znečistenia, a teda je počas skúšky na vozidlo ostrekovaná tekutina viditeľná iba pri UV svetle pre odhalenie slabín.[8]

Komplexné simulovanie ovzdušia aj vozovky je možné len vďaka teplovzdušnému tunelu s teplotami od mínus 10 stupňov Celzia do plus 60 stupňov Celzia so simulátorom slnečného žiarenia. Spektrum slnečného žiarenia je zabezpečené vďaka 32 lampám s výkonom od 200 až 1200 Wattov na štvorcový meter. Takéto hodnoty sú zriedkavé na našej Zemi a aj v tomto smere je istá výnimočnosť. Inou novinkou v testovaní vozidiel v aerodynamických tuneloch je teplota cesty od 50 do 70 stupňov Celzia.[8]

#### 4.1.3 HASIACA TECHNIKA

Pre najmodernejšie aerodynamický tunely od značky Mercedes- Benz boli navrhnuté aj špeciálne hasiace trysky pre očakávané, ale aj neočakávané problémy. Dané trysky pracujú pod vysokým vodným tlakom, čím vytvoria akúsi hmlu v okolí vozidla. V prípade akejkoľvek poruchy sa vo veľmi krátkom čase vysunú z podlahy trysky a oheň je uhasený v dôsledku nedostatku kyslíka. Na základe širokého plošného pokrytia hmlou je vozidlo okamžite ochladené, čím sa aj znižuje riziko vznietenia prototypu.[8]



#### 4.1.4 ÚČINNOST

Maximalizácia účinnosti aerodynamických tunelov u značky Mercedes- Benz priniesla prírodné zákonitosti a klimatické podmienky pod jednu strechu, čím môže napredovať v zvyšovaní kvality daných modelov značky. No pre absolútne urýchlenie aj času si pripravili aj šesť predprípravných komôr na testovanie prototypov. Nemusí sa teda čakať kým auto bude ochladené prúdením vzduchu v testovacej oblasti, ale priamo do testovacej časti sa prinesie prototyp už dopredu vymrazený z komory a môže sa okamžite začať s testovaním. Dve komory sú dokonca zvukotesné pre odstraňovanie rušivých zvukov vznikajúcich pri špecifických podmienkach. Vďaka takýmto možnostiam sú aerodynamické tunely zaťažované väčším počtom testov ale s kratším časom testovania.[8]

Pre elektronickú verziu tejto práce je možné vzhliadnuť video s praktickými skúsenosťami- [9].

## 4.2 AERODYNAMICKÝ TUNEL OD VOLVO CAR CORPORATION

Tento aerodynamický tunel bol vybudovaný v roku 1986 a už o 20 rokov neskôr bol celý prestavaný do dnešnej podoby so zavedením ďalších inovatívnych prvkov pre výskum vozidiel.[12]

Pre švédsku automobilku je daný aerodynamický tunel po renovácii v roku 2008 doposiaľ najmodernejším v celej histórii, keďže umožňuje celkové testovanie vozidiel s obtekaním vzduchu okolo a pod autom v spolupráci s natáčaním kolies na rovnom povrchu ciest. Jeho hlavné zameranie je na zníženie spotreby vozidiel a emisií oxidu uhličitého do ovzdušia. Volvo sa zameralo na tomto tunely na výskum aerodynamiky hlavne pod vozidlom v oblasti podvozku, keďže spolu s kolesami sa táto časť vozidla podieľa vyše 50 % na celom jazdnom odpore aerodynamického prúdenia. Klasické aerodynamické tunely, kde len testované vozidlá stoja a vzduch okolo nich prúdi, nedokáže ukázať reálny spôsob prúdenia aerodynamiky vozidla. V tunely je možné simulovať jazdu vozidla po cestných komunikáciách do rýchlosti 250 km/h.[12]

### 4.2.1 TESTOVANIE NOVÉHO MODELU VOLVO C30

Už prvé testy na novom modeli od Volva C30, ušľachtilé kupé vozidlo, nielen do mestskej premávky, ale aj na športovejšie vyžitie za volantom, priniesli na ekologickej verzii daného modelu Volvo C30 DRIVe úsporu aerodynamického odporu vyše 10% voči pôvodnému stavu. Konkrétne to prinieslo úsporu emisií oxidu uhličitého o 3 gramy na jeden prejdený kilometer, alebo úspora paliva o vyše 0,1 l/100 kilometrov pri normovanej spotrebe kombinovaného spôsobu jazdy. V skutočných podmienky premávky teda takáto úspora môže byť vyššia a dosahuje hodnoty 0,3 l/100 kilometrov. Pri ročnom objeme 15 000 kilometrov to znamená úsporu až 45 litrov paliva, teda pre Volvo C30 to je jedna plná nádrž.[12]

### 4.2.2 REÁLNE SPRÁVANIE SA VOZIDLA POČAS JAZDY PRI ZATÁČANÍ



Hlavnými inovativními parametry voči předcházející generaci aerodynamického tunelu sú čtyři ploché pásy vyrobené z ocele na simuláciu roztáčania kolies. Priemer otočnej plochy je 6,6 metra. Ďalšou inováciou pre simuláciu jazdy vozidla po cestnej komunikácii je pohyblivý oceľový pás s dĺžkou 5,3 metra a šírkou 1 meter. No najväčšou zmenou a časťou v aerodynamickom tunely je nový ventilátor s priemerom 8,15 metra a výkone 5 MW s deviatimi lopatkami z uhlíkového kompozitu pre zabezpečenie rýchlosti prúdenia vzduchu v okolí testovaných vozidiel až 250 km/h. Presnosť ventilátora v prúde vzduchu  $\pm 0,05$  m/s. Ďalej čo sa týka rýchlosti podlahy je možné napodobiť pomalé posúvanie sa v zápachach v meste od rýchlosti 7 km/h až po uponáhľanú jazdu v rýchlostiach 260 km/h.[12]



*Obr.23 Testovanie prúdenia vzduchu v oblasti podvozku a kolies pri simulovaní jazdy[13]*

Počas testovacích cyklov je skúmané vozidlo uchytené na jemnej a citlivej váhe za pomoci štyroch malých podpier, ktoré ho držia v správnej polohe a hmotnosť vozidla sa prenáša na váhu, merajúc závislosť aerodynamického silového pôsobenia, skrz kolesá vozidla cez ploché oceľové pásy. Teda daným spôsobom je možné presne si napodobiť podmienky rozloženia váhy automobilu na každé jedno koleso počas prevádzky. Dokonca je možné si skúmané vozidlo natočiť na podlahe o plus 30 stupňov alebo minus 30 stupňov voči kolmej rovine prúdenia vzduchu. V priebehu 16 hodín môžu výskumníci realizovať až 100 rôznych nastavení, čo je opäť výhodou.[12]



*Obr. 24 Natočenie vozidla v aerodynamickom tunely o plus 30 stupňov voči prúdeniu vzduchu[14]*

#### **4.2.3 AERODYNAMIKA A REÁLNA SPOTREBA**

Ak vychádzame z metodiky Európskej Únie pre kombinovaný spôsob jazdy, zistíme že dovŕšená rýchlosť je 33 km/h a vplyv vzduchu s jeho protismerným prúdením voči smeru pohybu vozidla sa podieľa na jednej štvrtine spáleného paliva. Pre rýchlosť pohybujúceho vozidla mimo mesta je tento podiel na spotrebe ešte výraznejší, a to viac ako 50 %. A práve aerodynamika je hlavným činiteľom vplyvujúcim na spotrebu vozidiel a nepriamo aj na znečisťovanie životného prostredia.[12]

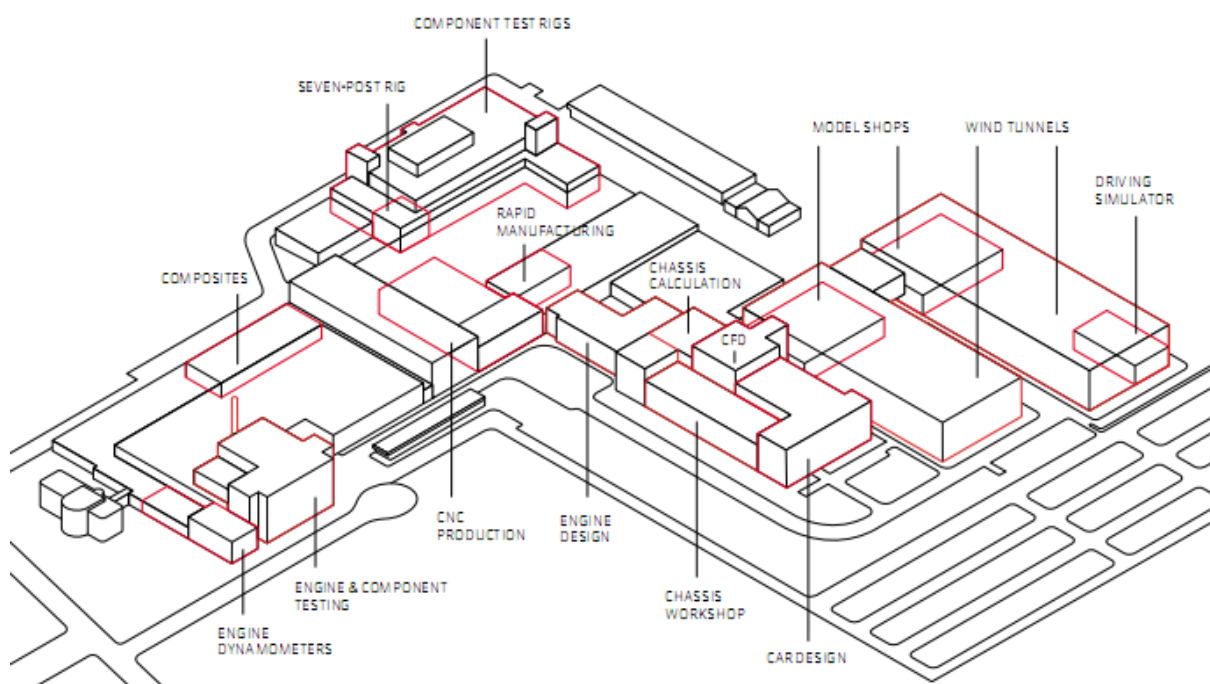
Vývojári od Volva zasiahli vďaka novému aerodynamickému tunelu aj ďalšie modelové rady ako Volvo S40 a Volvo V50 takmer nepatrnými zásahmi, ako sú predný spojler, či na hrane strechy alebo aj krycích plastových panelov na podvozku vozidla.[12]



*Obr. 25 Konečný design vozidla po mnohých testoch v aerodynamickom tunely[15]*

### 4.3 AERODYNAMICKÝ TUNEL OD TOYOTA

Najmodernejší aerodynamický tunel od značky automobilov Toyota sa nachádza v Kolíne nad Rýnom, kde si svoje konštrukčné riešenia testujú aj tímy najvyššej automobilovej súťaže Formule 1. Veľké skúsenosti značky Toyota v F1 boli testované ešte v roku 2009, kedy sa rozhodli presunúť testy modelov monopostov do Japonska. No daný aerodynamický tunel neprišiel na zmar a začali v ňom testovať aj iné značky automobilov či formúl. Momentálne poskytuje svoje skúsenosti v službách konzultácií a zákazkový vývoj a výrobu vo svojom špičkovom zariadení iným firmám. V roku 2010 sa po problémových testoch v Maranelle a reálnymi skúsenosťami presťahovala značka Ferrari. V danom výskumnom centre sú dva tunely dokončené v rokoch 2001 a 2007.[24]

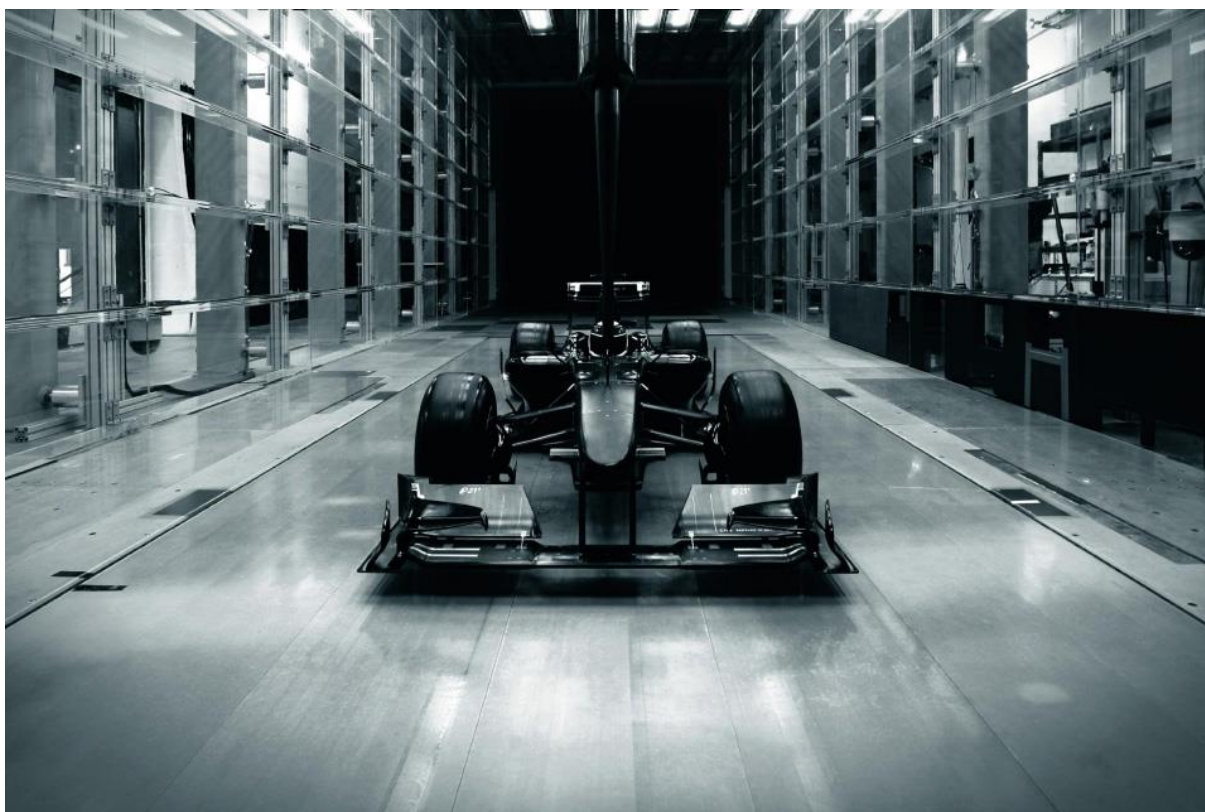


Obr.26 Schématický náčrt aerodynamických tunelů areálu Toyoty v Kolíne nad Rýnem [24]

#### 4.3.1 POKROK V AERODYNAMICKOM TUNELY V ROKU 2011

Za rok 2011 došlo k výrazným inováciám v dátových prenosoch a pohyblivom páse pre plynulý pohyb. Ďalšou inováciou bolo zavedenie laserovej rovinou anemometriou PIV (viď. 3.3.2) v oboch tuneloch. Vylepšená technológia systému plynulého pohybu bola taktiež inovovaná, kde je možné robiť zmeny vo svetlej výške počas pohybu, či vybočenie, rotáciu pozdĺž predozadnej osy, natačanie kolies a ďalšie individuálne zmeny v predbežnom zaťažení pre plynulý pohyb po predom definovanej trajektórii. Vďaka inovácii vysokorýchlostného snímania dát sú možné priebežné získavania výsledkov vo vysokých frekvenciách. Vďaka tomu zariadeniu je možné pozorovať skutočnú analýzu, zisťovať chovanie aerodynamiky v zákrutách, pri brzdení alebo akcelerácii, či pri prejazdoch nerovností a celkovo simuláciu podmienok v priebehu jazdy. Dosiahlo sa týmito inováciami zvýšenie efektivity využitia tunelu a zníženie nákladov ako aj času testu až o 70%, a to z dôvodu že nie je potrebné zastavovať tunel a prenasťavovať testovaný model.[24]





Obr.27 Testovanie v aerodynamickom tunely na pohyblivom páse Toyoty s konštrukciou pre laserovú anemometriu PIV [24]

#### 4.3.2 INOVÁCIAMI K SPLNENIU LIMITOV

Teraz vďaka týmto inováciám je možné testovať 24 hodín denne 7 dní v týždni v oboch tuneloch. U tradičných systémov je doba testovania 20 minút a ďalších 35 minút pre výmenu dielov a 5 minút pre údržbu a systémové kontroly, teda 1 hodina. U Toyoty došlo k veľkej časovej úspore a ovládaniu pohybu modelu v piatich smeroch súbežne. Testovanie teda umožňuje zníženie časovej náročnosti pri hlbších poznatkoch chovania automobilov, čo vedie k celkovo rýchlejšiemu vývoju. [24]

#### 4.3.3 TECHNICKÉ PARAMETRE AERODYNAMICKÉHO TUNELU

V oboch tuneloch je možné testovať rýchlosťou až 252 km/h a jeden tunel svojimi rozmermi testovacej oblasti umožňuje testovanie v reálnych rozmeroch. Pohyblivý pás má dĺžku 7 m a šírku 2,4 m a je z ocele, pod ktorým sú zakomponované silomery, ktoré merajú s presnosťou 7 Pa. Ocelový pohyblivý pás môže pracovať až rýchlosťou 252 km/h. V aerodynamických tuneloch sa nachádzajú najmodernejšie modely kynematického uchytenia, ktoré dokáže aktívne zaťažovať zavesenie kolies integrovanými push-rodmi a automatickým riadením. Celkové rozmery testovacej oblasti predstavujú na dĺžku 15 m a šírku 4,1 m s výškou 3,7 m. Ventilátor sa neradí medzi tie najväčšie, a ani tie najvýkonnejšie s priemerom ventilátoru 6,3 m a výkonom 2,3 MW. Mimo týchto inovácií je v Kolíne ešte jedna špecifická dielňa na výrobu modelov, dielňa s trojrozmernými meracími



systemami a jednou z nejlepších testovacích stolic, alebo vývojárske stredisko pre šasy, motory a elektroniku. [24]



## ZÁVER

S aerodynamikou a aerodynamickým prúdením sa stretávame každý deň už od prvopočiatkov našej planéty. No vplyvy aerodynamiky na automobily sa začali skúmať iba nedávno po prvej ropnej kríze. V daný okamih to začalo byť najzaujímavejšou témou pri vytváraní nových modelov, čím sa docielila úspora nielen na spotrebe paliva, ale aj zvýšenie maximálnej rýchlosti automobilov pri zachovaní identických motorov. Ako je už aj z danej bakalárskej práce zjavné, viac ako polovica energie vytvorenej motorom automobilov je spotrebúvaná na odpor vzduchu. Ďalším vývojom a experimentmi v oblasti aerodynamiky bude aj v budúcnosti dochádzať k ďalšiemu nárastu efektívneho využitia automobilov.

V prvej kapitole danej práce sme sa zamerali na hlavné rozdelenie aerodynamických tunelov, čo nám výrazne dopomohlo k ďalšiemu chápaniu a rozlíšeniu aerodynamických tunelov. Keďže každý typ dopravného prostriedku má svoje rozmery, ktoré ďalej určujú nielen veľkosť tunelu, ale aj ďalšie parametre.

Druhá kapitola zacieli svoj pohľad na jednotlivé časti aerodynamického tunelu s ich primárnymi časťami, ktoré majú najväčšie opodstatnenie v danej oblasti. Najviac častí a funkčných súčiastok obsahuje testovacia oblasť, kde sa aj v konečnom dôsledku testujú dané modely, či reálne prototypy automobilov. Aby dané tunely mali aj efektívnu prevádzku je potrebné zachovať testovacie podmienky pre širokú škálu testovacích programov aby sa znížil prípadný počet externých testov vozidiel v odľahlých kútoch sveta.

No aby bolo možné ďalej docieľiť špecifických klimatických, alebo jazdných podmienok v aerodynamickom tunely, práca je aj zameraná na konkrétne príklady špecifického vybavenia, ktoré prinášajú tak dôležité výsledky. Celou snahou dnešných aerodynamických tunelov a inžinierov pri vývoji nových tunelov je dotiahnuť reálne podmienky zo všetkých kútoch sveta pod jednu strechu s pomocou špecifického vybavenia tunelov keďže tak podrobná vizualizácia v reálnych podmienkach pri testoch nie je možná .

Na záver danej práce sme si vysvetlili viaceré inovácie a parametre v konkrétnych aerodynamických tuneloch od troch výrobcov automobilov. Ako poukazuje práca, každá značka má svoju filozofiu, a to nielen v reálnych podmienkach ale aj v aerodynamických tuneloch je to poznať.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Publishers, 2006. ISBN 0-8376-0142-8.
- [2] DRÁPAL, L. *Hnací ústrojí šestiválcového leteckého motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 69 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
- [3] NASA, *Wind Tunnels at NASA Langley Research Center* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z : <http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/windtunnels.html>
- [4] Ružička, P., *Aerodynamika*. Bratislava: Gymnázium Jura Hronca 2003. 15 s. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: [http://reto.artemisdesign.sk/files/seminarka\\_z\\_fyziky.pdf](http://reto.artemisdesign.sk/files/seminarka_z_fyziky.pdf)
- [5] DIMITRIADIS, G. *Experimental Aerodynamics: Introduction* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/Expairo01.pdf>
- [6] *V Brně spuštěn nový aerodynamický tunel* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/v-brne-spušten-novy-aerodynamicky-tunel>
- [7] *AXITOP – REVOLUČNÁ NOVINKA VO ZVYŠOVANÍ ÚČINNOSTI A ZNIŽOVANÍ HLUKU* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.asb.sk/tzb/vetranie-a-klimatizacia/axitop-revolucna-novinka-vo-zvysovani-ucinnosti-a-znizovani-hluku>
- [8] *Mercedes si upravuje počasie* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://media.mercedes-benz.sk/mbsk/press-centrum?&artid=957>
- [9] Mercedes-Benz TV. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=CvO3XhGl84Q&feature=youtu.be>
- [10] Wind tunnel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_tunnel](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel)
- [11] *BMW's new aerodynamic test center built in Munich* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.bmwblog.com/2009/06/22/bmws-new-aerodynamic-test-center-built-in-munich/>
- [12] *Nový najmodernejší aerodynamický tunel Volvo* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.volvocars.com/sk/top/about/news-events/pages/default.aspx?itemid=32>
- [13] VOLVO Car Corporation. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: [http://www.auto-salon.sk/data/sk/gallery/33/0d840195\\_pict\\_2-Tunel.jpg](http://www.auto-salon.sk/data/sk/gallery/33/0d840195_pict_2-Tunel.jpg)
- [14] VOLVO Car Corporation. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: [http://www.aad.sk/images/articles/volvo%20tunel\\_02.jpg](http://www.aad.sk/images/articles/volvo%20tunel_02.jpg)
- [15] VOLVO Car Corporation. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: [http://www.hyts.hu/autok/volvo/c30-drive-electric-2011/volvo\\_c30-drive-electric-2011\\_r8.jpg](http://www.hyts.hu/autok/volvo/c30-drive-electric-2011/volvo_c30-drive-electric-2011_r8.jpg)



- [16] BMW AVZ - Aerodynamická strategie [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/bmw-avz-aerodynamicka-strategie\\_38839.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/bmw-avz-aerodynamicka-strategie_38839.html)
- [17] BMW: Nové centrum aerodynamiky [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/bmw-nove-centrum-aerodynamiky-4476>
- [18] *How to Build and Use a Subsonic Wind Tunnel* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/wind-tunnel-toc.shtml>
- [19] BRADSHAW, P., MEHTA, R., ed. *Wind tunnel design* [online]. In: *Corner vanes* [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://navier.stanford.edu/bradshaw/tunnel/cornervane.html>
- [20] BRADSHAW, P., MEHTA, R., ed. *Wind tunnel design* [online]. In: *Test section* [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://navier.stanford.edu/bradshaw/tunnel/testsec.html>
- [21] BRADSHAW, P., MEHTA, R., ed. *Wind tunnel design* [online]. In: *Axial fan* [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://navier.stanford.edu/bradshaw/tunnel/axialfan.html>
- [22] BRADSHAW, P., MEHTA, R., ed. *Wind tunnel design* [online]. In: *Diffuser* [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://navier.stanford.edu/bradshaw/tunnel/diffuser.html>
- [23] HLAWICZKA, P., [online]. In: *Jak zpřesnit simulace aneb praktické využití PIV v aerodynamickém tunelu* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://f1news.autoroad.cz/technika/39851-jak-zpresnit-simulace-aneb-prakticke-vyuziti-piv-v-aerodynamickem-tunelu/>
- [24] HLAWICZKA, P., [online]. In: *Jaký je aerodynamický tunel Toyoty, kde své formule vyvíjí Ferrari?* [online]. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://f1news.autoroad.cz/technika/43201-jaky-je-aerodynamicky-tunel-toyoty-kde-sve-formule-vyviji-ferrari/>
- [25] SAEInternational, *The Windshear Rolling Road Wind Tunnel*, 2012 268 s. [cit. 2014-05-08]. DOI: 10.4271/2012-01-0300
- [26] WALKER, T., STERNÉUS, J., BENDER, T., SAEInternational, *Upgrade of the Volvo Cars Aerodynamic Wind Tunnel*, 2007 225 s. 2007-01-1043. [cit. 2014-05-08].
- [27] COGOTTI, A., *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, In: *Evolution of performance of an automotive wind tunnel*, 2008 669- 682 s.
- [28] DUELL, E., KHARAZI, A., MULLER, S., EBELING, W., MERCKER, E., SAEInternational, *The BMW AVZ Wind Tunnel Center*, 2010 6 s. 2010-01-0118. [cit. 2014-05-08].



## Zoznam použitých skratiek a symbolov

F	[N]	sila
p	[Pa]	tlak
P	[W]	výkon
s	[m]	dráha
v	[km/h]	rýchlosť
v	[ms <sup>-1</sup> ]	rýchlosť
V	[l]	objem

PIV Particle Image Velocimetry