



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

AERODYNAMICKÉ TUNELY PRO OSOBNÍ AUTOMOBILY

WIND TUNNELS FOR PASSENGER CARS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Fabříci

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Tomáš Fabřiči**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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 osobní automobily

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

I při obrovském rozvoji metod výpočtového modelování proudění jsou (a budou) aerodynamické tunely nedílnou součástí při výzkumu aerodynamiky vozidel, pro určování sil na vozidlo, vizualizaci proudění, hluku atd. Zároveň jsou nezbytné pro validaci výpočtových modelů a jejich další vývoj a zpřesňování.

Cíle bakalářské práce:

Práce bude rešeršního charakteru s následující strukturou

- rešerše aerodynamických tunelů a vývoj tunelů pro osobní vozy
- specifiky a parametry aerodynamického tunelu pro osobní vozy, vybavení tunelu, přehled aerodynamických tunelů v Evropě a jejich základní parametry
- možnosti ověření změřených aerodynamických účinků v reálných podmínkách (dojezdová vzdálenost).

Seznam doporučené literatury:

COGOTTI, A. Evolution of performance of an automotive wind tunnel. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008, 96, 667-700.

LYU, Y. Aerodynamic Wind Tunnel in Passenger Car Application. Stockholm, 2016. Master thesis. KTH.

HUCHO, W.-H. Aerodynamics of road vehicles. Annu. Rev. Fluid Mech. 1993, 25, 485-537.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá použitím aerodynamických tunelov v oblasti automobilového priemyslu. V súčasnosti sú stále neoddeliteľnou súčasťou pri výskume aerodynamiky vozidiel. Konkrétne pri určovaní síl pôsobiacich na vozidlo, vizualizácií prúdenia a aeroakustických meraniach. U osobných automobilov sa kladie dôraz na zníženie odporovej sily a tým pádom aj zníženia spotreby. Na zlepšenie jazdného komfortu sa stávajú čoraz viac populárne aeroakustické merania. Kvalita prúdiaceho vzduchu v aerodynamických tuneloch priamo ovplyvňuje presnosť spomínaných meraní. Snaha je zminimalizovať náhodnú turbulenciu a dosiahnuť rovnomerné prúdenie. Aj pri optimálnom návrhu všetkých sekcií, z ktorých aerodynamické tunely pozostávajú, nikdy nedosiahneme dokonalú kvalitu prúdiaceho vzduchu. Často sa musíme uspokojiť s akceptovateľnou kvalitou prúdiaceho vzduchu v závislosti na aplikácii. Pokrok v oblasti výpočtového modelovania nám ale skrátil čas strávený v aerodynamických tuneloch a zároveň ušetril aj financie. V súčasnosti existuje úzka spolupráca medzi nimi na dosiahnutie čo najlepších výsledkov.

Kľúčové slová

Aerodynamický tunel, osobný automobil, odporová sila, kvalita prúdiaceho vzduchu, výpočtové modelovanie,

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on a wind tunnel usage in the field of automotive industry. Nowadays, they are still the significant part in vehicle aerodynamics research. Specifically, at determining power actuating on vehicle, flow visualization, aero-acoustic measurements. Considering personal vehicles, reducing the drag and reducing the consumption are being accentuated. Aero-acoustic measurements are becoming more and more popular for improvement of driving comfort. Air-flow quality in wind tunnels directly affects the accuracy of the mentioned measurements. The effort is to minimize the accidental turbulence and reach uniform flow quality. Perfect quality of the air flow will never be reached even though there is an optimal proposal of all sections from which the wind tunnels consist. Very often, we must be satisfied with the accepted flow quality according to the application. However, the progress in the field of computing modeling has reduced the time spent in wind tunnels and moreover it has saved finances. Currently, there is close cooperation between them to reach the best results possible.

Key words

Wind tunnel, personal vehicle, drag, air flow quality, computing modeling

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

FABŘÍCI, Tomáš. *Aerodynamické tunely pro osobní automobily*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/150377>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 25. mája 2023

Fabřici Tomáš

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D. za vedenie pri vypracovaní bakalárskej práce, za jeho cenné rady a pripomienky. Ďalej by som sa rád poďakoval svojej rodine za podporu pri štúdiu a vypracovaní bakalárskej práce.

Obsah

Úvod	9
1 História a vývoj aerodynamických tunelov	10
2 Typy, jednotlivé časti a vlastnosti aerodynamických tunelov	12
2.1 Typy aerodynamických tunelov	12
2.1.1 Aerodynamický tunel s otvoreným okruhom	12
2.1.2 Aerodynamický tunel s uzavretým okruhom	12
2.2 Časti aerodynamických tunelov	13
2.2.1 Testovacia oblasť	14
2.2.2 Tryska	15
2.2.3 Difúzor	17
2.2.4 Rohy	17
2.2.5 Ventilátor	18
2.3 Kvalita prúdiaceho vzduchu	18
2.3.1 Rýchlosť turbulentného prúdenia	19
3 Merania v aerodynamických tuneloch, čo a ako sa meria, problémy pri testovaní, budúcnosť aerodynamických tunelov	20
3.1 Problémy pri testovaní	20
3.2 Meranie síl a momentov	22
3.3 Vizualizácia prúdenia	25
3.4 Aeroakustické merania	29
3.4.1 Meranie vnútorného zvuku	30
3.4.2 Meranie vonkajšieho zvuku	31
3.5 Meranie tlaku a rýchlosti	32
3.6 Budúcnosť aerodynamických tunelov	35
4 Prehľad aerodynamických tunelov v Európe	36
4.1 Aerodynamický tunel FKFS v Stuttgarte	36
4.1.1 Aeroakustický tunel	36
4.1.2 Modelový aerodynamický tunel	37
4.1.3 Tepelný aerodynamický tunel	38
4.2 Aerodynamický tunel Pininfarina	38
Zhodnotenie	40
Záver	41
Zoznam použitých zdrojov	42

Úvod

Aerodynamika osobných automobilov je v súčasnosti čoraz viac riešená aj z dôvodu zníženia energetických nárokov na pohon automobilov. Už pri rýchlosti približne 100 km/h a viac sa väčšina energie spotrebúva na prerážanie vzduchu. A to je jeden z hlavných dôvodov pre zlepšenie aerodynamických vlastností osobných automobilov a tým pádom aj zníženie finančných nárokov. Samozrejme u osobných automobilov sú aj iné faktory, ktoré ovplyvňujú ich návrh ako sú vzhľad, financie, hmotnosť alebo aj čas pri návrhu. Preto nie vždy je aerodynamika osobných vozidiel taká dokonalá ako je napr. u závodných automobilov, ale často sa volí kompromis medzi týmito faktormi v závislosti na aplikácii. Asi najdôležitejší parameter je odporová sila resp. koeficient odporu, kde je snaha znížiť ho na minimum. Tento parameter priamo ovplyvňuje aj spotrebu automobilu.

Jedným z hlavných nástrojov na určovanie síl pôsobiacich na automobil a skúmanie aerodynamických vlastností sú aerodynamické tunely. Tie sa zo začiatku používali hlavne v leteckom priemysle, ale postupom času sa začali čoraz viac uplatňovať aj v automobilovom priemysle. V aerodynamických tuneloch je možné skúmať viacej parametrov iba ako výsledné aerodynamické sily pôsobiace na automobil, ale možno tu vykonávať merania ako napríklad vizualizácia prúdenia, z ktorej možno zistiť ako obteká vzduch okolo testovaného modelu, merania tlaku, alebo v dnešnej dobe populárne aeroakustické merania pre zlepšenie komfortu pri jazde automobilom.

Z dôvodu rastúcej konkurencie medzi samotnými automobilkami, sú čas a financie potrebné pre návrh automobilu čoraz viac podstatnejšie. Aerodynamický tunel nie je vôbec lacná záležitosť, a preto sú kladené aj väčšie nároky na presnosť a hlavne rýchlosť meraní vykonávaných v aerodynamických tuneloch, pretože čas strávený v aerodynamických tuneloch je veľmi drahý.

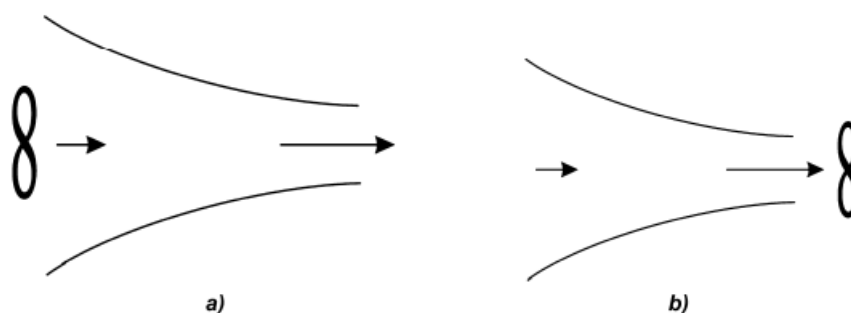
Cieľom tejto práce je zmapovať aerodynamické tunely pre osobné automobily. K čomu sa vlastne používajú a prečo? Stručná história a vývoj aerodynamických tunelov. Z akých častí sa aerodynamické tunely skladajú a ich základný popis a parametre. Čo a ako sa meria v aerodynamických tuneloch, aké môžu nastať problémy pri testovaní, ako simulovať reálne podmienky vozovky a limity aerodynamických tunelov. Poskytnúť prehľad aerodynamických tunelov používaných na testovanie v Európe.

Budúcnosť aerodynamických tunelov je ďalšia problematika, ktorá je načrtnutá v tejto práci. Táto otázka je v dnešnej dobe veľmi aktuálna, hlavne z dôvodu veľkého pokroku v oblasti počítačových simulácií, ktorých výhody pri skúmaní aerodynamických vlastností sú určite nespochybniteľné. Dokážu ich ale úplne nahradiť a aerodynamické tunely sa prestanú úplne používať? Alebo dosiahneme kompromis medzi používaním počítačových simulácií a aerodynamických tunelov ?

1 História a vývoj aerodynamických tunelov

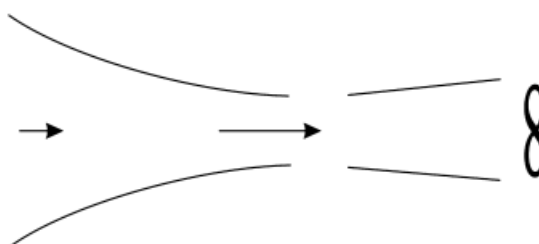
Keď pred viac ako 100 rokmi nahradili koče s koňmi prvé motory, nikto sa nezaujímal o aerodynamiku. Primárna funkcia tela koča bola iba chrániť cestujúcich pred dažďom alebo vetrom. Myšlienka aplikovať aerodynamiku pre osobné automobily prišla neskôr, až potom keď technológia v letectve urobila veľký pokrok. Pre vzducholode a lietadlá boli vyvinuté aerodynamické tvary, ktoré znížili odpor vzduchu a umožnili dosahovať väčších rýchlostí [1].

Ako prvý, kto navrhol a prevádzkoval aerodynamický tunel, sa považuje Frank H. Wenham a to v roku 1871 v Greenwichi [2]. Prvé tunely využívali ventilátory, ktoré boli umiestnené pred testovaným objektom (Obrázok 1a) a až neskôr boli umiestnené za testovaciu oblasť (Obrázok 1b). Toto sa ukázalo ako dôležitý krok vo vývoji aerodynamických tunelov. Ventilátor už neovplyvňuje model v testovacej oblasti a kvalita prúdiaceho vzduchu sa zlepšila [3].



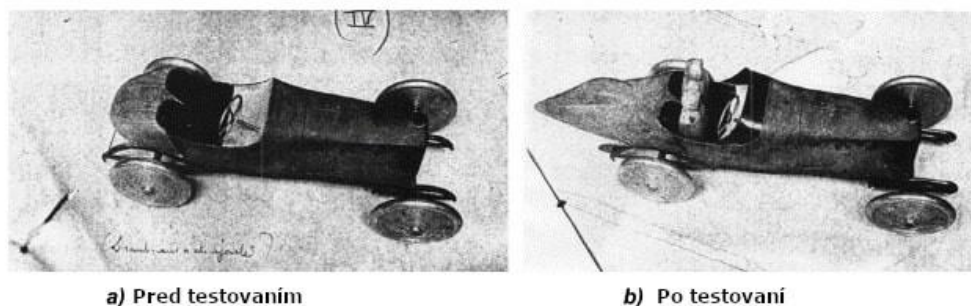
Obrázok 1 a) Ventilátor pred testovacou oblasťou b) Ventilátor za testovacou oblasťou [3]

Ďalším pokrokom vo vývoji bol vynález Eiffela v roku 1911 a to konkrétne difúzor (Obrázok 2). Hlavná myšlienka tohto zariadenia vychádza z Bernoulliho rovnice, ktorá hovorí, že ak znížim rýchlosť, tak sa mi musí zvýšiť tlak. To malo za následok, že tlakový rozdiel na strane ventilátora bol oveľa menší ako keby tam difúzor nebol. Tento vynález viedol k zredukovaniu nákladov [3].



Obrázok 2 Použitie difúzora medzi testovacou oblasťou a ventilátorom [3]

V roku 1914 Peugeot otestoval svoj model auta v Eiffelovom aerodynamickom tuneli v Paríži. Zadná časť bola modifikovaná, aby znížila odpor vzduchu [3]. Výsledný model po testovaní v aerodynamickom tuneli možno vidieť na Obrázok 3.



Obrázok 3 Model Peugeot testovaný v aerodynamickom tuneli [3]

Historicky testovanie automobilov v aerodynamických tuneloch začalo v zmenšených modeloch voči reálnym. V Európe boli preferované modely veľkosti 1:5 alebo 1:4 a napr. v USA 3:8. Výhody týchto zmenšených modelov sú na prvý pohľad jasné. Sú lacnejšie, ľahšie sa s nimi narába a môžu byť rýchlo modifikované a na testovanie stačia menšie aerodynamické tunely, ktoré sú ľahšie dostupné a dajú sa prenajať za menšiu cenu [1].

Evolúcia automobilov v posledných rokoch je veľmi rýchla hlavne z dôvodu konkurencie medzi jednotlivými automobilkami. Z tohto dôvodu je potrebné neustále zlepšovanie aerodynamických tunelov a meracích techník. Technické požiadavky na nové modely sú stále vyššie a vyššie a čas na rozvoj je kratší [4].

2 Typy, jednotlivé části a vlastnosti aerodynamických tunelov

Typ, veľkosť alebo geometria jednotlivých častí aerodynamických tunelov závisí hlavne od oblasti použitia. Také základné rozdelenia sú na otvorené a uzavreté okruhy, podľa typu testovacej miestnosti alebo či testujeme celý alebo zmenšený model [2]. Myšlienka a princíp však ostávajú stále rovnaké. Vždy budeme mať prúd vzduchu, generovaný napr. ventilátorom, ktorý bude prúdiť okolo modelu v testovacej miestnosti a z toho následne zisťovať aerodynamické vlastnosti [5].

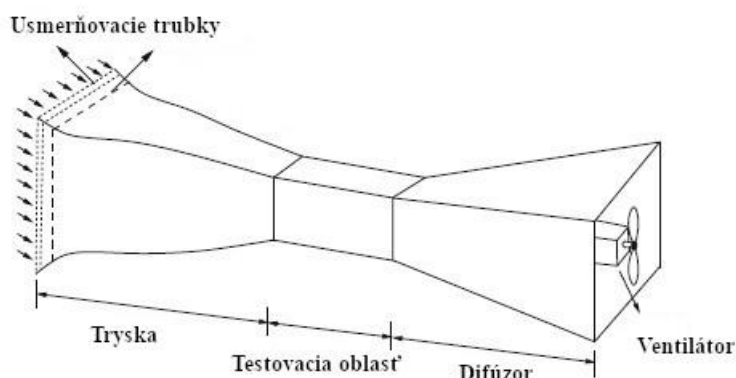
2.1 Typy aerodynamických tunelov

2.1.1 Aerodynamický tunel s otvoreným okruhom

Tunel s otvoreným okruhom (Obrázok 4) alebo Eiffelov typ má na oboch koncoch otvory a nasáva vzduch z okolia, ktorý prejde cez testovaciu sekciu a vráti sa následne naspäť [6].

Výhody týchto typov tunelov sú nízka cena na vybudovanie, pri vizualizácii prúdenia sa tu nehromadí dym alebo výfukové plyny napr. z motora. Ak okolité podmienky sú konštantné, tak teplota v testovacej oblasti sa pri dlhých testoch veľmi nezmení [7].

Na druhej strane nevýhody tohto typu sú vplyvy okolitých podmienok na prúdenie. Ak je tunel umiestnený vonku, tak okolitý vzduch môže mať veľký dopad na kvalitu prúdenia. Ďalej zvuk z testovacej oblasti a z ventilátora môže byť pri väčších tuneloch veľký problém. Ďalšia nevýhoda je, že na používanie tohto typu je potrebné väčšie množstvo energie ako pri type uzavretom [7].



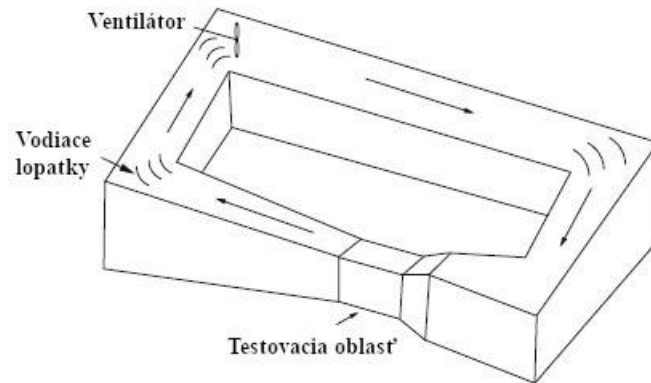
Obrázok 4 Schéma aerodynamického tunela s otvoreným okruhom [6]

2.1.2 Aerodynamický tunel s uzavretým okruhom

V tomto type vzduch, ktorý vychádza z testovacej oblasti ide cez uzavretý okruh a vracia sa naspäť (Obrázok 5). Táto konfigurácia patrí k najrozšírenejším typom aerodynamických tunelov [6].

Výhody tohto typu oproti tunelom s otvoreným okruhom sú nasledovné. Energia na prevádzku tohto typu je menšia, pretože ak prúdiaci vzduch už cirkuluje v aerodynamickom tuneli, tak stačí energia pre ventilátor iba na prekonanie tlakových strát, kvalita prúdiaceho vzduchu nie je ovplyvnená okolitými podmienkami a sú menej hlučné [7].

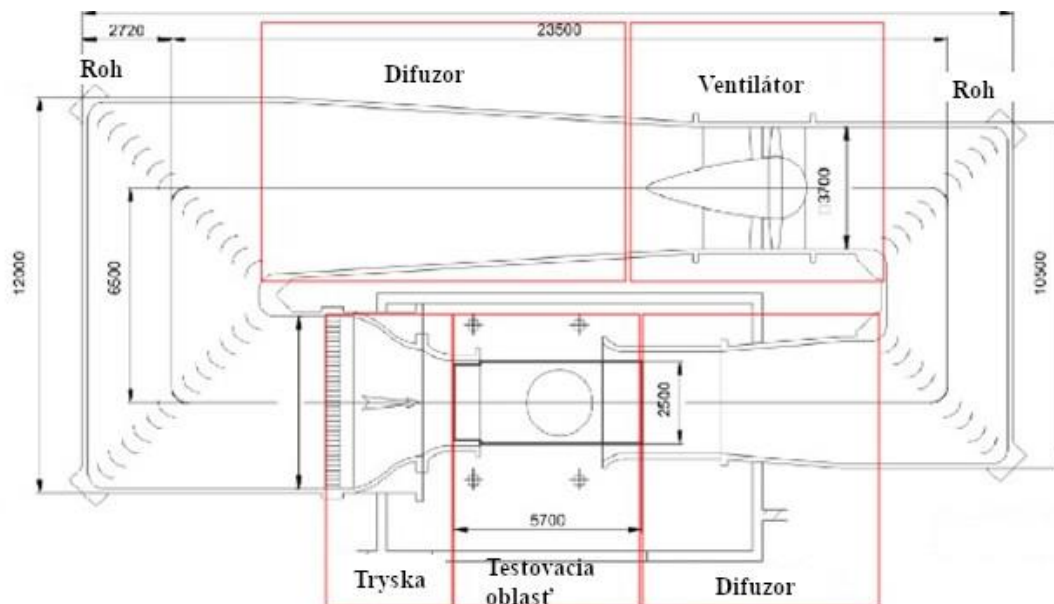
Nevýhody tohto typu sú, že na výstavbu sú pomerne drahé, pri vizualizácii prúdenia sa tu hromadí dym a z dôvodu trenia vzduchu o steny tunela tu dochádza pri dlhšom testovaní k zvýšeniu teploty v testovacej miestnosti. Tento problém sa dá čiastočne odstrániť pridaním napr. tepelných alebo vzdušných výmenníkov [7].



Obrázok 5 Schéma aerodynamického tunela s uzavretým okruhom [6]

2.2 Časti aerodynamických tunelov

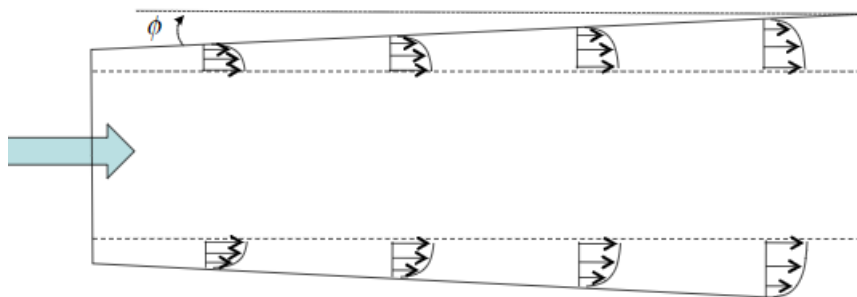
Hlavnými špecifikáciami pre aerodynamický tunel sú rozmery a tvar testovacej oblasti, trysky a požadovaná maximálna prevádzková rýchlosť. Ďalej musí byť špecifikovaná kvalita prúdiaceho vzduchu pomocou intenzity turbulencie a rovnomernosti prúdenia [8]. V nasledujúcich podkapitolách budú rozobrané časti aerodynamického tunela na (Obrázok 6).



Obrázok 6 Schéma aerodynamického tunela s jednotlivými časťami [9]

2.2.1 Testovacia oblasť

Cieľom pri testovaní v aerodynamických tuneloch je zabezpečiť, aby prúd vzduchu v testovacej oblasti bol rovnomerný, stabilný a kontrolovateľný. Obidva typy aerodynamických tunelov t.j. s otvoreným aj uzavretým okruhom môžu mať buď otvorenú alebo zatvorenú testovaciu oblasť [10]. Testovacia oblasť aj inak nazývaná pracovná oblasť, je časť tunela, ktorá má konštantné prúdové charakteristiky a je v nej umiestnený testovací model. Je dôležité, aby v tejto časti ostal prierez testovacej oblasti rovnaký po celej dĺžke. Z dôvodu tvorby medzných vrstiev na stenách sa v skutočnosti efektívna plocha o trochu znižuje, čo má za následok zrýchlenie prúdu vzduchu [6]. Na prekonanie tohto problému majú testovacie sekcie zväčšujúcu sa geometriu (Obrázok 7) o približne $0,5^\circ$ [9].



Obrázok 7 Schéma medzných vrstiev a zväčšujúcej sa geometrie [9]

Rozmery testovacej oblasti musia byť navrhnuté s ohľadom na použitie. Veľkosť testovacej oblasti a prevádzková rýchlosť limitujú maximálnu veľkosť testovaných modelov a maximálne možné dosiahnuteľné Reynoldsovo číslo [8]. Navrhnutie veľkosti a tvaru prierezu testovacej oblasti je dôležitým krokom pri návrhu aerodynamického tunela. Plocha prierezu určuje celkové rozmery aerodynamického tunela a toto priamo ovplyvňuje náklady na výstavbu. Počas vývoja aerodynamických tunelov bolo otestovaných mnoho tvarov prierezu testovacej oblasti ako napr. okrúhle, eliptické, štvorcové alebo obdĺžnikové. Zistilo sa, že tvar testovacej oblasti má zanedbateľný vplyv na tlakové straty. Preto pre ľahkú inštaláciu a výmenu testovaných modelov je obdĺžnikový alebo štvorcový tvar prierezu testovacej oblasti preferovaný [10].

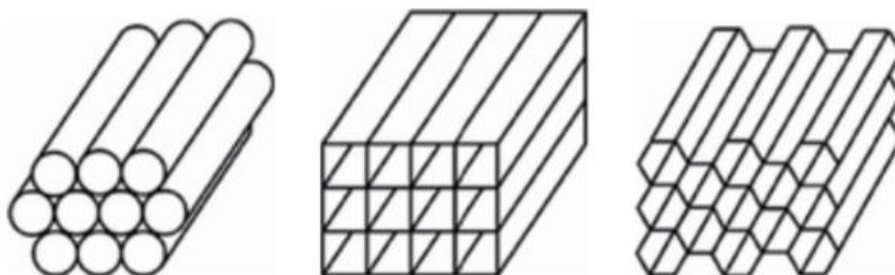
Pre testovanie osobných automobilov sa najčastejšie využívajú tunely s otvorenou testovacou sekciou. Väčšinou majú veľkú testovaciu oblasť bez stien okolo testovaného objektu [11]. Dovoľujú upnutie väčších modelov, prístupnosť je oveľa jednoduchšia, efekt stien je tiež menší a statický tlak sa tiež menej líši oproti uzavretej testovacej oblasti. Nevýhodou je, že vzduch v otvorenej oblasti sa často nechá rozptýliť okolitým vzduchom, a preto testovacia oblasť býva kratšia a viac energie je potreba na prevádzku [7].

Na druhej strane tunely s uzavretou testovacou oblasťou sú vyžadované tam, kde je potrebná väčšia presnosť t.j. Formula 1 alebo lietadlá. Sú veľmi drahé na vybudovanie, ale poskytujú presnejšie výsledky. V uzavretej oblasti dochádza k tzv. blokácii. To znamená, že umiestnením modelu do miestnosti dochádza k zmenšeniu plochy pre prúdenie vzduchu, čo má za následok lokálne zvýšenie rýchlosti a môže to negatívne ovplyvniť výsledky [11].

Ďalší variant je testovacia oblasť s tzv. štrbinovými stenami. Na stenách v testovacím priestore sú pozdĺžne otvorené štrbiny, kde až 30% plochy je otvorené, čo umožňuje testovanie väčších modelov. Model pôsobí v testovacej oblasti na prúd vzduchu, ktorý prejde drážkou a nedochádza k blokovaniu [7].

2.2.2 Tryska

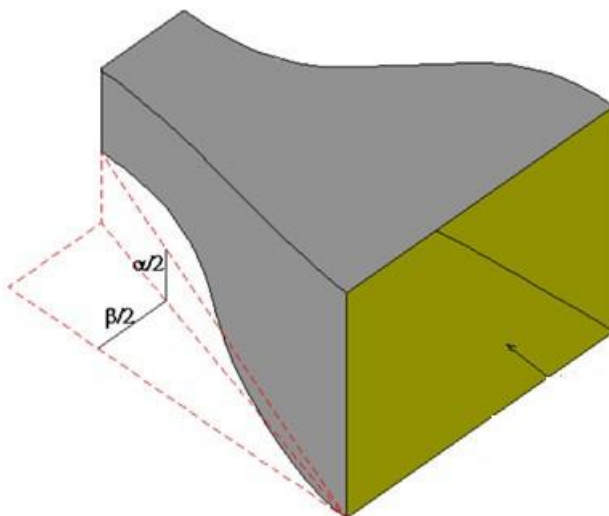
Skoro všetky aerodynamické tunely majú trysku pred testovacou oblasťou. V tryske sa prúd vzduchu zrýchli a usmerní [12]. Pre zmenu turbulentného prúdenia na laminárne pri vstupe do trysky sa používajú úzke a dlhé tzv. usmerňovacie trubky. Tieto trubky môžu mať kruhový, obdĺžnikový alebo šesťuholníkový prierez natočený v smere prúdenia vzduchu (Obrázok 8). Za týmito trúbkami sa nachádza ešte drôtové sito, ktoré slúži na premenu turbulentného prúdenia, ktoré ostalo ešte po usmerňovacích trúbkach. Na zrýchlenie prúdu vzduchu do testovacej oblasti sa znižuje prierez, čo má za následok zrýchlenie prúdu vzduchu [6]. Existujú 2 hlavné problémy pri návrhu trysky. Po prvé tlak v smere trysky klesá v dôsledku zvyšovania rýchlosti a vzniká nepriaznivý tlakový gradient medzi vstupom a výstupom, čo môže spôsobiť oddelenie medznej vrstvy a následne zhoršenie kvality prúdiaceho vzduchu a zvýšenie energetických nárokov. Po druhé ak má tryska obdĺžnikový alebo štvorcový tvar prierezu, tak v rohoch sa tvorí sekundárne prúdenie, ktoré má nižšiu rýchlosť a zvyšuje riziko oddelenie prúdenia [10].



Obrázok 8 Usmerňovacie trubky [10]

Tryska je najkritickejšou časťou pri návrhu aerodynamického tunela, pretože má najväčší vplyv na kvalitu prúdiaceho vzduchu v testovacej oblasti. Ako už bolo spomenuté, jej cieľom je zrýchliť prúdiaci vzduch a zmenšiť turbulencie a nerovnomernosti v prúdení na minimum. Toto zrýchlenie hlavne závisí od tzv. pomeru kontrakcie, čo je pomer medzi vstupnou a výstupnou oblasťou. Tento pomer sa volí zväčša medzi 6 až 12 v závislosti na aplikácii [8].

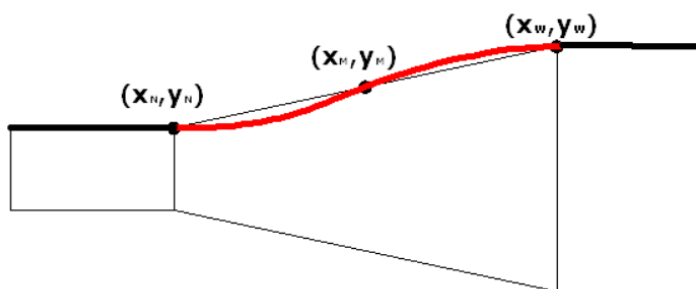
Druhým kritériom pri návrhu trysky je tvar trysky. Ak bude tento parameter zle navrhnutý, môže dôjsť k lokálnemu oddeleniu medznej vrstvy a následne sa intenzita turbulencie omnoho navýši. Ak bude rádius kriviek malý, môže dôjsť k narušeniu medznej vrstvy a ak bude rádius príliš veľký, môže zasa viesť k pomalému zrýchľovaniu. Existujú odporúčané hodnoty pre uhly α a β (Obrázok 9) približne 12° a pre tvar kriviek sa odporúčajú 2 polynómy 3 stupňa (Obrázok 10) [8].



Obrázok 9 Typický tvar trysky v aerodynamickom tuneli [8]

Tretím parametrom pri návrhu trysky je dĺžka trysky, ktorá určuje hrúbku medznej vrstvy na výstupe z trysky. Preto by sa zdalo, že zmeňovanie dĺžky trysky je ideálne riešenie na ušetrenie miesta aj financií. Bolo ale pozorované, že skracovanie dĺžky trysky zvyšuje riziko oddelenia medznej vrstvy, čo vedie k nežiadúcej kvalite prúdiaceho vzduchu. Odporúčaná dĺžka trysky potom je daná vzťahom [13], kde D_{inlet} je priemer na vstupe do trysky.

$$L = (0,75 \text{ až } 1,25) \cdot D_{inlet} \quad (1)$$



Obrázok 10 Odporúčaná tvar trysky [8]

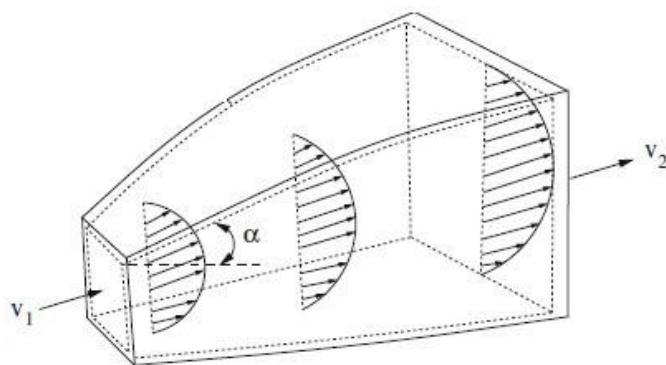
Rovnice polynómov 3 stupňa potom sú [8] :

$$y = a_w + b_w \cdot x + c_w \cdot x^2 + d_w \cdot x^3 \quad (2)$$

$$y = a_N + b_N \cdot x + c_N \cdot x^2 + d_N \cdot x^3 \quad (3)$$

2.2.3 Difúzor

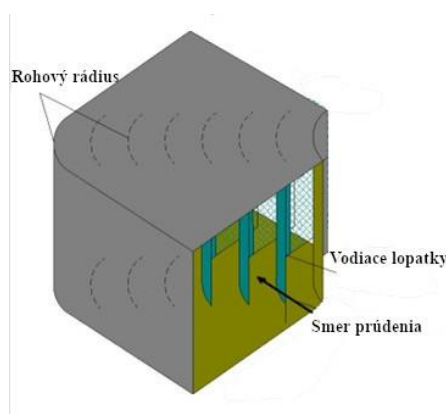
Difúzor (Obrázok 11) nasleduje po testovacej oblasti a na rozdiel od trysky slúži na spomalenie vzduchu v častiach, ktoré nie sú používané na testovanie. Zníženie rýchlosti má za následok zvýšenie statického tlaku a to postupným zväčšovaním prierezu tunela. Dochádza tu k rozdielu tlakov, čo môže viesť k oddeleniu prúdenia a spôsobiť vibrácie, osciláciu rýchlosti v testovacej oblasti a k zvýšeným stratám. Straty závisia na druhej mocnине rýchlosti, a preto by sa mala redukcia rýchlosti vykonať v najkratšej možnej vzdialenosti, aby sme udržali straty na minime. Ale ani s optimalizovaným difúzorom sa nedá tomuto úplne zabrániť [6].



Obrázok 11 Schéma difúzora [6]

2.2.4 Rohy

V uzavretých okruhoch sú na minimalizovanie tlakových strát a zlepšenia kvality prúdiaceho vzduchu v rohoch pri prúdení nainštalované vodiace lopatky (Obrázok 12) [6]. Tieto vodiace lopatky by mali byť nastaviteľné, aby bol zaručený kvalitný prúd vzduchu [9]. Parameter, ktorý ovplyvňuje, aké veľké straty budú v daných rohoch je rádius daného rohu. Tento rádius je úmerný šírke vstupu do daného rohu. Tento rádius bude rovnaký aj pre vodiace lopatky. Aj keď zväčšenie rádiusu znižuje tlakové straty v dôsledku rozloženia tlaku na vodiacich lopatkách, tak na druhej strane to zvyšuje straty spôsobené trením a celkové rozmery tunela. Preto sa odporúča použiť rádius ako 0,25-násobok šírky vstupu [8].



Obrázok 12 Schéma rohu aerodynamického tunela [8]

Ďalšia otázka sa naskytne, a to v akom rozostupe od seba by vodiace lopatky mali byť na redukovanie strát. Keď sa počet lopatiek zvýši, tlaková strata klesá, ale zvýši sa trenie. Z toho dôvodu by počet lopatiek nemal byť príliš vysoký a odporúča sa rovnaký rozstup medzi všetkými lopatkami [8].

2.2.5 Ventilátor

Ventilátor, väčšinou axiálny je v aerodynamickom tuneli umiestnený v konštantnom priereze, tým pádom rýchlosť vzduchu je konštantná. Preto zrýchlenie prúdu vzduchu sa dosahuje tlakovým rozdielom, čím väčší tlakový rozdiel, tým väčšia rýchlosť. Ventilátor nie je umiestnený priamo za testovacou oblasťou, ale až za rohom, a to z obáv, ak by náhodou niečo vyletelo z testovacej oblasti, aby to nezasiahlo ventilátor [9]. Ventilátor ale neprodukuje úplne laminárne prúdenie vzduchu a na odstránenie tohto problému sa používajú napr. usmerňovacie lopatky za ventilátorom, lopatky pred ventilátorom, ktoré predrotujú prúdiaci vzduch alebo sa používa protibežný ventilátor, ktorý odstráni rotáciu vyvolanú prvým ventilátorom. Riešenie pomocou protibežných ventilátorov je vhodné pre väčšie aerodynamické tunely a pre lacnejšie riešenie je vhodné použiť predrotačné alebo usmerňovacie lopatky. Predrotačné lopatky vlastne pracujú tak, že vytvárajú vír, ktorý je opačný oproti tomu, čo produkuje ventilátor a celkové vírenie za ventilátorom potom bude nulové [10].

2.3 Kvalita prúdiaceho vzduchu

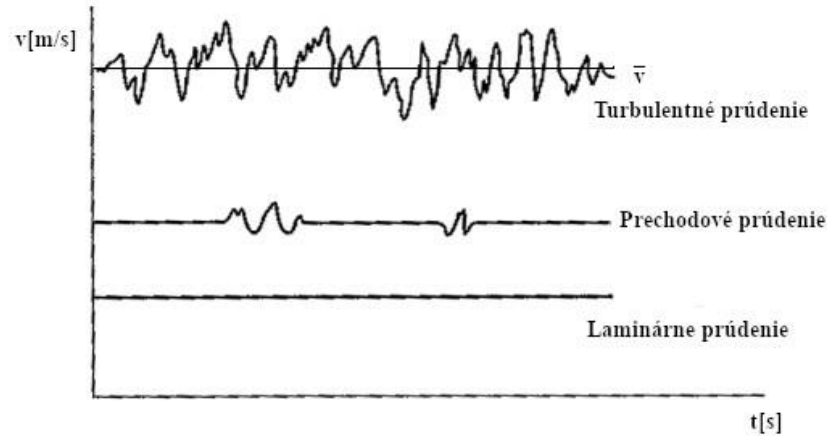
Po celé desaťročia sa testovanie v aerodynamických tuneloch vykonávalo v testovacích úsekoch, kde dôsledky kvality prúdiaceho vzduchu na merania a výsledky boli v značnej miere ignorované. Kvalita prúdiaceho vzduchu v aerodynamickom tuneli môže nepriaznivo ovplyvniť výsledky testov, a preto sú potrebné presné a konzistentné merania prúdiaceho vzduchu spolu s porozumením vzniku zdrojov, charakteristiky a manažovania turbulentného prúdenia [14].

Hlavná podmienka je, aby prúd vzduchu bol rovnomerný. Akékoľvek nerovnomernosti v prúdení by mali mať malú veľkosť a nízku frekvenciu, aby mali zanedbateľné účinky na merania vykonávané v aerodynamickom tuneli [10]. Niektoré z hlavných zdrojov nepriaznivých účinkov na kvalitu prúdiaceho vzduchu sú napr. aj samotný ventilátor, ktorý generuje turbulentné prúdenie alebo oddelenie prúdenia v okruhu aerodynamického tunela. Najpravdepodobnejšie miesta oddelenia prúdenia sú v difúzore, tryske a v rohoch. Redukovanie týchto účinkov sa môže dosiahnuť vylepšeným a optimalizovaným dizajnom komponentov aerodynamického tunela [14].

V ideálnom prípade, ak by bola testovacia oblasť prázdna t.j. žiadne vyvažovacie vzpery, ktoré držia testovaný model alebo iné prekážky, tak prúdiaci vzduch mimo medznej vrstvy by mal vlastnosti ako rovnomerný rýchlostný profil v pozdĺžnom smere, žiadna turbulencia a žiadna zložka rýchlosti vo vertikálnom smere. Keďže nežijeme v ideálnom svete, tak tieto podmienky sú veľmi ťažko splniteľné, až nespĺniteľné, a preto by sa mala dosiahnuť akceptovateľná kvalita prúdiaceho vzduchu [10].

2.3.1 Rýchlosť turbulentného prúdenia

Ako už bolo zmienené skôr, prúdenie vzduchu v aerodynamickom tuneli nebude nikdy úplne laminárne. Pri turbulentnom prúdení rýchlosť a tlak nie sú konštantné s časom, ale vykazujú nepravidelné kolísanie v čase (Obrázok 13) [15].



Obrázok 13 Kolísanie rýchlosti v čase pri turbulentnom prúdení [15]

Na percentuálne vyjadrenie veľkosti turbulencie máme veličinu intenzita turbulencie. V ideálnom prípade bez kolísania rýchlosti vzduchu by bola hodnota intenzity turbulencie 0%. Hodnota tejto veličiny v štandardných aerodynamických tuneloch sa pohybuje v intervale od 0,2 do 2% [15].

$$I_T = \frac{v'}{\bar{v}} \cdot 100\% \quad (4)$$

kde v' je kvadratický priemer výchyliek rýchlosti a \bar{v} je stredná rýchlosť

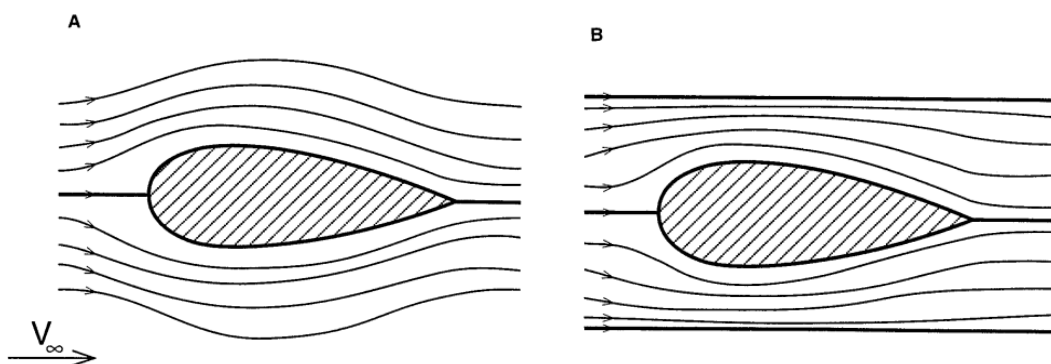
3 Merania v aerodynamických tuneloch, čo a ako sa meria, problémy pri testovaní, budúcnosť aerodynamických tunelov

Na to, aby sme začali merať dané aerodynamické vlastnosti automobilu, je potrebné najprv nainštalovať model do testovacej sekcie, čo prináša zopár problémov, ktoré môžu negatívne ovplyvniť získané dáta.

3.1 Problémy pri testovaní

Ako prvý problém, ktorý sa vyskytuje pri testovaní, bol spomenutý už skôr a teraz si ho viacej priblížime.

Tento problém je veľkosť modelu a následne blokácia, ktorú vytvára v testovacej sekcii. Treba spomenúť, že tento problém je podstatnejší pre typ s uzavretou testovacou oblasťou. Princíp tohto problému je, že model môže narušiť prúdenie vzduchu a to tak, že model zmenší plochu prierezu, cez ktorú prúdi vzduch a podľa rovnice kontinuity, ak zmenšíme prierez zvýši sa rýchlosť v danom mieste (Obrázok 14). V realite to problém nie je, ale keď sú okolo modelu steny dôjde k lokálnemu zrýchleniu prúdenia vzduchu [7].



Obrázok 14 a) Volný prúd vzduchu b) Prúd vzduchu medzi stenami [7]

To znamená, že na dosiahnutie relevantných výsledkov by sme potrebovali čo najväčšiu testovaciu miestnosť na redukovanie tohto efektu, ale to zvyšuje cenu na výstavbu tunela, na jeho prevádzku a taktiež energetické požiadavky [7]. Blokovací pomer je pomer medzi prierezom prednej časti auta a prierezom testovacej sekcie. Tento pomer sa odporúča okolo 5 %, čo pre priemerné auto znamená, že by sme museli mať prierez testovacej sekcie okolo 40 m^2 [1]. Je zrejmé, že iba veľké automobilky by si mohli dovoliť testovanie v plnej veľkosti modelu. Preto na testovanie sa môžu využiť aj zmenšené modely. Otázka ale je, že ako veľké by mali byť tieto modely. Pre minimálne ovplyvnenie stenami by mali byť čo najmenšie, ale z pohľadu detailov modelov čo najväčšie [7]. V dnešnej dobe však sa už zmenšené modely pre testovanie osobných automobilov používajú minimálne a preferujú sa skutočné veľkosti modelov na testovanie v aerodynamických tuneloch [16].

Pri testovaní zmenšených modelov je nutné dodržiavať podobnostné kritéria. Existujú 3 kritéria a to geometrické, kinematické a dynamické. Geometrická podobnosť je dodržaná, ak sú všetky rozmery podelené rovnakou konštantnou, ale nie uhly, uhly zostávajú zachované. Kde λ je pomer dĺžok strán prototypu L_P a dĺžok strán testovaného modelu L_M [17].

$$\lambda = \frac{L_P}{L_M} \quad (5)$$

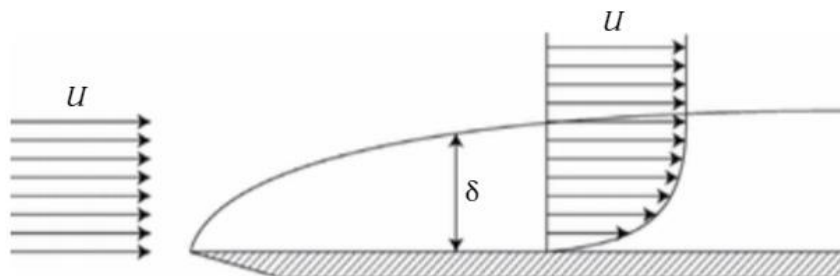
Ďalšie kritérium je kinematické, a toto je veľmi podobné, len na rozdiel od geometrického tu musia byť rýchlosti v rovnakom pomere a uhly medzi zložkami rýchlosti sa zachovávajú. Kde κ je pomer rýchlosti prototypu v_P a rýchlosti testovaného modelu v_M [17].

$$\kappa = \frac{v_P}{v_M} \quad (6)$$

Posledným kritériom je dynamická podobnosť a toto je asi najzložitejšie na dosiahnutie. Toto kritérium sa porovnáva väčšinou pomocou podobnostných čísel ako napr. Reynoldsovo, Machovo, Froudeho alebo Strouhalovo číslo. Pre testovanie automobilov v aerodynamických tuneloch je najrelevantnejšie Reynoldsovo číslo. Kde l je charakteristický rozmer, v je rýchlosť prúdenia a ν je kinematická viskozita. Zo vzorca môžeme ale vidieť nepríjemnosť pri testovaní zmenšených modelov. Povedzme, že budeme testovať model 1:5, to znamená, že charakteristický rozmer sa nám 5-krát zmenší. Na zachovanie Reynoldsoveho čísla musíme zvýšiť rýchlosť prúdenia 5-krát, keďže kinematická viskozita ostáva rovnaká [17].

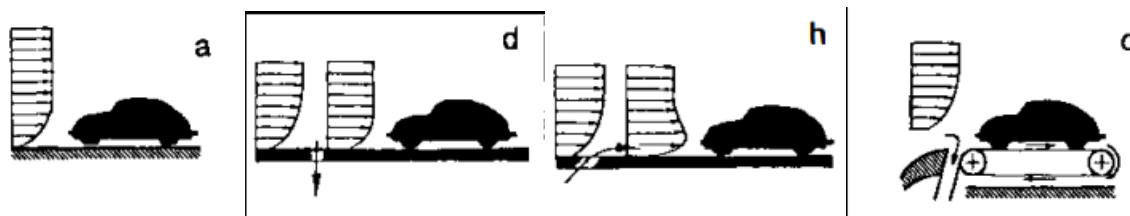
$$Re = \frac{l \cdot v}{\nu} \quad (7)$$

Ďalší problém je, ako simulovať cestu v aerodynamickom tuneli. Na relevantné výsledky pri testovaní sa používa pohyblivý pás namiesto stacionárneho. Rozdiel je v tvare medzných vrstiev. Ale čo je to medzná vrstva? Medzná vrstva je vlastne oblasť, v ktorej sa prúdenie spomaľuje z rýchlosti voľného prúdu vzduchu na nulovú rýchlosť, aby bola splnená podmienka ulpievania. Prúd vzduchu je spomaľovaný v tejto oblasti viskóznymi silami, ktoré produkujú šmykové napätie na stenách. Túto medznú vrstvu možno vidieť na (Obrázok 15) [10].



Obrázok 15 Schéma medznej vrstvy [10]

S niekoľko možných riešení najčastejšie používané sú: stacionárna podlaha bez akejkoľvek kontroly medzných vrstiev (Obrázok 16a), s tangenciálnym fúkaním (Obrázok 16h), s odsávaním medzných vrstiev (Obrázok 16d), pohyblivý pás s kombináciou sacej štrbiny na odstránenie medzných vrstiev (Obrázok 16c) [1].



Obrázok 16 Schéma konštrukcií podlahy [1]

Najjednoduchším riešením simulovaním cesty je stacionárna podlaha. Táto varianta umožňuje ľahké pripojenie k váhe cez 4 podložky, každá pod 1 koleso. Kolesá nerotujú počas tohto testovania. Ale pohyblivý pás reprezentuje najdokonalejšiu variantu ako simulovať cestu a veľmi často sa využíva v automobilovom priemysle. Nerotujúce kolesá v tejto variante by potrebovali medzeru medzi kolesami a pásom, čo vedie k nepresnostiam v meraní, preto všetky kolesá rotujú a sú poháňané pásom [1]. Problém je ale ako merať záťaž na rotujúcich kolesách, ktoré sú v kontakte s pásom. Niektoré tunely používajú úzke pásy, ktoré bežia iba medzi kolesami a tento problém je odstránený [7].

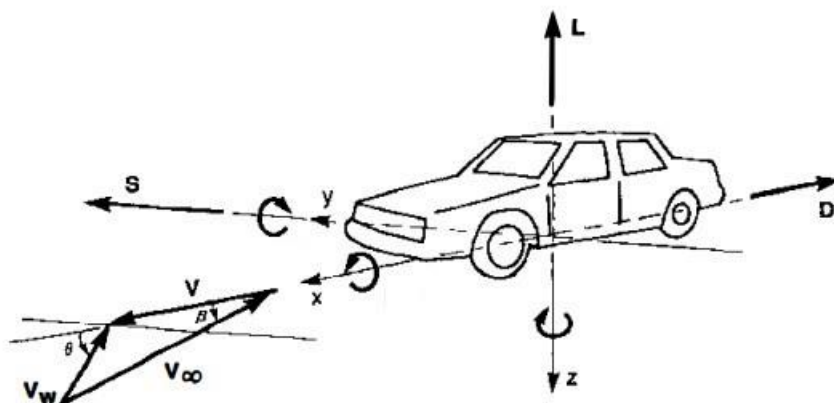
Niektoré aerodynamické tunely používajú odsávaciu medzeru pred modelom, táto odsávací medzera čo najviac zredukuje medznú vrstvu a vrstva, ktorá vznikne pod vozidlom je oveľa menšia. Ako vylepšenie tejto metódy je varianta, keď máme odsávacie medzery aj pod automobilom. Táto varianta je efektívnejšia, ale aj drahšia a konštrukčne komplikovanejšia [7].

3.2 Meranie síl a momentov

Interakcie medzi prúdiacim vzduchom a pohybujúcim sa objektom sú jedným z hlavných predmetov aerodynamických meraní. Na povrch skúmaného telesa pôsobí prúdiaci vzduch v každom bode tlakom a tangenciálnymi napätiami, po integrácii dostaneme výslednú silu. Táto sila sa dá rozložiť do 2 hlavných síl a to do vztlakovej a odporovej zložky sily [10].

Odporová sila resp. koeficient odporu C_D je najdôležitejší pri navrhovaní automobilov a stojí za zmienku, že zníženie tohto koeficientu o nejakú hodnotu má za následok zlepšenie spotreby. Ak napr. znížime koeficient odporu o hodnotu 0,1 môžeme prejsť o približne 3km viac na 1 liter paliva. Treba ešte dodať, že táto odporová sila je úmerná druhej mocnине rýchlosti t.j. čím rýchlejšie ideme, tým na nás pôsobí väčšia odporová sila, ktorú musíme prekonať [18].

Keď cestujeme po ceste, na automobil pôsobí viacej síl ako odporová sila v smere proti pohybu. Výsledné aerodynamické zaťaženie má komponenty vo všetkých 6 stupňoch voľnosti (Obrázok 17). V princípe všetky ovplyvňujú pohyb automobilu. Testovací inžinieri rozlišujú medzi chovaním automobilu pri nehybnom vzduchu a pri bočnom vetre [1].



Obrázok 17 Aerodynamické sily a momenty pôsobiace na automobil [1]

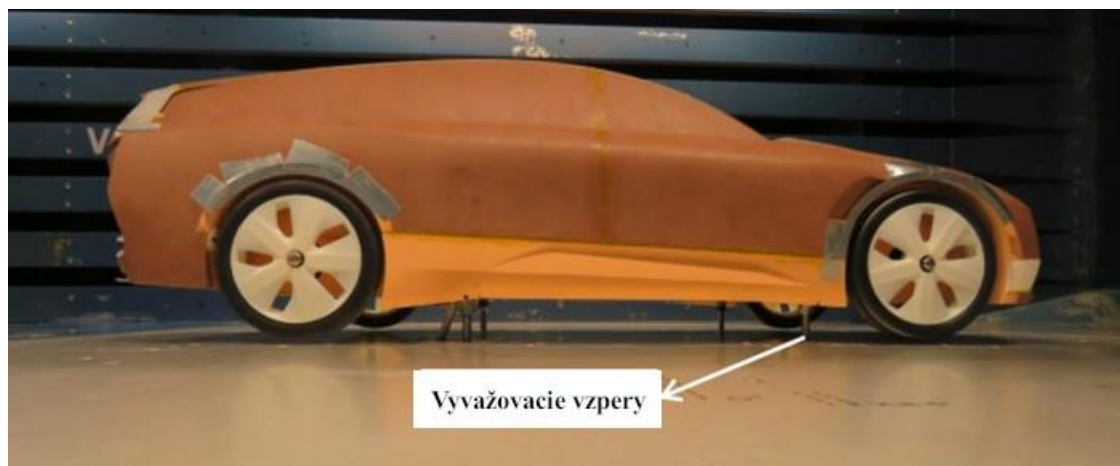
Prúdenie vzduchu okolo automobilu pohybujúce sa nehybným vzduchom je symetrické okolo roviny symetrie automobilu, čo má za následok, že jediné aerodynamické komponenty tu budú vztlaková sila, odporová sila a vztlakový moment (moment okolo osi y). Pokiaľ sa nevykonajú špeciálne úpravy, tak vertikálna sila (vztlaková sila) pôsobiaca na vozidlo je kladná. Pre typické autá s koeficientom vztlakovej sily 0,3, vztlaková sila ovplyvní 3% hmotnosti automobilu pri 96 km/h. Je to skôr vztlakový moment ako celková vztlaková sila, čo sa hodnotí pre dynamiku vozidla. Vztlakový moment mení rozloženie záťaže medzi prednou a zadnou nápravou, čo má dopad na riadiace vlastnosti vozidla. S pribúdajúcou rýchlosťou sa prejavuje záporný vztlakový moment, čo podporuje pretáčavosť, ktorá je nežiadúca, ale priemerný šofér si to pravdepodobne vôbec nevšimne [1].

Preto niektorí európski výrobcovia navrhujú svoje autá pre čo najmenší vztlak na zadnej náprave, aj keď to má za následok zväčšenie odporovej sily [1].

Na druhej strane pretekárske autá fungujú na zápornej vztlakovej sile. Ich schopnosť zatáčania bola drasticky zlepšená vďaka aerodynamickému prítlaku. Ale stále je to niečo za niečo. So zväčšujúcim sa aerodynamickým prítlakom sa zväčšuje aj odporová sila. Preto inžinieri musia nájsť kompromis, ktorý záleží na aplikácii [1].

Pri bočnom vetre alebo pri obíhaní auta prúd vzduchu okolo auta bude nesymetrický. Objaví sa tu bočná sila a 2 momenty, moment vybočenia (moment okolo osi z) a valivý moment (okolo osi x). Tiež komponenty odporová sila, vztlaková sila a zdvihový moment sú rozdielne a normálne zväčšené oproti situácii bez bočného vetra. Zo skúseností a zo simulácií bolo zistené, že iba bočná sila a moment vybočenia hrajú dôležitú úlohu pre chovanie automobilu pri bočnom vetre [1].

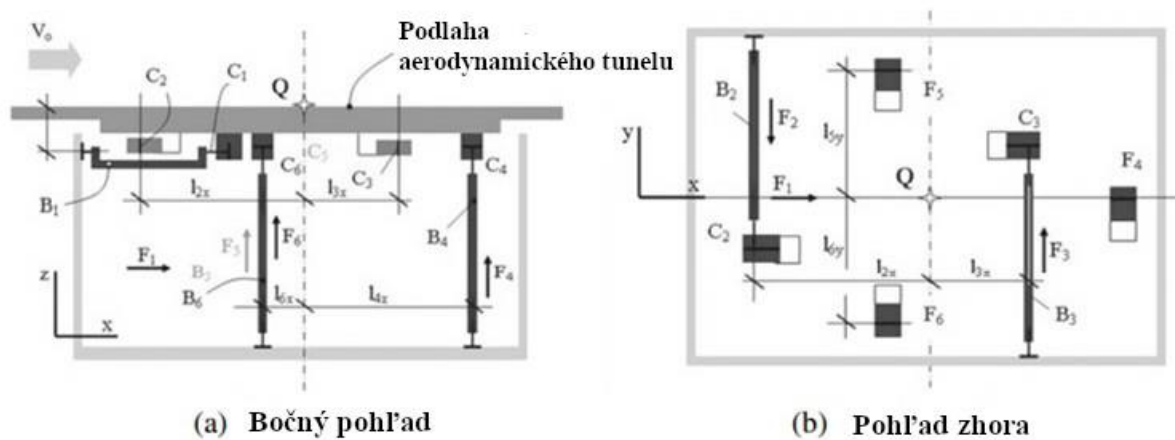
Meranie aerodynamických síl a momentov pôsobiace na automobil sa robí pripevnením modelu na podlahu testovacej sekcie a merané tzv. 6-komponentnými aerodynamickými silovými váhami. Existuje mnoho typov aerodynamických váh, ale najpopulárnejšie sú tenzometrické aerodynamické váhy. Testovací model je pripevnený na 4 vyvažovacích vzperách s kruhovým prierezom (Obrázok 18) [19]. Tieto vzpery sú priamo pripojené k aerodynamickým váham, ktoré sú izolované od podlahy aerodynamického tunela z dôvodu, aby zaznamenávali zaťaženie iba od prúdiaceho vzduchu [7].



Obrázok 18 Upevnenie modelu auta na vyvažovacích vzperách [19]

Princíp tenzometrických aerodynamických váh je založený na meraní priehybu prvkov v tvare dosiek. Tieto deformácie sa merajú pomocou snímačov, ktoré sú vybavené extenzometrami alebo tenzometrami, ktoré snímajú výchylku materiálu a prenášajú ho ako zmenu elektrického odporu alebo napätia (odpor je priamoúmerný priehybu) [20].

V prípade 6-komponentnej silovej váhy (Obrázok 19), ktorá používa 6 snímacích zariadení C_1, C_2, C_3 až C_6 , v ktorých budú sily F_1, F_2, F_3 až F_6 budú rovnice vyzerat' [20] :



Obrázok 19 Schéma silových váh [20]

Prvý snímač C_1 smerovaný pozdĺž osi x umožňuje meranie odporovej sily. 2 ďalšie snímače C_2 umiestnený pred modelom a C_3 umiestnený za modelom smerované v smere osi y umožňujú meranie prednej a zadnej bočnej sily a moment vybočenia (okolo osi z). 3 posledné snímače orientované v smere osi z umožňujú meranie zdvihovej sily, valivého momentu a zdvihový moment [20].

Sila nameraná snímačom C_1 je priamo odporová sila [20]:

$$F_x = F_1 \quad (8)$$

Zo snímačov C_2 a C_3 dostaneme bočnú silu a moment vybočenia k bodu Q (Obrázok 19) [20]:

$$M_z = l_{3x} \cdot F_3 + l_{2x} \cdot F_2 \quad (9)$$

$$F_y = F_3 - F_2 \quad (10)$$

Zo snímačov C_4 až C_6 dostaneme zdvihovú silu vpredu (F_{zfront}) a vzadu (F_{zrear}) [20]:

$$F_{zfront} = F_5 + F_6 \quad (11)$$

$$F_{zrear} = F_4 \quad (12)$$

$$F_z = F_{zrear} + F_{zfront} \quad (13)$$

$$M_x = l_{5y} \cdot F_5 - l_{6y} \cdot F_6 \quad (14)$$

$$M_y = l_{6x} \cdot (F_5 + F_6) - l_{4x} \cdot F_4 \quad (15)$$

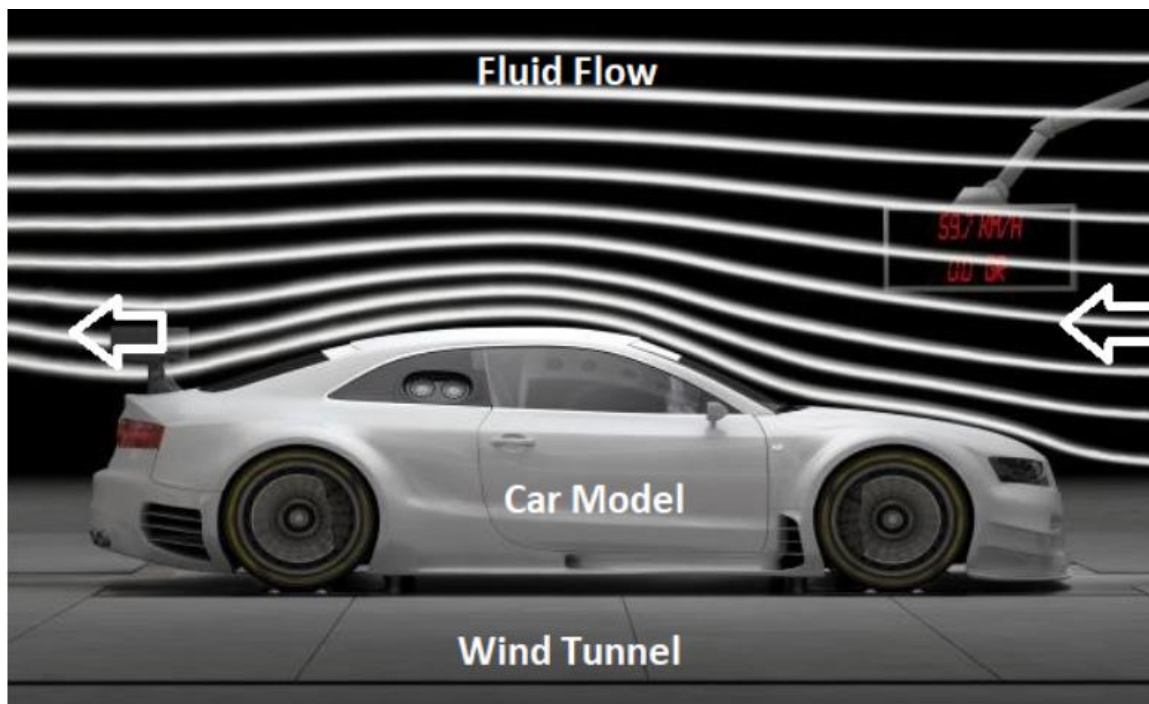
3.3 Vizualizácia prúdenia

V minulosti bol veľký záujem o vývoj metód pre vizualizáciu prúdenia a to zohralo dôležitú úlohu pri pochopení mechaniky tekutín. Vizualizácia prúdenia pomohla pri vývoji matematických modelov a hrala dôležitú úlohu pri overení teórií a celkovo stála pri vývoji zložitých inžinierskych systémov [16].

Vizualizácia prúdenia môže byť použitá v prípade, že chceme zistiť ako sa prúd vzduchu správa okolo testovaného objektu v aerodynamickom tuneli. Existuje veľa spôsobov, každý má svoje výhody a nevýhody.

Ako už bolo spomenuté skôr, väčšina osobných automobilov dnes sa testuje v reálnej veľkosti t.j. rozmery testovacej miestnosti sú väčšie, a preto tieto techniky vizualizácie prúdenia musia byť vhodné na použitie vo väčších priestoroch. Pri vizualizácii prúdenia je však vyžadované, aj aby čas a príprava danej techniky bola čo najkratšia, pretože čas v aerodynamickom tuneli je veľmi drahý, obzvlášť pri testovaní v reálnej veľkosti modelu. Napokon aerodynamické vlastnosti nie sú jediné a najhlavnejšie parametre pri vývoji osobného automobilu, ale aj vzhľad, výrobné náklady či funkčnosť [16].

Asi najznámejší spôsob vizualizácie prúdenia je pomocou dymu (Obrázok 20). Táto technika zahŕňa posielanie prúdu dymu do aerodynamického tunela, čo umožňuje inžinierom vidieť ako prúdenie vzduchu interaguje s testovaným modelom mimo povrchu modelu. Táto metóda môže byť použitá pri akomkoľvek type modelu a takmer v akomkoľvek type aerodynamického tunela. Čo sa týka nevýhod, tak pri dlhšom používaní sa tunel naplní dymom, to znamená, že pred ďalším používaním sa musí tento dym odstrániť [21]. Výhody tejto techniky sú, že výroba dymu je lacná, možnosť vypúšťania dymu mobilnou sondou, ktorú môžeme pohybovať po testovacej miestnosti, ale táto technika nefunguje dobre pri vyšších rýchlostiach [22].



Obrázok 20 Vizualizácia prúdenia pomocou dymu [23]

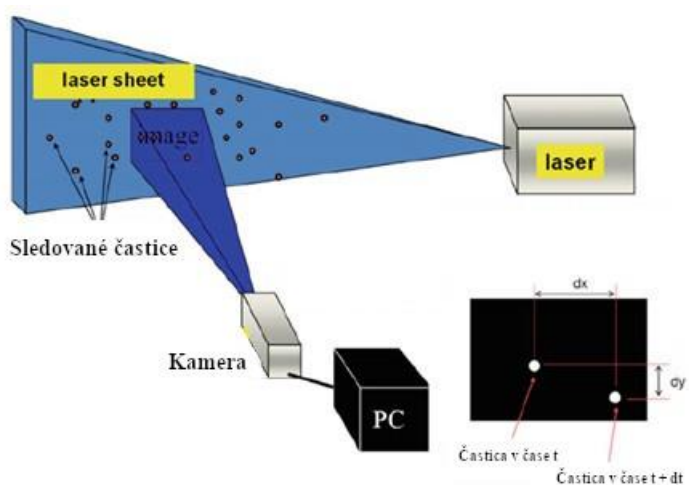
Ďalšia veľmi stará technika je použitie tzv. chumáčov (hodvábných, vlnených, alebo z akéhokoľvek vlákna), ktorých jeden koniec je prilepený na povrch modelu a druhý koniec, ktorý je voľný a ukazuje smer prúdenia vzduchu pri povrchu testovaného modelu (Obrázok 21) [20]. Táto technika je užitočná na vizualizovanie a pochopenie prúdenia vzduchu blízko povrchu tela, ale dĺžka a hmotnosť chumáčov by mala byť vhodne zvolená, bez toho aby bol narušený prúd vzduchu. Používa sa hlavne na detekciu oddelenia prúdenia a vírových štruktúr [23]. Ak je prúdenie stabilné, sú tieto chumáče relatívne stacionárne a natočia sa v smere lokálneho prúdenia. V opačnom prípade, ak dôjde k oddeleniu prúdenia, tak chumáče majú nestabilné pohyby a majú výchylky v naznačenom smere prúdenia vzduchu [16]. Tieto chumáče môžu byť potreté fluorescenčnými farbivami na zvýšenie viditeľnosti a ako také sú relatívne lacné na výrobu, ale požadujú čas, aby sa nalepili na model a musia byť zaistené, aby neboli z modelu odfúknuté [22].



Obrázok 21 Vizualizácia oddelenej oblasti prúdenia na aute pomocou chumáčov [20]

Ďalšia metóda je vizualizácia prúdenia vzduchu na povrchu testovaného telesa spôsobom, že model je potretý pred testovaním viskóznou kvapalinou (môže byť špeciálnym olejom). Vrstva oleja musí byť dostatočne hustá, aby pri testovaní sa tzv. nespláchla, ale nie moc hustá, aby neovplyvňovala prúd vzduchu [20]. Táto veľkosť olejového filmu je zásadná pre kvalitné výsledky. Výsledné olejové čiary vytvorené na povrchu testovaného telesa predstavujú ako sa správa prúd vzduchu na povrchu [23]. Tieto oleje sú väčšinou zmiešané s rôznymi farbivami pre zlepšenie viditeľnosti pri skúmaní zložitejších pozorovaní prúdu vzduchu [20].

Modernejšia metóda je PIV (Particle Image Velocimetry) alebo integrálna laserová anemometria, bola implementovaná v 90. rokoch a odvtedy sa stala jednou z najbežnejších používaných techník pri vizualizácii prúdenia. Základný princíp tejto techniky je, že sa meria rýchlosť snímaním posunu umelo vstrekaných častíc vo veľmi krátkych časových intervaloch (Obrázok 22) [20]. Táto metóda sa stala populárnou z dôvodu, že umožňuje merať celé rýchlostné pole okolo testovaného modelu bez toho, aby sa akokoľvek fyzicky zasiahlo do prúdu vzduchu [10].

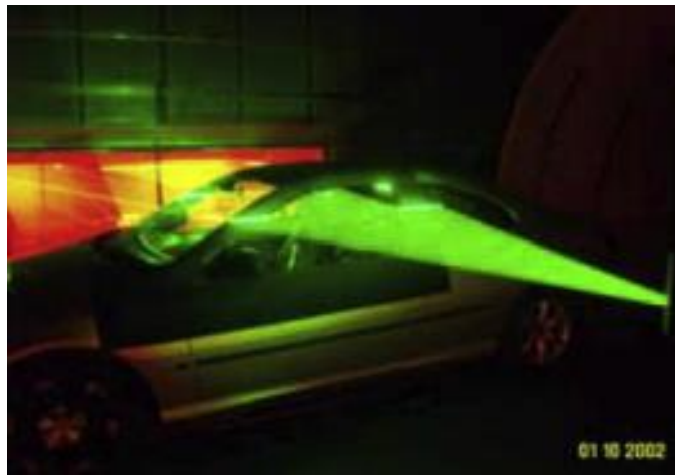


Obrázok 22 Schéma merania pomocou PIV [20]

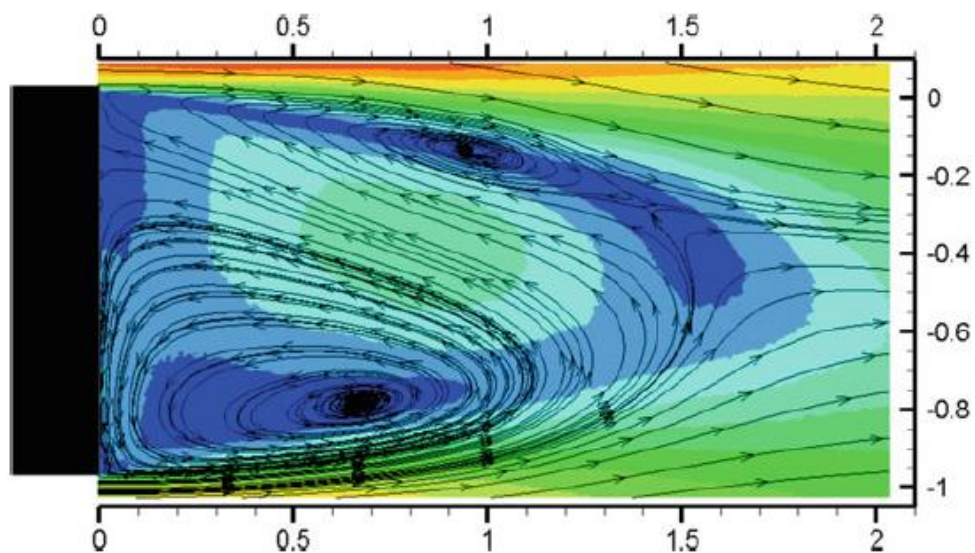
Ako bolo spomenuté, rýchlosť dostaneme ako podiel posunu Δs a krátkym časovým okamžikom Δt [20]:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (16)$$

Keďže rýchlosť prúdiaceho vzduchu sa získava z posunu vstrekaných častíc, tak je dôležité, aby tieto častice sledovali prúd vzduchu bez toho, aby ho nejak ovplyvnili. Preto by mali byť čo najmenšie a hustotu by mali mať podobnú ako sledovaná tekutina, čiže ako vzduch [24]. Ukážky merania pomocou PIV je možné vidieť na (Obrázok 23, Obrázok 24).



Obrázok 23 Ukážka merania PIV [4]



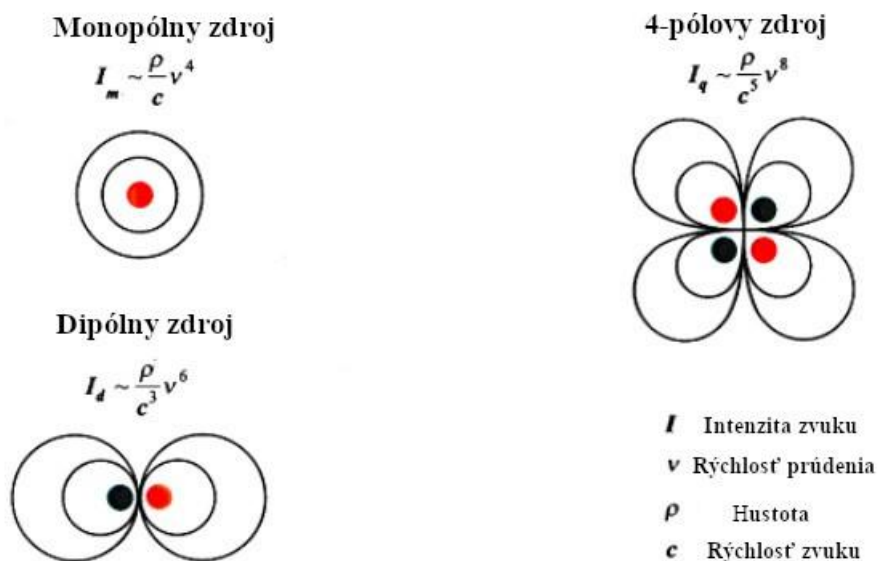
Obrázok 24 Meranie pomocou PIV v stope za modelom auta [20]

3.4 Aeroakustické merania

Hluk z motorových vozidiel v podstate zahŕňa hluk pohonnej jednotky, hluk pneumatík a aerodynamický hluk. Pri rýchlostiach do 50 km/h je to hluk pohonnej jednotky čo dominuje, ale pri zvyšujúcej sa rýchlosti je to zvuk turbulentných vírov, ktorý získava na sile [25].

Zatiaľ čo zvýšené úsilie na výskum v oblasti hluku pohonnej jednotky a pneumatík bolo v 60. a 70. rokoch, intenzívny výskum a vývoj v oblasti aeroakustiky sa začal až začiatkom 90. rokov. Zistilo sa pri skúškach, že dôležitosť zvuku od turbulentných vírov osobného automobilu je oveľa väčšia ako všetky ostatné zdroje hluku už pri 130 km/h [25].

Aerodynamický hluk je v podstate spôsobený faktormi ako nestály prúd, kolísanie nárazového tlaku na tvrdých povrchoch a turbulentné šmykové napätia [26]. Všetky tieto mechanizmy sú relevantné aj v aeroakustike automobilov, ale každý z nich má inú dôležitosť. Môžeme použiť idealizované, približné modely na charakterizáciu každého z nich. Nestály prúd môže byť reprezentovaný monopólnym zdrojom, kde príkladom tohto typu zdroja hluku môžu byť chyby v tesniacich systémoch alebo hluk z výfuku. Kolísanie nárazového tlaku môže byť reprezentované dipólnym zdrojom. Tento typ hluku možno nájsť vtedy, keď voľný alebo oddelený prúd vzduchu narazí na povrch vozidla. Turbulentné šmykové napätie vytvára 4-pólove zdroje [25]. Schémy týchto zdrojov a závislosti intenzity zvuku na rýchlosti prúdenia u každého zdroja možno vidieť na (Obrázok 25).



Obrázok 25 Schéma typov zdrojov v aeroakustike [26]

Porovnanie intenzít zvuku ukazuje, že pri nízkych rýchlostiach vzduchu je najvýznamnejší monopólový zdroj, po ktorom nasleduje dipólový a za ním 4-pólový, ktorý sa zvyčajne ignoruje pri riešení aerodynamického hluku automobilov. Je vidieť, že monopólový zdroj závisí na štvrtej mocnine rýchlosti prúdenia a dipólový na šiestej mocnine. Vzhľadom k tomu, že mechanizmy vytvárania hluku môžu byť vo všeobecnosti reprezentované kombináciou monopólových a dipólových zdrojov, sa v experimentoch väčšinou zistí, že intenzita zvuku sa mení niekde medzi štvrtou a šiestou mocninou [25].

3.4.1 Meranie vnútorného zvuku

Na meranie zvuku v interiéri sa používajú napríklad mikrofóny, intenzitné sondy alebo umelé hlavy [25].

Ako aj v strojovej akustike, aj v aeroakustike sa používajú samostatné mikrofóny. Použitie týchto mikrofónov je veľkou výhodou, ak sa majú merania vykonávať tam, kde sú sondy nepraktické kvôli ich väčšej veľkosti alebo keď sa má merať na viacerých pozíciách [26].

Merania s umelými hlavami (Obrázok 26) sú vlastne iba špeciálne merania mikrofónmi. Približne od roku 1980 sa čoraz viac začali používať na meranie zvuku vo vozidlách a na hodnotenie aerodynamického komfortu vo vnútri vozidla [26].



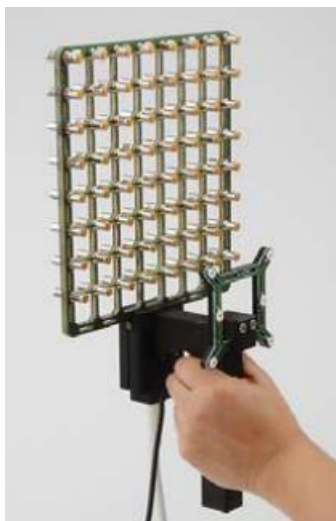
Obrázok 26 Umelá hlava na mieste vodiča [26]

Ďalšou možnosťou ako merať zvuk, je pomocou tzv. Sférického poľa (Obrázok 27). Táto metóda môže poskytnúť kompletnú zvukovú mapu v akomkoľvek smere a v akomkoľvek prostredí na základe jedného jednoduchého merania. V závislosti od výrobcu a typu sférického poľa, jedna alebo viac kamier slúžia na mapovanie okolia. Obrázky z týchto kamier sa používajú ako základ pre výslednú akustickú mapu. Táto metóda sa bežne používa na generovanie zvukových máp v prostrediach ako sú kabíny vozidiel alebo aj lietadiel [26].



Obrázok 27 2 príklady polí so sférickými lúčmi [26]

Ďalšia metóda sa nazýva akustická holografia v blízkom poli (NAH). Táto metóda poskytuje matematický model popisujúci zvukové pole na základe niekoľkých meraní akustického tlaku, ktoré sa zvyčajne robí v rovine pomerne blízko od zdroja. Z tohto merania parametre zvukového poľa môžu byť odvodené v rovinách rovnobežných s rovinou merania. Merania sa obvykle vykonávajú pomocou ručného zariadenia (Obrázok 28) [26].



Obrázok 28 Ručné zariadenie na získavanie dát pomocou NAH [26]

Ďalšia možnosť je použitie tzv. PU sond. Tieto sondy pozostávajú z mikrofónu a anemometra na meranie rýchlosti častíc. Merajú intenzitu zvuku priamo bez nejakých prepočtov z dvoch mikrofónov ako klasické sondy intenzity zvuku. Tieto sondy sú špeciálne vhodné na merania v kabíne automobilov na lokalizáciu únikov alebo iných bodov prenikania hluku počas experimentov v aerodynamickom tuneli [26].

3.4.2 Meranie vonkajšieho zvuku

Jedna z metód ako merať zvuk exteriéru, je metóda pomocou mikrofónových polí. Táto metóda sa väčšinou používa v aerodynamických tuneloch s otvorenou testovacou sekciou a toto mikrofónové pole je potom nastavené mimo prúd vzduchu alebo existujú aj polia s mikrofónmi zabudovanými do stien testovacej oblasti [26].

Ďalšou používanou metódou, je meranie pomocou akustických zrkadiel, ktoré sa ako mikrofónové polia používajú iba v otvorenej testovacej oblasti. V uzavretej testovacej oblasti nemôžu byť použité, pretože táto technológia nie je vhodná na použitie v prúde vzduchu [26].

Ďalej môžeme merať intenzitu pomocou špeciálnych sond. Meranie pomocou týchto sond si vyžaduje, aby bolo meranie vykonávané v blízkosti objektu a musí byť umiestnená v smere prúdu. Avšak nemôžu byť umiestnené v miestach, kde je väčší rozdiel tlakov, pretože by to viedlo k nesprávnemu meraniu [26].

Jedným z možných meraní pomocou špeciálnych sond je technika duálneho mikrofónu. Použitím tejto techniky je presné určenie zvuku len teoreticky možné, ak je prúdenie vzduchu jednorozmerné a s plochými zvukovými vlnami. Ale zdroje aerodynamického zvuku nevydávajú ploché zvukové vlny a ani prúdenie okolo vozidla nie je úplne jednorozmerné. Vďaka experimentom ale vieme, že pri bežnej rýchlosti sú výchyľky veľmi malé [26].

3.5 Meranie tlaku a rýchlosti

Ďalšie dôležité meranie vykonávané v aerodynamických tuneloch je meranie tlaku. Z rozloženia tlaku na telese môžeme určiť aj pôsobiace sily alebo aj lokálnu rýchlosť [27]. Meranie tlaku sa konvenčne vykonáva cez malé otvory (v priemere asi 0,5mm) , v ktorých sú rôzne senzory napojené na prevodníky, ktoré sa nachádzajú mimo modelu. Táto technika je dobre známa a existuje v dnešnej dobe veľká škála rôznych sensorov v závislosti na veľkosti meraného tlaku, času odozvy (pri nestabilných meraniach), veľkosti samotného senzora a nákladoch [20].

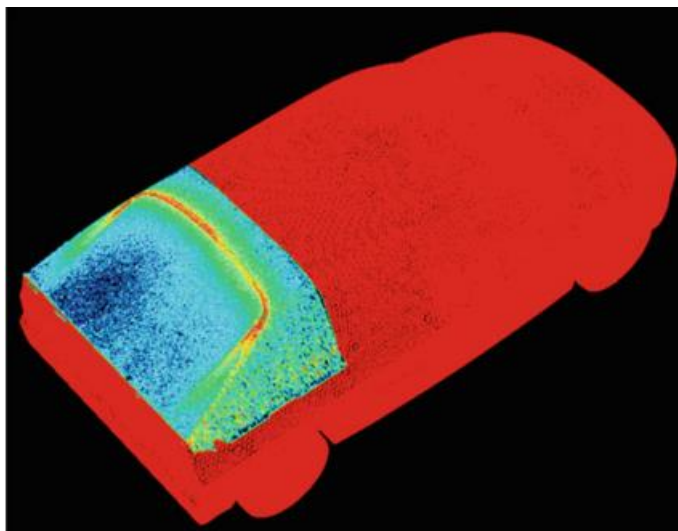
V prvých dňoch testovania v aerodynamickom tuneli sa tlak vo všeobecnosti meral pomocou viac trúbkových manometrov, ktoré zaznamenávali výšku vytlačenej kvapaliny. Merania sa vykonávali s ohľadom na referenčný tlak, ktorý bol atmosférický tlak alebo vákuum. Kvapalina mohla byť voda, alkohol alebo ortuť v závislosti na požiadavkách merania. Najznámejší manometer je asi U-trubica. Aj keď táto metóda je užitočná na monitorovanie priebehu experimentu, tak tieto manometre sa málokedy používajú a namiesto toho sa používajú prevodníky, ktoré prevedú tlak na snímanom modeli na elektrický signál. Existujú 3 kategórie tlakových snímačov a to relatívne snímače, ktoré merajú tlak vzhľadom na referenčný tlak, diferenčné snímače merajúce tlakový rozdiel a absolútne snímače merajúce tlak vzhľadom k vákuu [20] .

Existuje široká škála tlakových prevodníkov, ktoré pracujú na rôznych fyzikálnych princípoch. V tzv. pasívnych prevodníkoch pôsobí tlaková sila na membránu, ktorej deformácia je meraná. V aktívnych prevodníkoch je pôsobenie tlaku merané priamo. Sila vyplývajúca z tlaku na membránu vytvára rozdiel potenciálu piezoelektrickým javom tiež používaný u aerodynamických váh [20].

Začiatkom 80. rokov bola vyvinutá na určenie rozloženia tlaku na modeli pomocou menej rušivej techniky založenej na farbách citlivých na tlak (Obrázok 29) tzv. Pressure Sensitive Paints (PSP). Táto metóda je založená na vlastnostiach vyžarovania svetla určitých zlúčenín pri excitácií vhodným zdrojom. Svetlo vyžarované farbou už nemá takú vlnovú dĺžku ako excitačné svetlo. Množstvo vyžarovaného svetla závisí od množstva kyslíka, ktorý difundoval do farby a má tendenciu deaktivovať excitované molekuly. Keďže vnútorná koncentrácia kyslíka je lineárnou funkciou vonkajšieho tlaku toho istého plynu, tlak možno merať z niektorých luminiscenčných parametrov. Intenzita vyžarovaného svetla závisí od vlnovej dĺžky excitačného svetla a jeho intenzity, koncentrácie aktívnych molekúl, hrúbky potretej vrstvy, povrchovej teploty a tlaku. PSP povlak musí byť hladký, rovnomerný a dokonale príľnavý k povrchu. Ako jedna z nevýhod je, že tieto farby sú veľmi citlivé na teplotu [20] .

$$\frac{I_0}{I} = A + B \frac{p}{p_0} \quad (17)$$

Koeficienty A, B sú citlivosti povlaku, ktoré sú závislé na teplote a sú určené experimentálne v aerodynamickom tuneli na natretých vzorkách. V tejto rovnici index 0 reprezentuje stav, kde je tlak konštantný po celom povrchu tzv. bez prúdenia [20] .



Obrázok 29 PSP meranie rozloženia tlaku na zadnej časti modelu Peugeot 206 [20]

Podobná metóda ako PSP je potretie modelu tzv. tekutými kryštálmi citlivých na šmykové napätie. Táto technika sa používa na meranie šmykového napätia pôsobiaceho na povrch testovaneho modelu alebo zistenie oddeleného prúdenia. Ak pri osvetlení bielym svetlom, kolmým na natretý povrch a pozorovaní pod šikmým uhlom nad rovinou natretého povrchu bude pôsobiť šmykové napätie, tak nastane zmena farby. Táto zmena farby je charakterizovaná ako posun od farby bez šmyku, čo je farba červená alebo oranžová smerom k modrej časti viditeľného spektra [24]. Výhody tejto techniky sú jej vysoká citlivosť a schopnosť získať informácie o celom povrchu. Touto technikou vieme aj identifikovať prechodovú oblasť od laminárnej do turbulentnej medznej vrstvy, kde tento prechod je daný zmenou farby [20].

Dokonca aj v súčasnosti sú parametre prúdiaceho vzduchu merané pomocou pevných sond napr. pomocou Pitotových a Prandltových trubíc. Napriek tomu, že existujú viac sofistikovanejšie meracie techniky, tak ich použitie je výhodne pre ich cenu, presnosť, spoľahlivosť a jednoduchosť [20].

Tlak prúdiaceho vzduchu a následne z toho rýchlosť prúdiaceho vzduchu možno merať pomocou Pitotovej alebo Prandtlovej trubice, ktorá je v podstate trubica s otvorom smerujúcim proti prúdu vzduchu [20].

Prandltova trubica (Obrázok 30) meria celkový tlak P_t a statický tlak P_s . Statický tlak je taký, ktorý by ste pocítili pri pohybe spolu s prúdom vzduchu bez toho, aby ste ho narušili. Dynamický tlak súvisí s kinetickou energiou prúdiaceho vzduchu a celkový tlak je taký tlak, ktorý by sa dal namerať, keby sme danú tekutinu úplne zastavili [28].

$$P_s + \frac{1}{2}\rho v^2 = P_t \quad (18)$$

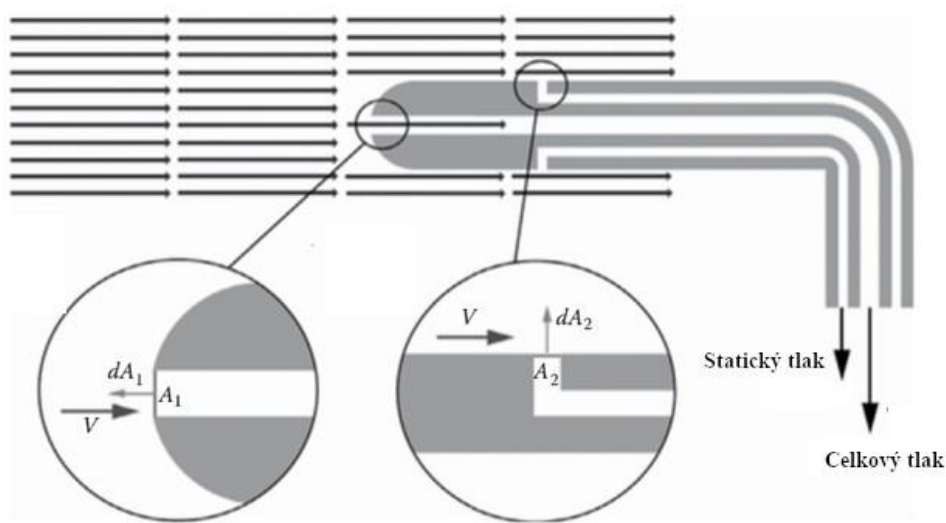
Po úprave rovnice dostaneme :

$$v = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad (19)$$

Ale ako meriame statický a celkový tlak ? Tlak prúdiaceho vzduchu sa meria v dvoch bodoch, a to v otvore rovnobežným s prúdiacim vzduchom na začiatku trubice, kde vzduch spomaľuje na nulovú rýchlosť, tam nameriame celkový tlak P_t a v otvore kolmom na smer prúdiaceho vzduchu, tam nameriame statický tlak P_s (Obrázok 30) [10].

Ďalším krokom je zistenie rozdielu medzi statickým a celkovým tlakom na zistenie dynamickeho tlaku. Je pár možností ako to zistiť napr. pripojením oboch trubíc k manometru alebo membráne. Rozdiel vo výške vody alebo v priehybe membrány sa môže použiť na výpočet rozdielu tlakov a následne rýchlosti prúdiaceho vzduchu. Alebo možno pripojiť trubice k tlakovému prevodníku a použiť výstupný elektrický signál na výpočet údajov [28].

Pitotove trubice sú kľúčové pri meraní a kalibrácii rýchlosti vzduchu v aerodynamických tuneloch pred testovacou oblasťou [28].



Obrázok 30 Schéma Prandtlovej trubice [10]

3.6 Budúcnosť aerodynamických tunelov

V súčasnosti ciele experimentov v aerodynamických tuneloch sú rôznorodé. V oblasti automobilov je hlavný cieľ znížiť odporovú silu vzduchu, tým pádom aj znížiť spotrebu paliva, zvýšiť stabilitu vozidla pri reakcii na bočný vietor a zvýšiť vnútorný komfort znížením aerodynamického hluku. S nedávnym vývojom v oblasti numerických simulácií (CFD) nastáva ale otázka, či vôbec majú aerodynamické tunely svoju budúcnosť.

Až do 70. rokov experimentálne zisťovanie aerodynamických síl dominovalo a odvtedy naberá CFD na význame vďaka pokroku v technike. Testovanie v aerodynamických tuneloch sa výrazne zlepšilo aj vďaka CFD a v súčasnosti je nevyhnutné pri vývoji kombinovať aj aerodynamické tunely a CFD, pričom CFD nám slúžia na zisťovanie tých najslubnejších konfigurácií a aerodynamické tunely hlavne na overenie získaných dát a samotného modelu v programe [20].

Treba ale povedať, že CFD majú tiež svoje limity [20] :

- CFD simulácie vyžadujú veľa výpočtového výkonu a času na vyriešenie
- Sú tiež náchylné na problémy s konvergenciou a potrebujú skutočne dobrú sieť
- Turbulencie sa dajú modelovať len s vysokým stupňom aproximácie
- Nepresnosť numerického riešenia

Ako už bolo spomenuté skôr, aerodynamický tunel je drahý na výstavbu a aj čas strávený v ňom. Preto nie všetky automobily majú svoj samostatný aerodynamický tunel, ale prenajímajú si aerodynamický tunel od iných automobiliek a iba dostať sa do aerodynamického tunela na testovanie je zložité. Škoda napr. testuje v aerodynamickom tuneli v Stuttgarte a väčšinu času vývoja prebieha pomocou CFD a meranie v aerodynamickom tuneli robia až na konci celého vývoja na potvrdenie výsledkov získaných z počítačových simulácií.

4 Prehľad aerodynamických tunelov v Európe

4.1 Aerodynamický tunel FKFS v Stuttgarte

FKFS prevádzkuje rôzne aerodynamické tunely pre priemyselny rozvoj a základny výskum. Aerodynamické tunely v FKFS umožňujú aerodynamické, aeroakustické testovanie, ale aj testovanie tepelného manažmentu [29].

4.1.1 Aeroakustický tunel

Aeroakustický tunel v FKFS na testovanie modelov v reálnej veľkosti bol naposledy modernizovaný v roku 2014 a je jedným z najmodernejších v Európe na aerodynamické testovanie osobných automobilov, dodávok a závodných automobilov. Okrem akustických meraní sú k dispozícii aj rozsiahlejšie možnosti na testovanie síl, tlakov, rýchlosti a vizualizácie prúdenia vzduchu [29]. Technické parametre a veľkosti niektorých častí možno vidieť v (Tabuľka 1).

Tento aeroakustický tunel má otvorenú testovaciu oblasť. Aby boli podmienky prúdenia reprezentované čo najrealistickejšie, testy sa vykonávajú s rotujúcimi kolesami a pohyblivým pásom. Toto sa vykonáva pomocou 5-pásového systému (5-belt system), ktorý sa skladá z pohyblivého stredového pásu a pohonných jednotiek štyroch kolies s rôznymi úpravami medzných vrstiev [29]. Veľkosť medznej vrstvy v závislosti na úpravách možno vidieť v (Tabuľka 2).

Tabuľka 1 Technické parametre aeroakustického tunela [29]

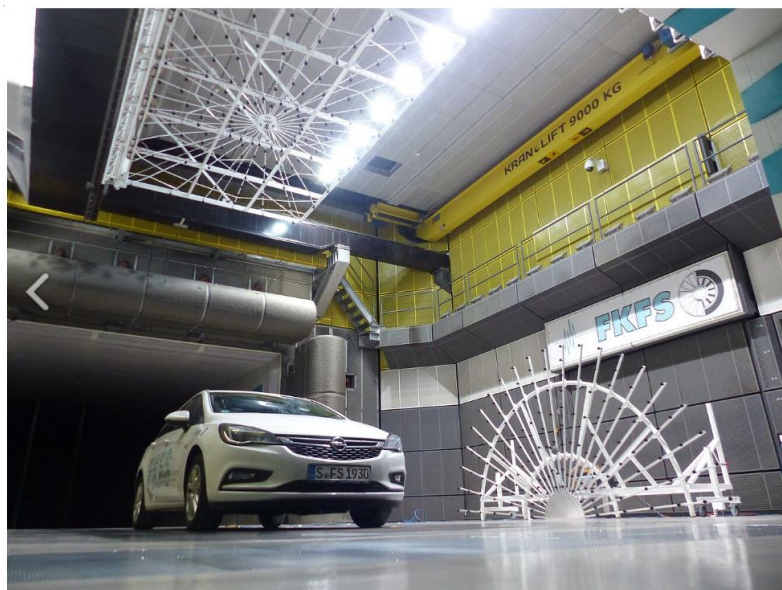
Rozmery trysky	5,8 m x 3,87 m
Výstupný prierez trysky	22,45 m ²
Pomer kontrakcie	4,41
Dĺžka testovacej sekcie	9,95 m
Priemer axiálneho ventilátora	7,1 m
Maximálna možná rýchlosť vzduchu	260 km/h

Tabuľka 2 Porovnanie veľkosti medznej vrstvy [29]

Veľkosť medznej vrstvy	
Bez žiadnej úpravy medznej vrstvy	15,5 mm
S odsávaním medznej vrstvy	7 mm

Aplikácie tohto aeroakustického tunela potom sú [29] :

- Meranie síl a povrchových tlakov prostredníctvom systému pohyblivého pásu
- Aeroakustické merania na povrchu auta a v interiéri auta
- Meranie vibrácií povrchu pomocou laserových vibrometrov
- Meranie objemového prietoku chladiaceho vzduchu
- Lokalizácia zdrojov hluku pomocou mikrofónových polí (Obrázok 31) a akustických zrkadiel



Obrázok 31 Aeroakustické vyšetřovanie pomocou mikrofónových polí [29]

4.1.2 Modelový aerodynamický tunel

Tento aerodynamický tunel slúži na testovanie automobilov, ktoré nie sú v reálnych rozmeroch, ale sú zmenšené v pomere 1:4 alebo 1:5. Má 3/4 otvorenú testovaciu sekciu a ako v predchádzajúcom tuneli, aj tu na najrealistickejšie reprezentovanie prúdenia sa testy vykonávajú s rotujúcimi kolesami a pohyblivým pásom [29] .

Na inštaláciu modelov je k dispozícii plne automatický modelový manipulátor. Meranie vlastností prúdiaceho vzduchu pomocou PIV alebo viacotvorových sond je možné vykonávať pomocou posuvného zariadenia. Teplota prúdiaceho vzduchu je regulovaná na 24 °C pomocou tepelného výmenníka [29] .

Tabuľka 3 Parametre modelového aerodynamického tunela [29]

Rozmery trysky	1,575 m x 1,05
Výstupný prierez trysky	1,654 m ²
Pomer kontrakcie	4,95
Dĺžka testovacej oblasti	2,585 m
Priemer axiálneho ventilátora	2 m
Maximálna možná rýchlosť vzduchu	288 km/h

Aplikácie modelového aerodynamického tunela sú [29] :

- Merania aerodynamických síl na modeloch osobných automobilov v štvrtinovej alebo päťtinovej mierke
- Optimalizácia tvaru
- Meranie povrchového tlaku
- Vizualizácia prúdenia pomocou PIV

4.1.3 Tepelný aerodynamický tunel

Tento typ tunela sa používa na testovanie tepelného manažmentu a znečistenia, ale aj na meranie výkonu a testov funkčnosti vozidla. V tepelnom aerodynamickom tuneli FKFS môže byť testovanie nezávislé na období a počasí a ponúka množstvo možností pre mokré podmienky, vplyv postreku, meranie prietoku vzduchu a vizualizácie prúdenia [29].

Testujú sa tu rôzne veci ako napr. [29]:

- Testy chladenia (tepelný manažment) – tieto testy sa využívajú na dizajn a testovanie chladičov v automobile, hnacieho ústrojenstva a komponentov, tepelného správania brzd.
- Testovanie kontaminácie – podrobné testovanie na cudzie a samo znečistenie vozidiel, znečistenie od rotujúcich kolies, vyšetrenie slabnutia brzd v mokrých podmienkach. Na zlepšenie vizualizácie sa pridáva fluorescenčné farbivo.
- Testovanie jazdného výkonu – Stacionárne a cyklické merania jazdného výkonu, testy životnosti pohonnej jednotky, tepelné správanie komponentov a prevádzkových kvapalín.
- Testy funkčnosti komponentov vozidla – brzdný výkon, testy stieračov, testovanie snímačov.

4.2 Aerodynamický tunel Pininfarina

Aerodynamický tunel Pininfarina bol jedným z prvých aerodynamických tunelov v Európe a jeho výstavba sa skončila v roku 1972 a uvedený do prevádzky bol v roku 1973. Jeho výkon v porovnaní s modernými štandardmi bol veľmi chudobný. V tej dobe bolo bežné, že testy boli vykonávané s nehybnou podlahou a nerotujúcimi kolesami. V priebehu nasledujúcich rokov sa aerodynamický tunel vďaka investíciám z roka na rok zlepšoval [4]. V dnešnej dobe tento aerodynamický tunel patrí k jedným z najlepších nástrojov ako dosiahnuť vysokého štandardu vo výkone vozidiel, spotrebe energie a celkovom pohodlí prostredníctvom aerodynamického a aeroakustického testovania. Tento aerodynamický tunel sa využíva na osobné automobily v reálnej veľkosti modelov [30].

Na simuláciu reálnych podmienok tento aerodynamický tunel využíva tzv. Ground Effect Simulation System (GESS). Tento systém umožňuje, aby sa kolesá auta a pohyblivý pás pohybovali rovnakou rýchlosťou. Tento systém bol vyvinutý, aby testovacie podmienky čo najviac reprezentovali reálnu vozovku a aby bolo možné analyzovať prúdenie pod vozidlom, ktoré by bolo v prípade stacionárnych kolies veľmi odlišné (Obrázok 32) [30].



Obrázok 32 Ground Effect Simulation System [4]

Väčšinu času sa vozidlá pohybujú po ceste v prítomnosti turbulentného prúdenia. Toto turbulentné prúdenie je spôsobené okolitým vetrom, často v prítomnosti prekážok na ceste alebo ostatnými vozidlami, ktoré sa pohybujú na ceste alebo kombináciou týchto dôvodov [4]. Z tohto dôvodu majú v tomto aerodynamickom tuneli systém generovania turbulentného (TGS) prúdenia (Obrázok 33), ktorý umožňuje simuláciu rôznych intenzít turbulentného prúdenia. Taktiež je možné simulovať jazdné podmienky v stope iného vozidla alebo predbiehanie. Pracuje to na princípe, kde pomocou počítačového systému je možné riadiť pohyb piatich párov krídiel umiestnených v tryske, aby sa dosiahli v testovacej miestnosti rôzne podmienky turbulencií [30].



Obrázok 33 TGS [4]

Aeroakustické testy sú nevyhnutné pre zaručenie maximálneho komfortu jazdy. Tento aerodynamický tunel je vybavený tromi externými mikrofónovými poľami (stropný, bočný, predný) a s mnohými kamerami schopnými merať vnútorné aj vonkajšie zvuky, čo pomáha pri identifikácii zdroja zvuku a následne spraviť opatrenia. Na vyhodnotenie vnútorného akustického komfortu je možné použiť aj akustické figuríny [30].

Aplikácie tohto aerodynamického tunela potom sú [30]:

- Meranie aerodynamických síl a momentov
- Meranie tlakov a rýchlostí pomocou tlakových sond (napr. 14 otvorová sonda)
- Vizualizácia prúdenia (PIV)
- Aeroakustické merania
- Meranie deformácií a vibrácií

Zhodnotenie

Prínos aerodynamických tunelov pri vývoji aerodynamiky osobných automobilov je určite nepochybniteľný. Treba však spomenúť aj ich nedostatky a negatíva.

Podľa môjho názoru jedna z ich najväčších nevýhod súvisí s ich vysokou cenou pri výstavbe a prevádzke. Aj z toho dôvodu nie každá automobilka má vlastný aerodynamický tunel, ale si iba napr. prenajíma priestory od druhých automobiliek. Logicky vysoká cena súvisí aj s rozmermi samotných aerodynamických tunelov. Čiže ak by sme zmenšili ich rozmery, tak by sa nám znížili aj náklady. Myslím si, že aj z tohto dôvodu existujú testovania zmenšených modelov voči realite. Z viacerých zdrojov som zistil, že testovanie osobných automobilov v súčasnosti prebieha hlavne pomocou modelov reálnych rozmerov. Ale prečo sa táto povedzme technika nevyužíva oveľa viac? Ako teória to znie skvele. Vyrobíme čo najmenší možný model pri zachovaní detailov a na testovanie nepotrebujeme tak veľký aerodynamický tunel. No treba však povedať, že aby sme mohli výsledky medzi zmenšenými modelmi a modelmi v reálnej veľkosti porovnávať, tak je nutné zachovať podmienky modelovej podobnosti. Asi najdôležitejšie a zároveň najťažšie kritérium na dosiahnutie je dynamické kritérium vyjadrené pomocou Reynoldsoveho čísla. Tento parameter spája rozmery telesa a rýchlosť prúdiaceho vzduchu. Povedzme, že budeme testovať model 1:5 t.j. rozmery sú päťkrát zmenšené voči realite. Potom na zachovanie rovnakého Reynoldsoveho čísla musí byť zase rýchlosť prúdiaceho vzduchu päťkrát väčšia.

Ďalším problémom je presnosť meraní. Na dosiahnutie čo najvyššej presnosti pri meraní je nutné zabezpečiť dobrú kvalitu prúdiaceho vzduchu a simulovať testovacie podmienky tak, aby sa čo najviac priblížili realite. Dobrá kvalita prúdiaceho vzduchu sa dá dosiahnuť dobrým návrhom samotných sekcií aerodynamických tunelov alebo pridaním komponentov v tryske, na čo najväčšiu redukciu turbulencie a zrovnomenenie prúdenia. Na simulovanie reálnych podmienok prezentujem v tejto práci nahradenie stacionárneho pásu pod automobilom pohyblivým pásom. Toto riešenie má za následok zmenšenie medznej vrstvy, ktorá môže ovplyvniť presnosť meraní. Prípadne môže byť ešte pred týmto rotujúcim pásom umiestnená odsávací medzera, ktorá túto medznú vrstvu zredukuje na minimum. Tieto priblíženia sa čo najviac reálnym podmienkam, tiež podľa mňa súvisia s ich vysokou cenou.

Po spomenutí, že aerodynamické tunely sú finančne náročné nastáva otázka. Prečo sa v súčasnosti pri veľkom pokroku v oblasti počítačových simulácií stále tieto aerodynamické tunely využívajú? Podľa mňa aj z dôvodu, že tieto počítačové simulácie tiež nie sú nejaký magický nástroj a nedokážu replikovať všetky podmienky, ktorým je osobný automobil pri jazde na ceste vystavený. Zároveň si myslím, že aerodynamické tunely majú hlavne bezpečnostnú alebo validačnú funkciu. Vlastne otestovaním sa chce overiť či výpočtový model, ktorý sa použil je naozaj správny. Zároveň ale treba vyzdvihnúť, že tieto počítačové simulácie nám môžu ušetriť čas strávený v aerodynamickom tuneli, tým pádom aj financie. A to tak, že sa testujú hlavne iba najslubnejšie konfigurácie, ktoré prejdú cez pomyselné výpočtové sito sa otestujú priamo v aerodynamickom tuneli. Uvedené počítačové simulácie sú síce náročné na výpočtovú silu, ale stále ekonomickejšie ako prevádzka aerodynamického tunela. Nemyslím si, že v blízkej dobe sa aerodynamické tunely úplne prestanú využívať, ale bude sa pokračovať v testovaniach ako som teraz načrtnol, tieto dve veci budú úzko prepojené.

Záver

Táto bakalárska práca sa zaoberá použitím aerodynamických tunelov v oblasti automobilového priemyslu. Ich význam spočíva v určovaní aerodynamických síl ako sú odporová alebo vztlaková sila. Hlavne odporová sila je sledovaná pri návrhu automobilu, keďže ma priamy dopad aj na spotrebu paliva automobilu. V aerodynamických tuneloch je ale možno merať oveľa viac parametrov ako sú tieto aerodynamické sily. Je možné tu uskutočňovať vizualizáciu prúdenia a vidieť ako sa prúdiaci vzduch správa pri obtekaní okolo testovaného modelu. Ďalej je tu možné uskutočňovať rôzne tlakové merania a zistiť rozloženie tlaku na danom testovanom modeli alebo pre zlepšenie jazdného komfortu osobných automobilov sú v súčasnosti populárne aeroakustické merania.

Cieľom tejto práce bolo priblížiť ako tieto aerodynamické tunely vlastne fungujú a aké merania sa tu uskutočňujú pri návrhu osobných automobilov. Okrajovo je spomenutá problematika ich budúcnosti, kvôli veľkému pokroku v oblasti výpočtového modelovania.

Úvod práce je venovaný vývoju aerodynamických tunelov a popisu sekcií, z ktorých sa skladajú. Rozpracované sú existujúce typy aerodynamických tunelov, ich hlavné sekcie a funkcie. Spomenuté sú aj problémy, ktoré v nich môžu nastať, ich nedostatky a ako uvedené problémy čo najviac minimalizovať, aby sme dosiahli v aerodynamickom tuneli požadovanú kvalitu prúdiaceho vzduchu na čo najpresnejšie merania. Najväčšia pozornosť je venovaná meraniam vykonávaných v aerodynamických tuneloch. V tejto časti sú rozpracované, aké druhy meraní sú najčastejšie vykonávané na osobných automobiloch. Dôraz je kladený na zhodnotenie ich výhod, ale aj nevýhod a na čo konkrétne sa využívajú pri testovaní. Záver je venovaný stručnému prehľadu aerodynamických tunelov nachádzajúcich sa v Európe. Pre lepšiu predstavu a porovnanie medzi sebou sú tu spomenuté ich základné technické parametre a na čo sa v praxi používajú.

Aerodynamický tunel je ale tiež iba prostriedok ako simulovať reálne podmienky a má svoje limity. Z toho dôvodu tu nastávajú pri testovaní komplikácie, ktoré by sa pri jazde na reálnej vozovke neobjavili a je potrebné ich riešiť. V realite sa automobil pohybuje a vzduch viac-menej stojí, v aerodynamickom tuneli je to presne naopak, vzduch sa hýbe a model stojí. Na čo najdokonalejšiu reprezentáciu reálnych podmienok je preto nutné simulovať aj vozovku.

Výstavba a prevádzka aerodynamického tunela je veľmi drahá záležitosť, preto nie každý výrobca automobilov má svoj aerodynamický tunel, ale veľakrát si iba prenajíma jeho priestory. Často je problém sa do aerodynamického tunela vôbec dostať kvôli jeho vyťaženosti a tak veľa automobiliek vykonáva väčšinu svojho vývoja pomocou počítačových simulácií a aerodynamický tunel využíva na finálne overenie výsledkov. Je toto budúcnosť aerodynamických tunelov alebo dospejeme do bodu, kde počítačové simulácie budú na takej dokonalej úrovni, že sa úplne prestanú používať ?

Zoznam použitých zdrojov

- [1] HUCHO, W a G SOVRAN. Aerodynamics of Road Vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics* [online]. 1993, **25**(1), 485-537 [cit. 2023-01-26]. ISSN 0066-4189. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.fl.25.010193.002413
- [2] *List-of-wind-tunnel-testing-facilities* [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://dewesoft.com/daq/list-of-wind-tunnel-testing-facilities>
- [3] CHANETZ, Bruno. A century of wind tunnels since Eiffel. *Comptes Rendus Mécanique* [online]. 2017, **345**(8), 581-594 [cit. 2023-01-25]. ISSN 16310721. Dostupné z: doi:10.1016/j.crme.2017.05.012
- [4] COGOTTI, A. Evolution of performance of an automotive wind tunnel. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008, **96**(6-7), 667-700. ISSN 01676105. Dostupné z: doi:10.1016/j.jweia.2007.06.007
- [5] OKAMOTO, Satoru, ed. *Wind Tunnels* [online]. InTech, 2011 [cit. 2023-01-25]. ISBN 978-953-307-295-1. Dostupné z: doi:10.5772/642
- [6] KAUSHIK, Mrinal. *Theoretical and Experimental Aerodynamics*. První vydání. Imprint: Springer, 2019. ISBN 978-981-13-1678-4.
- [7] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: design for speed*. Revised 2nd edition. [Cambridge]: Bentley Publishers.com, 2006. ISBN 0837601428.
- [8] GONZALEZ HERNANDEZ, Miguel, Ana MORENO LOPEZ, Artur A., Jose PERALES PERALES, Yuliang WU a Sun XIAOXIAO. Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel. In: AHMED, Noor, ed., Noor AHMED. *Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications* [online]. InTech, 2013 [cit. 2023-04-29]. ISBN 978-953-51-1047-7. Dostupné z: doi:10.5772/54169
- [9] *01 Wind Tunnels - Prof. G. Dimitriadis*. Dostupné také z: <https://studylib.net/doc/8871661/01-wind-tunnels---prof.-g.-dimitriadis>
- [10] *Experimental aerodynamics*. První vydání. Editor Stefano DISCETTI, editor Andrea IANIRO. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 978-1498704014.
- [11] *The wind tunnel test section explained* [online]. [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://airshaper.com/videos/wind-tunnel-test-section/L1AYo9Mk1EI>
- [12] KRAMER, C., H.J. GERHARDT a B. REGENSCHUIT. Wind tunnels for industrial aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [online]. 1984, 16(2-3), 225-264 [cit. 2023-01-25]. ISSN 01676105. Dostupné z: doi:10.1016/0167-6105(84)90009-6
- [13] ZANOUN, E.-S. *Flow characteristics in low-speed wind tunnel contractions: Simulation and testing*. Alexandria Engineering Journal [online]. 2018, 57(4), 2265-2277 [cit. 2023-04-29]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2017.08.024
- [14] OWEN, F. a Andrew OWEN. Measurement and assessment of wind tunnel flow quality. *Progress in Aerospace Sciences* [online]. 2008, 44(5), 315-348 [cit. 2023-04-29]. ISSN 03760421. Dostupné z: doi:10.1016/j.paerosci.2008.04.002
- [15] *Velocity of the Turbulent Flow* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.tutorhelpdesk.com/homeworkhelp/Fluid-Mechanics-/Velocity-of-the-Turbulent-Flow-Assignment-Help.html>
- [16] WEN JEI YANG. *Handbook Of Flow Visualization*. Druhé vydání. Routledge, 2018. ISBN 9781560324171.

- [17] *DYNAMIC SIMILARITY* [online]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/dynamic-similarity/>
- [18] *YAKKUNDI*, Vivek a Shankar MANTHA. *Aerodynamics of Cars: An Experimental Investigation - A Synergy of Wind Tunnel & CFD*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. ISBN 978-3847324447.
- [19] *Aerodynamic Wind Tunnel in Passenger Car Application* [online]. [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1083457/FULLTEXT01.pdf>
- [20] *CHANETZ, Bruno*, Jean DÉLERY, Patrick GILLIÉRON, Patrick GNEMMI, Erwin GOWREE a Philippe PERRIER. *Experimental Aerodynamics: an introductory guide*. První vydání. Switzerland: Springer, 2020. Springer tracts in mechanical engineering. ISBN 978-3-030-35561-6.
- [21] *Visualization Techniques in a Wind Tunnel* [online]. [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://calspan.com/company/news/visualization-techniques-wind-tunnel>
- [22] *Smoke and tuft flow visualization* [online]. [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvsmoke.html>
- [23] *Flow Visualization Techniques in Experiment and CFD* [online]. [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://cfdflowengineering.com/flow-visualization-techniques-in-experiment-and-cfd/>
- [24] *SMITS, Alexander* a T. LIM. *Flow visualization: techniques and examples*. 2nd ed. Hackensack, NJ: Distributed by World Scientific Press, 2012. ISBN 978-1848167919.
- [25] *Aeroacoustic Testing in Wind Tunnels* [online]. [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/306030293_Aeroacoustic_Testing_in_Wind_Tunnels
- [26] *Application of Wind Tunnels for Automotive Aeroacoustic Development* [online]. [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/STO-EN-AVT-287/EN-AVT-287-11.pdf>
- [27] *Pressure, velocity Measurement* [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://courseware.cutm.ac.in/wp-content/uploads/2020/06/Pressure-velocity.pdf>
- [28] *Pitot Tubes - Measuring Flow Velocity* [online]. [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://airshaper.com/videos/pitot-tubes-measuring-flow-velocity/IAojySsbnhg>
- [29] *Wind Tunnels* [online]. [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: <https://www.fkfs.de/en/test-facilities/wind-tunnels>
- [30] *PININFARINA WIND TUNNEL* [online]. [cit. 2023-02-07]. Dostupné z: <https://pininfarina.it/en/wind-tunnel/>