

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

VYUŽITÍ REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ PRO VÝPOČTY AERODYNAMIKY AUTOMOBILU

THE UTILIZATION OF REVERSE ENGINEERING IN COMPUTATION OF VEHICLE AERODYNAMICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN ROZSÍVAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ing. PETR PORTEŠ, Ph.D.

BRNO 2008

Abstrakt

Jan Rozsival

Využití reverzního inženýrství pro výpočty aerodynamiky automobilu

DP, ÚADI, 2008, 75 str., 81 obr.

V diplomové práci byla změřena geometrie karoserie vozidla s využitím 3D skeneru ATOS. Naměřená data z 3D skeneru ATOS byla použita pro vytvoření CAD modelu karoserie a následně modelu celkového vozu v programu Pro/ENGINEER s ohledem na další využití modelu. Získané plochy vozidla byly využity pro výpočet rozložení aerodynamického statického tlaku v CFD softwaru Star-CCM+.

klíčová slova: 3D skener, ATOS, reverzní inženýrství, Pro/ENGINEER, CFD, Star-CCM+, aerodynamika

Abstract

Jan Rozsival

The utilization of reverse engineering in computation of vehicle aerodynamics

DT, ÚADI, 2008, 75 pg., 81 pic.

The vehicle body was measured by using ATOS 3D scanner. Measured data from the ATOS 3D scanner were applied to make a 3D model of vehicle body and to make a 3D model of whole vehicle by using computer program Pro/ENGINEER. The model of vehicle was made with a view for future use of CAD model. Surface of the vehicle model was used for computation of vehicle aerodynamics – aerodynamic static pressure distribution by using CFD software Star-CCM+.

keywords: 3D scanner, ATOS, reverse engineering, Pro/ENGINEER, CFD, Star-CCM+, aerodynamic

Bibliografická citace

ROZSÍVAL, J. *Využití reverzního inženýrství pro výpočty aerodynamiky automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana ing. Petra Porteše, Ph.D. a s použitím uvedené literatury a informačních zdrojů.

V Brně dne 19. května 2008

Jan Rozsival

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi svými radami usnadnili vypracování této diplomové práce. Za podporu a cenné rady a připomínky při zpracování této diplomové práce děkuji vedoucímu diplomové práce panu ing. Petru Portešovi, Ph.D.

OBSAH

Úvod	8
1. Reverzní inženýrství	9
1.1. Vybrané druhy reverzního inženýrství a jeho využití	9
2. 3D skenovací technologie.....	10
2.1. Rozdělení 3D skenerů.....	10
2.2. Základní principy vybraných 3D skenovacích technologií	11
2.2.1. Kontaktní skenery.....	11
2.2.2. Bezkontaktní aktivní skenery	12
2.2.3. Bezkontaktní pasivní skenery	17
3. 3D skener ATOS	19
3.1. Pracovní prostředí stanice 3D skeneru ATOS.....	20
3.2. Výstup dat ze systému ATOS.....	22
4. Vytipování vozu a volba strategie skenování	22
5. Skenování vozu 3D skenerem ATOS	23
5.1. Příprava jednotlivých dílů pro měření 3D skenerem ATOS Std 520	23
5.2. Skenování jednotlivých dílů karoserie systémem ATOS	26
6. Převod dat ze systému ATOS do CAD systému	30
6.1. Vytvoření řezů v systému ATOS.....	30
7. Vytvoření modelu závodního vozu v Pro/ENGINEER Wildfire	32
7.1. Pro/ENGINEER - Importování modelu	32
7.2. Pro/ENGINEER – tvorba modelů jednotlivých částí karoserie	33
7.3. Pro/ENGINEER – vytvoření sestavy karoserie ze skenovaných dílů	36
7.4. Pro/ENGINEER – vytvoření celkového modelu závodního vozu	38
8. Základní pojmy aerodynamiky	41
9. Aerodynamika vozidel.....	45
9.1. Aerodynamické síly působící na vozidlo.....	45
9.2. Aerodynamický odpor	45
9.2.1. Tvarový tlakový odpor	45
9.2.2. Odtržení proudu vzduchu	46
9.2.3. Vzduchový vak	46
9.2.4. Proudění vzduchu mezi vozovkou a karoserií.....	46
9.2.5. Indukovaný odpor v důsledku aerodynamického vztlaku	46
9.2.6. Interferenční účinky mezi základním tvarem a dalšími detaily karoserie	47

9.2.7. Odpor rotujících kol	47
9.3. Odporová síla, vztlaková síla a boční síla	47
10. Způsoby měření aerodynamiky	49
10.1. Silniční testy	50
10.2. Aerodynamické tunely.....	50
10.3. CFD metody	51
11. Star-CCM+	53
11.1. Importování modelu do Star-CCM+	54
11.2. Příprava modelu pro výpočet ve Star-CCM+	54
11.3. Nastavení fyzikálního modelu a podmínek modelu	56
11.4. Tvorba sítě ve Star-CCM+	57
11.4.1. Tvorba povrchové sítě	57
11.4.2. Tvorba objemové sítě	59
12. Vypočtená aerodynamika ve Star-CCM+	60
13. Odladěný postup digitalizace a přípravy geometrie pro CFD výpočty	69
Závěr.....	71
Seznam použitých zdrojů.....	71
Seznam použitých zkratk a symbolů	74

Úvod

Reverzní inženýrství se objevuje již řadu let v mnoha podobách, ať už jde o snahu zkoumat nejrůznější objekty a přístroje nebo o vytvoření počítačového modelu, například podle designérského návrhu v podobě hliněného modelu.

Metody reverzního inženýrství se s postupujícím časem a vyvíjející technikou zdokonalují a stávají přesnější a uživatelsky přívětivější. Způsobů převodu reálného objektu do digitální podoby existuje celá řada. Volba vhodné metody a provedení může ovlivnit přesnost a tím i reálnost modelu vzhledem k předloze.

Karoserie automobilu obsahuje řadu složitých křivek, které není možno věrně popsat a sestavit v modelářích, proto je pro získání počítačového modelu karoserie vozu vhodné využít metod reverzního inženýrství.

Vhodné je pro získání popisu takového povrchu, jakým je karoserie vozidla, použít bezkontaktního 3D skeneru, jako je například 3D skener ATOS, který umí s velkou přesností měřit velké povrchy. Tato naměřená data mohou být převedena do modeláře a s jeho pomocí pak vytvořen požadovaný model, který může být dále zkoumán.

Tvorbu modelu ovlivňuje i účel, za jakým vzniká. Jednou z možností využití modelu vozidla získaného pomocí reverzního inženýrství je výpočet aerodynamiky. Zdokonalováním tvaru karoserie, která by kladla menší odpor proudícímu vzduchu, můžeme dosáhnout snížení spotřeby pohonných hmot a při stejném výkonu dosahovat větších rychlostí a zrychlení. Tvar karoserie a tím pádem rozložení aerodynamického statického tlaku a z něj plynoucí působící síly na vozidlo zase ovlivňují stabilitu vozidla při vyšších rychlostech.

Využití reverzního inženýrství k digitalizaci vozidla a dále pro výpočet aerodynamiky vozidla jsou jednou z mála cest pro ověření stávajícího stavu vozidla i pro návrh změn.

1. Reverzní inženýrství

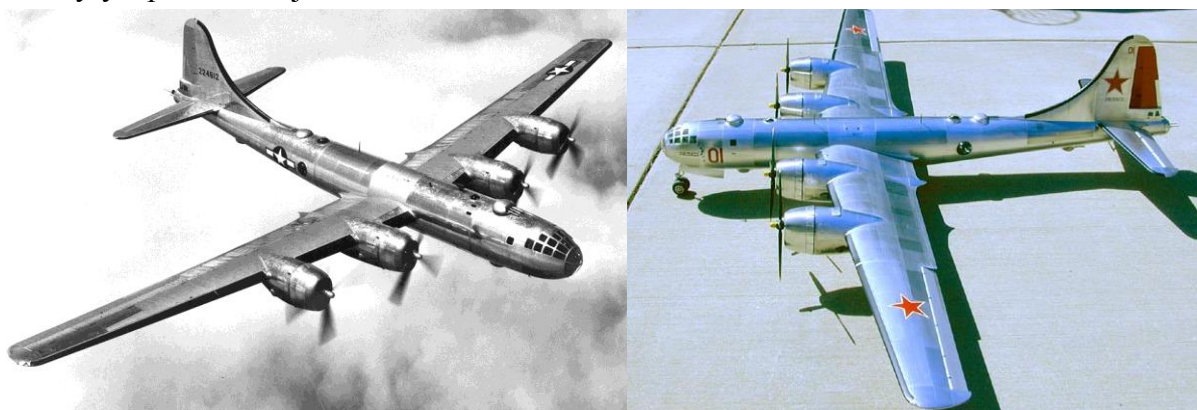
Reverzní inženýrství, z anglického *Reverse Engineering*, je označení pro proces, jehož cílem je odkrýt princip fungování zkoumaného předmětu (např. mechanického zařízení nebo počítačového programu), většinou za účelem sestrojení ekvivalentního předmětu, který ale není kopií originálu (zejména neporušuje autorské právo). Mezi obvyklé postupy reverzního inženýrství patří měření a analýza struktury předlohy (dekompozice) a zkoumání „vnitřních vztahů“ částí systému.

Výstupem reverzního inženýrství je obnovení návrhu (či jen dokumentace), které může být podkladem k vylepšení designu nebo např. k bezpečnostnímu auditu.

1.1. Vybrané druhy reverzního inženýrství a jeho využití

S nárůstem popularity CAD (počítačově podporované konstruování), stalo se reverzní inženýrství více realizovatelnou cestou k vytvoření 3D virtuálního objektu existující fyzické součásti pro využití v nejrůznějších 3D programech jako CAD, CAM, CAE atd. Proces reverzního inženýrství zahrnuje měření objektu a jeho rekonstrukci jako 3D modelu. Fyzické modely mohou být měřeny s využitím 3D skenovacích technologií jako CMM, laserové skenery, strukturované světelné digitalizéry nebo počítačové tomografie. Naměřená data jsou většinou reprezentovány jako mračna bodů postrádající další potřebné informace (např. jejich poloha vůči souřadnému systému) a proto bývají často zpracovány a převedeny do použitelného formátu jako trojúhelníková síť, NURBS plochy (zkratka anglického Non-uniform rational B-spline) nebo CAD model. Existují také aplikace (Imageware, Polyworks,...), které umožňují převod mračen bodů samotných do formátů využitelných v 3D programech.

Reverzní inženýrství má dlouhou a zřetelnou historii v armádě, kde se používalo například k okopírování národních technologií, zařízení nebo jejich částí, které byly nalezeny na bojištích nebo jako výsledek špiónážních aktivit. Toho bylo často využito za Druhé světové války. Jako příklad může být americký bombardér B-29 okopírovaný sovětskými inženýry a představen jako Tu-4.



Obr. 1.1. Vlevo americký bombardér B-29, vpravo sovětský bombardér Tu-4 [15]

Dnes je využití reverzního inženýrství rozmanité, zahrnuje i prověřování a obcházení bezpečnostních opatření, odstraňování ochrany proti kopírování, obcházení přístupových omezení často užívaných ve spotřební elektronice, úprava již obsažených systémů, vnitřní opravy dodatečného vybavení a povolování doplňujících vlastností na levnějším hardwaru (jako jsou chipsety grafických karet).

Reverzní inženýrství je využíváno také v marketingu. Například k přenesení existující fyzické geometrie do digitálního prostředí k vytvoření digitální 3D nahrávky vlastního

produktu nebo k vyhodnocení konkurenčního produktu. Bývá také použito k analyzování a příkladům, jak může výrobek pracovat, co výrobek umí, z jakých částí se skládá, odhadování nákladů, identifikaci potenciálních patentových porušení atd.

Další častou úlohou reverzního inženýrství je pomoc při vytvoření ztracené dokumentace. Nebo k pořízení dokumentace, která nikdy neexistovala. Také zastaralé integrované obvody nelze přenést do moderních technologií jinak než přenesením funkčnosti výrobku pomocí reverzního inženýrství. Podobně lze reverzní inženýrství aplikovat i na softwarové produkty, kdy dochází k analýze zdrojových kódů a jejich zpětný rozbor.

Reverzní inženýrství použité jak na softwarových tak na hardwarových systémech, které je využité pro kooperaci firem (např. pro podporu nezdokumentovaných souborů nebo zařízení), je považováno za legální, majitelé patentů často protestují proti těmto pokusům a snaží se o potlačení používání prostředků reverzního inženýrství na jejich produktech.

2. 3D skenovací technologie

Nejjednodušší cesta přenosu reality do digitální podoby je s využitím 3D skeneru. Využívají je kosmetické a lékařské firmy, například Procter&Gamble zjišťují s pomocí 3D skenerů účinnost krémů proti vráskám. V technické praxi se využívají pro měření deformací a při přesných montážích. S rozvojem internetu nacházejí své místo taky pro tvorbu vhodné vizualizace pro internetové prezentace.

Ve strojírenství mají 3D skenery velké využití v oblasti designu, kde designéři vytvoří hliněný model a s pomocí 3D skeneru převedou do CAD aplikací. Tohoto se nejvíce využívá v automobilovém průmyslu, kde se pracuje se složitými křivkami a jejich vytvoření je jiným způsobem velice obtížné.

2.1. Rozdělení 3D skenerů

3D skenery lze rozdělit z několika hledisek:

dle přístupu ke skenovanému objektu:

- kontaktní,
- bezkontaktní,

nebo také

- destruktivní,
- nedestruktivní.

1. dle užití technologie:

- mechanické,
- laserové,
- optické,
- rentgenové,
- ultrazvukové.

2. dle stupně dosahované přesnosti vhodné pro:

- rapid prototyping, rapid inspection (vyžadovaná vysoká přesnost),
- ostatní zařízení (vhodná pro vizualizaci např. do filmu, při hrách apod.).

2.2. Základní principy vybraných 3D skenovacích technologií

2.2.1. Kontaktní skenery

CMM (Coordinate-measuring machine)

Kontaktní zařízení pro rozměrové měření součástí. Je to NC stroj pohybující měřicí sondou připevněnou na rameni pro získání souřadnic bodů na povrchu objektu. Tyto stroje se využívají převážně pro měření rozměrů (kontrolu) dané součásti. Používají souřadný systém X-Y-Z pro určení přesné pozice na pracovním stole. Sonda (viz. Obr. 2.2.) kontroluje přesně určené body na měřené součásti a těmto bodům jsou přiřazeny příslušné souřadnice. Sondy bývají dotykové. Novější stroje používají sondy, které jsou vedeny po povrchu součásti a zaznamenávají souřadnice v jistém intervalu, tím je měření efektivnější, přesnější a rychlejší. CMM systémy se skládají ze čtyř hlavních částí:

1. souřadnicového měřicího stroje,
2. měřicí sondy,
3. výpočtového systému,
4. měřicího programu.

Jejich využití je zejména pro měření rozměrů, siluet, úhlů a sklonů, měření děr, hřídelů, digitalizace a zobrazování součástí. Tyto systémy mají širokou škálu provedení. Mohou být ovládány manuálně, CNC nebo počítačem. Provedeny mohou být jako stolní, volně stojící, ruční a přenosné.

Nevýhodou těchto systémů je, že je vyžadován přímý dotyk měřené součásti a měřicího zařízení, tím by mohli být některé měřené věci pozměněny nebo poškozeny, jak by se mohlo stát třeba u velmi cenných historických artefaktů. Další nevýhodou by mohla být delší doba měření, dána hlavně pomalým pohybem ramene v porovnání s časem promítnutí a sejmutí obrazu u optických systémů. Nejrychlejší CMM systémy umí pracovat s frekvencí několik stovek Hz oproti laserovým skenerům s frekvencí 10 kHz až 500 kHz.



Obr. 2.1. CMM systém CARBex firmy Mitutoyo pro měření karoserií automobilů. [14]



Obr. 2.2. Sonda CMM systému Legex [14]

2.2.2. Bezkontaktní aktivní skenery

Tyto skenery emitují nějaký druh záření nebo světla a detekuje se odraz buď na sondě, nebo měřeném prostředí. Možná emitovaná záření jsou světelná, ultrazvuková nebo rentgenová.

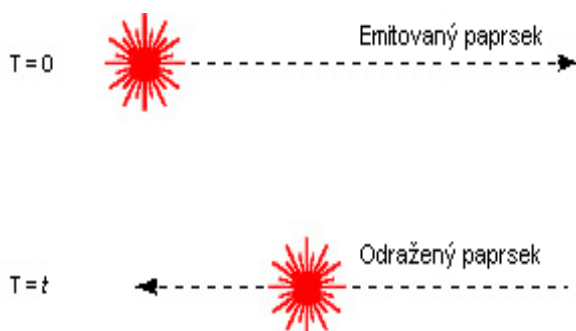
Time-of-flight

Aktivní laserový 3D skener, který užívá laserového paprsku pro měření objektu. Jádrem tohoto typu tvoří laser range finder, který hledá vzdálenost měřeného povrchu výpočtem času, za který se vrátí pulz paprsku. Laser je použit pro emitování světelného pulzu. Protože rychlost světla je známa, dá se spočítat vzdálenost, kterou paprsek urazil, porovnáním času vyslání pulzu a času, než se odražený paprsek dostane k detektoru (viz. Obr. 2.3.). Přesnost time-of-flight skenerů závisí na tom, s jakou přesností jsme schopni změřit čas. Přibližně 3,3 pikosekundy je čas potřebný pro uražení dráhy 1 mm.

Laser range finder měří vzdálenosti bodu ve směru detekce (pohledu), takže skener měří čistě jen pole v úhlu pohledu range finderu. Změnou úhlu pohledu range finderu můžeme skenovat další body. Změna úhlu může být realizována buď otáčením range finderu nebo využitím zrcadel. Systém zrcadel je využíván častěji, protože je mnohem lehčí a tak se může otáčet rychleji s větší přesností. Typické time-on-flight skenery mohou měřit od 10000 bodů do 100000 bodů každou sekundu.

Výhodou těchto skenerů je, že jsou schopné pracovat na velké vzdálenosti v řádech kilometrů. Proto jsou více využívány pro velké struktury, jako jsou budovy nebo zeměpisné úkazy.

Přesnost je hlavní nevýhodou těchto zařízení, kvůli vysoké rychlosti světla je měření času, za který urazí paprsek uvažovanou dráhu, relativně malá, v řádech milimetrů.



Obr. 2.3. Princip time-of-flight skeneru [17]

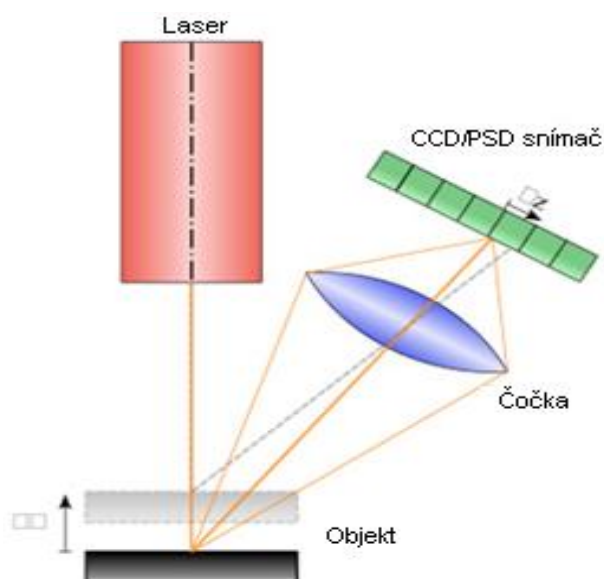


Obr. 2.4. Time of flight skener fy. Leica [17]

Triangulation (Trigonometrický)

Aktivní laserový skener, který užívá laserové světlo k měření okolí. Podobně jako time-of-flight skenery vysílají laserový paprsek na měřený objekt, ale využívají kamery pro sledování místa, kde je promítnut bod laserem. Princip je zřejmý z Obr. 2.5. V závislosti na tom, jak daleko laser dopadá na povrch, se bod vytvořený dopadajícím laserovým paprskem objevuje různě na kameře při různých úhlech pohledu kamery. Tato technika se nazývá trigonometrická, protože bod vysílaný laserem, vysílač a kamera tvoří trojúhelník. Délka jedné strany trojúhelníku, vzdálenost mezi kamerou a laserovým vysílačem je známá. Úhel, pod kterým je emitován laserový paprsek, je také znám. Úhel kamery může být určený směrem pohledu kamery na bod promítaný laserem. Tyto tři informace plně určují tvar a velikost trojúhelníku a dávají polohu bodu laseru ve třetím vrcholu trojúhelníku. Ve většině případů je místo bodu vysílán laserový pruh, který je veden přes součást, pro urychlení procesu měření.

Trigonometrické skenery mají omezený dosah několika metrů, ale jejich přesnost je relativně vysoká. Dosahují přesnosti desetin mikrometrů.

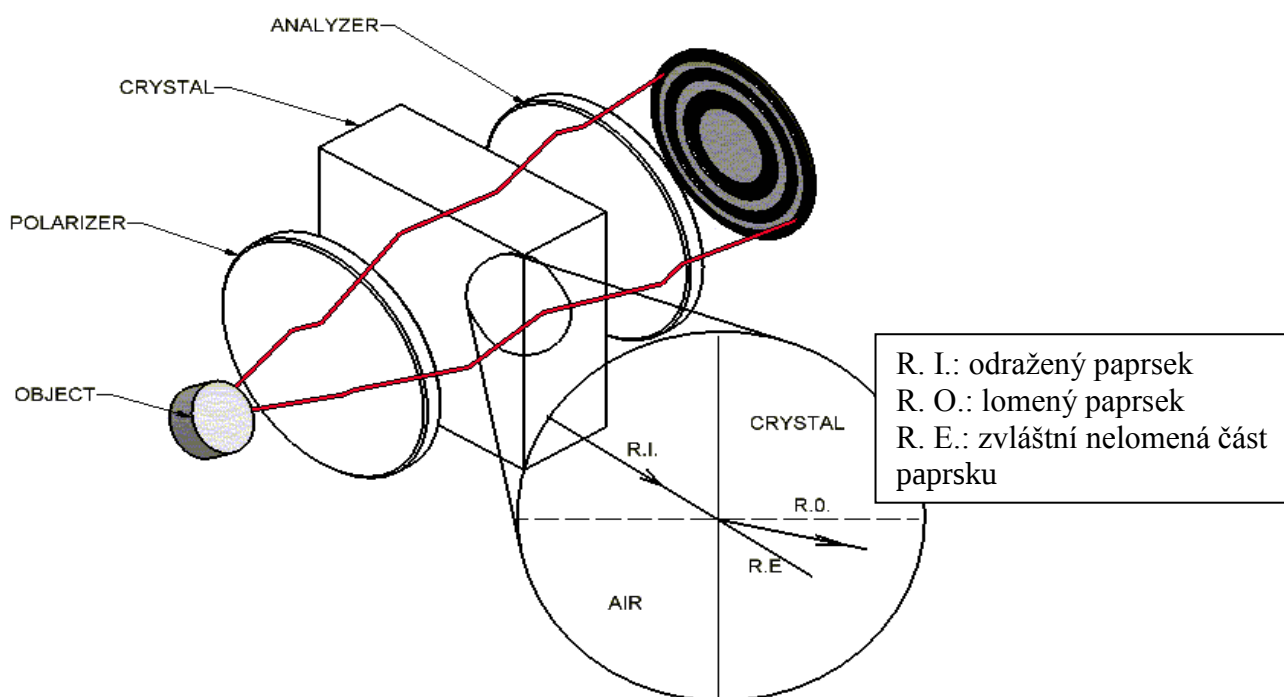


Obr. 2.5. Princip funkce trigonometrického skeneru [17]

Conoscopic Holography

Aktivní laserový skener využívající laserového paprsku promítaného na povrch měřené součásti, kde se paprsek okamžitě odrazí podél stejné trasy paprsku a spojuje se v conoscopickém krystalu a promítá se na CCD kameru. V krystalu se paprsek láme a tak může být následně frekvenčně analyzován, tím je zjištěna vzdálenost k měřenému objektu.

Hlavní výhodou Conoscopic Holography je, že paprsek jde po stejné cestě tam i zpět, to nám dává možnost měřit hloubku jemně vrtaných děr.



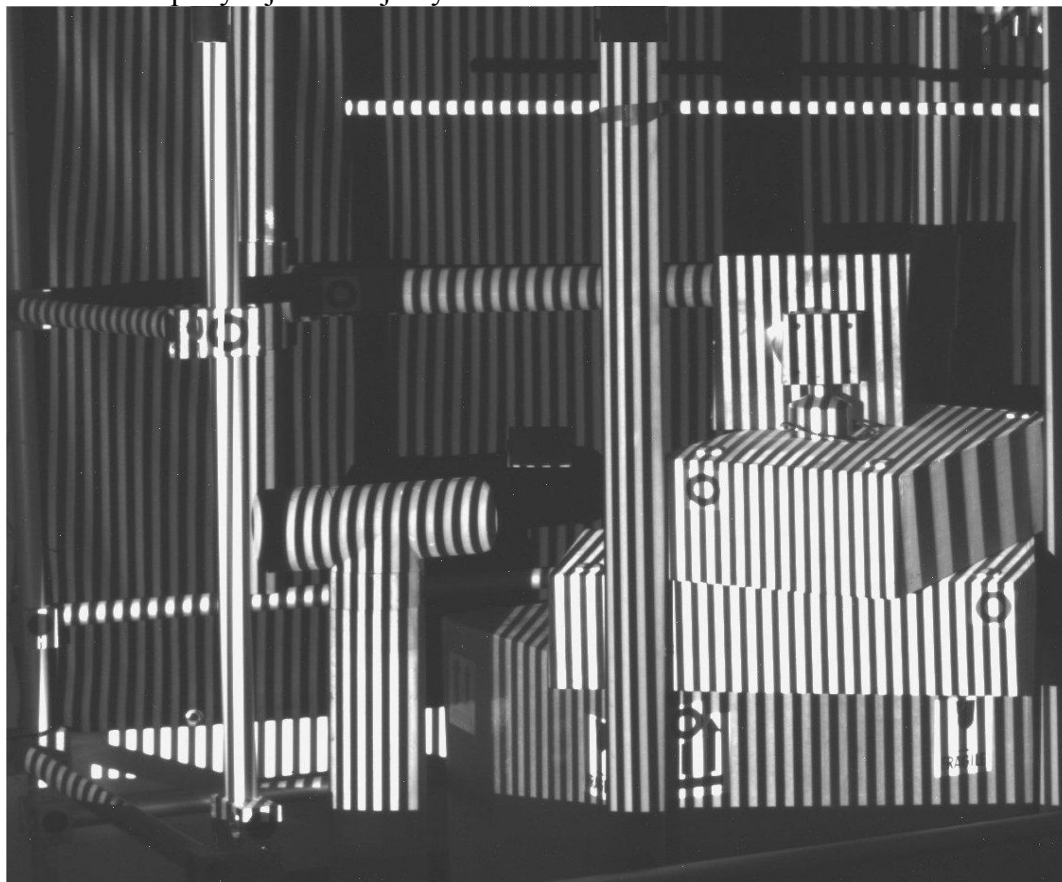
Obr. 2.6. Princip systému Conoscopic Holography [17]

Structured light

Aktivní 3D skener využívající promítaného vzoru světla na objekt sleduje, jak se promítaný vzor mění na měřeném objektu. Vzor světla může být jednorozměrný nebo dvourozměrný. Příkladem jednorozměrného vzoru může být linka. Linka je promítaná na objekt LCD projektorem nebo laserem. Kamera, která bývá v blízkosti projektoru, snímá tvar promítané linky a podobně jako trigonometrický skener počítá vzdálenost každého bodu na linii. V případě jednorozměrného vzoru je vždy jen jedna linka vedená přes zorné pole kamery pro měření vzdálenosti.

V případě dvourozměrného skeneru je promítán pruhovaný vzor, příklad takového vzoru je na Obr. 2.7. Kamera opět sleduje deformace vzoru a přes komplex algoritmů je počítána vzdálenost každého bodu vzoru. Důvod pro komplex algoritmů je nejednoznačnost. Zvážíme-li pole paralelních pruhů promítnutých přes objekt, v nejjednodušším případě můžeme předpokládat, že v promítaném poli pruhů může být první viditelný pruh ten první promítaný, druhý viditelný ten druhý promítaný atd. Pokud už objekt nebude takto triviální, bude obsahovat díry a nerovnoměrnosti ve výšce povrchu, tak bude promítaný paprsek přerušován a bude často ukryt před snímací kamerou a může vést ke změně pořadí promítaných pruhů. Konečným řešením tohoto problému je technologie nazvaná Multistripe Laser Triangulation (MLT).

Rychlost je jednoznačnou výhodou těchto skenerů. Místo skenování jednoho bodu za druhým je umožněno snímání více bodů najednou. Toto je řešením i nepřesností vznikajících při skenování možným pohybem skeneru nebo součásti. Některé systémy jsou schopné dokonce skenovat pohybující se objekty v reálném čase.



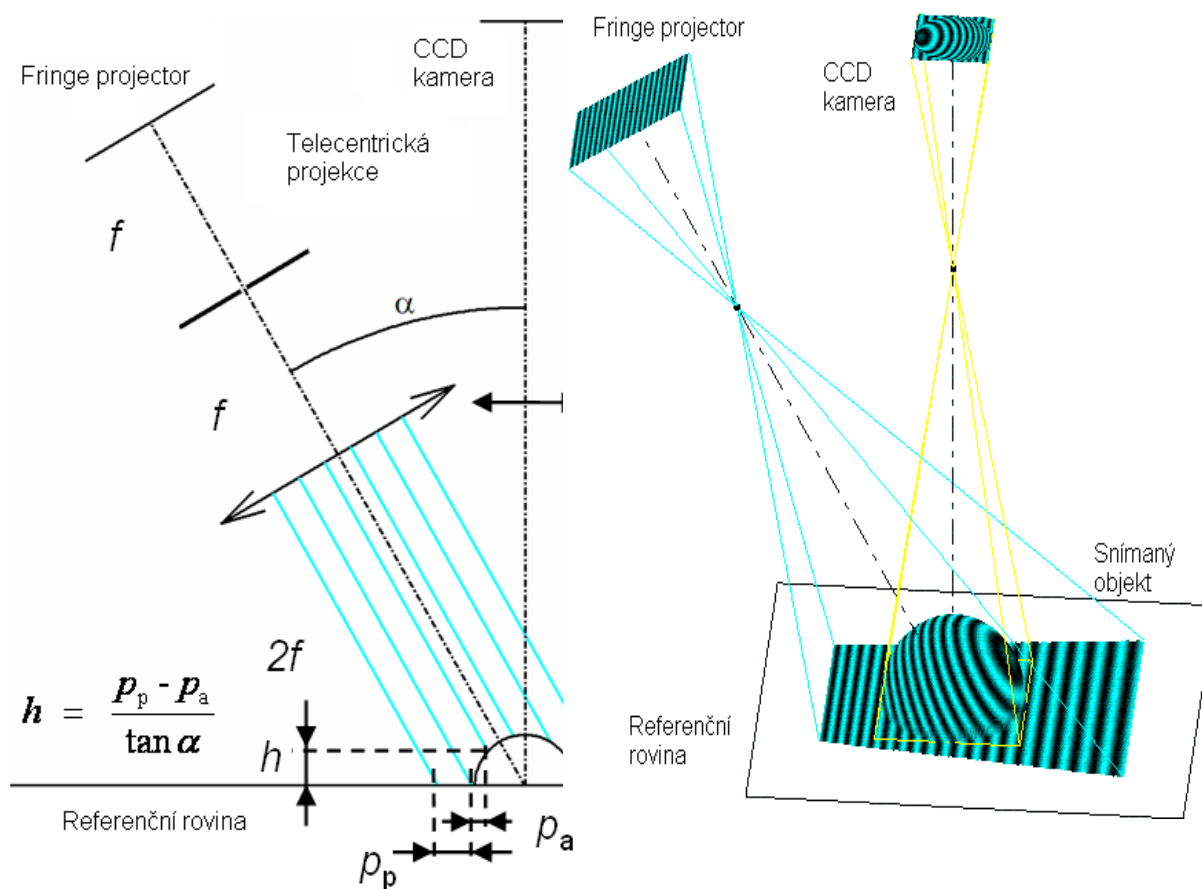
Obr. 2.7. Příklad dvourozměrného promítaného pruhovaného vzoru [19]

Modulated light

Aktivní 3D skenery s modulovaným světlem svítí na součást světlem s časově proměnnou intenzitou, obvykle je zdrojem sinusový cyklus. Kamera snímá odražené množství promítaného světla, tím udává vzdálenost, kterou světlo urazilo.

Fringe projection

Aktivní 3D skener, používající tuto metodu skenování, promítá na měřený objekt periodicky světelné paprsky vhodné intenzity. Objekt, který je takto strukturovaně osvětlen, je opticky rozčleněn a každý jeden snímek promítnutého vzoru zdeformovaný tvarem povrchu udává právě jeho výšku. Princip je zobrazen na Obr. 2.8.

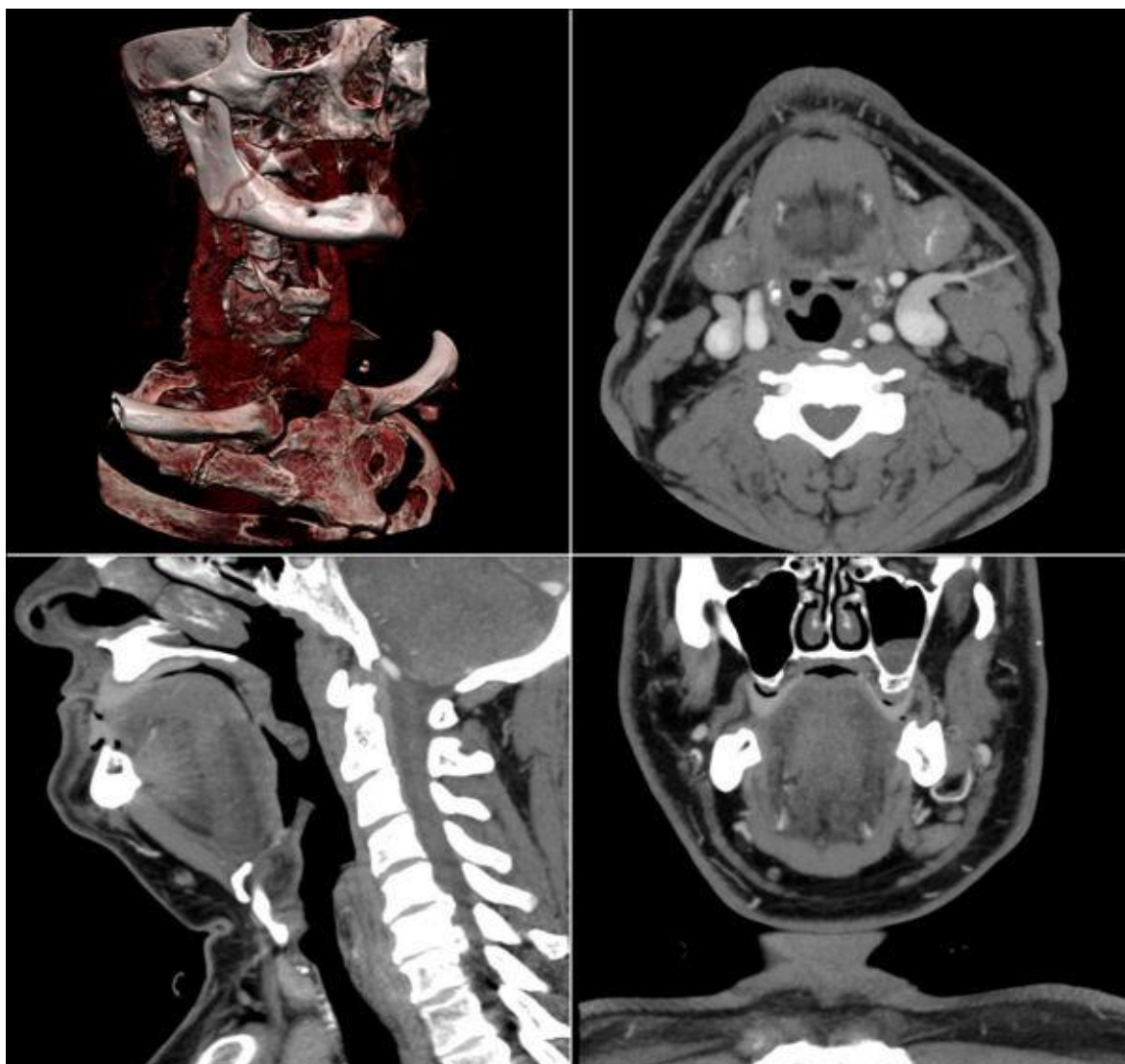


Obr. 2.8. Princip funkce Fringe projection skenerů [9]

Počítačová tomografie (Computer Tomography – CT)

Metoda skenování využívaná dnes hojně v lékařství využívající tomografie (pořizování jednoho snímku za druhým) a počítačových algoritmů k sestavení třírozměrného obrazu vnitřku objektu z velké série dvourozměrných rentgenových obrazů pořízených rotací okolo jedné osy. CT produkuje velká množství dat, která mohou být zpracována tzv. okénkováním za účelem předvedení různých struktur založených na blokování průchodu rentgenového záření. Dříve skenery uměly zobrazit struktury pouze kolmé na osu skenování (ve směru prozařování rentgenem), dnes už je možné zobrazovat libovolné řezy strukturou.

Uplatnění CT zařízení je nejvíce v lékařství, ale mají i různá další využití jako například při nedestruktivních materiálových zkouškách.



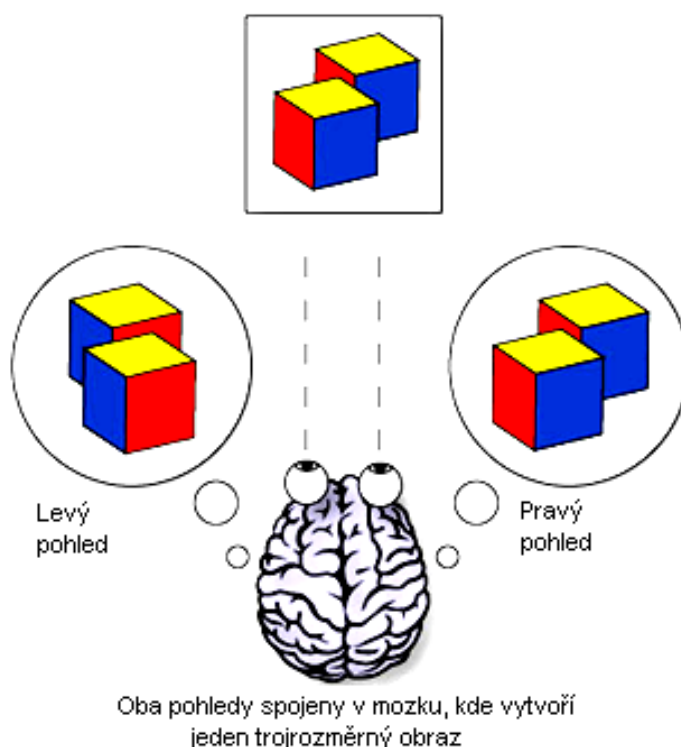
Obr. 2.9. Vlevo nahoře 3D rekonstrukce objektu, která vycházela sestavením série rentgenových snímků, některé z nich jsou na obklopujících snímcích. [18]

2.2.3. Bezkontaktní pasivní skenery

Pasivní skenery nevysílají žádný druh záření, ale místo toho se spoléhají na detekci odraženého okolního záření. Většina skenerů tohoto typu detekuje viditelné světlo, protože je nejdostupnějším zářením, používáno bývá také infračervené záření. Pasivní metody mohou být velmi levné, protože ve většině případů nepotřebují žádné zvláštní zařízení.

Stereoscopic

Stereoskopické systémy obvykle využívají dvou videokamer lehce od sebe vzdálených, které analyzováním rozdílů mezi scénami snímaných kamerami určují vzdálenosti každého bodu scény. Princip metody je odvozen od lidského prostorového vidění.



Obr. 2.10. Princip prostorového vidění lidí, od něhož jsou odvozeny stereoskopické skenery [17]

Silhouette

Tyto druhy skenerů používají obrysy vytvořených sekvencí fotografií okolo trojrozměrného objektu pořízených proti kontrastnímu pozadí. Takto vytvořené siluety jsou vytaženy a protnuty k vytvoření povrchu blízcímu se objektu. Touto technikou však nejsou některé druhy vydutín detekovány.

User Assisted (Image Based Modeling)

Metoda založená na pomoci uživatele, který detekuje a identifikuje některé obrysy a tvaruje tak objekt. Tak je možno vytvořit přibližný model. Tento druh metody se používá k vytvoření rychlých, ale přibližných modelů jednoduchých tvarů jako jsou budovy. Tato metoda 3D skenování je založena na principu fotogrammetrie, což je něco podobného jako metoda panoramatického fotografování s výjimkou toho, že jsou pořízené snímky jednoho objektu z různých míst v třírozměrném prostoru k pořízení repliky objektu, namísto pořízení série fotek z jednoho místa v třírozměrném prostoru k vytvoření okolního prostředí.

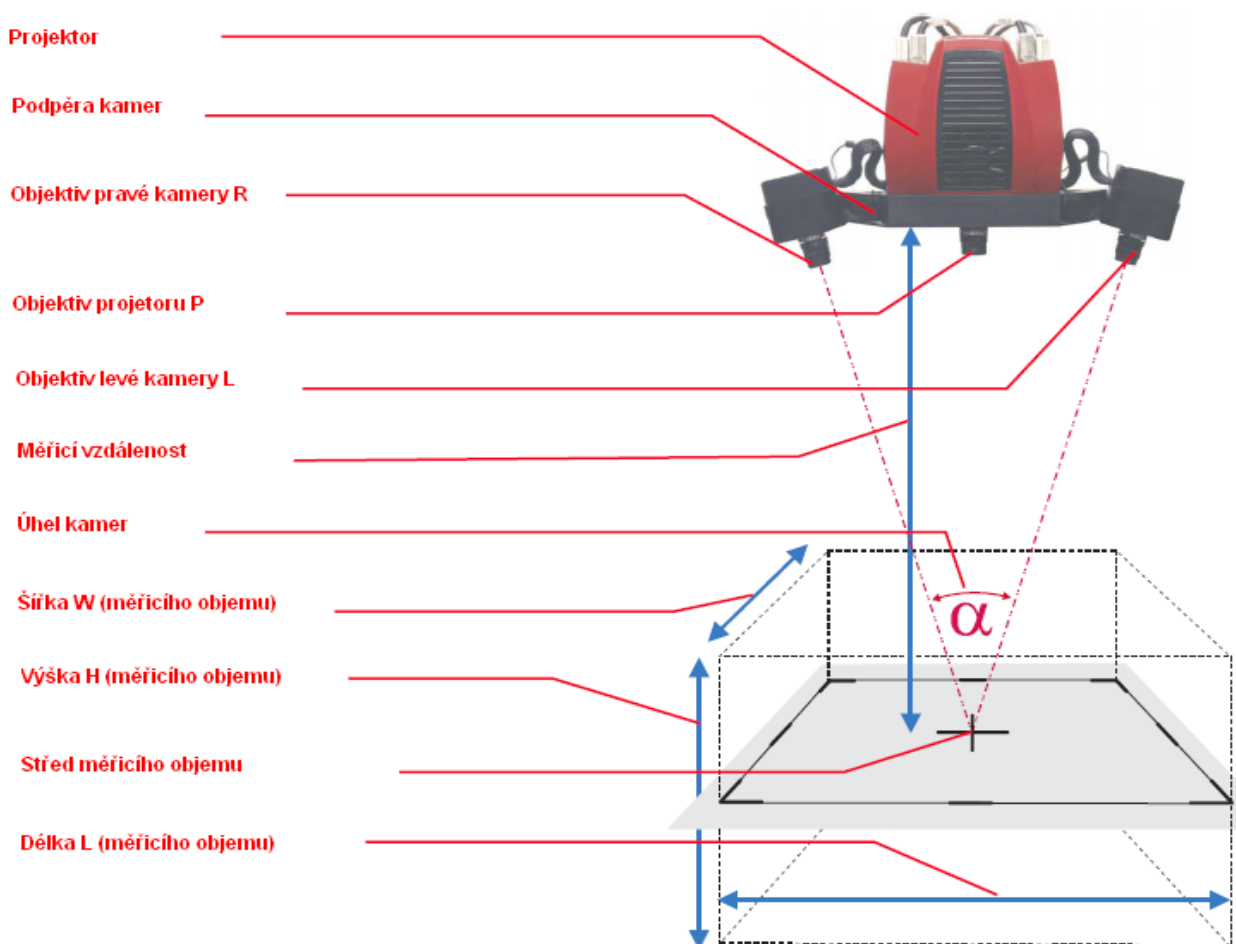
3. 3D skener ATOS

ATOS je dle předchozího rozdělení mobilní bezkontaktní optický a nedestruktivní 3D skener firmy GOM určený pro nejrůznější aplikace. Jeho vysoká výkonnost, velké rozlišení a široká flexibilita měřicích objemů umožňuje přesnou a efektivní kontrolu kvality výroby (Quality Control) a ukládání optimalizovaných dat z design aplikací. Nejširší využití systému ATOS je v oblastech CAD, CAM a FEM kde je vyžadováno měření reálných objektů a jejich následné srovnání s teoretickým modelem.

Hlavní části systému ATOS:

- snímací hlava se dvěma kamerami a fringe projektorem
- stojan pro zabezpečení stabilní polohy snímací hlavy
- ovládací jednotka napájení a pro ovládání snímací hlavy a PC
- výkonný PC systém
- ATOS obslužný software a operační systém Linux

Snímací hlava systému ATOS spolu s dalšími důležitými údaji je popsána na následujícím obrázku Obr. 3.1.



Obr. 3.1. Popis snímací hlavy systému ATOS [6]

Měření systémem ATOS je rychlé s vysokou hustotou dat (velké rozlišení detailů), která je dána použitým zařízením, pohybuje se v rozmezí 800 000 až 4 000 000 bodů na jeden snímek. Proces měření je založen na principech optické triangulace, fotogrammetrie a fringe projection, kdy jsou na povrch objektu promítány pruhy světla, které jsou snímány pomocí

dvou kamer s CCD čipem. Software z těchto záběrů vypočítá prostorové souřadnice jednotlivých bodů. Měřené součásti se musí připravit na měření nanesením vrstvy bílé barvy, kterou dokáže skener snímat jako plochu. Díky referenčním značkám, umístěných na objektu i mimo objekt, je zajištěno automatické složení jednotlivých záběrů.

V této konfiguraci byl pro měření použit systém ATOS první generace ATOS Std 520, jehož vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 1. Podle velikosti měřených objemů je možno volit odpovídající velikost objektivů dle Tab. 2.

Tab. 1. Vlastnosti systému ATOS Std 520 [6]

Typ senzoru	Měřicí objem (LxWxH mm ³)	Výsledná vzdálenost měřicích bodů v mm		Objektiv projektoru	Objektiv kamer	Úhel kamer	Měřicí vzdálenost
ATOS Std 520	350 x 280 x 280	0,46 při 50Hz	0,55 při 60Hz	6mm	12mm	30°	750mm
	250 x 200 x 200	0,33 při 50Hz	0,39 při 60Hz	8mm	17mm		
	175 x 140 x 135	0,23 při 50Hz	0,27 při 60Hz	12mm	23mm		
	135 x 108 x 95	0,18 při 50Hz	0,21 při 60Hz	17mm	35mm		

Tab. 2. Přehled objektivů systému ATOS Std 520 [6]

Měřicí objem (mm ³)	135x108x108 až 350x280x280
Počet měřených snímaných bodů každý snímek nebo rozlišení kamery	přibližně 310 000 (60Hz) 640x480 pixelů
Promítnuto	1 x bodový snímek
	1 x referenční snímek
	6 x snímek šedé stupnice
	4 x fázový snímek
	1 x transparentní snímek
	Vzory uloženy v PC.

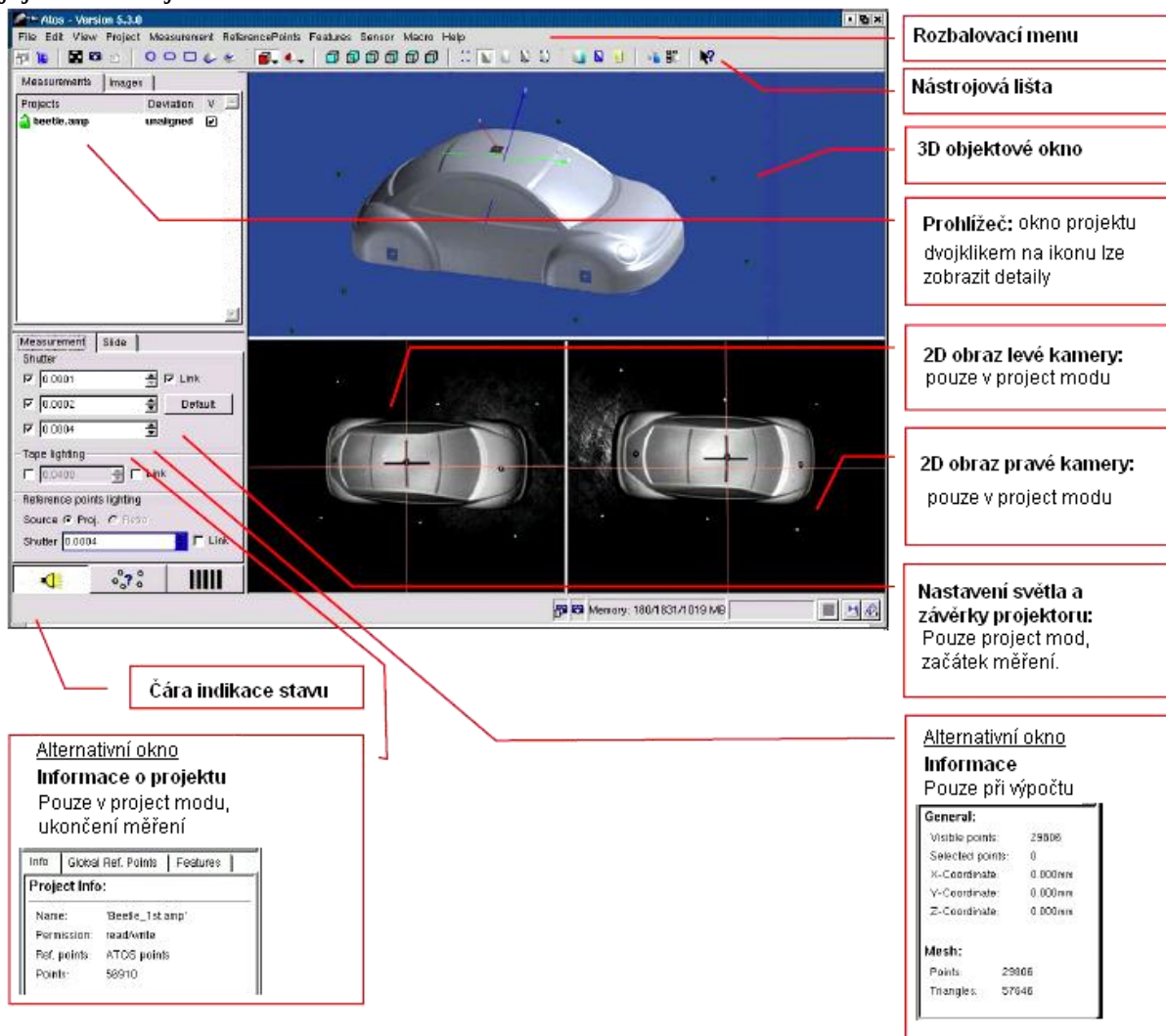
3.1. Pracovní prostředí stanice 3D skeneru ATOS

Prostředí pracovní stanice se může nacházet ve dvou režimech a to v režimu projektu (Project mode), kdy dochází ke snímání měřeného objektu a pracuje se se snímací hlavou a dále ve výpočtovém režimu (Evaluation mode), kdy je dále možno pracovat s naměřenými daty.

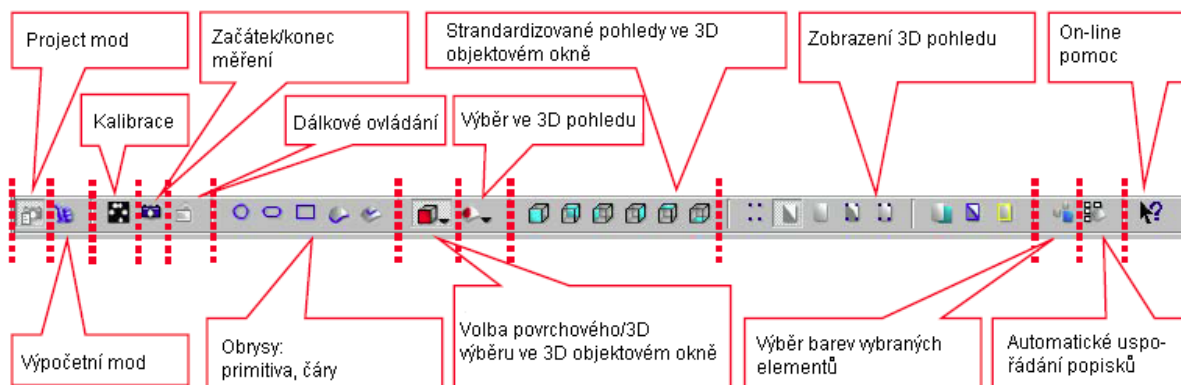
Základní vzhled obou režimů je podobný a je možno ho vidět na Obr. 3.2., v režimu projektu se ve 3D objektovém zobrazují již naměřené snímky, pod nimi je dále pohled jak levé tak pravé kamery na snímané místo. Nalevo od zobrazení kamer je možnost volby vlastností snímací hlavy a to intenzity světla a závěrky, nad tímto oknem se nachází prohlížeč projektu, kde jsou zobrazeny všechny naměřené snímky a jejich přiřazené body, stejně tak přesnost, s jakou byly snímky přiřazeny. Dále se nahoře v obvyklých místech nachází nástrojová lišta, jejíž popis v režimu projektu je vidět na Obr. 3.3.

Pokud neměříme, pohybujeme se v režimu výpočtového módu, kde je dále možno pracovat s naměřenými daty. V tomto režimu je celkový vzhled obrazovky téměř totožný se vzhledem při práci v projektovém módu, ve spodní části ale nejsou obrazy kamer a pod

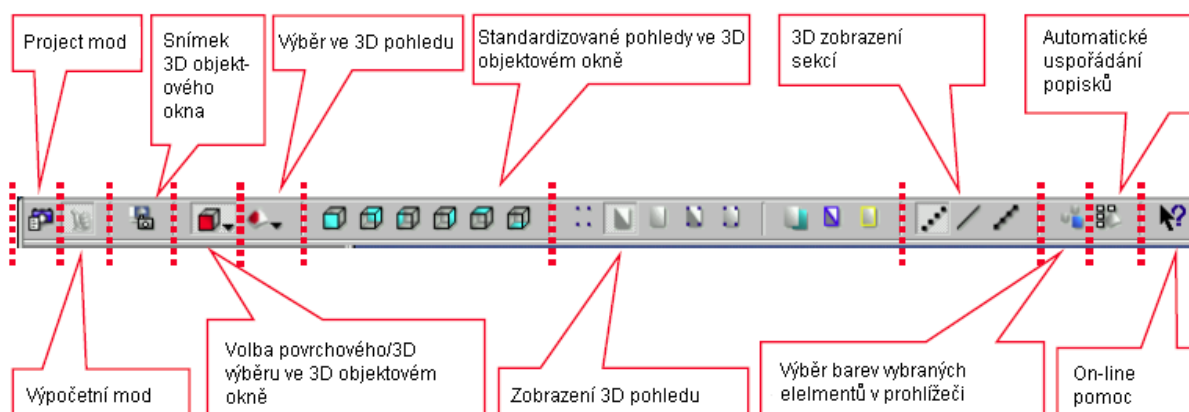
prohlížečem se nachází alternativní okno s informacemi. Nástrojová lišta se také změní, popis jejích funkcí je na Obr. 3.4.



Obr. 3.2. Pracovní prostředí pracovní stanice systému ATOS [6]



Obr. 3.3. Nástrojová lišta při projektovém modu [6]



Obr. 3.4. Nástrojová lišta při výpočetním modu [6]

3.2. Výstup dat ze systému ATOS

System ATOS umí exportovat data v mnoha formátech, z nichž každý může obsahovat jiné informace viz. Tab. 3.

4. Vytipování vozu a volba strategie skenování

Vytipovaný vůz, vhodný pro provedení studie byla vybrána formule Ford z osmdesátých let (viz. Obr. 4.1.) s obsahem motoru 1.6 litru, bezsynchronní čtyřstupňovou převodovkou Hewland a lichoběžníkovým zavěšením náprav. Z hlediska aerodynamiky jde o vůz bez kapotáže kol a náprav s rovnou podlahou bez dalších přidavných aerodynamických prvků.

Před samotným skenováním bylo třeba rozmyslet celkovou strategii skenování ploch ovlivňující aerodynamiku vozidla. Možnosti byli následující:

- skenování karoserie vozidla jako celku,
- skenování jednotlivých dílů karoserie a jejich následné spojení v CAD softwaru.

Konečná volba strategie skenování padla na skenování jednotlivých dílů karoserie zvlášť a následném seskládání celkového vozu v CAD programu, vzhledem k tomu, že jednotlivé díly musí být po skenování přemodelovány a mohou být dále jednotlivě upravovány k jiným účelům. Navíc se nepracuje při skenování jednotlivých dílů s tak velkým objemem dat, což umožňuje lepší kontrolu správnosti přiřazení snímků a je možno dosáhnout větší přesnosti skenovaných dílů. S výhodou lze využít i symetrie vozu v částech, kde to právě symetrie umožňuje a zbytečně nesnímat stejnou část vozu dvakrát. Menší objem dat jednotlivých dílů také klade menší nároky na hardware, ať už při modelování jednotlivých dílů ze skenovaných předloh, tak i na skenovací stanici samotnou. Dalším důvodem je jednodušší manipulace s jednotlivými díly a možnost využití formule (rám, nápravy) bez kapotáže k dalším účelům.

5. Skenování vozu 3D skenerem ATOS

5.1. Příprava jednotlivých dílů pro měření 3D skenerem ATOS Std 520

Pro měření povrchu karoserie byl k dispozici systém ATOS první generace, který umí snímat pouze povrchy bílé barvy pokryté speciálními body pro přesné určení polohy snímaného povrchu a přiřazení snímku na správné místo.

Tab. 3. Exportní formáty systému ATOS a jejich stručný popis [6]

Výstupní formát	Data 3D sítě	Řezy, 3D čáry	Mračna bodů	Odchylky	Kontrolní body povrchu	Základní prvky			Stručné informace	Přípona souboru
						Kruhy, body, protínající se body	Koule, roviny, protínající se čáry, čáry	Kužele, válce, paraboloidy, NURBS		
Export g3d	ano	ano	ne	ne	ne	ne	ne	ne	Vnitřní data ATOSu převedena do g3d formátu a tak dokáží i starší verze pracovat s těmito informacemi	.g3d
STL	ano	ne	ne	ano	ne	ne	ne	ne	STL je formát pro polygonální data, dokonce podporuje i barevné polygony.	.stl
POL	ano	ne	ne	ano	ne	ne	ne	ne	POL je formát pro polygonální data a může být otevřen v softwarech Polyworks firmy Innovmetric. POL také podporuje i barevné polygony.	.pol
IGES	ne	ano	ano	ne	ne	ano	ano	ne	IGES je formát určený pro výměnu s CAD softwarem. Je třeba ho exportovat jako řezy	.iges
VDA/ PSET	ne	ano	ano	ne	ne	ano	ne	ne	VDA/SET je formát Německé Asociace Automobilového Průmyslu. Součásti jsou exportovány jako 3D body nebo jako VDA primitiva.	.vda
ASCII	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ne	ne	Součásti jsou exportovány jako 3D body s dalšími doplňujícími informacemi v ASCII formátu.	.asc
Ref. body	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	ne	Referenční body jsou uloženy jako XYZ souřadnice.	.ref
Části PW	ne	ano	ano	ne	ne	ano	ne	ne	PW je formát softwaru Polyworks firmy Innovmetric. Data jsou exportována jako 3D body.	.pw
Tabulky	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	Data uložena v závislosti na zvolené šabloně, například X,Y,Z souřadnice v normálním směru, RGB barvy, atd. exportovány v souboru	.asc/.html

Příprava dílů vyžadovala:

- 1) očištění povrchu karoserie (viz. Obr. 5.1.),
- 2) opakované nástřiky směsí plavené bílé křídý a lihu pro vytvoření dokonale bílého povrchu (viz. Obr. 5.2.), tato směs je vhodná pro relativně nízkou cenu a dobrou krycí schopnost, tak i proto, že lze snadno odstranit z karoserie po dokončení měření,
- 3) umístění měřicích bodů vhodným způsobem na povrch dílů karoserie (viz. Obr. 5.3.). Pro správné a úplně přiřazení snímku jsou zapotřebí minimálně 3 známé body na každém snímku.



Obr. 4.1. Formule Ford



Obr. 5.1. Očištěný díl karoserie přichystaný ke stříkání směsí lihu a křídý



Obr. 5.2. Díl karoserie dokonale pokrytý bílou barvou



Obr. 5.3. Umísťování referenčních bodů pro měřicí systém ATOS

5.2. Skenování jednotlivých dílů karoserie systémem ATOS

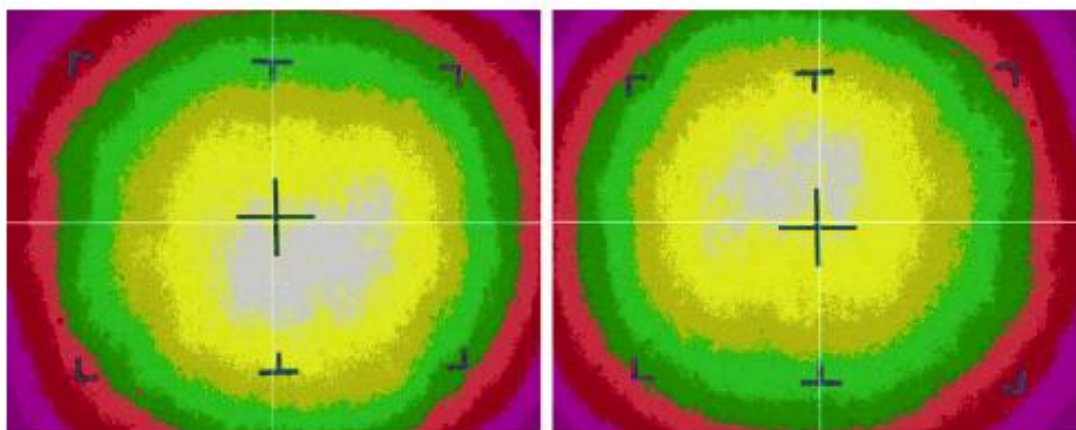
Po úpravě povrchu dílů karoserie se přistoupilo k měření 3D skenerem ATOS. Tento systém před započítím měření vyžaduje kalibraci dle pokynů měřicí stanice. Tuto kalibraci je možno provádět i v průběhu měření, začnou-li se objevovat velké odchylky při měření, je třeba dbát doporučení softwaru měřicí stanice. Osvětlení prostorů mělo také vliv na kvalitu měření. Systém ATOS dosahoval nejlepších výsledků při minimálním osvětlení místnosti, kdy skenované plochy byly osvětlovány samotnou stanicí při provádění měření.

Postup měření 3D skenerem ATOS:

1. Umístění snímače – snímací zařízení musí být umístěno volně před měřený objekt ve stanové vzdálenosti, v našem případě je to 750 mm. Musí být také zajištěno pevné a stabilní uchycení snímací hlavy, aby nedošlo k ovlivnění měření pohybem nebo otřesy v průběhu snímání. Systém toto ovlivnění rozpozná a ohlásí varovnou hláškou.
2. Měření (snímání) – systém snímá měřený objekt. Určí polohy referenčních bodů a identifikuje povrch, toto je zaznamenáno dvěma nezávislými kamerami. Pro správné snímání je důležité, aby probíhalo za stejných podmínek, za jakých byl systém kalibrován a aby byla správně nastavená expozice, při barevném rozložení spektra barev dle expozice, jako je zobrazeno na Obr. 5.5., značí bílá barva 100% přeexponování obrazu a modrá barva by značila silné podexponování obrazu. Tyto povrchy by nebyly rozpoznány a sejmuty. Systém sám vyhodnotí umístění snímku pomocí referenčních bodů. Zejména je velmi důležité, aby skenovací hlava měla dobrý „výhled“ na referenční body, kvůli jejich rozpoznání. Referenční body mohou mít různé tvary a velikosti viz. Obr. 5.4. Velikost referenčních bodů byla volena 5 mm dle velikosti měřeného objemu dle Tab. 4., vzhledem k rozměrům jednotlivých dílů karoserie byli vybrány objektivy pro měření největších možných objemů.



Obr. 5.4. Varianty referenčních bodů [6]

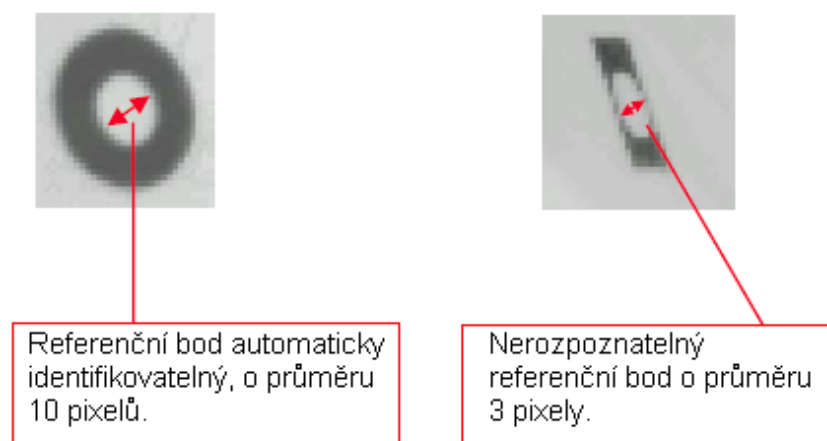


Obr. 5.5. Barevné spektrum značící stupeň expozice [6]

Tab. 4. Velikosti referenčních bodů [6]

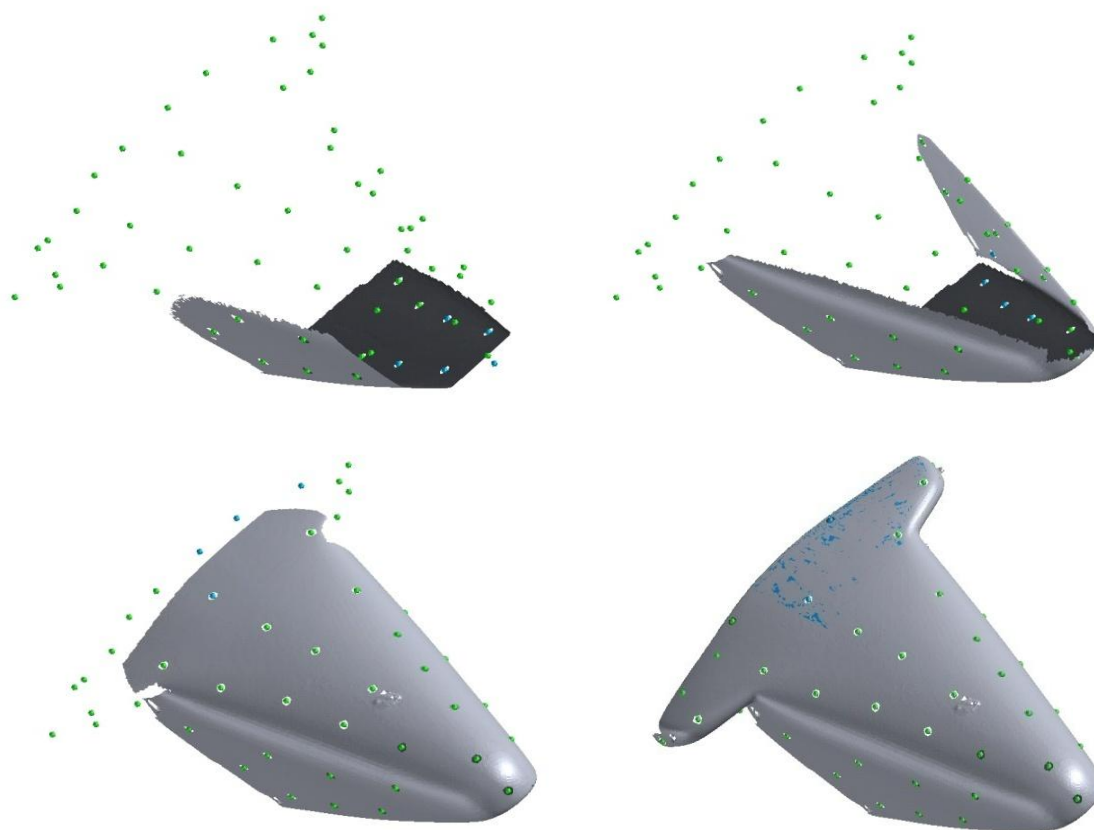
Měřený objem [mm]	Průměr ref. bodů
35 x 28 x 15	0.6 mm
65 x 52 x 30	1.2 mm
100 x 80 x 60	2.0 mm
135 x 108 x 95	2.0 mm
175 x 140 x 135	3.0 mm
200 x 160 x 160	3.0 mm
250 x 200 x 200	5.0 mm
350 x 280 x 280	5.0 mm

3. Výpočet – po nasnímání systém vypočítá 3D polohu snímku a informuje o přesnosti přiřazení snímku na součást. Pokud skenovací hlava vidí referenční body z velkého úhlu, je možné, že tyto body nerozpozná automaticky. Skener rozpozná automaticky body, které mají po naskenování průměr alespoň 10 pixelů viz. Obr. 5.6. Dále je možnost přidat referenční body ručně, jestliže mají větší průměr než 3 pixely, pokud jsou naskenovány oběma kamerami a přesto z nějakého důvodu nejsou označeny jako přiřazené body. Počet referenčních bodů na snímku také do jisté míry ovlivňuje přesnost přiřazení snímku. Při ručním přiřazování referenčních bodů je důležité sledovat, s jakou přesností byly tyto body přiřazeny. Postupný růst jednoho dílu karoserie skenováním je zobrazen na Obr. 5.7. Zelené body na obrázku značí umístění referenčních bodů.

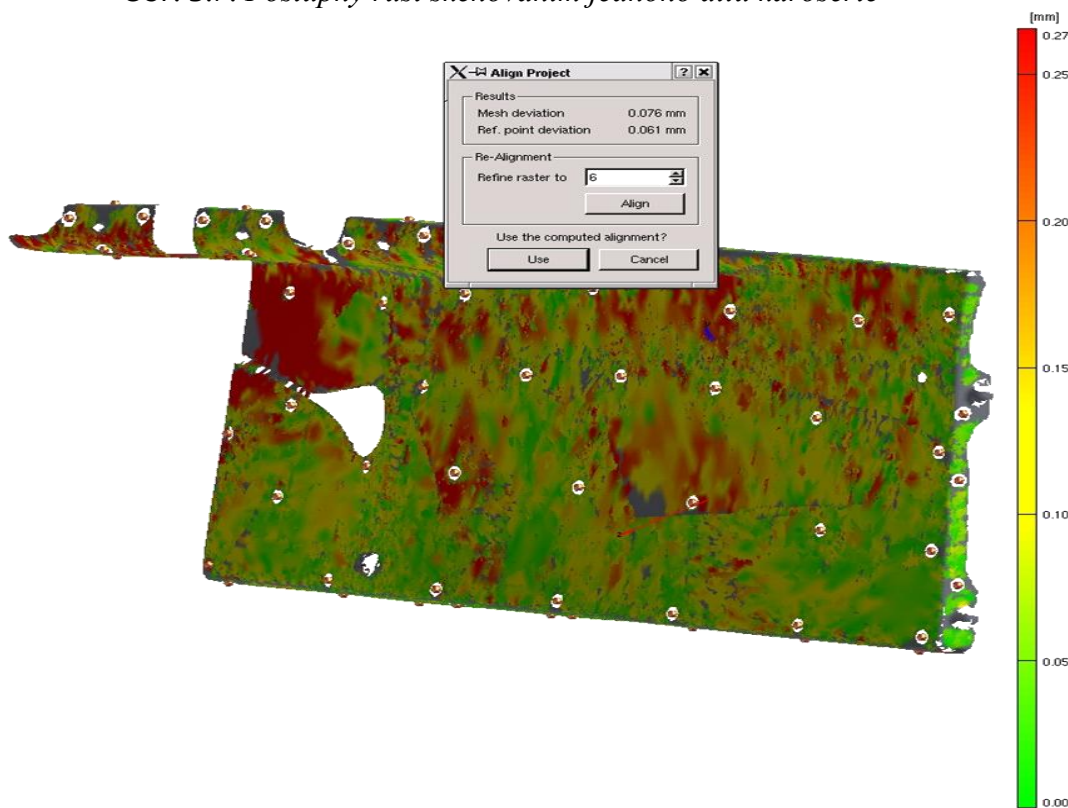


Obr. 5.6. Automaticky rozpoznatelný a nerozpoznatelný referenční bod [6]

4. Výsledek – po naměření celé součásti je potřeba objekt polygonizovat. V této části software stanice ATOS zarovná všechny snímky do jednoho povrchu a vyhladí tak rozdíly, které vznikly díky nepřesnostem mezi jednotlivými měřeními. Pro polygonizaci je třeba vybrat všechny povrchy, ze kterých se součást skládá a v záložce *Project* spustit nástroj *Processing Wizard*, který nás provede dokončením měření dle našich požadovaných parametrů, zde například je vyhodnocena celková přesnost měření součásti (viz. Obr. 5.8.).



Obr. 5.7. Postupný růst skenováním jednoho dílu karoserie



Obr. 5.8. Zobrazení celkové přesnosti měřeného dílu, díl překryt oknem Processing Wizard

Celková karoserie formule Ford se skládala z dílů viz. Obr. 5.9.



Obr. 5.9. Formule Ford a jednotlivé díly karoserie, z nichž se skládá, jako výstupy ze skeneru

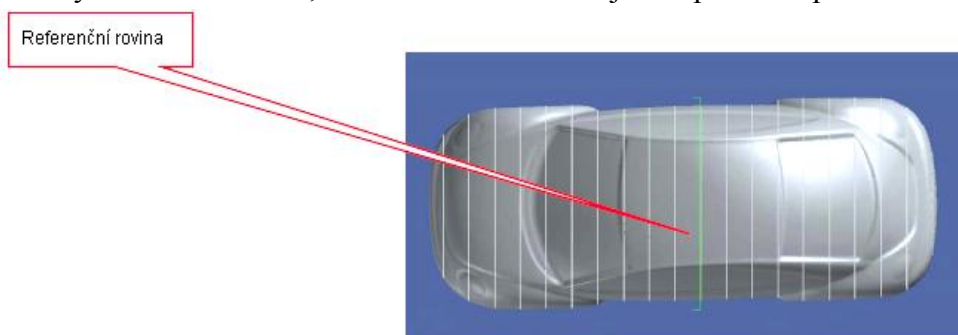
6. Převod dat ze systému ATOS do CAD systému

Jako vhodný CAD systém pro vytvoření výsledného modelu závodního vozu použitelného pro další účely byl vybrán program Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 firmy Parametric Technology Corporation (PTC). Jako exportní formáty ATOSU je možné importovat do programu Pro/ENGINEER soubory přípon: *.stl, *.iges, *.vda, *.asc.

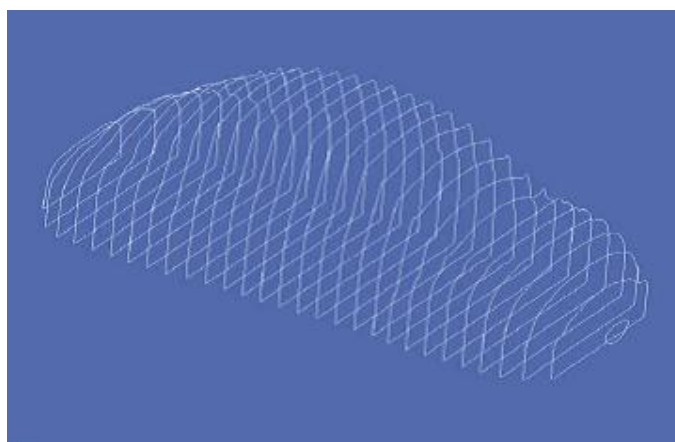
Ovšem jak již bylo uvedeno dříve v Tab. pro další práci v CAD software jsou vhodné řezy součástí, které jsou exportovány s příponou *.igs. Řezy je možné exportovat i v dalších formátech a to *.vda nebo *.asc. Ve všech formátech mohou být řezy reprezentovány body nebo čarami. Pro náš účel byly zvoleny čáry. Import povrchů do CAD systému je také možný, ale pro další práci není vhodný, protože nainportované povrchy se jeví jako mrtvé síť, se kterými není možno dále pracovat.

6.1. Vytvoření řezů v systému ATOS

Pro vytvoření řezů součástí je potřeba mít na naměřené součásti nadefinovanou vhodnou rovinu, se kterou budou vytvořené řezy rovnoběžné. Pokud tuto rovinu nemáme, je možno si ji na součásti vytvořit. Rovina může být vytvořena v záložce *Primitives->Plane->Point-Point-Point Plane* vybráním 3 bodů ležících v požadované rovině. Vytvoření řezů se dále provede v záložce *Primitives->Plane->Axis Parallel Plane* vybráním referenční roviny, se kterou mají být řezy rovnoběžné a zvolíme si požadovanou hustotu řezů. Poté řezy součásti z Obr. 6.1. vybráním referenční roviny (reference plane) vypadají dle Obr. 6.2. Je vhodné vytvořit si řezy ve více rovinách, tak nám vznikne hustější síť pro další práci.

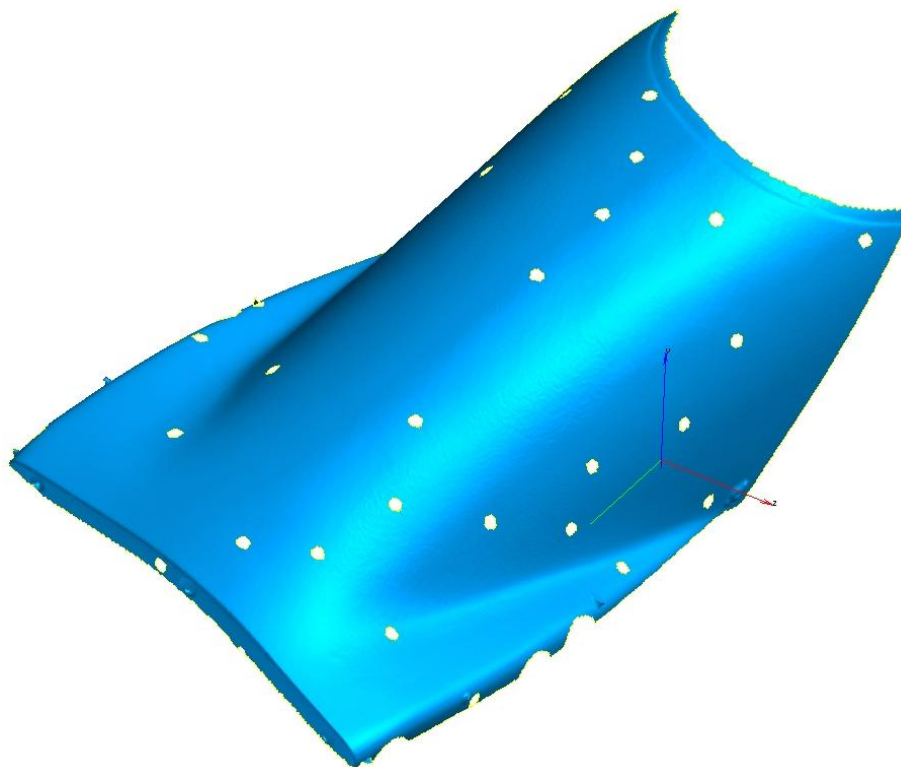


Obr. 6.1. Součást, na které je patrná referenční rovina a paralelní řezy [6]

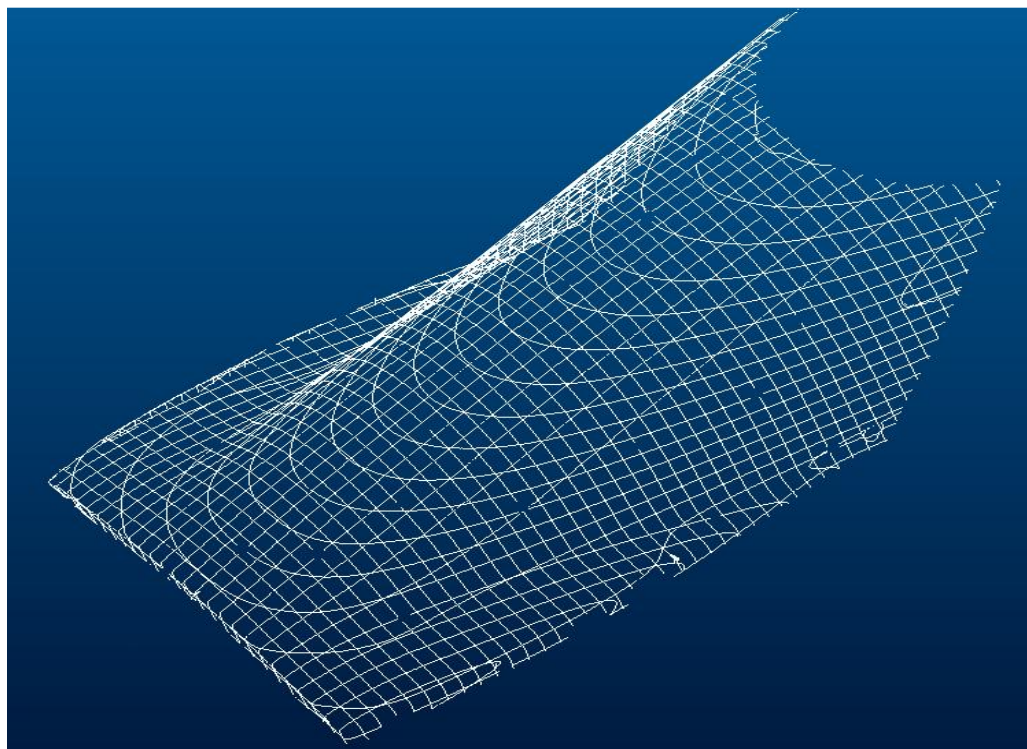


Obr. 6.2. Řezy vzniklé rozřezáním součásti [6]

Na dílech karoserie byly vytvořeny řezy ve více rovinách pro získání sítě pro tvorbu modelu. Příklad této sítě předního dílu karoserie z Obr. 6.3. je vidět na Obr. 6.4. Díry jak na měřené součásti, tak v síti vznikly po referenčních bodech, které jsou černobílé a tento druh skeneru umí snímat pouze bílou barvu, proto po bodech vznikly na všech dílech drobné díry.



Obr. 6.3. Naskenovaný přední díl karoserie



Obr. 6. 4. Řezy předního dílu karoserie

Stejným způsobem byla síť vytvořena na všech dílech karoserie. Síť byla následně uložena ve formátu *.igs a byla připravena pro importování do CAD software, v našem případě do programu Pro/ENGINEER Wildfire 3.0.

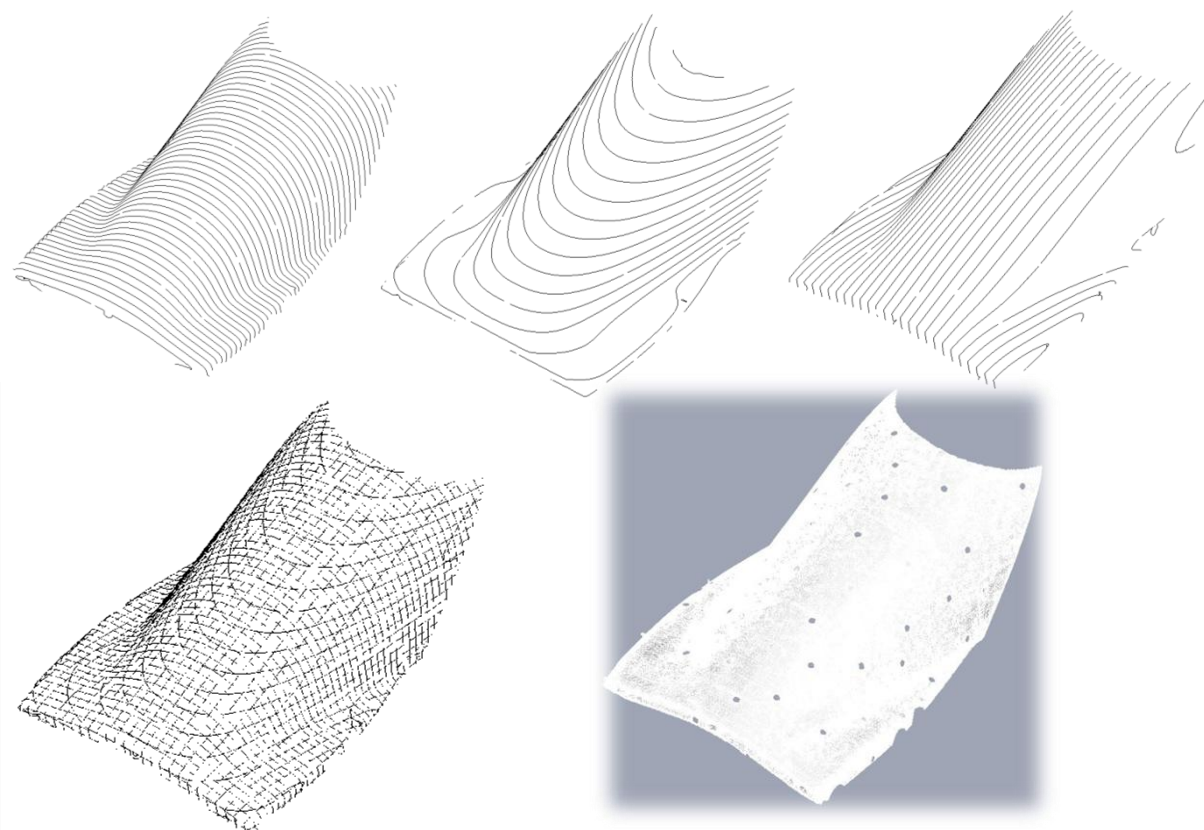
7. Vytvoření modelu závodního vozu v Pro/ENGINEER Wildfire

Software společnosti PTC Pro/ENGINEER Wildfire je přesný, plně asociativní, parametrický, objemový modelář založen na modelování pomocí konstrukčních prvků. Obsahuje celou sadu nástrojů pro všechny fáze výrobku od designu až po tvorbu výrobní dokumentace včetně analýzy a optimalizace NC obrábění.

7.1. Pro/ENGINEER - Importování modelu

Vytvoření přesného modelu skenované součásti je tedy podmíněno importováním řezů vytvořených v pracovní stanici ATOS. Ze stanice ATOS máme řezy a povrch skenované součásti. Všechny tyto části lze otevřít stejným způsobem jako běžný výkres, v záložce *Open* se zobrazí po vybrání položky *all files*, ale tímto způsobem není možné postupovat.

Je třeba založit výkres nové součásti v záložce *File -> New -> Part* a do tohoto výkresu importovat řezy. Import řezů se provede v záložce *Insert -> Shared Data -> From file* a vybráním souřadného systému vložíme vybraný řez nebo povrch. V kolika rovinách byly řezy vytvořeny, tolik řezů je potřeba importovat. Na předním dílu kapoty, na kterém bude ukázán průběh vytvoření celé součásti, byly vytvořeny řezy ve všech třech rovinách viz. Obr. 7.1., které byly postupně naimportovány a dále byl naimportován i povrch ve formátu *.stl, který může sloužit pro kontrolu při modelování, zdali jsou součásti opravdu totožné, povrchy by se tudíž měli protínat.

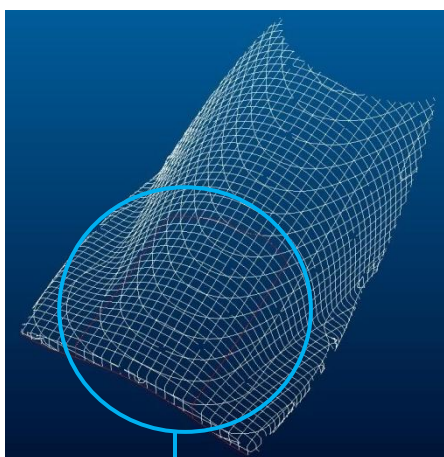


Obr. 7.1. Jednotlivě importované řezy přední části karoserie a povrch *.stl

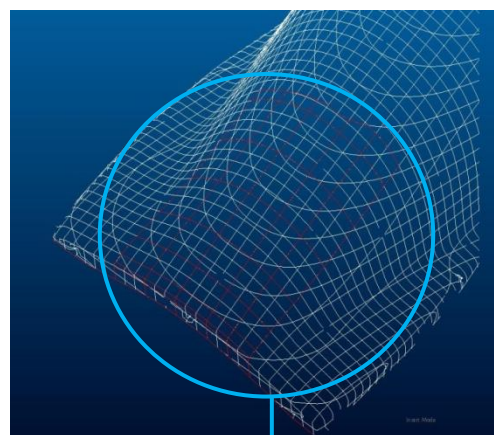
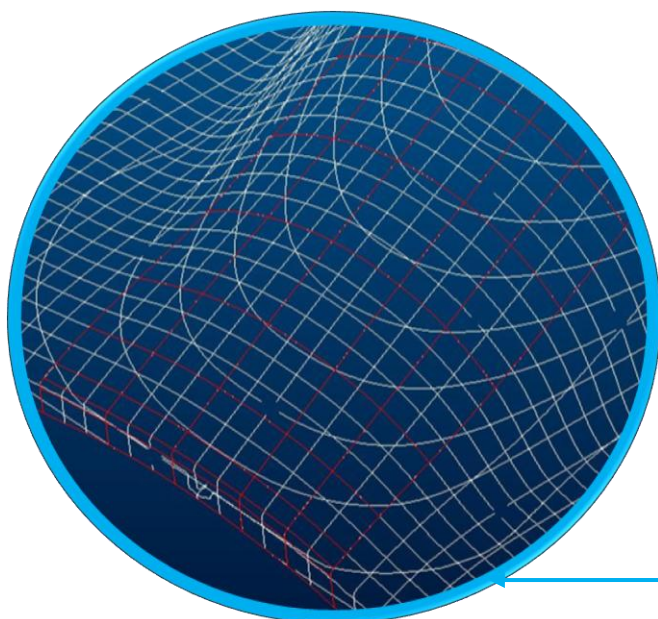
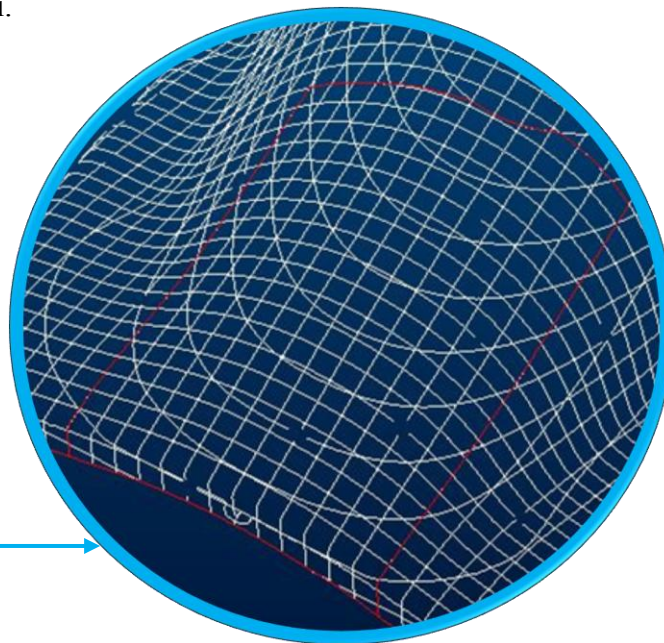
7.2. Pro/ENGINEER – tvorba modelů jednotlivých částí karoserie

Při tvorbě modelu dílu karoserie se s výhodou využívá toho, že je možno kopírovat nástrojem *Style Tool* síť vytvořenou řezy ze stanice ATOS. Takto vytvořená síť je dále využita pro tvorbu povrchu celé součásti s využitím nástroje *Style Tool* nebo *Boundary Blend*. Při tvoření nové sítě je dobré si součást pomyslně rozdělit na několik částí a síť tvořit postupně po částech.

Při tvoření sítě nástrojem *Style Tool*, která bude dále použita pro vytvoření povrchu, se ukázalo jako nejlepší strategie nejprve vytvořit hranice a teprve v takto ohraničené části dále tvořit síť. Nástroj *Style Tool* je vhodný proto, že se lze k importované síti přichytávat pomocí tlačítka CTRL a tak ji jednoduše kopírovat. Vytvořená hranice části předního dílu kapoty je na Obr. 7.2. a následně vytvořená síť mezi touto hranicí je ukázána na Obr. 7.3. Při tvoření sítě a hranic je důležité, aby hranice byly uzavřené a křivky tvořící síť vždy vedly od jedné hranice přesně k druhé hranici, pokud by toto nebylo dodrženo, nebylo by možno vytvořit pomocí těchto křivek následný povrch součásti. Hustotu sítě volíme dle tvarové složitosti a hustoty přechodů právě definované oblasti.



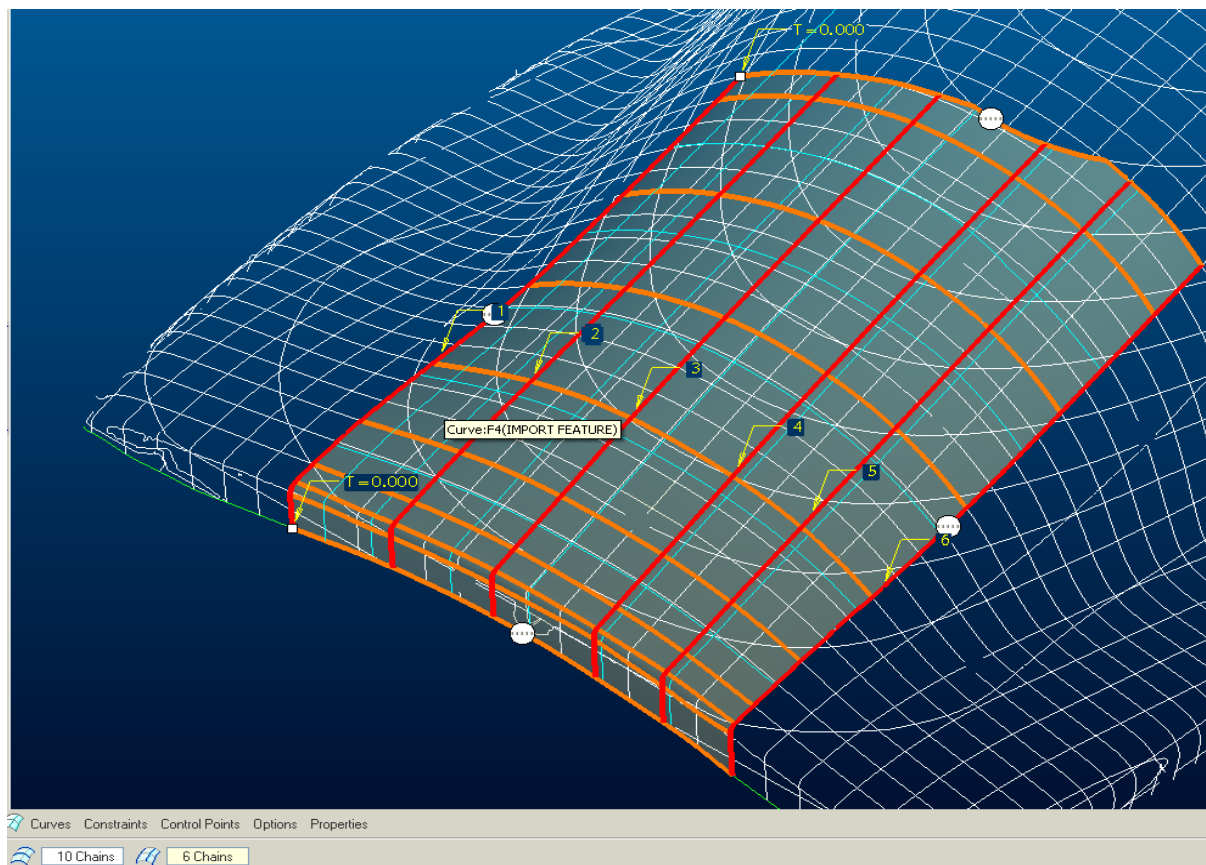
Obr. 7.2. Vytvořená hranice



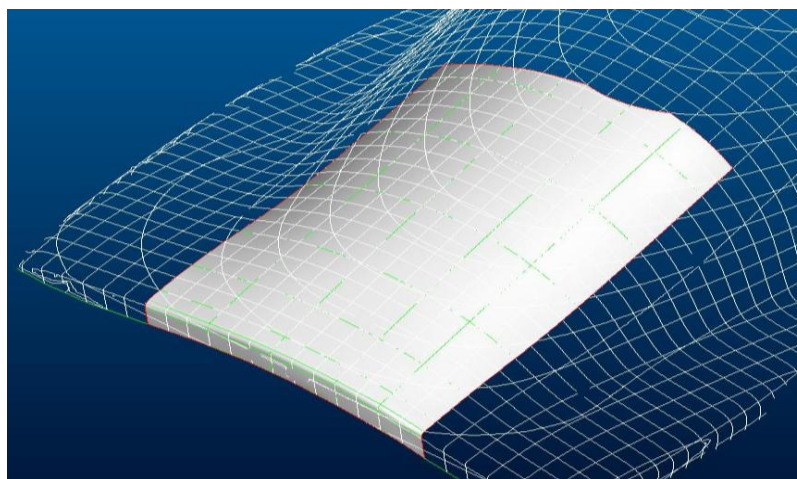
Obr. 7.3. Vytvořená síť

Po vytvoření sítě, jak je znázorněno na předcházejícím obrázku, je možno přejít k vytvoření povrchu z této sítě. Povrch je možno tvořit přímo pomocí nástroje *Style Tool*, kde je tlačítko na vytvoření povrchu z hraničních křivek a křivek procházející touto oblastí nebo nástrojem *Boundary Blend*, kde se vybírají nejprve vertikální a potom horizontální křivky tvořící oblast, na které bude vytvořen odpovídající povrch. Druhý jmenovaný nástroj se ukázal být jako vhodnější, protože lépe kopíruje křivky a tím lépe tvoří povrch, také je lepší pro editaci a tvoření povrchu tímto nástrojem není tak náročné na výpočtový hardware.

Použití nástroje s výběrem křivek na námi zvolené oblasti je ukázáno na Obr. 7.4. Povrch vytvořený z těchto křivek vypadá dle Obr. 7.5.

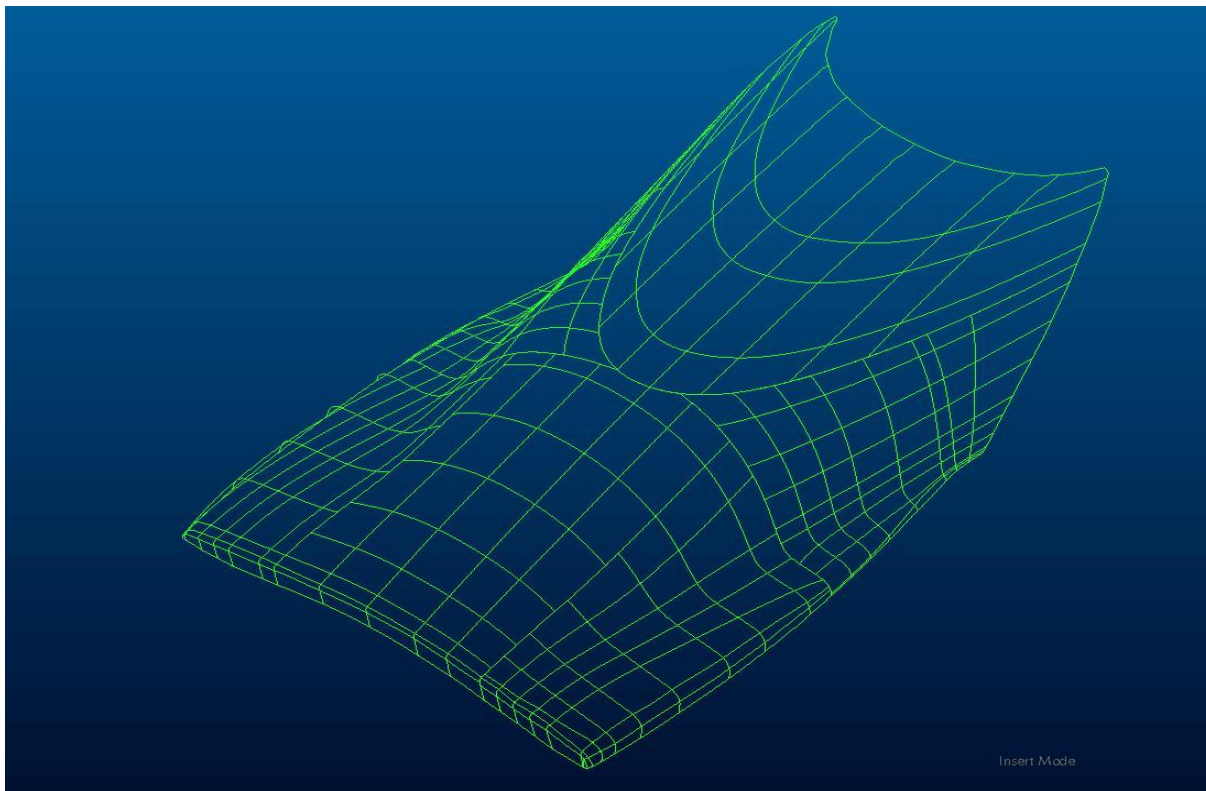


Obr. 7.4. Výběr křivek, dle kterých je tvořena část povrchu

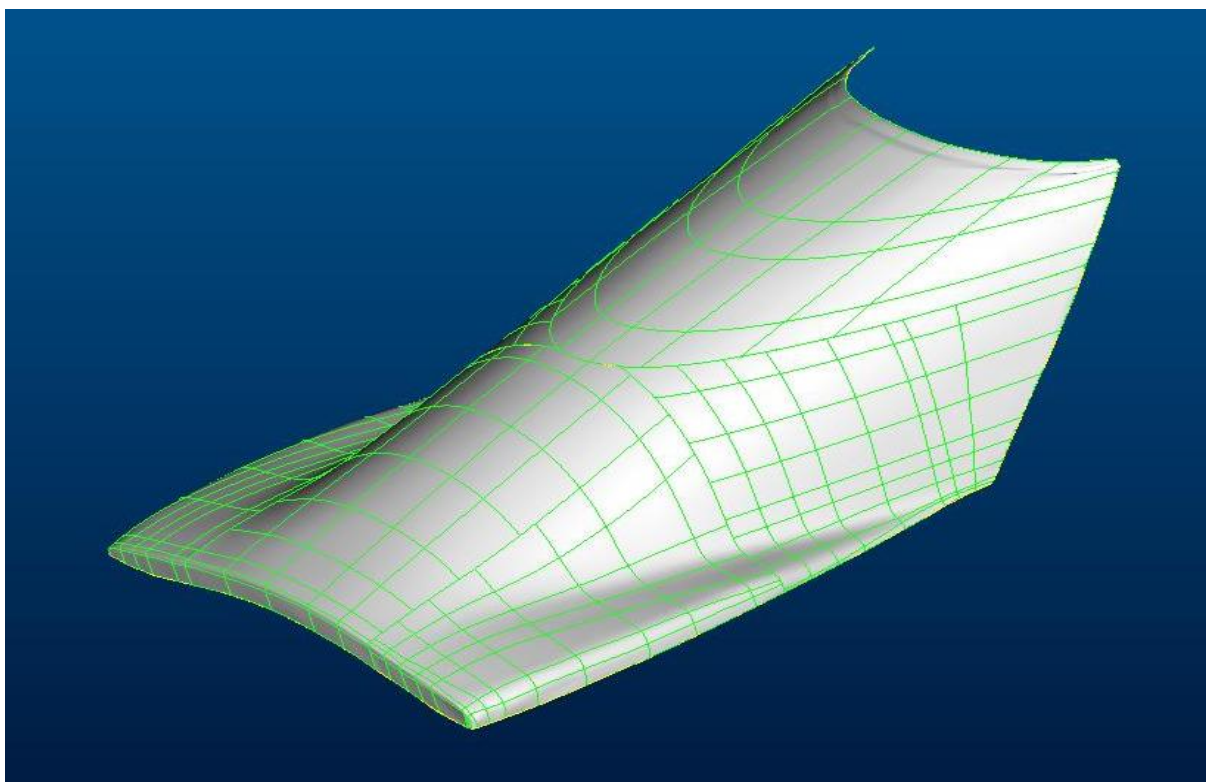


Obr. 7.5. Část povrchu vytvořená z křivek kopírujících síť

Celková síť předního dílu kapoty potom může vypadat například dle Obr. 7.6. A následně povrch vytvořený po částech na tomto dílu kapotáže dle Obr. 7.7.

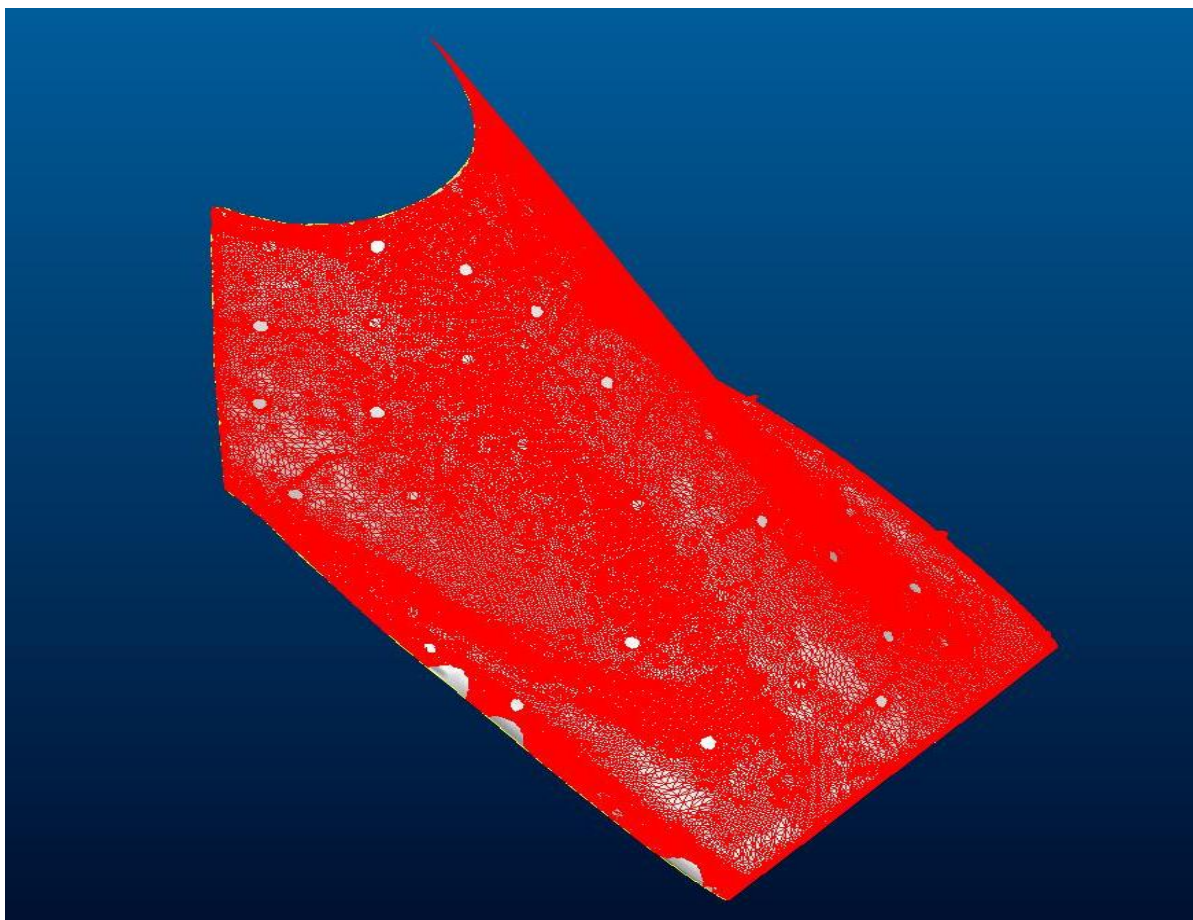


Obr. 7.6. Celková síť předního dílu kapoty



Obr. 7.5. Část povrchu vytvořená z křivek kopírujících síť

Jelikož je povrch tvořen několika plochami, tak jak byla postupně tvořena součást, mohou tyto plochy být postupně spojeny v jednu plochu použitím příkazu *Merge* ze záložky *Edit*. Nakonec může být zkontrolována přesnost dílu využitím naimportovaného skenovaného povrchu ve formátu *.stl, jako je ukázáno na Obr. 7.8., kde se oba povrchy navzájem protínají. Obdobným způsobem byly vymodelovány všechny díly karoserie.



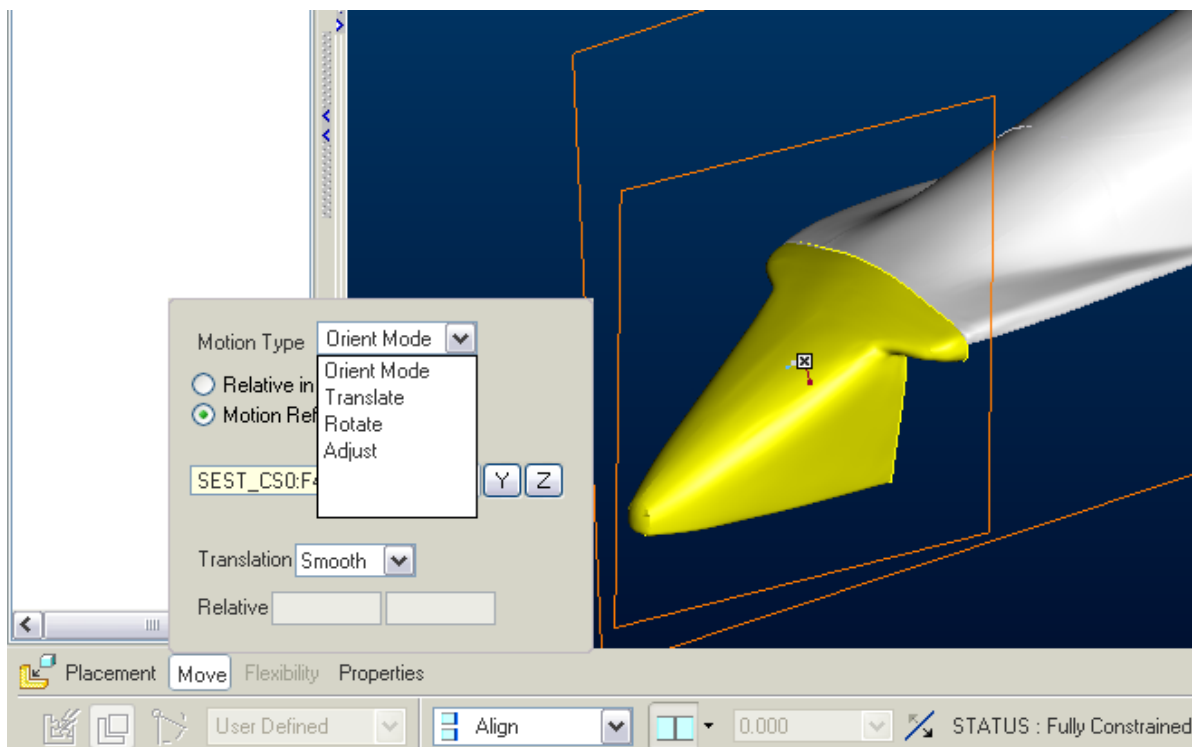
Obr. 7.8. Prolnutý skenovaný povrch s vytvořeným povrchem v Pro/ENGINEERu

7.3. Pro/ENGINEER – vytvoření sestavy karoserie ze skenovaných dílů

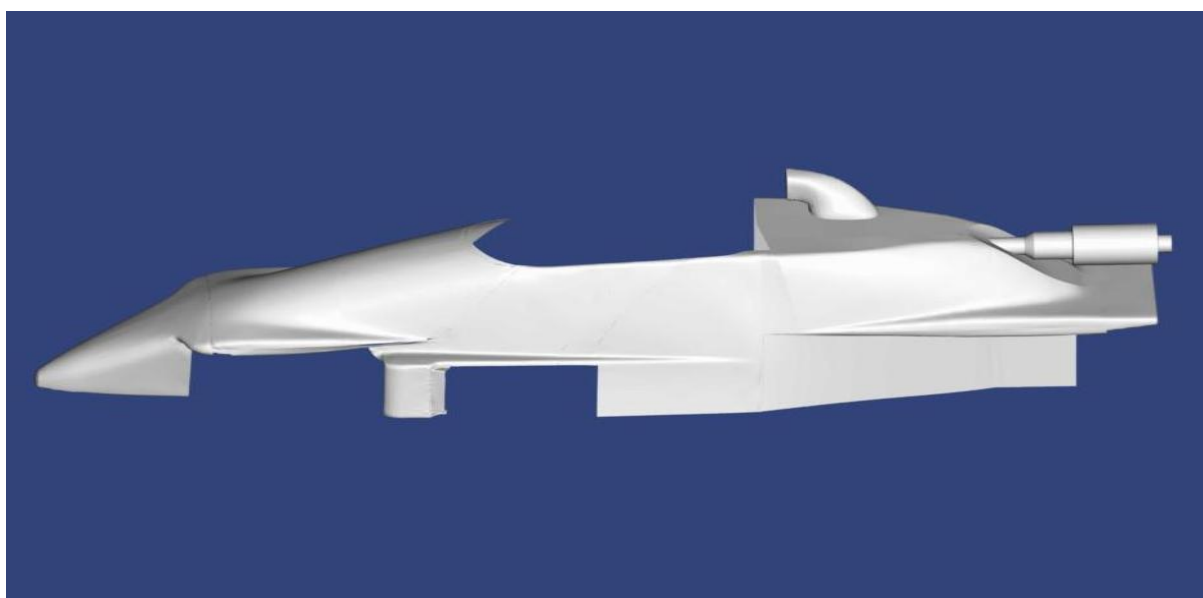
Pro vytvoření modelu karoserie z jednotlivých jejích částí bylo využito podélné symetrie vozidla, to znamená, že stačilo vytvoření pouze poloviny vozidla a ta byla následně zrcadlena. Seskládání jednotlivých dílů karoserie bylo provedeno v režimu sestavy Pro/ENGINEER tzn. v režimu *Assembly*.

Všechny díly byly nasnímany s dosedacími plochami, aby bylo možno přesně určit jejich polohu vůči sobě, přesto bylo důležité uvědomení si polohy a přesné ustavení dílů. Výchozí pozicí bylo, že Formule Ford má rovnou podlahu a tudíž všechny díly byly ustavovány k sobě s ohledem na dosedací plochy jednotlivých dílů, podélně osovou symetrii a na rovnost podlahy. Při sestavování dílů se odhalila jedna z nevýhod metody skenování jednotlivých dílů karoserie zvláště a nikoliv vozidla jako celku. Některé díly karoserie se díky uchycení na rám lehce deformují, tudíž všechny spáry vozidla nebyly naprosto přesné, jak bychom očekávali. Drobnými úpravami byly díly opraveny s přihlédnutím ke skutečným rozměrům a tvarům sestavené karoserie.

Dále byl postup tvoření sestavy následující. Nejprve byla vložena první součást tak, aby její rovina souměrnosti byla zarovnaná (*Align*) s rovinou celkového souřadného systému. Každá další součást byla vložena tak, že byla opět za rovinu souměrnosti srovnána s rovinou celkového souřadného systému a tím pádem i s každou další součástí. Poté byla součást uvolněna k volnému pohybu v rámci výše stanovených předpokladů a v záložce *Move* byl zvolen hlavní souřadný systém jako vztažný pro pohyby součásti a pomocí posuvů a rotací přizpůsobována k ostatním dílům karoserie, jak bylo požadováno, toto je možno vidět na Obr. 7.9. Takovýmto způsobem byly přizpůsobovány všechny díly karoserie. Model karoserie seskládaný ze všech skenovaných dílů vypadal dle Obr. 7.10.



Obr. 7.9. Skládání jednotlivých dílů karoserie, se zobrazením menu umožňující volný pohyb



Obr. 7.10. Seskládané jednotlivé díly

Jelikož v režimu *Assembly* není možno modelovat, takto připravené části byly převedeny opět na výkres, tedy součást (*Part*). Pro převod geometrie musí být otevřen nový výkres a součásti karoserie se přenesou pomocí příkazu *Insert -> Shared Data -> Copy Geometry* (pozn. zrušit zatržení – *Publish Geometry Only*). Uspořádání dílů tak, jak je v sestavě, je dosaženo pomocí volby vždy stejného souřadného systému celé sestavy a nikoliv jednotlivých dílů.

Vytvoření karoserie vyžadovalo dotvoření boku karoserie, toho bylo docíleno s využitím nástrojů *Style Tool* a *Boundary Blend* tak, aby to odpovídalo skutečnosti. Po dotvoření ploch byly s využitím podélné symetrie oříznuty všechny plochy podélnou rovinou a zrcadleny. Jediná nesymetrická část, vstup sání do motoru byl opět vložen zpět na místo pomocí příkazu *Copy Geometry*. Poté byla uzavřena podlaha a vrchní část karoserie, tím vznikl tvar zobrazený na Obr. 7.11.



Obr. 7.11. Uzavřená karoserie

7.4. Pro/ENGINEER – vytvoření celkového modelu závodního vozu

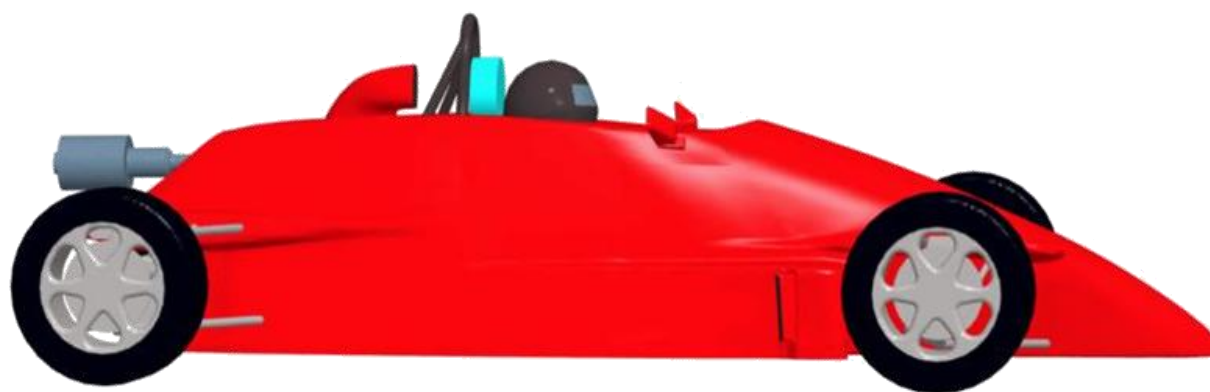
Po vytvoření uzavřeného povrchu karoserie je možno z tohoto povrchu vytvořit objem. Před vytvořením objemu je třeba mít všechny povrchy spojeny v jeden, je tedy potřeba všechny povrchy spojit příkazem *Merge*, velmi důležité se ukázala u příkazu *Merge* pro spojení používat pro typ spojení *Intersect* a ne *Join*, aby došlo k oříznutí případných protínajících se povrchů a nevznikly tak volné hrany. Po spojení všech dílčích povrchů v jeden bylo možné ze záložky *Edit -> Solidify* převést povrch na objem.

Pro úplnost karoserie byli již rutinními modelářskými postupy na karoserii umístěna zpětná zrcátka, dále k této karoserii byl vložen rám určený pro ochranu hlavy jezdce, který byl získán z 3D modelu rámu, který byl posléze k dispozici. Na rám byla umístěna opěrka hlavy jezdce a dodělán model helmy jezdce, která dotváří celkový popis karoserie z hlediska aerodynamiky.

Pro vytvoření celkového vozu bylo potřeba změřit polohu náprav vzhledem ke karoserii a také rozměry kol. Dále byl vytvořen model přední a zadní nápravy, kde bylo použito několik zjednodušení s ohledem na účel použití modelu, kde například tvar těhlice nemá zásadní vliv na celkovou aerodynamiku vozidla, stejně tak i převodovka byla nahrazena kvádrem odpovídající velikosti. Srovnání vytvořeného modelu vozidla a reálného vozidla je možno na následujících Obr. 7.12.-7.15.



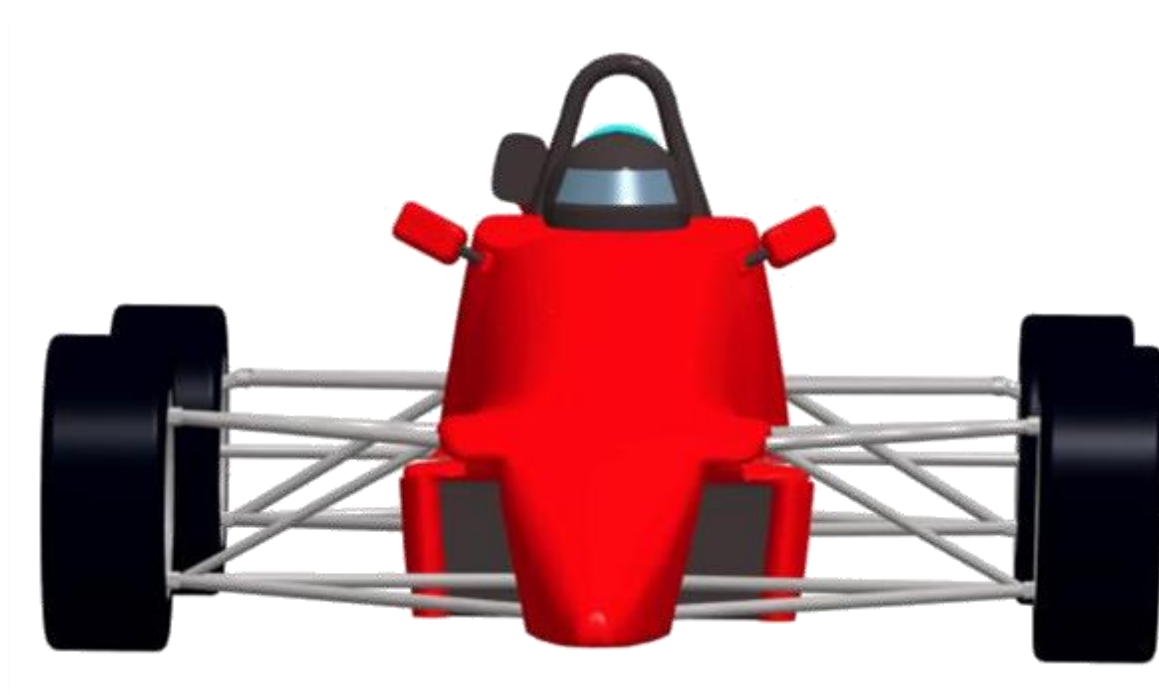
Obr. 7.12. Boční fotografie reálné Formule Ford



Obr. 7.13. Boční pohled na model Formule Ford



Obr. 7.14. Čelní pohled na reálnou Formuli Ford



Obr. 7.15. Čelní pohled na model Formule Ford

8. Základní pojmy aerodynamiky

V následujícím odstavci budou vysvětleny a definovány základní pojmy a mechanismy, které jsou nutné pro pochopení vzniku a působení aerodynamického tlaku na vozidlo.

Hustota

Hustota každého materiálu je definována jako poměr jeho hmotnosti k objemu. U plynů tato vlastnost závisí na tlaku a teplotě. Naštěstí se naprostá většina automobilů, včetně závodních aut pohybuje rychlostí, která dosahuje maximálně jedné třetiny rychlosti zvuku. Pro rozsah těchto rychlostí jsou změny teploty a tlaku malé, proto mohou být změny hustoty zanedbány. Také proto můžeme považovat pro tyto účely vzduch jako nestlačitelný. Při atmosférickém tlaku $P_a = 101325 \text{ Pa}$ a teplotě $T = 20 \text{ °C}$ je hodnota hustoty vzduchu $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$.

Viskozita (Vazkost)

Viskozita charakterizuje vnitřní tření mezi jednotlivými molekulami. Viskozita udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami proudící kapaliny.

Vztah pro výpočet viskozity:
$$\mu = \frac{\tau}{\delta v / \delta y}, \quad (8.1)$$

kde τ značí třecí sílu vztaženou na jednotkovou plochu (tečné napětí) N/m^2 ,

$\delta v / \delta y$ značí gradient rychlosti podél normály vedené v daném bodě na uvažovanou plochu tření.

Při atmosférickém tlaku $P_a = 101325 \text{ Pa}$ a teplotě $T = 20 \text{ °C}$ je hodnota viskozity pro vzduch $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{sec/m}^2$.

Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu, tzn. růst odporu prostředí v důsledku vnitřního tření. Když Reynoldsovo číslo přesáhne jistou mezní hodnotu, začíná docházet k turbulentnímu proudění, je možná existence obou proudění zároveň.

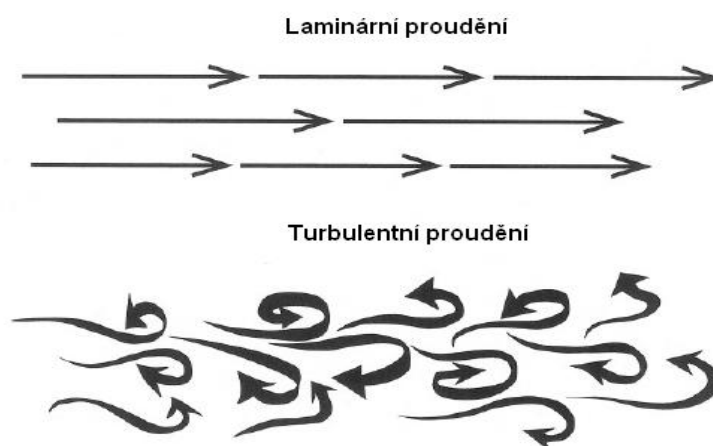
Vztah pro výpočet Reynoldsova čísla:
$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}, \quad (8.2)$$

kde ρ značí hustotu prostředí, μ viskozitu, V značí rychlost a L je délka, v našem případě délka vozidla.

Laminární a turbulentní proudění

Laminární proudění lze chápat jako proudění, kde kdybychom sledovali jednotlivé molekuly proudícího vzduchu a směr pohybu jednotlivých částic, byl by rovnoběžný, všechny částice by se pohybovaly průměrně stejnou rychlostí a jejich pohyb by byl uspořádaný. Takové proudění je znázorněno v horní části Obr. 8.1.

Oproti tomu můžeme mít částice se stejnou průměrnou rychlostí proudění, ale k tomuto pohybu ve směru proudění se částice pohybují v každém okamžiku v dalších směrech, pak se toto proudění nazývá turbulentní proudění. To je znázorněno v dolní části Obr. 8.1.



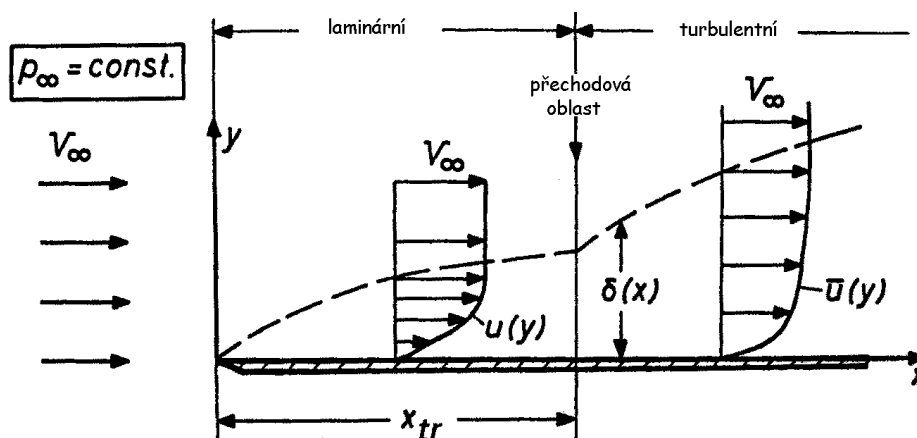
Obr. 8.1. Laminární a turbulentní proudění [3]

Mezní vrstva

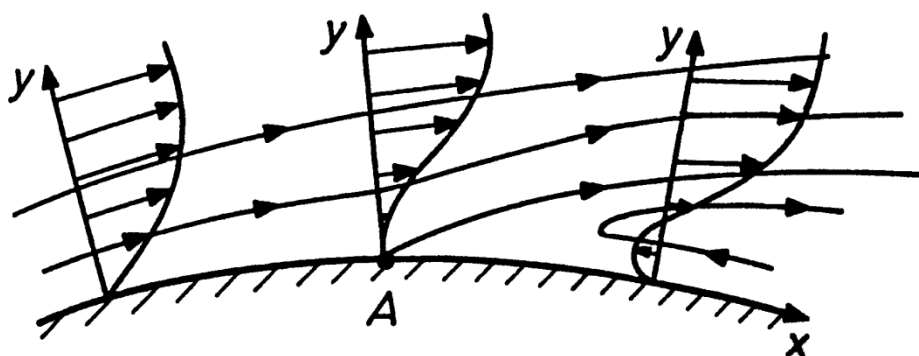
Mezní vrstva vzniká v reálném prostředí na povrchu každé obtékané součásti. Tloušťka mezní vrstvy roste se vzdáleností od počátku obtékaného tělesa. Rychlost uvnitř této mezní vrstvy se mění a to od nulové hodnoty na povrchu obtékané součásti (působením viskozity) až po rychlost okolí na okraji mezní vrstvy.

Změna rychlostního spádu uvnitř vrstvy určuje, jde-li o laminární nebo turbulentní mezní vrstvu, jak je znázorněno na Obr. 8.2. Obvykle na obtékaném tělese začíná mezní vrstva vždy jako laminární, ale s narůstající délkou součásti se proudění mění na turbulentní. U turbulentního proudění má laminární vrstva vždy větší tloušťku.

Pokud dochází u reálných těles k postupnému nárůstu tlaku ve směru proudění, tok v mezní vrstvě se zpomaluje ve směru k obtékanému tělesu, dokonce může dojít k obrácenému proudění. Toto chování je zobrazeno na Obr. 8.3., kde je mezi dopředným a obráceným prouděním v místě A zobrazené odtrhávající se proudění. Turbulentní mezní vrstva vydrží větší tlakové rozdíly bez odtrhnutí, díky turbulentnímu proudění, které neustále dodává energii z vnější vrstvy do vnitřní vrstvy přiléhající ke stěně. Pokud dochází ve směru proudění ke snižování tlaku, potom nejsou žádné tendence k odtrhávání mezní vrstvy.



Obr. 8.2. Znázornění laminární a turbulentní mezní vrstvy [1]



Obr. 8.3. Vznik obráceného proudění [1]

Pro závodní automobily je vždy lepší udržet laminární mezní vrstvu na velkých plochách kvůli ztrátám prouděním u turbulentního proudění. Avšak v případech, kde by docházelo k odtrhávání mezní vrstvy vlivem různých zakřivení povrchu (např. na křídlech), je lepší zvolit turbulentní proudění i za cenu ztrát s tímto spojených, než dopustit odtržení mezní vrstvy (např. ztratit přítlak na křídle).

Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice může být použita jak na laminární, tak i na turbulentní proudění. Podél kteréhokoliv bodu na proudnici udává vztah mezi statickým tlakem p , hustotou ρ a rychlostí proudění V .

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = konst. \quad (8.3.)$$

Z této rovnice plyne, měníme-li rychlost proudícího vzduchu okolo objektu, potom se tlak na součást mění nepřímo úměrně se čtvercem rychlosti proudícího vzduchu. Pokud bychom tedy chtěli snížit tlak působící na vozidlo, musíme zvýšit rychlost obtékajícího vzduchu.

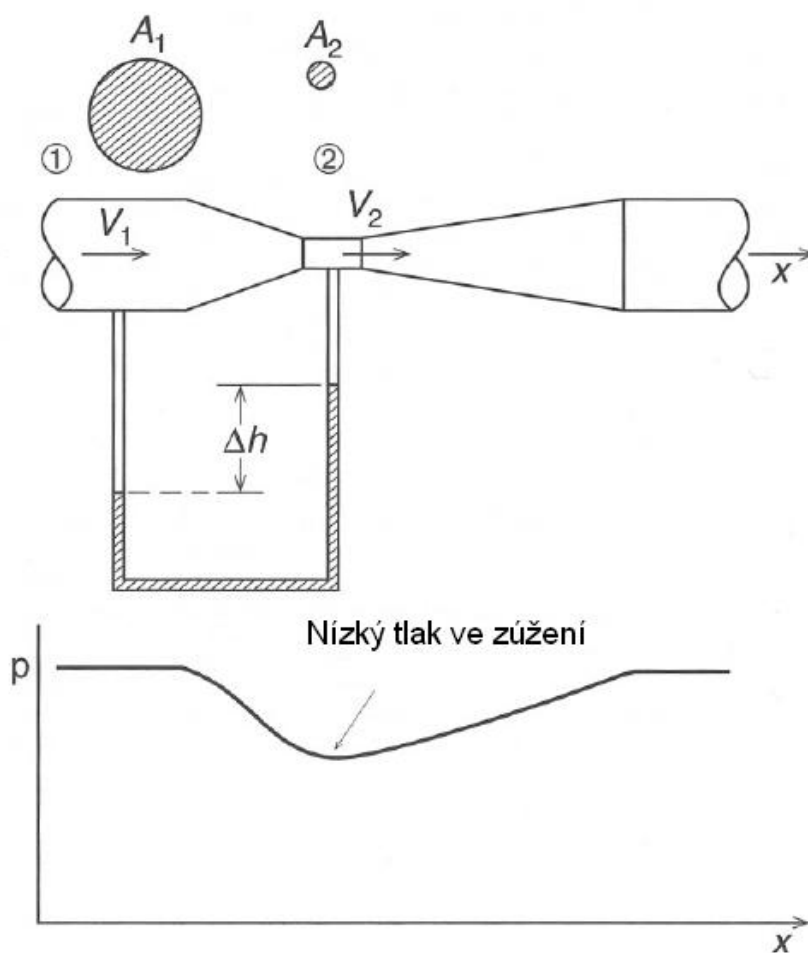
Venturiho trubice

Venturiho trubice je zařízení k měření rychlosti. Je to trubice se zúženým středem, jak je zobrazená na Obr. 8.4. Pokud trubicí protéká vzduch, dostává se do užší části, kde vzduch zrychluje a jak vyplývá z Bernoulliho rovnice, vzniká v tomto místě nižší tlak než na vstupu. Proto je hladina tekutiny v části spojené se středem užší části trubice výš, než hladina v trubicí na vstupu. Průběh tlaků ve Venturiho trubicí je znázorněn ve spodní části Obr. 8.4. Rozdíl hladin tedy může udávat rychlost.

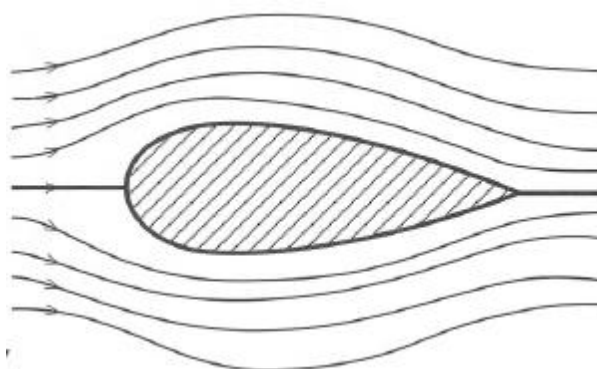
V automobilovém průmyslu se s Venturiho efektem můžeme setkat na více místech. Využití má v některých typech karburátorů. Nebo také v různých difuzorech a tunelech v podlaze vozidla pro vytvoření podtlaku a omezení vztahové síly a tím zlepšení stability vozidla.

Proudnice

Proudnice je trajektorie uvažované částice vycházející z bodu dostatečné vzdálenosti před vozidlem, pokud se za předpokladu konstantní rychlosti další částice procházející tímž bodem bude pohybovat po stejné trajektorii jako předcházející. Soubor proudnic potom tvoří obraz obtékání, jak je znázorněno na Obr. 8.5.



Obr. 8.4. Venturiho trubice a zobrazení průběhu tlaku [3]



Obr. 8.5. Proudnice obtékající profil křídla [3]

9. Aerodynamika vozidel

Aerodynamika vozidel se dá rozdělit na aerodynamiku vnitřní, zkoumající jak tok vzduchu motorem a dalšími komponenty, tak i klima uvnitř vozidel. Dále aerodynamiku vnější, která zkoumá rozložení tlaku na vozidle, aerodynamické odpory a síly. Obě tyto části se mohou v některých oblastech prolínat. Tok vzduchu komponenty vozidla souvisí s celkovým tokem vzduchu okolo celého vozidla.

Obtékání vzduchu okolo vozidel je velice důležité, pokud bude vzduch klást vozidlu menší odpor při jízdě, potom vozidlo může cestovat vyšší rychlostí při stejném výkonu. Při cestování vozidel vysokou rychlostí musí být kladen důraz na vytvoření dostatečné přitlačné síly na vozidlo směrem k vozovce a omezení vztahové síly směrem od vozovky.

9.1. Aerodynamické síly působící na vozidlo

Na vozidlo při jízdě působí dva základní druhy aerodynamických sil. Do první kategorie spadají síly od aerodynamického tlaku na vozidle působící normálově na plochy, které způsobují vztahovou sílu na vozidla a částečně i odpor. Další působící silou je tření, které působí rovnoběžně s plochami a přispívá k celkovému odporu vozidla.

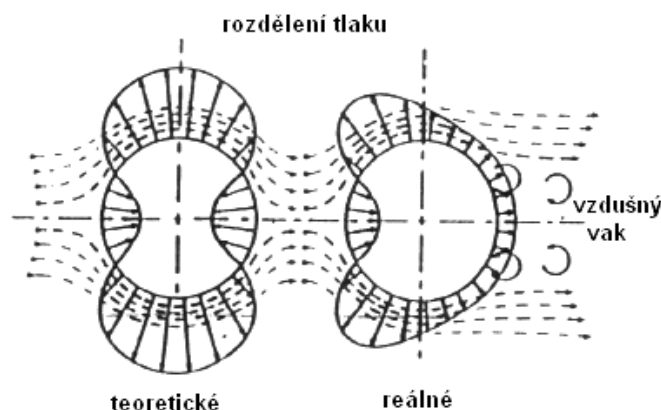
9.2. Aerodynamický odpor

Aerodynamický odpor na vozidle lze rozdělit:

- tvarový odpor (tlakový 50 až 80%, třecí 5 až 10%),
- indukovaný odpor v důsledku aerodynamického vztahu 3 až 10%,
- odpor příslušející interferenčním účinkům mezi základním tvarem a různými detaily karoserie 10 až 20%,
- odpor rotujících kol 5%,
- odpor vzniklý průchodem vzduchu systémem chlazení, topení a větrání 10 až 20 %.

9.2.1. Tvarový tlakový odpor

Ve skutečném prostředí při obtékání tělesa nastává odtržení proudu vzduchu a vzniká vzduchový vak za tělesem. Aerodynamický odpor je dán součtem podélných složek tlakových sil, rozdělení tlaků na reálném a teoretickém tělese je na Obr. 9.1. Vzniká oblast aerodynamického přetlaku a aerodynamického podtlaku. Reálné obtékání tělesa je ovlivněno mnoha faktory, jedním z nejdůležitějších je mezní vrstva.



Obr. 9.1. Rozložení vzniklých aerodynamických statických tlaků [4]

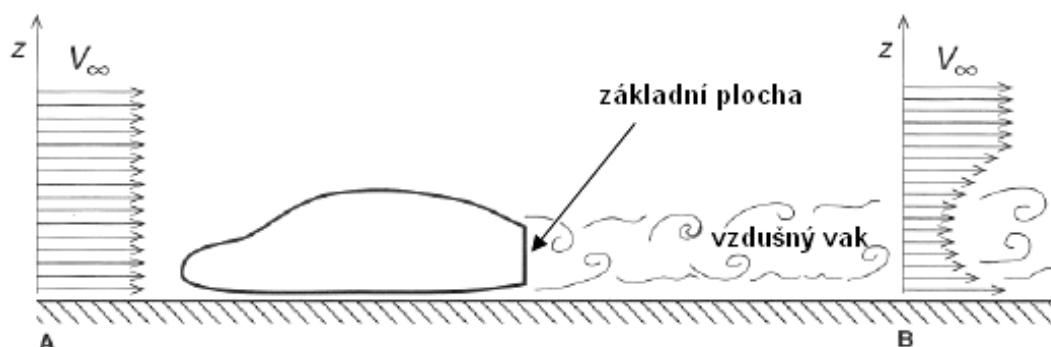
9.2.2. Odtržení proudu vzduchu

Rovina maximálního příčného průřezu dělí vozidlo na dvě oblasti proudu vzduchu. V první polovině se proud vzduchu urychluje a klesá statický tlak i tlakový spád, což je z hlediska odtržení vzduchu příznivé. V druhé polovině se proud vzduchu zpomaluje, zvyšuje se tlak a roste i tlakový spád, tím vzniká vzduchový vak za vozidlem.

K částečnému odtržení proudu vzduchu také dochází na rozhraní přední kapoty a čelního skla vlivem tlakového rozložení, kde velikost odtržené oblasti závisí na úhlu mezi kapotou a čelním sklem.

9.2.3. Vzduchový vak

Další odpor na vozidle vzniká rozvířenou vrstvou za vozidlem, která vzniká odtrženým prouděním, tak zvaným vzdušným vakem viz. Obr. 9.2. V oblasti vzduchového vaku působí negativní tlak na základní plochu ve směru proti pohybu tělesa, proto jsou snahy o co nejmenší základní plochu. Základní aerodynamický odpor je dán velikostí základní plochy.



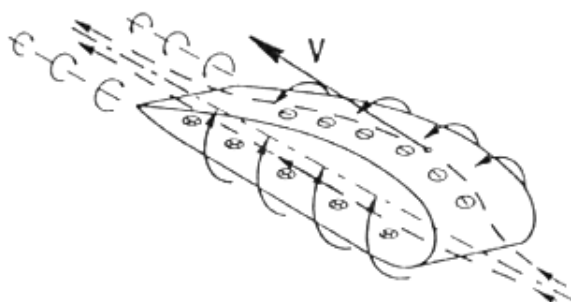
Obr. 9.2. Vznik vzdušného vaku [3]

9.2.4. Proudění vzduchu mezi vozovkou a karoserií

Vozovka mění podstatně obtékání automobilu. Teoreticky by rychlost mezi obtékaným tělesem a vozovkou měla být zvyšována, což by vedlo k negativnímu vztlaku. Ve skutečnosti se ale vlivem viskozity mění smysl svislé síly a působí směrem nahoru. Na začátku mezery mezi vozidlem a vozovkou dochází ke zrychlení proudu vzduchu proti vozidlu, ale pak je vlivem viskozity vzduch strháván ve směru pohybu vozidla. V závislosti na světlé výšce vozidla se mezní vrstva na karoserii dotkne země v jiné vzdálenosti od hrany vozu a splyne se vzdušným vakem.

9.2.5. Indukovaný odpor v důsledku aerodynamického vztlaku

Při pohybu vozidla jsou na jeho povrchu rozloženy statické tlaky a vzduch má tendenci se přemísťovat z míst s vysokým tlakem do míst s nižším tlakem. Proto má vzduch proudící pod vozidlem tendenci přejít a spojit se se vzduchem obtékající boční povrch karoserie, podobně jak je na Obr. 9.3. Tímto mechanismem vznikají boční víry u vozidel. Tlakové rozdíly určují velikost aerodynamického tlaku. Boční víry jsou postupně vstřebávány vzdušným vakem za vozidlem, což vede ke snížení statických tlaků za vozidlem a ke zvyšování aerodynamického odporu. Působení tlakových vírů vede k odklonění vztlakové síly o malý úhel dozadu vozu.



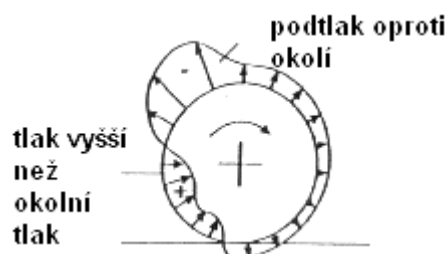
Obr. 9.3. Vznik bočních vírů [4]

9.2.6. Interferenční účinky mezi základním tvarem a dalšími detaily karoserie

Interferenční účinek je ovlivnění proudění vzduchu po povrchu dalším členem, který rozrušuje aerodynamický tok, například zpětné zrcátko na karoserii automobilu. Největší interferenční účinek je při nulové vzdálenosti mezi zrcátkem a základním tělesem. Dalším příkladem může být např. předový spoiler, který má sám velký aerodynamický odpor, ale příznivě ovlivní proudění pod vozidlem a tím sníží celkový aerodynamický odpor vozidla.

9.2.7. Odpor rotujících kol

Kola vystavená proudu vzduchu mají značný aerodynamický odpor vlivem vzniku vírů a turbulentního vzduchového vaku. Rozložení statických tlaků na rotujícím kole je zobrazeno na Obr. 9.4. Dvojnásobná rychlost horní části kola oproti rychlosti pohybu vozidla způsobuje rychlé odtržení proudu vzduchu ještě před vrcholem kola. Tím vzniká velký vzduchový vak a vysoký aerodynamický odpor. Boční obtékání je komplikované, velké množství vírů odtékajících směrem dolů způsobují další aerodynamický odpor. Rotující kola také způsobují aerodynamický vztlak.



Obr. 9.4. Rozložení tlaku na rotujícím kole [4]

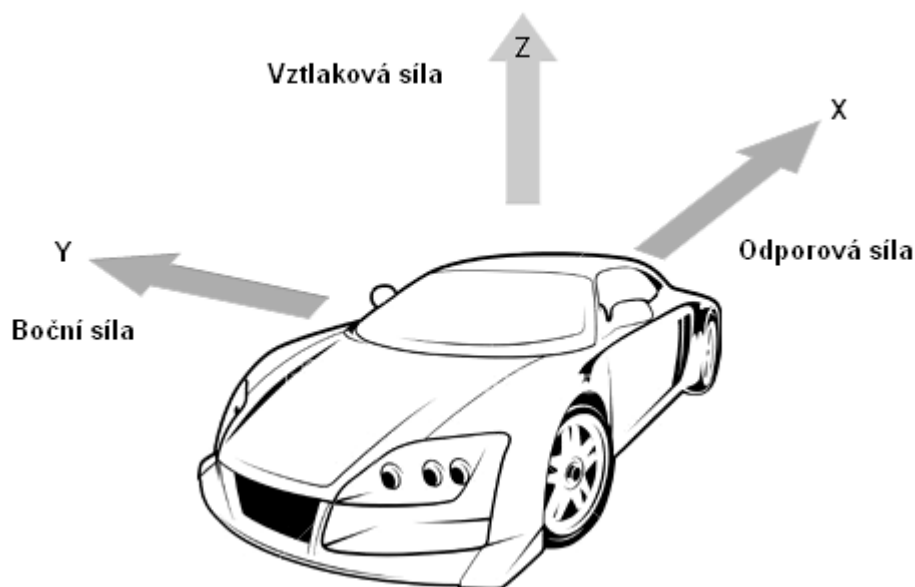
9.3. Odporová síla, vztlaková síla a boční síla

Síly od aerodynamického tlaku na povrchu vozidla, které působí normálově na povrch vozidla, způsobují vztlakovou sílu, boční sílu a částečně i odporovou sílu. Působení těchto sil je na Obr. 9. 5. Nejběžnější působící síly na vozidlo jsou vztlaková a odporová síla, boční síla je důležitá v případech silného bočního větru, v některých případech závodních vozidel jsou vozidla tak rychlá, že efekt bočního větru je zanedbatelný.

Směr odporové síly je rovnoběžný se směrem pohybu vozidla a míří proti pohybu vozidla, vztlaková síla míří vzhůru normálově k vozovce.

Od těchto sil na vozidlo potom působí momenty. Pro motoristy nejdůležitější moment klonění okolo osy y, pozitivní moment klonění zvedá předek vozidla.

Poměr mezi přední a zadní nápravou je velice důležitý, ovlivňuje vysokorychlostní stabilitu vozidla. Ideální rozložení zatížení na vozidlo je 40% na přední nápravu a 60% na zadní nápravu.



Obr. 9.5. Síly působící na vozidlo

Pro porovnání účinků sil na vozidlo byly zavedeny koeficienty:

koeficient odporu:
$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A}, \quad (9.1.)$$

koeficient vztlaku:
$$C_l = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A}, \quad (9.2.)$$

koeficient boční síly:
$$C_y = \frac{F_Y}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 A}, \quad (9.3.)$$

kde F_d je odporová síla, F_Y je boční síla, F_L je vztlaková síla působící na vozidlo, V_∞ je rychlost vozidla, ρ je hustota vzduchu a A je čelní plocha vozidla.

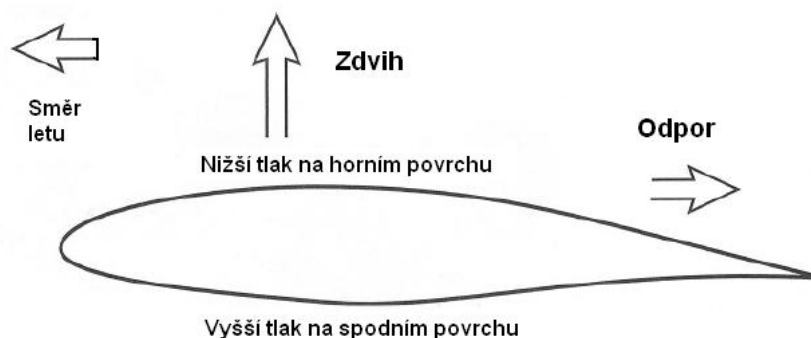
Dále byl zaveden koeficient povrchového tření, tj. odpor na vozidle v mezní vrstvě, kdy v místě, kde vzniká turbulentní proudění se mezní vrstva stává tlustější a ztráta energie v této mezní vrstvě je větší než v laminární mezní vrstvě. Turbulentní tření na povrchu je větší, a tím je větší i odpor vozidla.

koeficient povrchového tření:
$$C_f = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2}, \quad (9.4.)$$

kde τ je smyková síla na jednotku povrchu (třecí odpor), je bezrozměrný a velikost je určena velikostí dynamického tlaku $\frac{1}{2}\rho V_\infty^2$, takže hodnota C_f je také nezávislá na rychlosti.

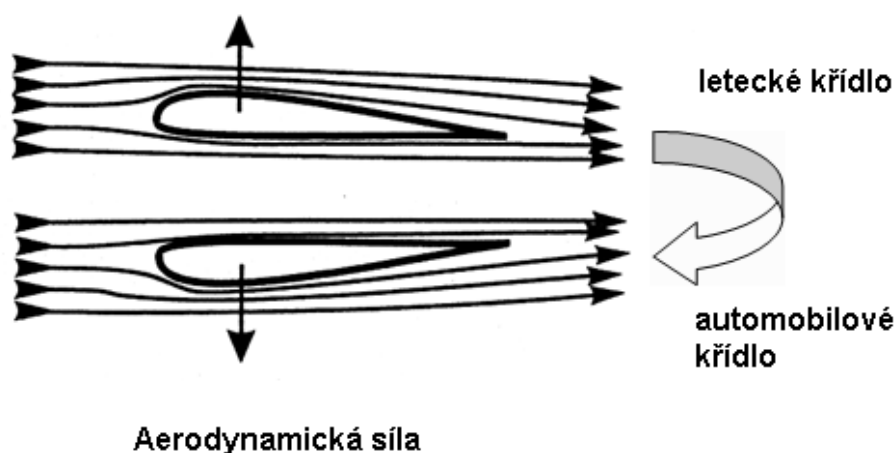
Pro pochopení, jak může být vytvořena přítlačná síla na povrchu vozidla je vhodné vysvětlení na leteckém křídle na Obr. 9.6., kde díky tvaru křídla vzduch obtéká horní část křídla vysokou rychlostí a tudíž je na horní části menší tlak, oproti tomu je spodní část křídla obtékána menší rychlostí, takže na spodní straně křídla je tlak vyšší. Rozdíl těchto tlaků potom pomáhá udržet letadlo ve vzduchu. Při vzniku síly působící nahoru, tedy zdvihu,

vzniká ale i odpor na křídle, což je síla působící proti směru pohybu. Tento odpor je obvykle mnohonásobně menší než zdvih a může být omezen správným obtékáním tělesa.



Obr. 9.6. Působení sil na profilu leteckého křídla

Z tvaru leteckého křídla jsou odvozena přitlačná křídla automobilů, jeho otočením tak, aby zdvihová síla působila směrem dolů a vytvářela přitlačnou sílu, jak je znázorněno na Obr. 9.7.



Obr. 9.7. Profil leteckého a automobilového křídla [3]

10. Způsoby měření aerodynamiky

Měření aerodynamiky vozidel je možné několika způsoby, je možné měřit aerodynamiku jízdním testem v běžném prostředí, dále existují testy v aerodynamických tunelech a v poslední době díky rychlému rozvoji výkonné výpočetní techniky i simulace ve výpočetních programech.

Výsledky měření aerodynamiky by měly obsahovat minimálně tyto údaje:

- aerodynamické koeficienty jako koeficienty odporu, koeficienty vztlaku, atd.,
- rozdělení tlaku na povrchu vozidla, což slouží jako základ pro návrh změny tvaru kapoty vozidla,
- vizualizace toku vzduchu po povrchu vozidla, jako např. proudnice, které určí, kde se tok vzduchu odtrhává od vozidla.

10.1. Silniční testy

Silniční testy mají v sobě jednu velkou výhodu a tou je, že lze testovat reálné vozidlo za reálných podmínek. Také efekt různých dílčích změn může být rychle vyhodnocen měřením maximální rychlosti vozidla nebo rychlosti při průjezdu zatáčkou.

Nevýhodou může být, že všechna měření se provádějí na jedoucím vozidle, proto všechna měřicí zařízení musí být umístěna ve vozidle. Dalším problémem je opakovatelnost zkoušek, díky vlivu povětrnostních podmínek.

Měření vztlaku jsou založená na měření pohybu tlumiče nebo napětí vlivem aerodynamického zatížení.

Měření aerodynamického odporu vozidla je komplikovanější, protože odpor pohybu vozidla klade i hnací ústrojí a odvalující se kola. Proto je potřeba znát odpor valení kol například od výrobce. Existuje také možnost změřit si tyto odpory umístěním vozu do vlečené uzavřené schránky, tím se izoluje vozidlo od aerodynamických odporů a vlečením vozu v této schránce mohou být změřeny všechny odpory kladené vozidlem vyjma aerodynamického odporu.

Měření statického aerodynamického tlaku se provádí navrtáním malých dírek kolmo na povrch vozidla. Tyto dírký jsou spojeny s měřicím čidlem. Měření dynamického tlaku, který je potřeba pro výpočet koeficientu tlaku, se provádí například pitotovou trubicí. Riziko, kterou má tato metoda je, že hrozí ucpání dírek nečistotou nebo hmyzem.

Vizualizace toku vzduchu po povrchu vozidla může být provedena mnoha způsoby. Nejběžnějším způsobem bývá připnutí krátkých strun jedním koncem na povrch vozidla, které se jednoduše tvarují ve směru toku vzduchu. Dalším způsobem může být pozorování stop zanechaných viskózní tekutinou, například olejem nebo barvivem, které je rozmazáno po povrchu vlivem toku vzduchu.

10.2. Aerodynamické tunely

Základní myšlenkou vzniku aerodynamických tunelů bylo namísto pronásledování letadel nebo jedoucích automobilů s měřicím zařízením, přemístit tyto testy na místo, kde se bude vzduch pohybovat relativně okolo stacionárního tělesa. Navíc aerodynamické tunely umožňují testování za stále stejných podmínek, takže nejsou ovlivněny počasím. Možné je v tunelech testovat i modely ve zmenšeném měřítku, což umožňuje provádět studie a následné změny na výrobcích ještě ve fázi výroby, které by se později mohli mnohonásobně prodražit.

Aerodynamické tunely jsou momentálně primárním nástrojem pro měření aerodynamiky automobilů.

Pro testování automobilů v aerodynamických tunelech je důležité:

- velikost modelu a velikost testovací sekce (aby nedocházelo k ovlivnění toku vzduchu přílišnou blízkostí stěn tunelu),
- simulace pohyblivé vozovky,
- upevnění modelu s možností rotujících kol.

Naměřená data obsahují vztlakovou, odporovou a boční sílu, také momenty klopení, klonění a stáčení. Dále rozdělení zatížení na přední a zadní nápravu. Také je důležitá vizualizace proudění, která se provádí podobně jako při silničním testování, v tunelu ale nemáme pohyblivé okolí, proto je zajímavá i další možnost umístit do toku vzduchu trysky, ze kterých vychází kouř a vytváří tak proudnice.

10.3. CFD metody

Výpočtové metody se dostávají do popředí v poslední době s růstem výkonu dostupné výpočetní techniky. CFD metodami lze relativně rychle a levně ve srovnání s testy v aerodynamickém tunelu určit trendy u vyšetřované součásti. Hlavní výhodou výpočtových metod je možnost ověřit si návrh a případné změny ještě ve fázi návrhu, kdy je součást ještě model v CAD softwaru. Výpočetní metody také slouží jako diagnostický nástroj pro vylepšení vlastností již existujících vozidel.

Výhodou výpočetních metod je také, že jako výsledek dostaneme nejen veličiny, které je možno naměřit na reálných modelech, ale například i vektorové rozdělení rychlostního pole, stejně tak i proudnice. Tyto informace daleko více ulehčí rozhodování například o vhodnosti umístění sání motoru apod.

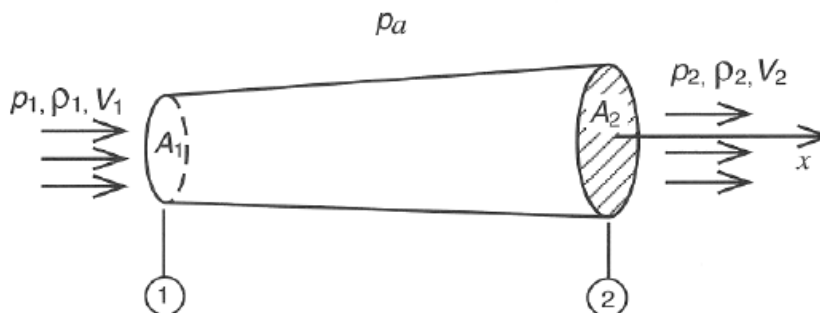
Výpočtové metody se řídí základními fyzikálními principy, jako zákonem zachování hmoty a energie. Řešení proudění vozidla bez uvažování teplotních změn je možné za pomoci dvou druhů rovnic.

První rovnice udává zachování hmoty a je to rovnice kontinuity. Princip této funkce je vysvětlen na proudové trubici, která je zobrazena na Obr. 10.1. Vstup vzduchu prochází jen plochou A_1 a vystupuje jen plochou A_2 . Potom hustota v místě 1 je ρ_1 a rychlost proudění je V_1 . Pak je hmotnostní tok $\dot{m}$ vstupní plochou:

$$\dot{m}_1 = \rho_1 V_1 A_1 \quad (10.1.)$$

a jednotkou může být zpravidla kg/s. Tečka nad $\dot{m}$ značí hmotnostní tok za jednotku času. Rovnice kontinuity udává, že při ustáleném proudění se vstupující hmota musí rovnat vystupující hmotě, tedy $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Takže dolní index 1 nebo 2 může být vynechán. Při lokální rychlosti a hustotě může být rovnice kontinuity přepsána jako:

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (10.2.)$$



Obr. 10.1. Proudová trubice [3]

Druhou rovnicí je rovnice zachování momentu:

$$\sum F = \frac{d}{dt}(mV), \quad (10.3.)$$

kde $\sum F$ znamená součet všech působících sil a $\frac{d}{dt}$ je derivace dle času. Pokud bychom tuto rovnici aplikovali opět na naši proudovou trubici, dostaneme:

$$\sum F = \dot{m}_2 V_2 - \dot{m}_1 V_1 = \dot{m}(V_2 - V_1),$$

$$\text{pokud } \dot{m}_1 = \dot{m}_2. \quad (10.4.)$$

Síly v plynu pak mohou být od tlaku, tření, gravitace nebo dalších externích sil. Pokud se omezíme na síly pouze od tlaku a další síly označíme F , můžeme pro směr osy x přepsat rovnici do tvaru:

$$\sum F = F + (p_1 - p_a)A_1 - (p_2 - p_a)A_2, \quad (10.5.)$$

kde p_1 a p_2 jsou statické tlaky v průřezích 1 a 2 a p_a je referenční tlak okolí. Dosazením z předchozí rovnice [10.5.] do [10.4.] dostaneme:

$$F + (p_1 - p_a)A_1 - (p_2 - p_a)A_2 = \dot{m}(V_2 - V_1), \quad (10.6.)$$

úpravou pak dostaneme:

$$F = (p_2 - p_a)A_2 - (p_1 - p_a)A_1 + \dot{m}(V_2 - V_1) \quad (10.7.)$$

a z toho potom také:

$$F = (p_2 - p_a)A_2 - (p_1 - p_a)A_1 + \rho_2 V_2^2 A_2 - \rho_1 V_1^2 A_1. \quad (10.8.)$$

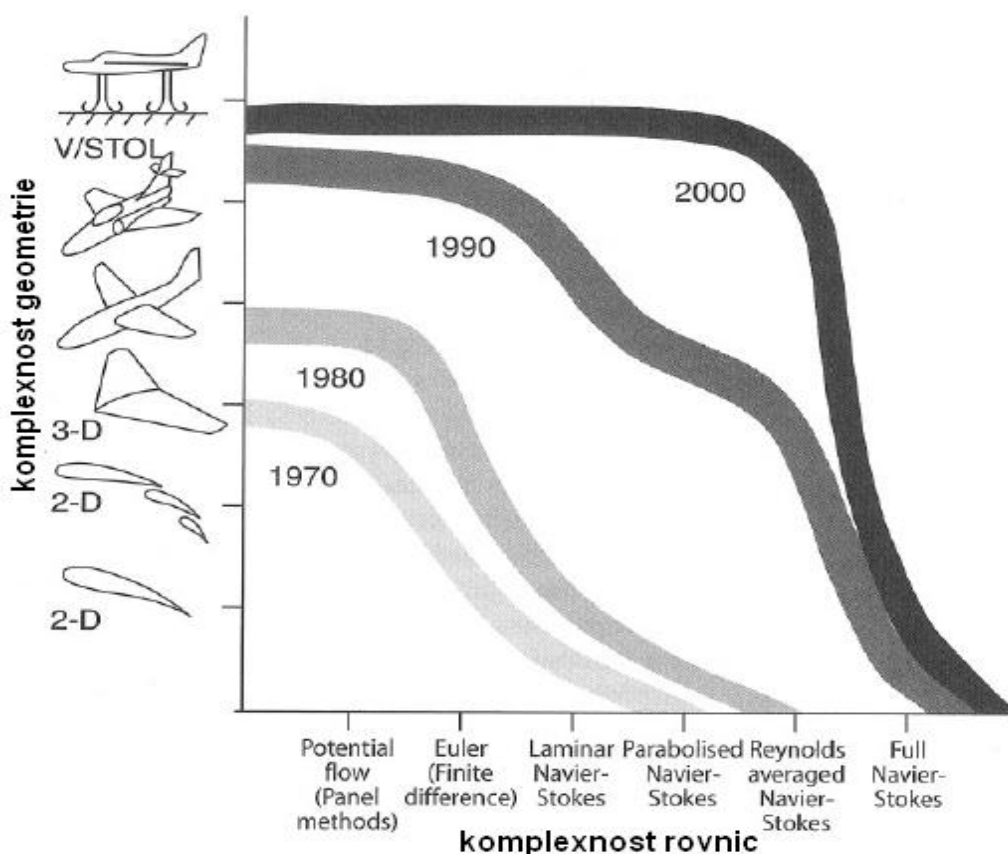
Z těchto rovnic už můžeme jednoduše dopočítat výstupní rychlost z trubice za předpokladu, že například vstupní rychlost je stejná jako rychlost pohybu vozidla jako

$$V_2 = V_1 \frac{\rho_1 A_1}{\rho_2 A_2}. \quad (10.9.)$$

Obdobným způsobem je možné spočítat i působící síly.

Rozdíl mezi různými řešiči je v úrovni jejich fyzikální přesnosti, některé například mohou zanedbávat viskozitu nebo časovou závislost turbulentního proudění. Další rozdíly mohou být v numerickém vyhodnocení parciálních diferenciálních rovnic nebo v metodě tvoření sítě. Také s požadovanou komplexností metody/modelu je požadováno více výpočetní síly s tím, že se blíží více reálné fyzice.

Dnešní nejpokročilejší metody jsou založeny na řešení Navier-Stokesových rovnic, které umí simulovat i efekt viskozity, tření a odtržení toku vzduchu. Postupný vývoj metod a řešení komplexních modelů je schematicky znázorněn na Obr. 10.2.



Obr. 10.2. Vývoj komplexnosti řešené geometrie a rovnic [3]

Doplňkové použití CFD spolu se silničními testy a testy v aerodynamických tunelech se stávají důvodem pro používání CFD metod v automobilovém průmyslu v posledních letech. Vypočtené hodnoty a vizualizace mohou vysvětlit data obdržena z měření

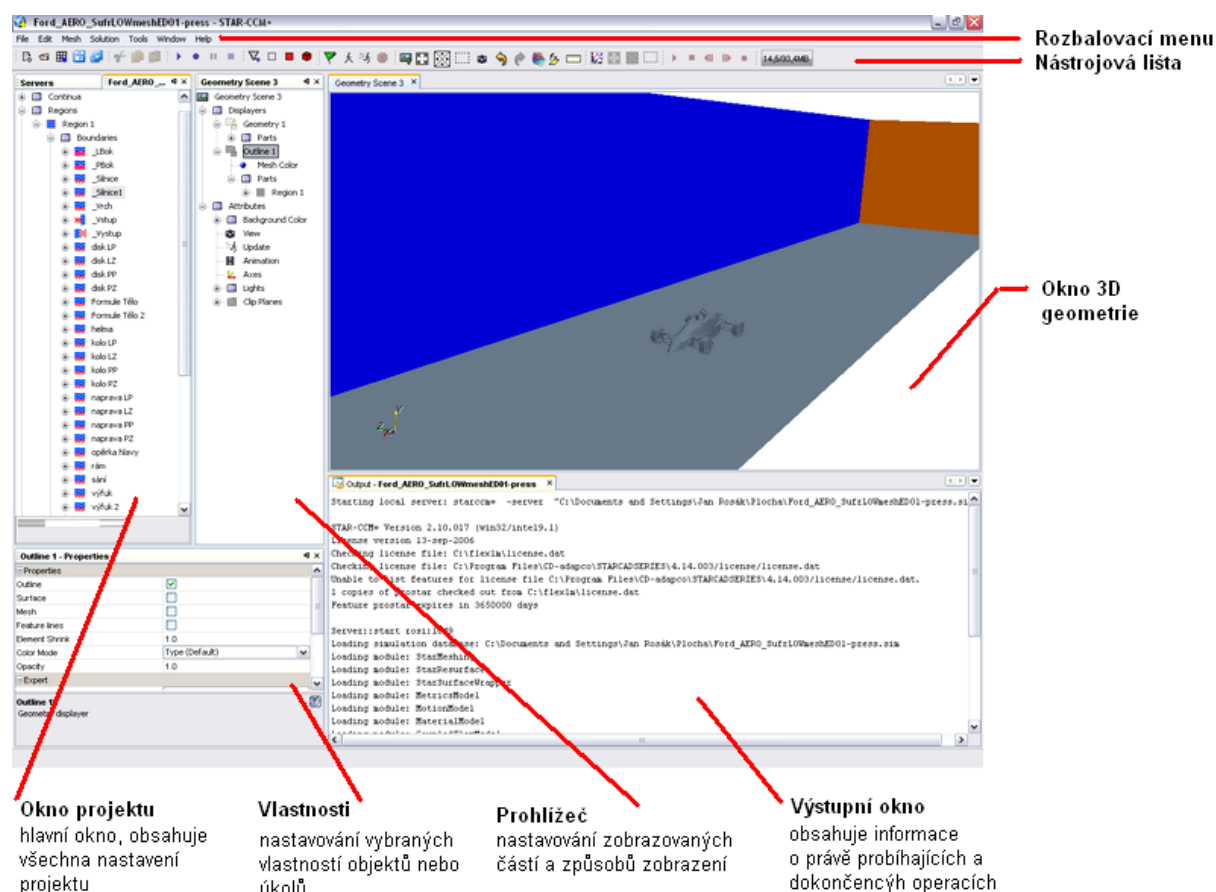
v aerodynamických tunelech a ušetřit tak čas při vývoji. Navíc, jak se poměr výpočetní výkon/cena neustále zlepšuje, použití takovýchto virtuálních experimentálních nástrojů se neustále v automobilovém průmyslu zvyšuje.

11. Star-CCM+

V dnešní době jsou pro CFD výpočty nejrozšířenější hlavně programy CFX firmy ANSYS a Fluent nově koupený firmou ANSYS a dále software firmy CD-adapco Star-CCM+. Pro svou dostupnost byl vybrán software právě firmy CD-adapco Star-CCM+.

První vydání programu Star-CCM+ založené na objektovém programování vyšlo v roce 2004 a pracuje s Java klientem, který běží na uživatelské stanici připojené k serveru běžícím buď na stejné nebo jiné stanici. Tak stačí jeden výkonný výpočetní cluster a pomocí připojeného běžného počítače může uživatel vidět výsledky, spouštět výpočty nebo provádět změny v nastavení úkolu.

Pracovní prostředí programu Star-CCM+ je znázorněno na Obr. 11.1.



Obr. 11.1. Prostředí programu Star-CCM+

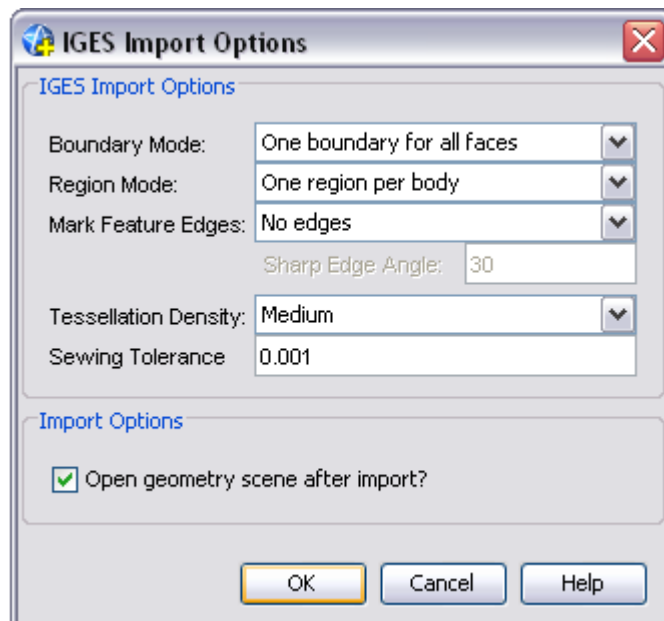
11.1. Importování modelu do Star-CCM+

Do programu Star-CCM+ je možno importovat velké množství formátů, avšak z CAD aplikací lze importovat jen povrchy ve formátu:

- *.igs/*.iges (výchozí grafický výměnný specifikační soubor),
- *.stp/*.step (standardizovaný výměnný soubor produktu),
- *.x_t/*.x_b (přenosný soubor Parasolidu),

pro náš účel byl vybrán formát IGES - *.igs.

Při importování povrchů byly nastaveny parametry dle Obr. 11.2.



Obr. 11.2. Nastavení parametrů importu

Jelikož Star-CCM+ simuluje proudění v uzavřených tělesech, bylo nejprve potřeba zpět v programu Pro/ENGINEER vytvořit vhodný aerodynamický tunel a umístit formuli Ford do tohoto tunelu. Aby nedocházelo k ovlivnění formule blízkostí stěn tunelu, byly rozměry tunelu voleny tak, aby byly alespoň:

- 4 délky formule od vstupu vzduchu do tunelu k formuli,
- 10 délek formule za formulí směrem k výstupu vzduchu z tunelu,
- 8 výšek formule ke stropu,
- 2 šířky formule na každou stranu směrem ke stěnám tunelu.

Takto vytvořený tunel s formulí byl uložen ve formátu *.igs v programu Pro/ENGINEER tak, že byly exportovány pouze plochy modelu.

Naimportovaný model nesmí obsahovat žádné volné hrany. Ty by později dělaly problémy při tvorbě sítě na modelu. Také všechny povrchy musí být uzavřeny, aby byla jasná jejich orientace vzhledem k proudění.

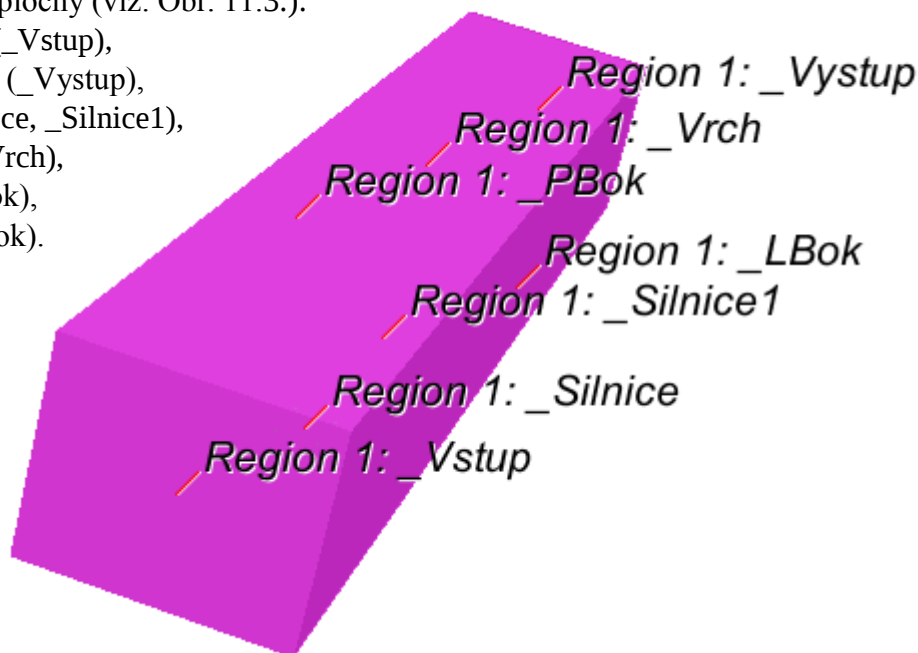
11.2. Příprava modelu pro výpočet ve Star-CCM+

Tunel společně s formulí tvoří jednu velkou plochu. Tuto plochu bylo potřeba rozdělit na oblasti, které budou mít různé vlastnosti, ať už jde o nastavení proudění nebo velikost základního prvku sítě.

Pro dělení ploch je potřeba si nejprve zobrazit hrany, dle kterých budou plochy děleny. Tyto hrany se zobrazí po kliknutí pravým tlačítkem na záložku *Regions* -> *Feature Curves* vybráním položek *New Feature Curves* -> *Mark Edges*. Tímto se zobrazí požadované hrany na modelu a v záložce *Regions* -> *Feature Curves* přibude nová položka obsahující hrany modelu. Jelikož je možno dělit povrch jen podle uzavřených hran a rozhodně nebylo třeba rozdělit povrch dle všech hran, vybereme si ze stávajících vybraných hran jen ty hrany, dle kterých chceme povrch dělit. Vybrání hran, dle kterých se měl povrch, se provede po kliknutí pravým tlačítkem na předchozím postupem vytvořené hrany a vybráním příkazu *Edit Existing Edges In Current Scene*.

Pomocí takto vytvořených hran byl model rozdělen na několik oblastí. Tunel byl rozdělen na následující plochy (viz. Obr. 11.3.):

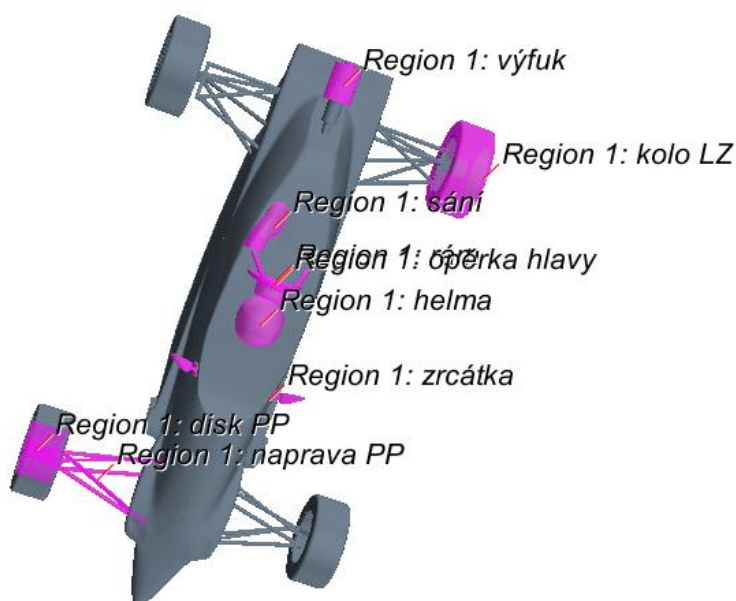
- Vstup vzduchu (_Vstup),
- Výstup vzduchu (_Vystup),
- Vozovka (_Silnice, _Silnice1),
- Strop tunelu (_Vrch),
- Levý bok (_LBok),
- Pravý bok (_PBok).



Obr. 11.3. Rozdělení tunelu na jednotlivé části

Formule byla následovně rozdělena na části viz. Obr. 11.4. (zobrazeny jen některé části pro přehlednost):

- Tělo Formule (Formule Tělo, Formule Tělo2, sání),
- Kola (kolo PP, kolo PZ, kolo LP, kolo LZ),
- Disky kol (disk PP, disk PZ, disk LP, disk LZ),
- Nápravy (naprava PP, naprava PZ, naprava LP, naprava LZ),
- Výfuk (výfuk, výfuk 2, výfuk 3),
- Opěrka hlavy (opěrka hlavy),
- Rám (rám),
- Zrcátka (zrcátka),



Obr. 11.4. Rozdělení formule na jednotlivé části

11.3. Nastavení fyzikálního modelu a podmínek modelu

Nastavení fyzikálního modelu bylo dle následující tabulky Tab. 5.

Tab. 5. Nastavení fyzikálního modelu

Model	Nastavení	Vysvětlení
Space	Three Dimensional	Nastavení 3D prostoru.
Motion	Stationary	Formule se vzhledem k tunelu nepohybuje.
Material	Gas	Simulace probíhá v plynném prostředí.
Flow	Coupled Flow	Model řešící na základě rovnic zachování hmoty a energie. Vhodný pro řešení nestlačitelného, izotermického proudění.
Equation of State	Constant Density	Předpoklad, že hustota je za každých okolností konstantní .
Time	Steady	Model pro výpočet ustálených stavů.
Viscous Regime	Turbulent	Simulace turbulentního proudění.
Reynolds-Averaged Turbulence	K-Omega SST	Dvourovnicový model silný v předpovědi turbulentního proudění v mezních vrstvách, volných třecích vrstvách i rychlost rozpadu tryskajících proudů.
All y+ Wall Treatment		Volí vhodný model výpočtu mezní vrstvy vzhledem k hustotě sítě.
Cell Quality Remediation		Pokouší se vyhledat buňky sítě nízké kvality a přiřadí jim nižší váhu důležitosti za účelem získání přesného řešení.

Aerodynamika je vyšetřována při rychlosti 50 m/sec, což je 180 km/hod. Na modelu byla nastavena rotující kola a posuvná vozovka. Nastavení se provedlo na částech modelu dle Tab. 6.

V blízkosti modelu formule byl dále umístěn bod – Monitor, pro sledování konvergenčních kritérií.

Tab. 6. Nastavení podmínek tunelu a formule

Část	Vlastnost	Vysvětlení
_LBok	Symmetry Plane	podélná symetrie modelu
_PBok		
_Silnice	Velocity	rychlost posuvu vozovky, tzn. 50 m/s
_Silnice 1		
_Vstup	Velocity Inlet	vstupující vzduch do tunelu
	Velocity Magnitude	rychlost vstupujícího vzduchu 50 m/s
_Vystup	Pressure Outlet	výstup vzduchu z tunelu
disk LP	Velocity	rotace kolem vlastní osy rychlostí 188,68 rad/s , což odpovídá rychlosti 50 m/s při uvažovaném poloměru kol
disk LZ		
disk PP		
disk PZ		
kolo LP	Velocity	rotace kolem vlastní osy rychlostí 188,68 rad/s , což odpovídá rychlosti 50 m/s při uvažovaném poloměru kol
kolo LZ		
kolo PP		
kolo PZ		

11.4. Tvorba sítě ve Star-CCM+

Nejprve se v programu Star-CCM+ tvoří povrchová síť, z této sítě vychází objemová síť.

11.4.1. Tvorba povrchové sítě

Povrchová síť je tvořena nástroji *Surface Remesher* a *Surface Wrapper*. *Surface Wrapper* připraví povrch převedený z CAD dat pro vytvoření sítě pomocí *Surface Remesheru*.

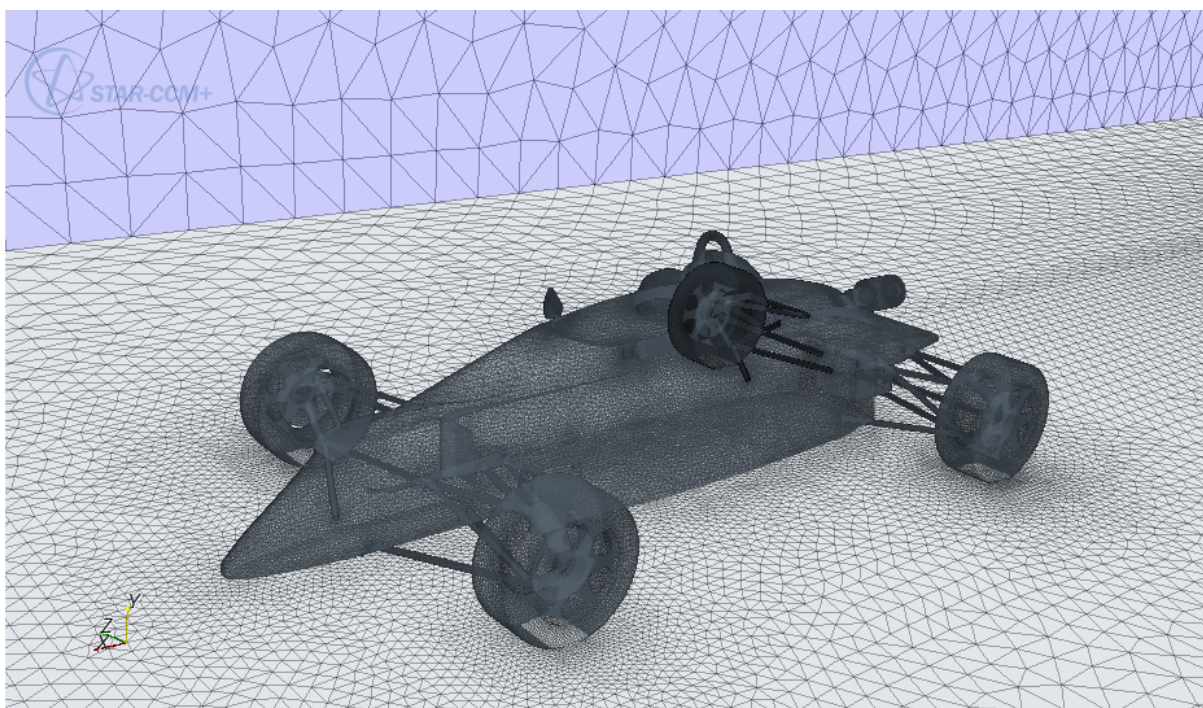
Volba velikosti základního prvku sítě je ovlivněna následným celkovým počtem vytvořených prvků. Cílová velikost a minimální velikost prvku sítě byla volena s ohledem na přesnost výpočtu a také tak, aby na sebe síť jednotlivých částí dobře navazovala. Základní rozměr prvku sítě (*Base Size*) byl nastaven na 5cm.

Tak jak byla formule rozdělena na jednotlivé části, těmto jednotlivým částem byla přiřazena základní velikost prvku sítě následovně:

část modelu	cílová velikost sítě	min. velikost sítě
• _LBok (levý bok tunelu)	0,8 m	0,2 m
• _PBok (pravý bok tunelu)	0,8 m	0,2 m
• _Silnice (cesta v okolí vozidla)	0,2 m	0,03 m
• _Silnice1 (zbytek cesty)	0,5 m	0,1 m
• _Vrch (horní část tunelu)	0,8 m	0,2 m
• _Vstup (přední část tunelu)	0,8 m	0,2 m
• _Vystup (zadní část tunelu)	0,8 m	0,2 m
• disk LP (levý přední disk)	0,03 m	0,007 m
• disk LZ (levý zadní disk)	0,03 m	0,007 m
• disk PP (pravý přední disk)	0,03 m	0,007 m

• disk PZ (pravý zadní disk)	0,03 m	0,007 m
• Formule tělo (karoserie)	base size	
• Formule tělo 2 (okolo řidiče)	0,02 m	0,002 m
• helma (helma jezdce)	0,02 m	0,002 m
• kolo LP (levé přední kolo)	base size	
• kolo LZ (levé zadní kolo)	base size	
• kolo PP (pravé přední kolo)	base size	
• kolo PZ (pravé zadní kolo)	base size	
• naprava LP (levá přední náprava)	0,025 m	0,007 m
• naprava LZ (levá zadní náprava)	0,025 m	0,007 m
• naprava PP (pravá přední náprava)	0,025 m	0,007 m
• naprava PZ (pravá zadní náprava)	0,025 m	0,007 m
• rám (rám chránící hlavu jezdce)	0,02 m	0,005 m
• sání (sání do motoru)	0,012 m	0,005 m
• výfuk (nejširší část výfuku)	0,02 m	0,003 m
• výfuk 2 (prostřední část výfuku)	0,01 m	0,005 m
• výfuk 3 (neužší část výfuku)	0,01 m	0,002 m
• zrcátka	0,01 m	0,003 m

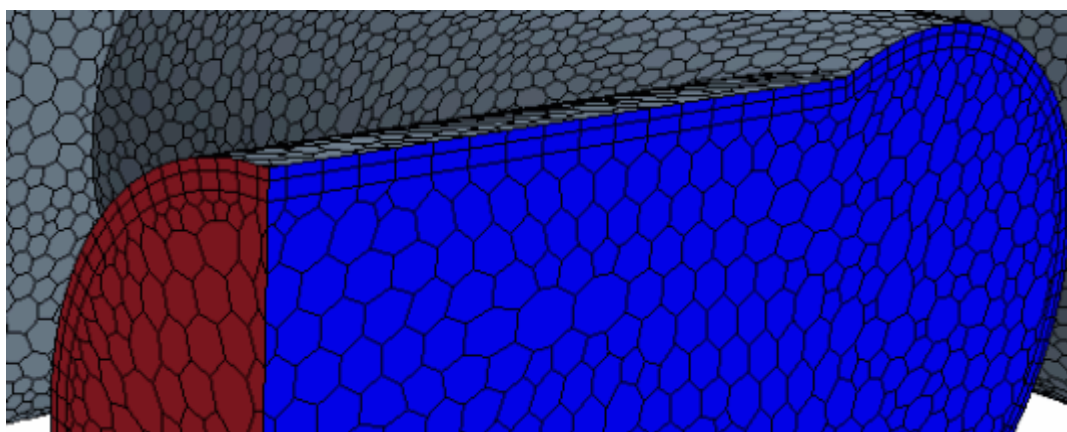
Mezi koly a silnicí a také mezi tělem formule a silnicí docházelo k přeskokům sítě při Wrappování povrchu, tomuto bylo zamezeno použitím funkce *Prevent Contact*. Vytvořená povrchová síť na modelu vypadala dle Obr. 11.5.



Obr. 11.5. Povrchová síť na modelu

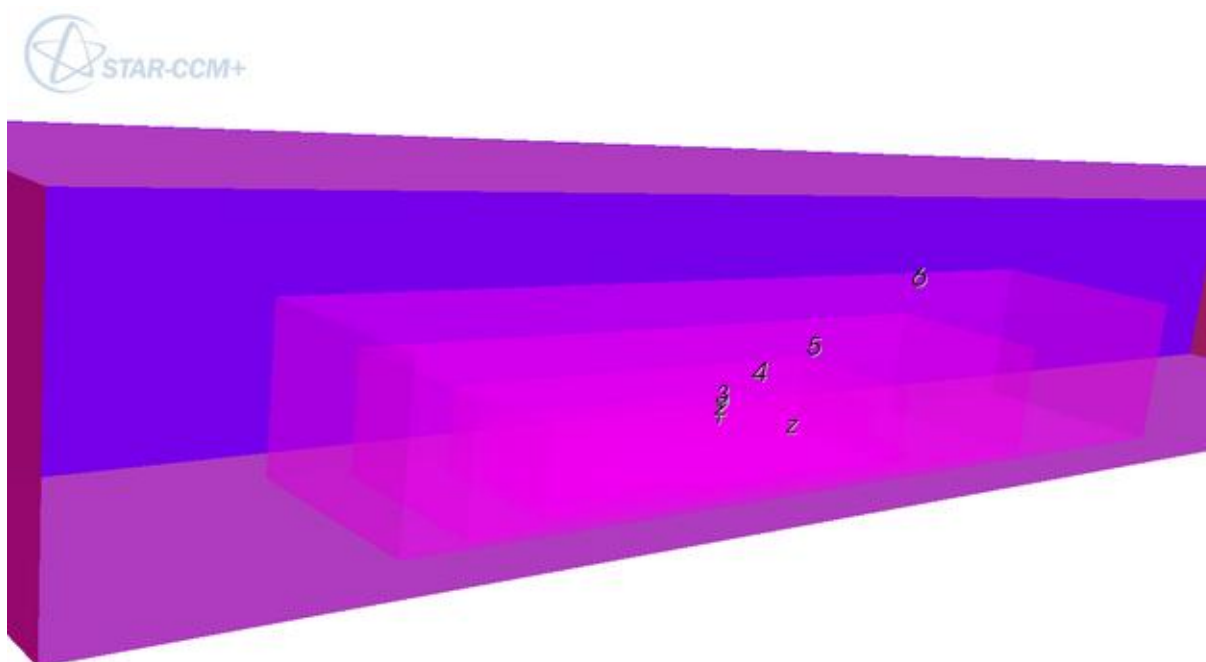
11.4.2. Tvorba objemové sítě

Objemová síť modelu vychází z povrchové sítě. Je tvořena nástroji *Prism Layer Mesher* a *Polyhedral Mesher*. Nástroj *Polyhedral Mesher* tvoří objemovou síť, kde mají buňky podobu „kopacích míčů“. Díky tomu je výpočet přesnější a méně náročný na hardware, protože při menším počtu buněk je vytvořeno více uzlů. Nástroj *Prism Layer Mesher* tvoří kolmé hranolovité buňky v objemové síti na povrchu modelu dle Obr. 11.6. Jejich účelem je zvýšit přesnost simulace turbulence a přenosu tepla v mezní vrstvě.



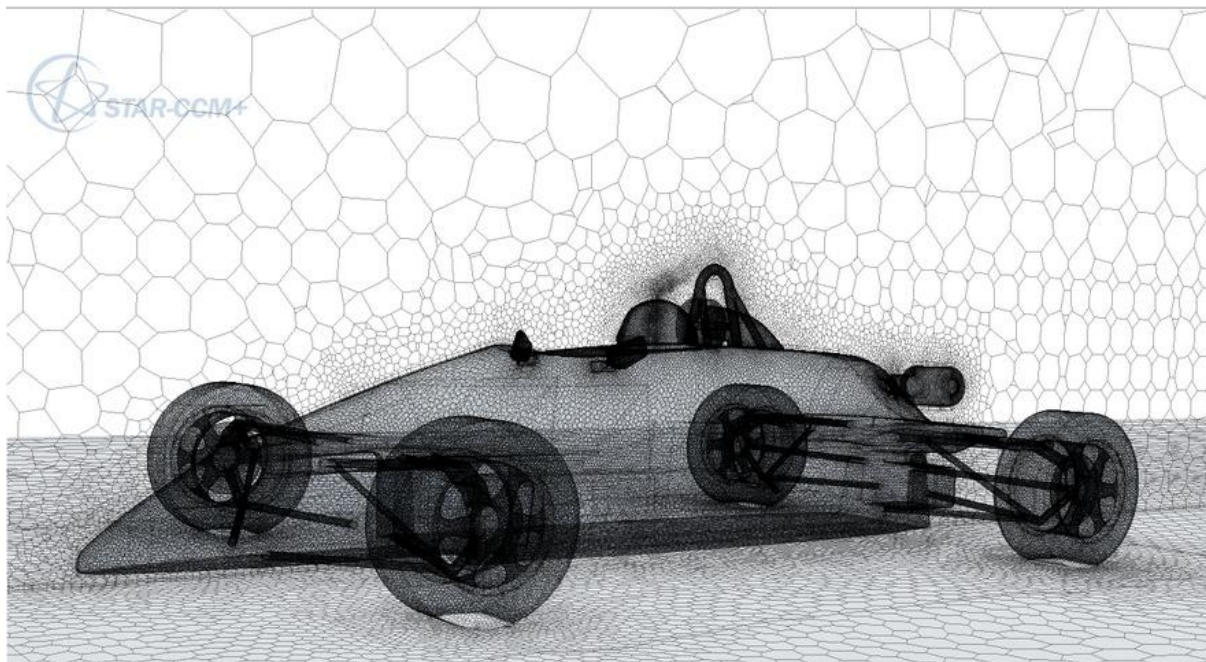
Obr. 11.6. Objemová síť, na hranici buňky tvořené *Prism Layer Mesherem* [7]

Velikost buněk objemové sítě byla odstupňována v několika krocích tak, aby byly nejmenší buňky v blízkosti formule a pak postupně rostly. Tento proces ovlivní již tvorbu povrchové sítě, protože objemová síť vychází právě z povrchové sítě. Toto odstupňování bylo provedeno také s ohledem na konečný počet buněk, aby výpočet nebyl příliš náročný na hardware. Odstupňování sítě je ukázáno na Obr. 11.7.



Obr. 11.7. Znáznornění odstupňování velikosti buněk objemové sítě

Objemová síť vytvořená tímto postupem pak vypadá dle Obr. 11.8.



Obr. 11.8. Objemová síť modelu

12. Vypočtená aerodynamika ve Star-CCM+

Po ustálení sledovaných hodnot dokonvergoval výpočet aerodynamiky vozidla při hodnotách:

Hustota vzduchu ρ :	$1,18415 \text{ kg.m}^{-3}$
Čelní plocha vozidla A :	$0,8549153 \text{ m}^2$
Rychlost V :	50 m.s^{-1}

k následujícím výsledkům:

Odporová síla D :	712,38 N
Vztlaková síla L :	313,88 N
Boční síla Y :	-40,08 N
Smyková síla τ :	42,86 N

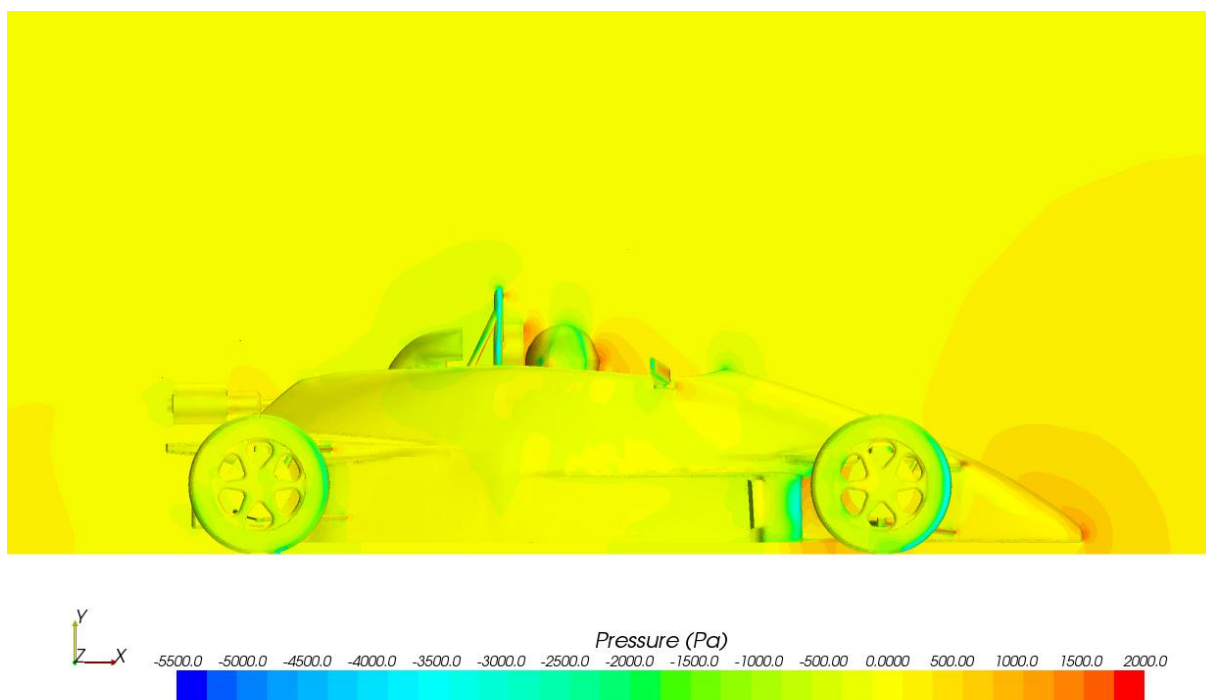
Koeficient odporu C_d :	0,563
Koeficient vztlaku C_l :	0,248
Koeficient boční síly C_y :	-0,032
Koeficient povrchového tření C_f :	0,034

Program Star-CCM+ počítá hodnoty koeficientů jednotlivých sil dle vztahů (9.1.), (9.2.), (9.3.) a (9.4.) v kapitole 9.3.

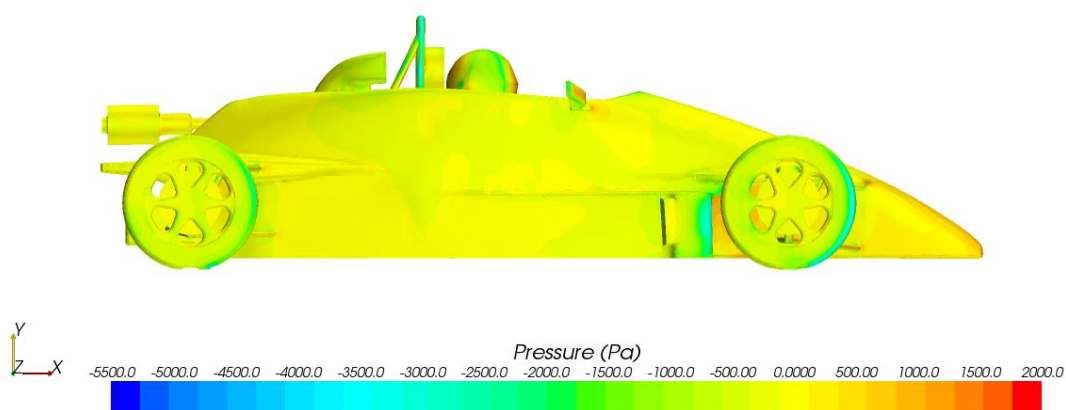
Z rozložení statického aerodynamického tlaku z Obr. 12.3. a 12.4. lze vysledovat, že maximální hodnoty statického tlaku se objevují především na vstupu vzduchu - sání do motoru a na vstupu vzduchu do chladičů motoru, to poukazuje na správné umístění a tím i na správnou funkci těchto prvků. Dále se objevují maximální hodnoty tlaků na přední straně předních kol formule, to je vzhledem ke koncepci toho vozidla očekávané a správné, jak bylo popsáno v kapitole 9.2.7. Vznik podtlaku viz. Obr. 12.1. a 12.2. na bočních plochách rotujících kol i částí karoserie automobilu a na zádi vozidla na Obr. 12.5. je očekávaný a správný také, vzhledem ke kapitole 9.2.1.

Obraz obtékání vozidla proudem vzduchu je proveden klasickými proudnicemi zobrazených na Obr. 12.7., 12.9. – 12.12. a vektorovým zobrazením na Obr. 12.8., 12.13. – 12.15. Obraz obtékání ukazuje na odtržení proudu vzduchu a na vznik turbulentního proudění vlivem helmy řidiče a opěrky helmy řidiče, to je vidět na proudnicích na Obr. 12.7. a 12.11. i na rozložení vektorů rychlostí na Obr. 12.8. Další vznik turbulentního proudění lze dobře vidět z Obr. 12.8., 12.13. – 12.15. vlivem tvaru karoserie, vlivem tvaru výfuku a vlivem velkých tlakových rozdílů. Také lze vidět i vznik bočních vírů, které deformují proudnice směrem vzhůru po stranách karoserie, jak je vidět na Obr. 12.9. a 12.10. vlivem nízkého tlaku pod vozidlem viz. kapitola 9.2.5., tato deformace proudnic může být částečně způsobena také strhnutím proudu vzduchu rotujícími koly.

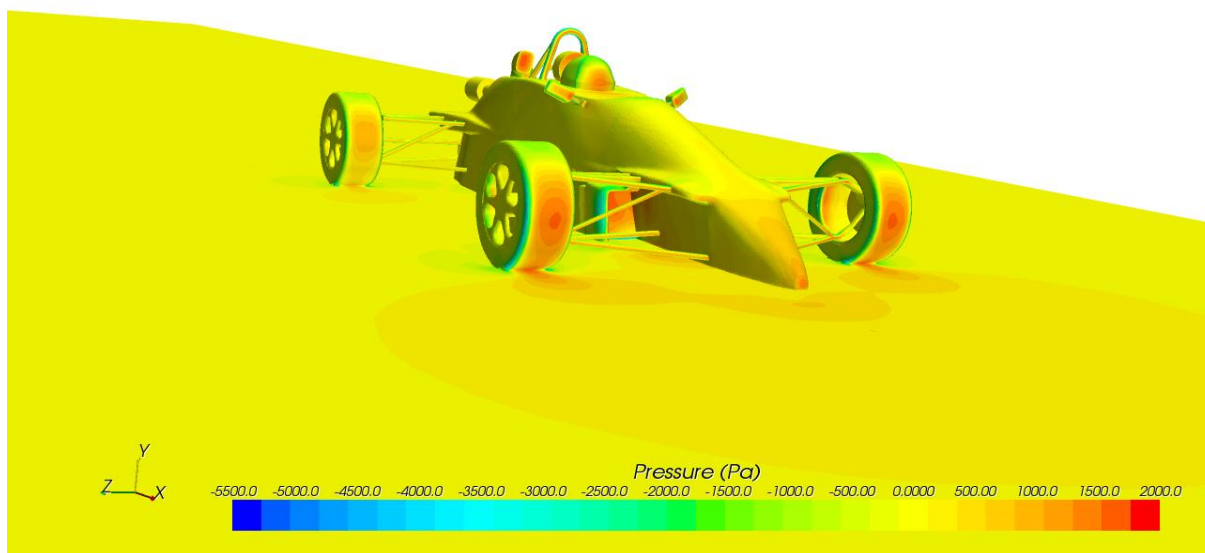
Dále je také možno sledovat zpomalení proudu vzduchu pod vozidlem na vektorových i proudnicových zobrazeních a také průběh rychlosti vzduchu na rotujících kolech.



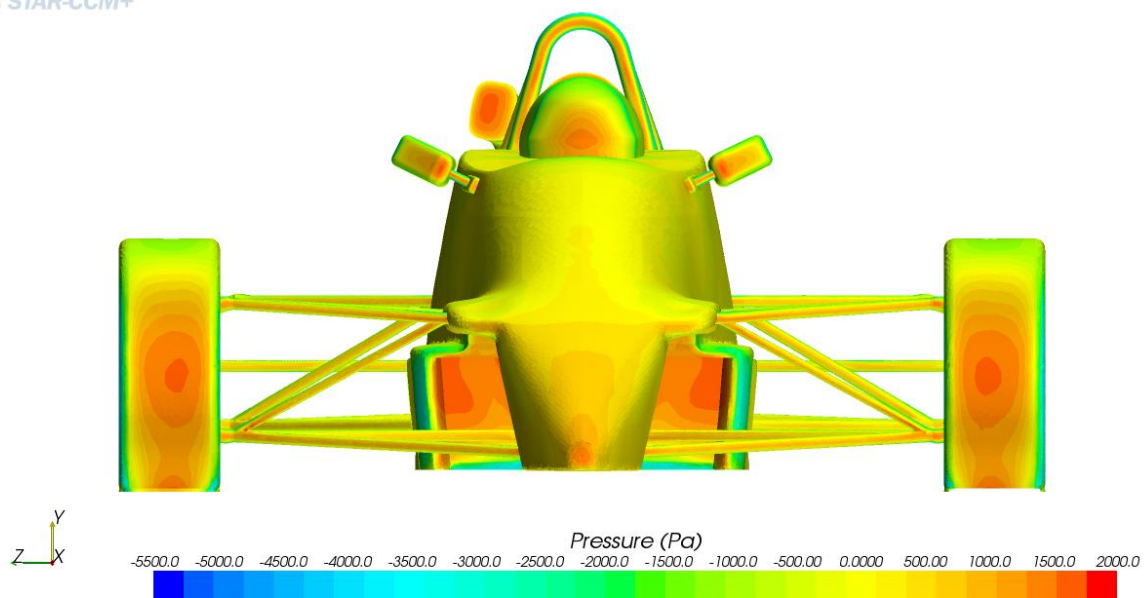
Obr. 12.1. Rozložení aerodynamického statického tlaku, boční pohled se zobrazením rozložení tlaku i v rovině jezdců



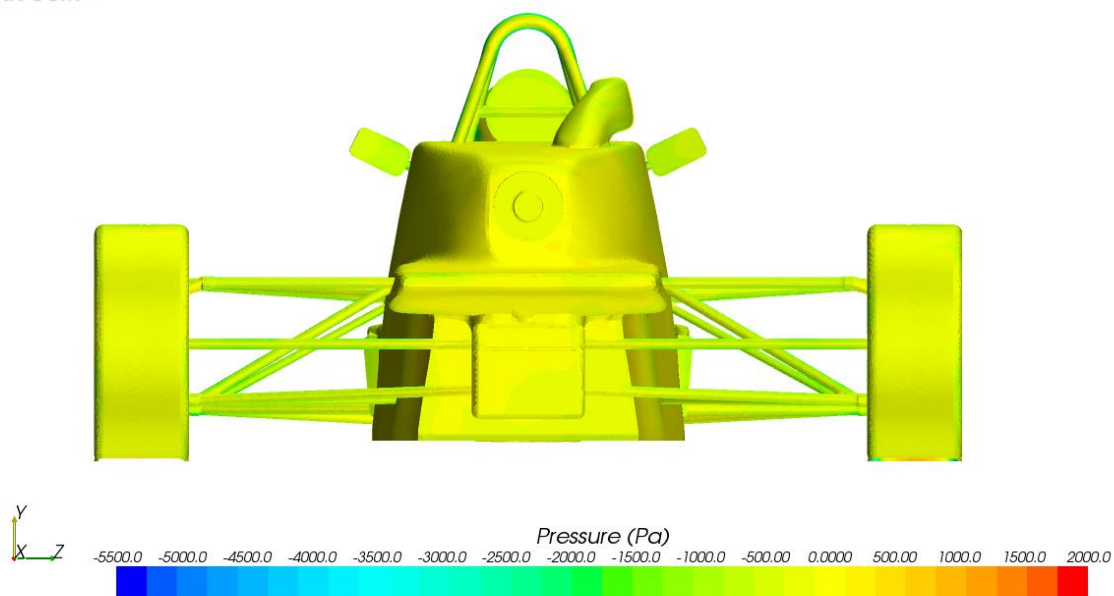
Obr. 12.2. Rozložení aerodynamického statického tlaku, boční pohled



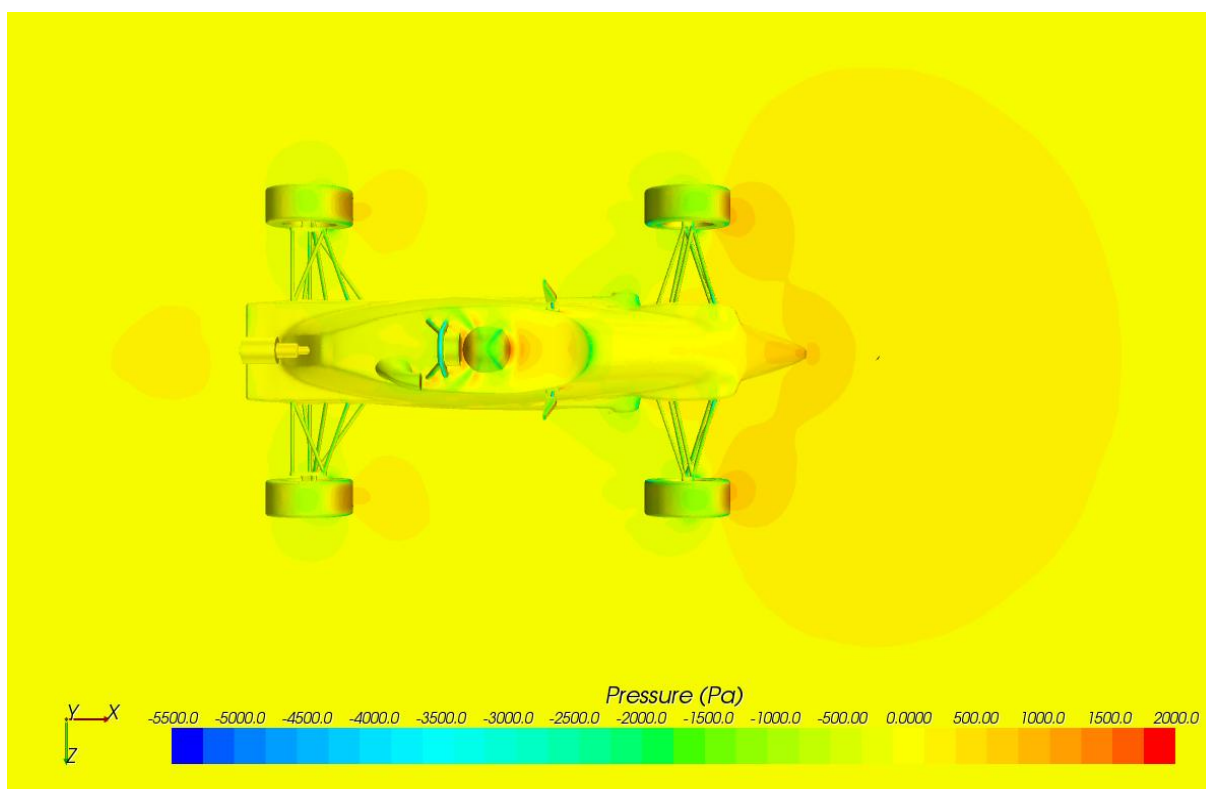
Obr. 12.3. Rozložení aerodynamického statického tlaku, perspektivní pohled se
zobrazením rozložení tlaku i na vozovce



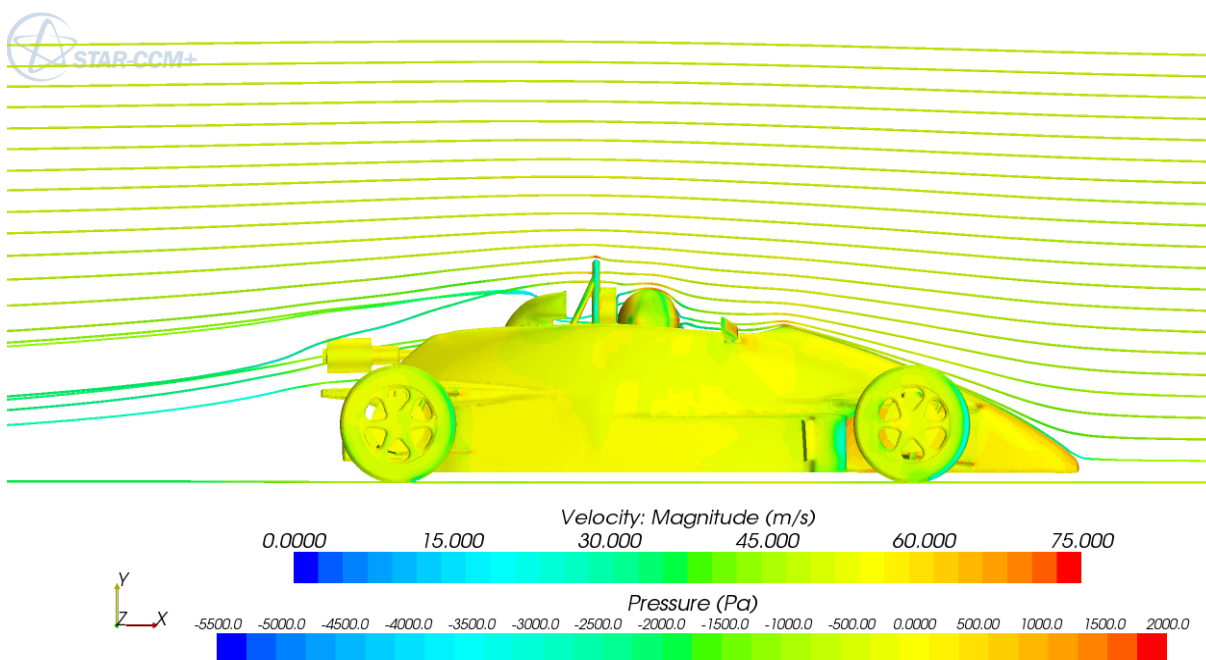
Obr. 12.4. Rozložení aerodynamického statického tlaku, přední pohled



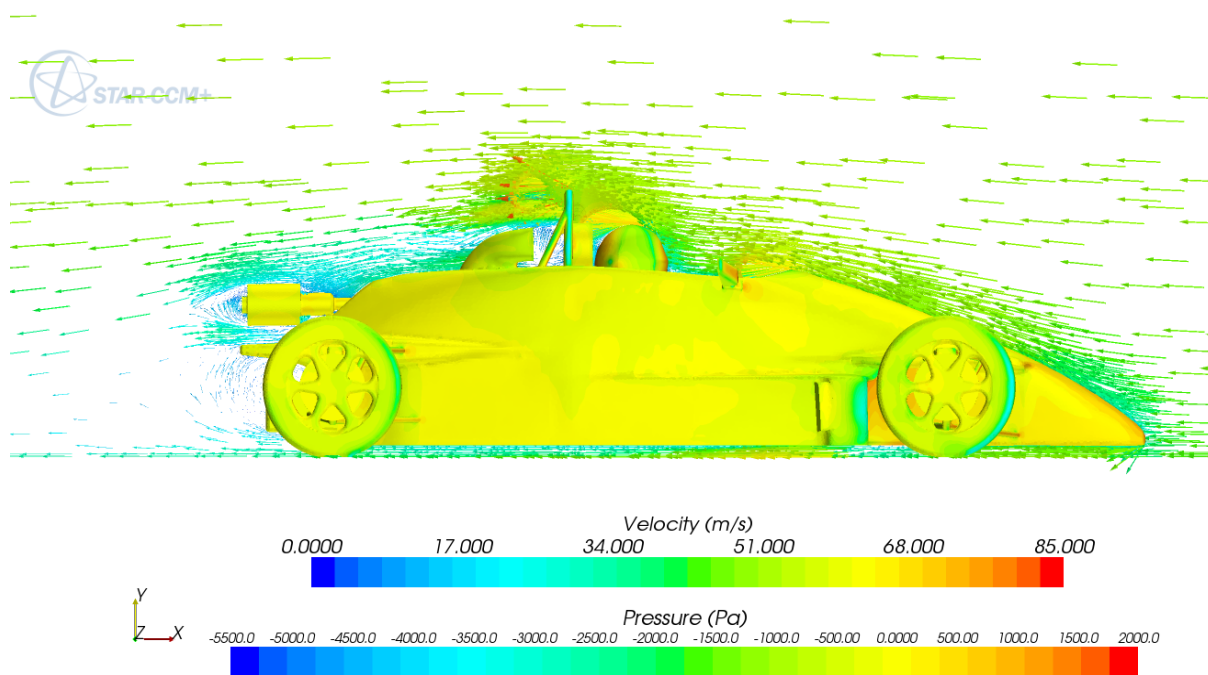
Obr. 12.5. Rozložení aerodynamického statického tlaku, zadní pohled



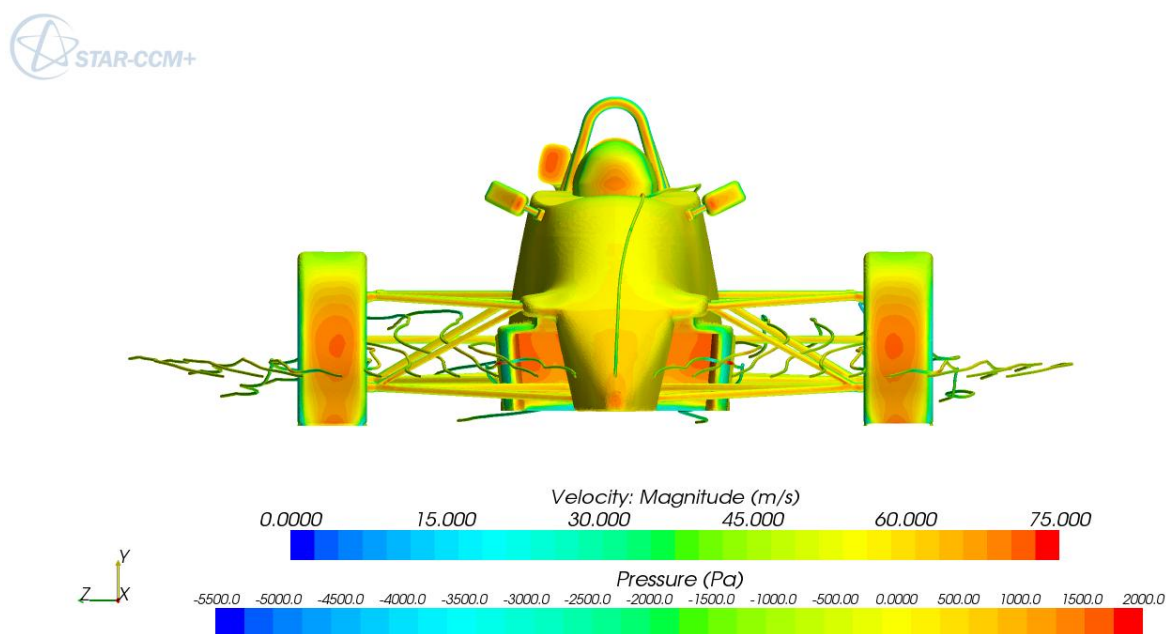
Obr. 12.6. Rozložení aerodynamického statického tlaku, pohled z vrchu se zobrazením rozložení tlaku i na vozovce



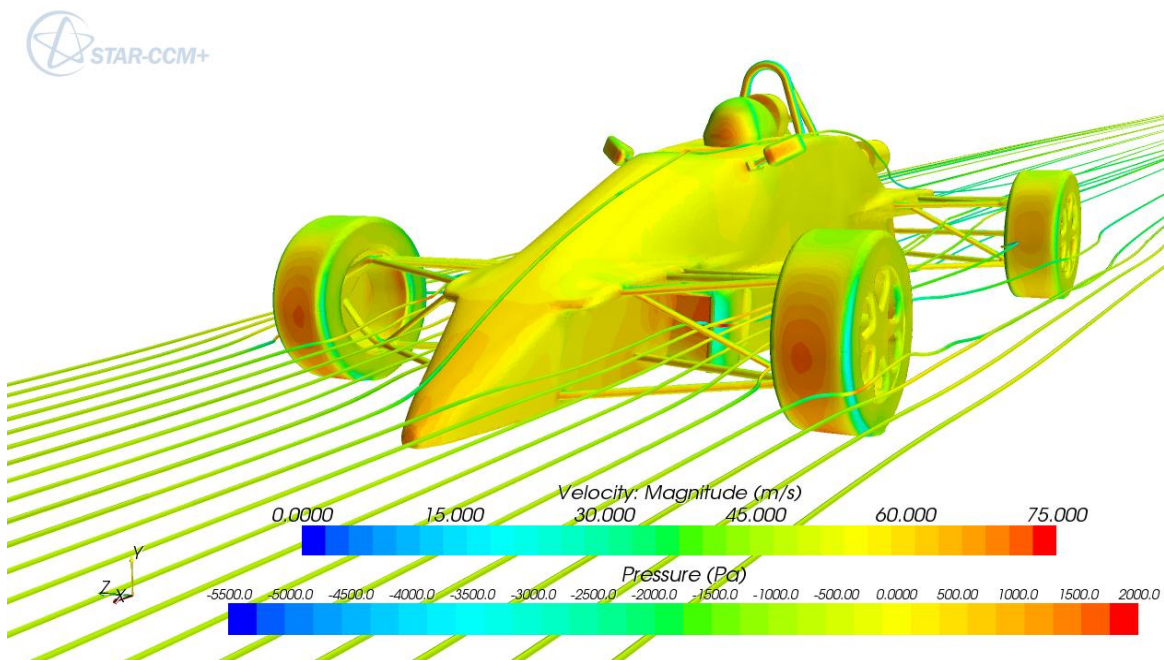
Obr. 12.7. Obraz obtékání formule proudnicemi, pohled z boku



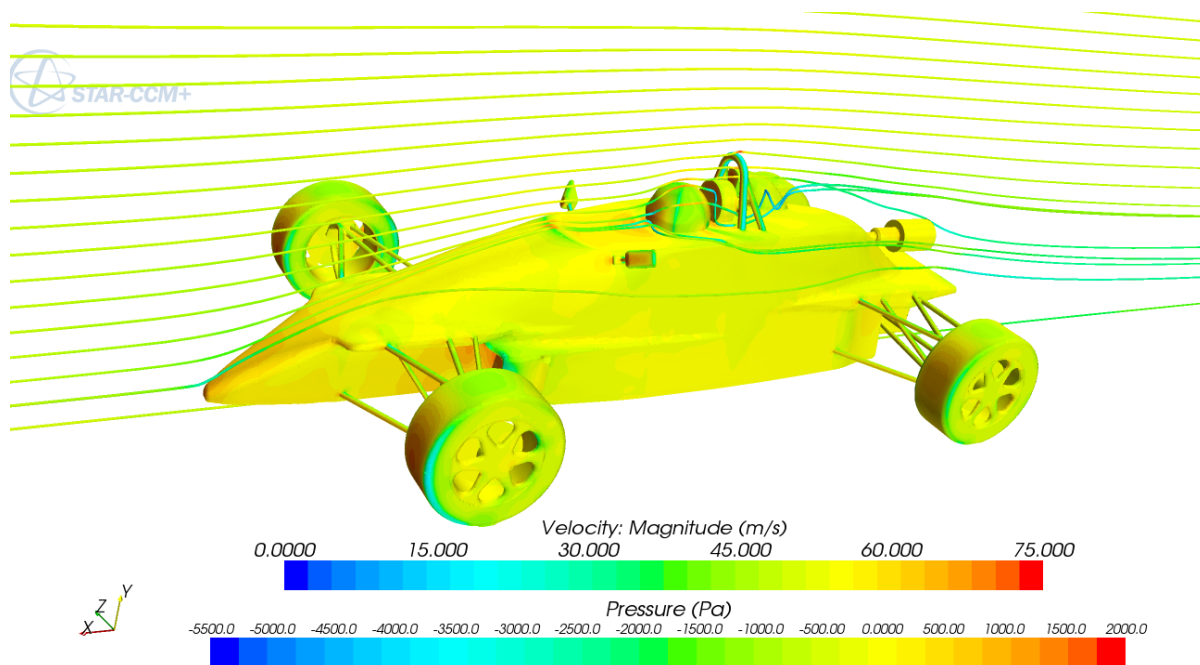
Obr. 12.8. Obráz obtékání formule vektory rychlosti proudícího vzduchu, pohled z boku



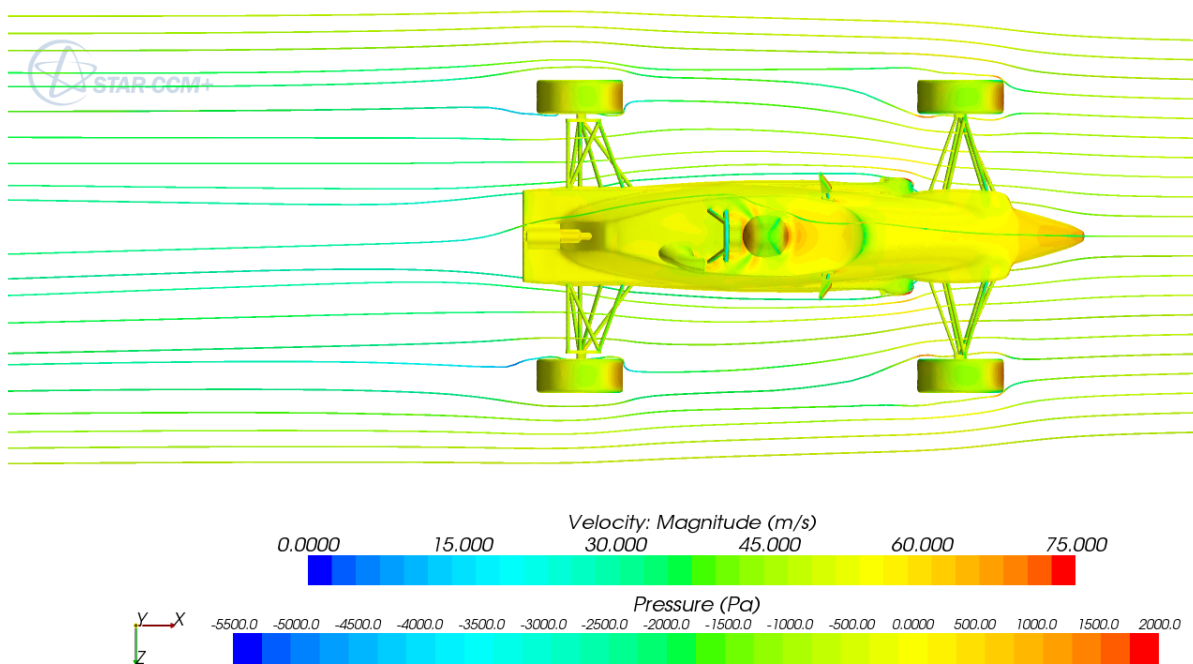
Obr. 12.9. Obráz obtékání formule proudnicemi, čelní pohled



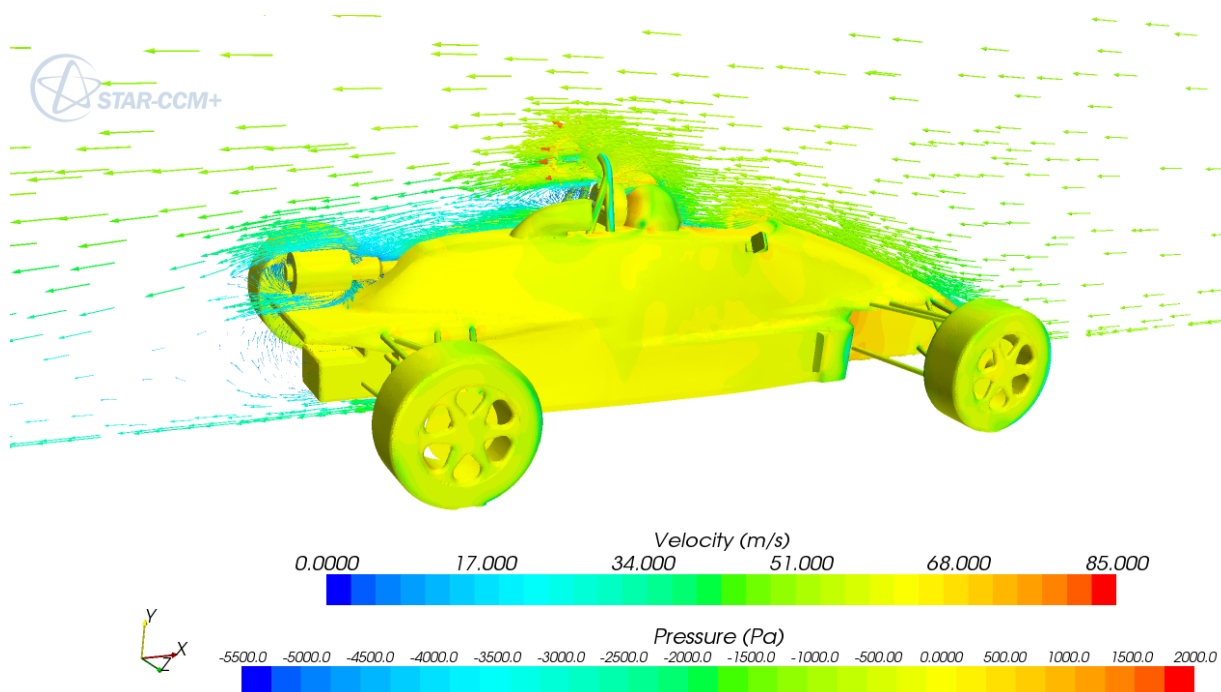
Obr. 12.10. Obráz obtékání formule proudnicemi, perspektivní pohled



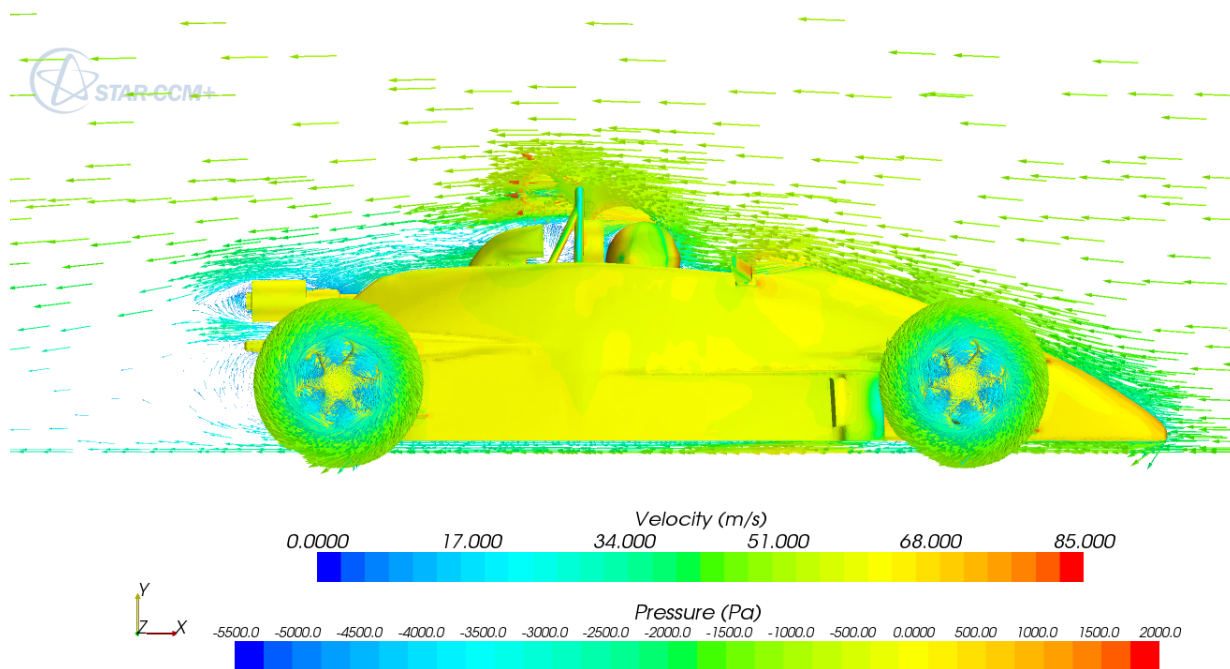
Obr. 12.11. Obráz obtékání formule proudnicemi, perspektivní pohled



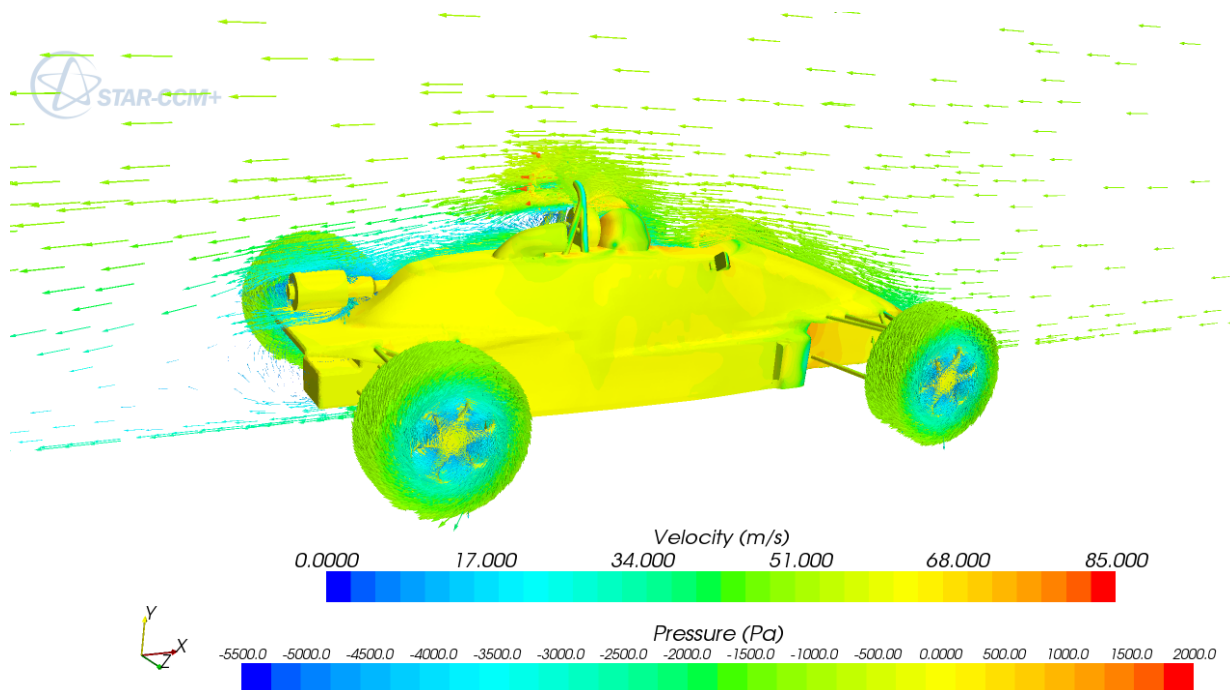
Obr. 12.12. Obráz obtékání formule proudnicemi, vrchní pohled



Obr. 12.13. Obráz obtékání formule vektory proudícího vzduchu, perspektivní pohled



Obr. 12.14. Obráz obtékání formule vektory proudícího vzduchu, boční pohled



Obr. 12.15. Obráz obtékání formule vektory proudícího vzduchu, perspektivní pohled

13. Odladěný postup digitalizace a přípravy geometrie pro CFD výpočty

S ohledem na možnosti Ústavu automobilního a dopravního inženýrství na Fakultě strojního inženýrství v Brně je postup převedení existující geometrie do digitální podoby ve formě CAD dat pro CFD výpočty zobrazen v následující Tab. 7.

Tab 7. Schematické znázornění postupu digitalizace dat a přípravy výpočtu v CFD softwaru Star-CCM+

Prostředek	Vstup	Provedené úkoly
3D skener ATOS	-díly karoserie	-očištění povrchů -příprava povrchů pro skenování -skenování
Použité příkazy	-calibration -start measurement -align project -polygonize object	Výstup -povrch ve formátu *.stl
Prostředek	Vstup	Provedené úkoly
stanice ATOS	-povrch ve formátu *.stl	-tvorba řezů skenovaných součástí
Použité příkazy	-point-point-point plane -axis parallel plane	Výstup -řezy součástí ve formátu *.igs
Prostředek	Vstup	Provedené úkoly
Pro/ENGINEER	-řezy součástí *.igs -povrchy součástí *.stl	-import řezů (*.igs) a povrchů (*.stl) -tvorba povrchu modelů z řezů
Použité příkazy	-insert shared data from file -style tool -boundary blend -merge -intersect -project -trim	Výstup -model jednotlivých součástí *.prt
Prostředek	Vstup	Provedené úkoly
Pro/ENGINEER	-model jednotlivých součástí *.prt	-vytvoření sestavy karoserie
Použité příkazy	-add component to the assembly	Výstup -sestava *.asm

Prostředek	Vstup	Provedené úkoly
Pro/ENGINEER	-sestava *.asm	-převedení sestavy na výkres *.prt -uzavření povrchů -vytvoření výsledné geometrie
Použité příkazy	-copy geometry -style tool -boundary blend -sketch -extrude -trim -merge -mirror -project -fill -revolve -pattern -round -copy -solidify	Výstup -povrch ve formátu *.igs
Prostředek	Vstup	Provedené úkoly
Star-CCM+	-povrch ve formátu *.igs	-importování povrchu *.igs -rozdělení modelu na části -nastavení fyzikálního modelu -nastavení vlastnostní počítané geometrie -vytvoření povrchové sítě -vytvoření objemové sítě -výpočet
Použité příkazy	-import surface -mark edges -split by feature curves -generate surface mesh -generate volume mesh -initialize solution -run	Výstup -rozložení statického aerodynamického tlaku -vizualizace proudění -síly působící na vozidlo -koeficienty působících sil

Závěr

Pro převod reálného vozidla na počítačový model bylo možno pracovat s nástroji dostupnými na Fakultě strojního inženýrství v Brně. Pro skenování modelu byla vybrána strategie skenování jednotlivých dílů karoserie zvláště 3D skenerem ATOS, kvůli lepší manipulaci s díly a menším objemům dat. Tímto postupem bylo dosaženo vysoké přesnosti měření jednotlivých dílů a byly kladeny menší nároky na hardware při skenování i při následném modelování. Před začátkem samotného měření bylo potřeba provést řadu pracných příprav. Tento proces by mohl být usnadněn při použití nejnovějších technologií z oblasti digitalizace, protože nejnovější skenery umí snímat povrchy všech barev s vyšším rozlišením a jsou vybaveny výkonnějším hardwarem, což by umožňovalo bezproblémové měření celého vozu bez rozsáhlých příprav. Měření karoserie vozidla ve výchozí poloze, myšleno na vozidle, také odstraňuje pracné skládání jednotlivých dílů karoserie v modeláři. Navíc by byla vyloučena možná deformace jednotlivých dílů, vlivem uchycení na rám, se zaručenou polohou jednotlivých dílů vůči sobě. Avšak i použitím dostupných prostředků bylo dosaženo přesného modelu předlohového vozu (viz. Obr. 7.12.-7.15.) s ohledem na jeho následné využití, tzn. na výpočty aerodynamiky.

Při vytváření modelu celkového vozu v programu Pro/ENGINEER byla použita zjednodušení například v oblasti náprav, těhlic a převodové skříně. Tato zjednodušení mohla být použita vzhledem k tomu, že tyto prvky vůbec nebo jen minimálně mohou ovlivnit aerodynamiku celkového vozidla. Navíc by vznikl problém s následnou tvorbou sítě v programu Star-CCM+, kde by musela být na tyto oblasti kvůli jejich jinak tvarové složitosti použita velmi jemná síť. Ovšem v těchto oblastech není vzhledem k důležitosti výpočtu těchto částí vozu jemné síťování potřebné, pouze by se zvyšoval celkový počet buněk v úloze. Při plném využití výpočetního hardwaru by naopak velké množství buněk v těchto oblastech ubíralo možnost tvorby jemné sítě a tím možnost přesnějšího výpočtu na oblastech vyššího zájmu. Z těchto důvodů by mohly být v případě potřeby na použitém modelu zjednodušeny disky kol a nápravy, například nahrazením kol pouze válcem odpovídající velikosti a nápravami vstupujícími do těchto válců.

Pro výpočet aerodynamiky v programu Star-CCM+ bylo potřeba nejprve vytvořit povrchovou síť, následně objemovou síť a nastavit fyzikální hodnoty výpočtu, jak je popsáno v kapitolách 11.3. a 11.4. Výpočet vzhledem ke zhodnocení v kapitole 12. proběhl správně. Na modelu byla nastavena rotující kola a posuvná vozovka. Pro přiblížení simulace reality ve větším měřítku by mohl být nastaven proudící vzduch chladiči vzduchu a také průchod vzduchu motorem.

Vypočtená aerodynamiku pak může sloužit pro návrh změn na vozidle, což by vzhledem k vypočteným hodnotám mohla být hlavně přitlačná křídla, která by vytvářela přítlak směrem k vozovce, případně difuzor omezující vztlakovou sílu směrem od vozovky a některé tvarové úpravy karoserie, které by omezily celkový aerodynamický odpor vozidla.

Seznam použitých zdrojů

Knihy

- [1] HUCHO, W. *Aerodynamics of road vehicles*. Fourth edition. 1998. ISBN 0-7680- 0029-7
- [2] HÁJEK, J. *Modelování s využitím CFD – I*. 2007
- [3] KATZ, J. *Race Car Aerodynamics: Designing for speed*. Revised 2nd edition. 2006. ISBN 0-8376-0142-8
- [4] KOVANDA, B., KOVANDA, J. *Aerodynamika Vozidel*. 1999. ISBN 80-01-01942-X
- [5] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. 2005. ISBN 80-239-0024-2

Manuály k aplikacím

- [6] KLUG, H., APPEL. U. *GOM Manual ATOS v 5.3.0*. 2004
- [7] CD-ADAPCO. *User guide Star-CCM+ version 2.10.017*. 2007

Elektronické zdroje informací

- [8] AV ENGINEERING. *Obecné vlastnosti CAx / PLM technologie Pro/ENGINEER* [on-line]. Poslední revize 15.4.2008. Dostupné z: <<http://www.aveng.cz/technologie/proengineer.aspx>>
- [9] EPFL - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. *Skin anatomy* [on-line]. Poslední revize 20.4.2008. Dostupné z: <<http://lob.epfl.ch/page46528.html>>
- [10] GOM. *GOM – Optical measuring techniques* [on-line], poslední revize 13.5.2008. Dostupné z: <<http://www.gom.com/EN/index.html>>
- [11] NAVRÁTIL, R. *3D skenery* [on-line]. 2000, poslední revize 14.4.2008. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>>
- [12] NAVRÁTIL, R. *Reverse Engineering* [on-line]. 2002, poslední revize 14.4.2008. Dostupné z: <<http://robo.hyperlink.cz/re-teorie/index.html>>
- [13] MCAE Systems. *ATOS – digitizing* [on-line]. Poslední revize 20.4.2008. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/o_nas_CS.html>
- [14] TM - TECHNIK. *Katalog měřících zařízení firmy Mitutoyo* [on-line]. Poslední revize 6.5.2008. Dostupné z: <http://www.tm-technik.cz/docs/mitutoyo/katalog_cz_13001.pdf>

- [15] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [on-line]. 2001, poslední revize 5.4.2008.
Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Zp%C4%9Btn%C3%A9_in%C5%BEn%C3%BDrstv%C3%AD>
- [16] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [on-line]. 2001, poslední revize 5.4.2008.
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_engineering>
- [17] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [on-line]. 2001, poslední revize 5.4.2008.
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/3d_scanner>
- [18] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [on-line]. 2001, poslední revize 5.4.2008.
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Computed_tomography>
- [19] WIKIPEDIE. *Otevřená encyklopedie* [on-line]. 2001, poslední revize 10.2.2008.
Dostupné z: <http://wikipedia.org/wiki/Structured_Light_3D_Scanner>

Seznam použitých zkratk a symbolů

použité zkratky	anglický význam	český význam
3D	3 – Dimensional	Trojrozměrný
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	Americký standardní kód pro výměnu informací
CFD	Computation Fluid Dynamics	Výpočet dynamiky tekutin
CAD	Computer Aided Design	Počítačová podpora konstruování
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačová podpora výroby
CAE	Computer Aided Engineering	Automatizované inženýrství
CMM	Coordinate Measuring Machine	Souřadnicově měřicí stroj
NC	Numerical Control	Číslicově řízený
CNC	Computer Numerical Control	Číslicové řízení počítačem
CCD	Charge Coupled Device	Snímač s vázanými náboji
LCD	Liquid Crystal Display	Displej z tekutých krystalů
MLT	Multistripe Laser Triangulation	Mnohopruhová laserová triangulace
CT	Computer Tomography	Počítačová tomografie
FEM	Finite Elements Method	Metoda konečných prvků
PC	Personal Computer	Osobní počítač

použité symboly

m	[kg]	hmotnost
m_1	[kg]	hmotnost tekutiny v místě 1
m_2	[kg]	hmotnost tekutiny v místě 2
p	[Pa]	tlak
p_1	[Pa]	tlak v místě 1 proudové trubice
p_2	[Pa]	tlak v místě 2 proudové trubice
p_a	[Pa]	atmosférický tlak
$\dot{m}_1$	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní tok v místě 1
$\dot{m}_2$	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní tok v místě 2
$\dot{m}$	[kg.s ⁻¹]	hmotnostní tok
A	[m ²]	čelní plocha vozidla
A_1	[m ²]	plocha proudové trubice v místě 1
A_2	[m ²]	plocha proudové trubice v místě 2
C_d	[-]	koeficient odporu
C_f	[-]	koeficient povrchového tření
C_l	[-]	koeficient vztlaku
C_y	[-]	koeficient boční síly
F	[N]	působící síla
F_d	[N]	odporová síla
F_L	[N]	zdvihová síla
F_Y	[N]	boční síla
L	[m]	délka
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
T	[N]	smyková síla
V	[m.s ⁻¹]	rychlost
V_1	[m.s ⁻¹]	rychlost proudění v místě 1
V_2	[m.s ⁻¹]	rychlost proudění v místě 2

ρ	$[\text{kg.m}^{-3}]$	hustota
τ	$[\text{N.m}^{-2}]$	tečné napětí
μ	$[\text{N.s.m}^{-2}]$	viskozita
ρ_1	$[\text{kg.m}^{-3}]$	hustota tekutiny v místě 1
ρ_2	$[\text{kg.m}^{-3}]$	hustota tekutiny v místě 2