Středoškolská technika 2011

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

FORMULE 1 VE ŠKOLÁCH

Petr Skřivánek

Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická České Budějovice; Dukelská 13

Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická České Budějovice; Dukelská 13

PRAKTICKÁ MATURITNÍ PRÁCE

Návrh modelu závodního auta F1 podle parametrů uvedených v podmínkách účasti ve světové soutěži „FORMULE 1 VE ŠKOLÁCH“, ročník soutěže 2010/2011 a příprava výroby modelu

VYPRACOVAL: PETR SKŘIVÁNEK

Školní rok: 2010/2011 *Vedoucí práce:* Ing. Vilém Čejka

Obsah práce

Obsah 2
Zadání odborné maturitní práce 3
Abstrakt 4
O soutěži Formule 1 ve školách 5
Technická pravidla 6
Vývoj modelu 9
Faktory ovlivňující vývoj modelu 9
První koncepty 9
Model vozu – „vyduté dno“ 11
Difuzor 12
Model vozu – „křídlo“ 13
Hlavní vlivy působící na model 13
Vlastní modelování 14
Ploché dno 15
Parametry finálního modelu 15
Kinematika kol 16
Aerodynamika modelu 17
Testování ve virtuálním aerodynamickém tunelu 18
Výsledky aerodynamického tunelu – finální model 19
Technologie výroby 21
Použité zařízení, software a nástroje 21
Volba technologie 21
Dělící přístroj 21
Řezné podmínky 22
Vlastní obrábění 22
Obrábění zadního křídla 26
Gravírování 26
Ostatní komponenty sestavy 26
Návodka na obrábění 27
Bombička 28
Simulace expanze plynu z bombičky 28
Měření dynamických vlastností modelu na dráze 29
Školní optické závory 31
Poděkování 32
Přílohy 32

Zadání odborné maturitní práce

Zadání je vystaveno pro žáka:

Jméno a příjmení: Petr Skřivánek

Datum narození: 13. července 1992

Žák třídy: 4SA ve šk. r. 2010/2011

Téma maturitní práce:

Návrh modelu závodního auta F1 podle parametrů uvedených v podmínkách účasti ve světové soutěži „FORMULE 1 VE ŠKOLÁCH“, ročník soutěže 2010/2011 a příprava výroby modelu.

Požadované dílčí body práce:

1) Studium podkladových materiálů a související teorie – uvedení podkladů a literatury

2) Varianty návrhu modelu formou náčrtků

3) Návrh modelu ve zvoleném CAD systému

4) Měření dynamických vlastností reálného modelu

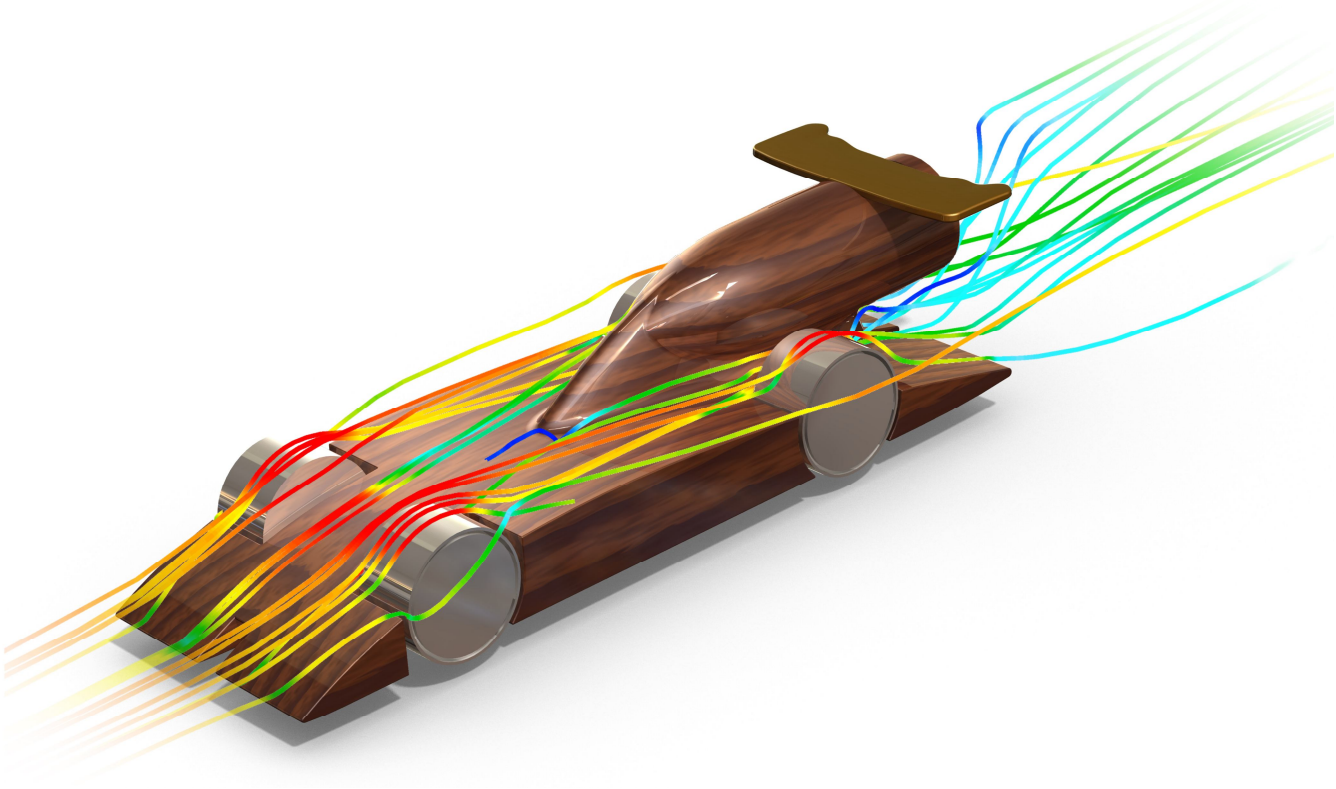
5) Příprava programu pro výrobu modelu na CNC frézce

Zpracovatel práce může využít jako východisko maturitní práce výsledky vlastního přínosu z účasti týmu školy v předešlém ročníku soutěže.

Rozsah práce:	minimální 20 stran textu + výkres modelu + technologický list
Termín odevzdání:	do 29. dubna 2011 ve dvou vyhotoveních
Vedoucí práce:	Ing. Vilém Čejka, učitel odborných předmětů
Kritéria hodnocení práce:	původnost, technická úroveň návrhu, formální úroveň zprávy, úroveň ústní prezentace při obhajobě práce

Abstraktr

Práce obsahuje vývoj modelu vozu formule 1 z balzového dřeva, využívající reaktivní pohon stlačeného CO_2. Cílem projektu bylo vytvořit ideální aerodynamický tvar vozu, který bude klást při přímočarém pohybu co nejmenší odpory. Model se následně obráběl na CNC frézce pomocí nejmodernějších technologií. K úspěchům mi pomohlo testování na zkušební dráze, kde jsem změřil časový průběh pohybu autíčka na dráze. Při práci jsem používal CAD systémy Solid Edge V20 a Solid WORKS 2010. Model byl obroben za pomoci softwaru SurfCAM Velocity4.



O soutěži Formule 1 ve školách

Formule 1 ve školách je jedinečná, celosvětově vzdělávací soutěž, určena pro týmy studentů středních škol ve věku od 15 – 19 let.

Studenti mají za úkol navrhnout, zkonstruovat, otestovat, vyrobit a závodit s vlastním modelem formule 1, který je poháněn CO_2.

Soutěžní týmy se učí používat CAD software, pomocí kterého tvoří design modelu, virtuální větrný tunel, který je určen pro analýzu chování modelu za jízdy, CAM software, s nímž vygenerují data pro obrábění a CNC frézku, která na základě dat vyrobí závodní model.

Součástí soutěže je i příprava ústní prezentace realizované práce, doplněná o prezentaci konstrukční dokumentace, která dokumentuje kompletní návrh, konstrukci a výrobu závodního modelu.

Povinností týmu je i zajistit finanční příjem od sponzorů, hospodařit s ním, vypracovat rozpočet a účelně financovat cestování a ubytování (týká se dopravy, případně ubytování, spojeného s návštěvou jednotlivých kol soutěže).

Závodí se na úrovni národních kol (Čechy a Morava), celostátního finále a ve světovém šampionátu. Hlavní výhrou ve světovém finále je stipendium pro všechny členy týmu na londýnské univerzitě v oboru: „Automobilový inženýr“

První ročník jsem působil jako grafik a webmaster týmu. Naučil jsem se pracovat s moderními grafickými programy (Photoshop CS3, Corel DRAW 12 aj.) a seznamoval jsem se i s technickou částí projektu.

Ve druhém ročníku byla moje úloha v týmu vytvořit model vozu od ideových návrhů po 3D modely na počítači a technická část týkající se výroby modelu na CNC frézce.

IN SCHOOLS

THE FORMULA ONE™ TECHNOLOGY CHALLENGE

Technická pravidla – rozměry jednotlivých částí modelu

1) Tolerance

Tolerance pro všechny specifikace:

Tolerance rozměrových limitů ± 0,1 mm

Tolerance hmotnostních limitů ± 0,5 g

2) Rozměry karoserie

č.	*Konstrukční prvek*	*Min. [mm]*	*Max. [mm]*
2a	Celková délka karoserie*	170	210
2b	Světlost karoserie nad tratí* (bez oček), včetně bočnic a křídel	3	15
2c	Šířka karoserie v místě bočnic*	50	65
2d	Celková šířka vozu včetně kol*	60	85

*Doplňující poznámky

2a. měřeno mezi předním a zadním koncem karoserie.

2b. měřeno od povrchu tratě ke spodní hraně karoserie.

2c. měřeno mezi bočnicemi vozu. Vnější povrch bočnic při pohledu z boku musí mít plochu nejméně 30 x 15 mm, protože na oba boky vozu budou umístěny samolepky s číslem o rozměru 30 x 15 m, které musí být při pohledu z boku 100% viditelné. Bočnice mohou mít konvexní, konkávní, nebo plochý tvar, ale musí umožňovat umístění propagačního obtisku s logem F1 in Schools.

2d.měřeno mezi vnějšími hranami kol nebo karosérie, podle toho, který rozměr je větší.

2h. tělo modelu včetně bočnic musí být vyrobeny z jednoho kusu balsového dřeva.

2i. konstrukce budou prověřovány a kontrolovány zda uvnitř neskrývají nepovolené prvky

2k. při pohledu z vrchu musí být v místě bočnic prostor o velikosti minimálně 30 x 50 m, měřeno od vnějších stran bočnic

3) Rozměry kol

3a. Všechny vozy F1 musejí mít 4 kola, dvě vpředu a dvě vzadu a všechna kola musí mít válcovitý tvar.

č.	*Konstrukční prvek*	*Min. [mm]*	*Max. [mm]*
3b	Průměr předních kol*	26	34
3c	Šířka předních kol* (v místě kontaktní plochy)	15	19
3d	Průměr zadních kol*	26	34
3e	Šířka zadních kol* (v místě kontaktní plochy)	15	19

3f. Všechna čtyři kola se musí dotýkat povrchu závodní dráhy současně a všechny čtyři kola se musejí snadno otáčet.

3g. Rozměry kol musí být konzistentní po celém průměru/obvodu kola.

3h. Tým může vyrobit svá vlastní kola, pokud vyhoví stanoveným specifikacím.

3i. Kola nesmí být uvnitř karoserie, při pohledu shora a z boku by mělo být vidět 100% kola.

*Doplňující poznámky

3c. a 3e. měřeno k vnějším hranám každého kola.

3b. a 3d. měřeno mezi vnějšími hranami (včetně jakýchkoliv výčnělků)

4) Pohonná jednotka

Organizátoři zajistí veškeré CO_2 náplně pro regionální finále, národní finále a světový šampionát

č.	*Konstrukční prvek*	*Min. [mm]*	*Max. [mm]*
4a	Průměr komory pro patronu s CO_2 náplní	19,5	-
4b	Nejnižší bod komory k povrchu tratě*	22,5	30
4c	Hloubka otvoru	50	60
4d	Tloušťka stěny kolem patrony*	3,5	-
4e	Uvnitř komory není povolena žádná barva (při barvení vozu prosím komoru zakryjte).		

*Doplňující poznámky

4b. měřeno od povrchu tratě k nejnižšímu bodu CO_2 komory.

4d. vůz u kterého bude volný prostor obklopující CO_2 patronu menší než 3 mm, nebude připuštěn do závodu a ztratí odpovídajícím způsobem body.

5) Očka se závitem/plastikové vložky

5a. Každý vůz musí mít v přední a zadní části podél středové osy pevně připevněna dvě očka se závitem/plastikové vložky. Těmito dvěma očky/plastikovými vložkami musí procházet vodící struna trati.

6b. Žádné z oček se nesmí dotýkat povrchu závodní dráhy. Dbejte prosím na používání doporučených oček/plastikových vložek.

č.	*Konstrukční prvek*	*Min. [mm]*	*Max. [mm]*
5a	Vnitřní průměr očka/plastikové vložky*	3,5	5
5b	Vzájemná vzdálenost (v nejvzdálenějším bodě)*	120	190

5e. K zajištění oček/vložek je možné použít lepidlo.

5f. Týmy musí zajistit, aby byla očka pevně uzavřená, aby se vodící struna nemohla z očka vyvléknout. To by mělo být provedeno před registrací závodu.

*Doplňující poznámky

5c. Vztahuje se k vlastnímu otvoru očka/plastikové vložky. V případě potřeby mohou týmy zhotovit své vlastní vložky.

6d. Největší vzdálenost mezi vnějšími hranami oček/plastikových vložek.

6) Trup vozu a křídla

6a. Design hotového vozu by se měl podobat skutečným vozům F1.

6b. Trup vozu včetně bočnic musí být vyroben z jednoho kusu balsového dřeva. Přední přítlačná křídla a zadní křídla mohou být vyrobena jako integrální součást trupu nebo mohou být tvořena samostatným materiálem (nekovovým).

Přední křídlo a každá další část, která je umístěna před středovou osou může být z jiného, nekovového materiálu.

č.	*Konstrukční prvek*	*Min. [mm]*	*Max. [mm]*
6c	Šířka zadního/předního křídla (tam, kde je křídlo rozděleno trupem vozu, počítá se šířka jako součet obou částí)	40	65
6d	Hloubka zadního/předního křídla	15	25
6e	Tloušťka zadního/předního křídla	1,5	12

*Doplňující poznámky

6g. Celé přední křídlo při pohledu z boku musí být před středovou osou přední nápravy.

6h. Celé zadní křídlo při pohledu z boku musí být za středovou osou zadní nápravy.

6i. Spodní část zadního křídla musí být vyšší než nejvyšší bod zadního kola. Měřeno od povrchu dráhy.

Minimální hloubka předního i zadního křídla bude měřena v nejužším bodě každého křídla.

Vývoj modelu

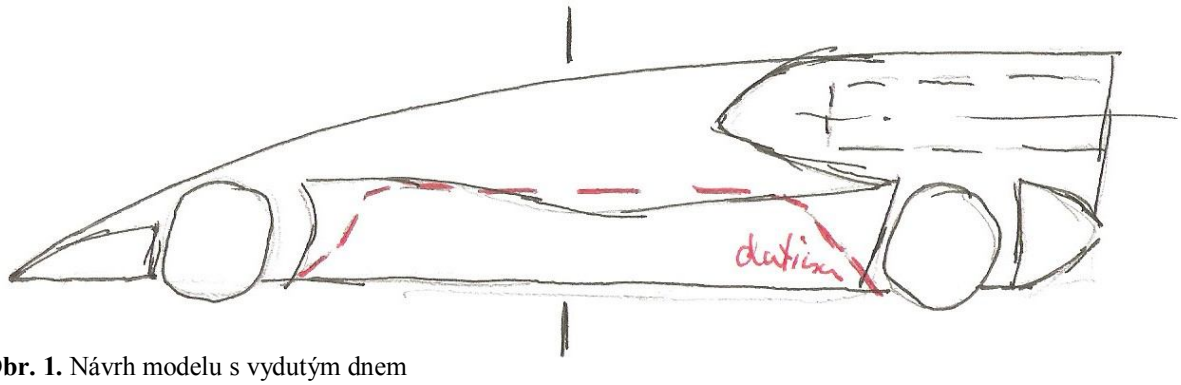
Při vytváření ideových návrhů modelů byly využity naše vlastní zkušenosti a poznatky z minulého roku. Hlavní úkol vývojového týmu spočíval ve vytvoření sumáře vlivů, které působí na model. Poté bylo nutné určit takové vlivy, které nejvíce zasahují do rychlosti vozu.

Faktory ovlivňující vývoj modelu:

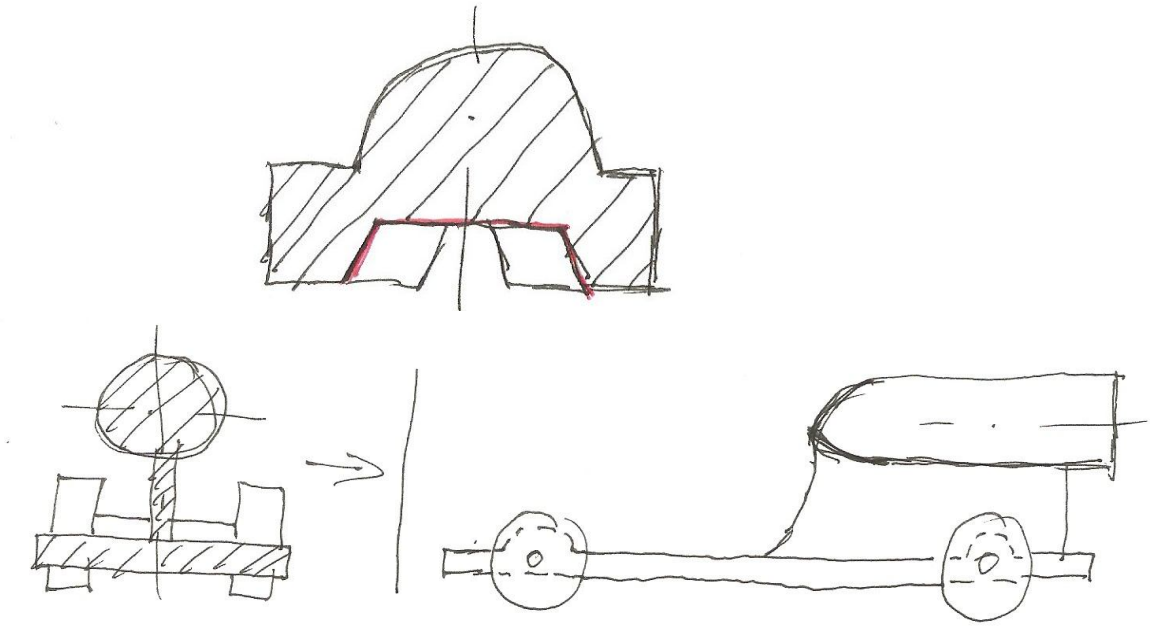
1) Vlivy působící na model (tvar vozu; aerodynamika; kinematika kol, odpory atd.)
2) Studie materiálu (vlastnosti balsového dřeva; zkoušky obrábění)
3) Programové dovednosti (využití CAD/CAM programů)
4) Technické zázemí (CNC frézka, upnutí polotovaru aj.)

První koncepty

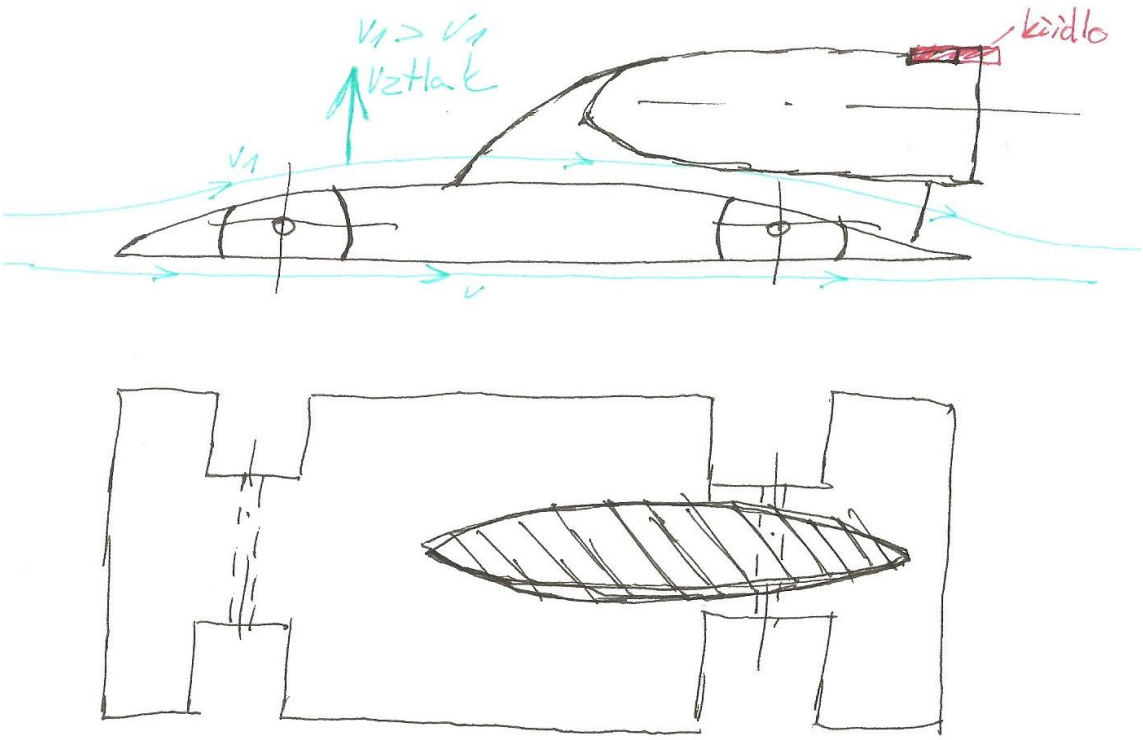
První návrhy našeho vozu vznikaly na papíře. Postupným vyřazováním z desítek skic zbylo osm modelů, které jsem přenesl do 3D podoby. Z těchto konceptů vznikl postupným zdokonalováním finální model.



Obr. 1. Návrh modelu s vydutým dnem

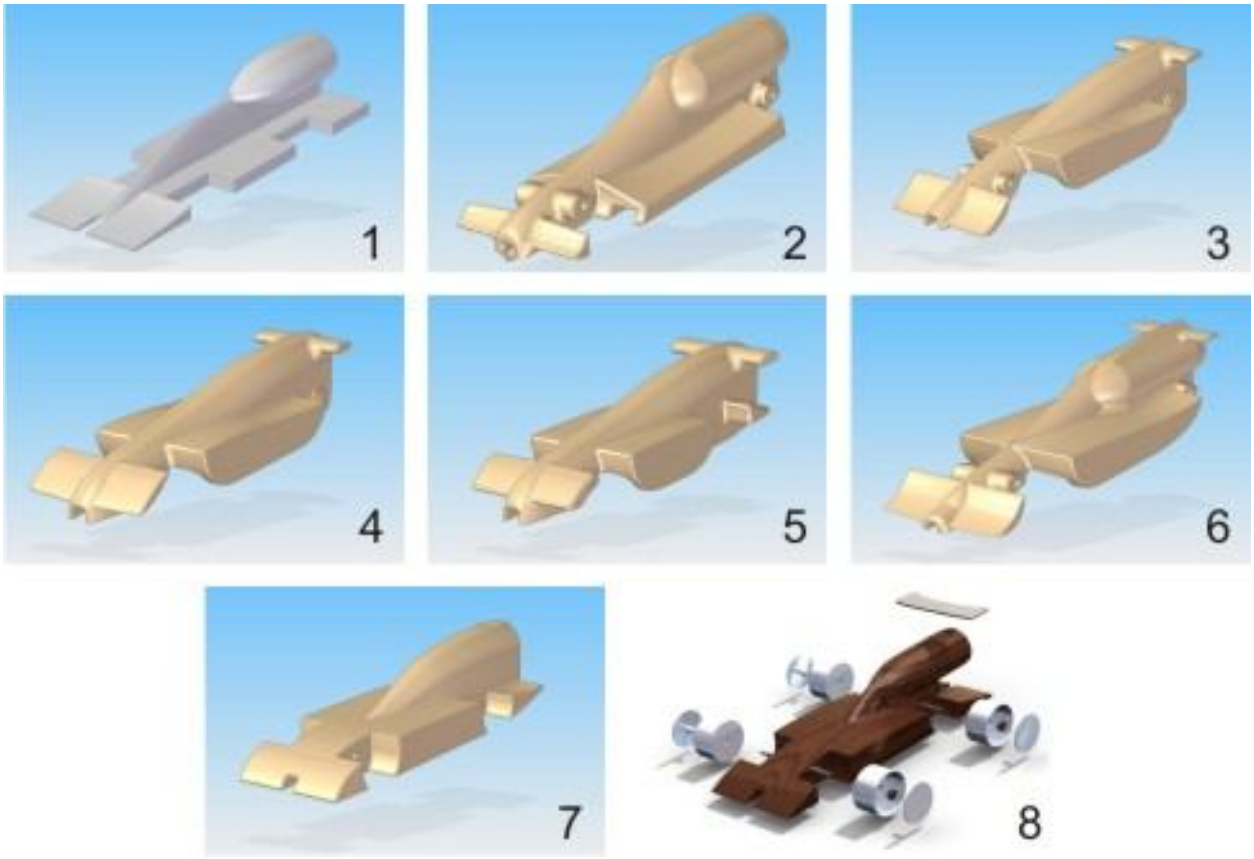


Obr. 2. Návrh modelu „T“



Obr. 3. Návrh modelu „křídlo“

Pro modelování jsem se nejprve rozhodl použít školní verzi softwaru Solid Edge V20, poté jsem přešel na program SolidWorks 2010 s modulem Flo Works pro zkoumání aerodynamiky vozu.

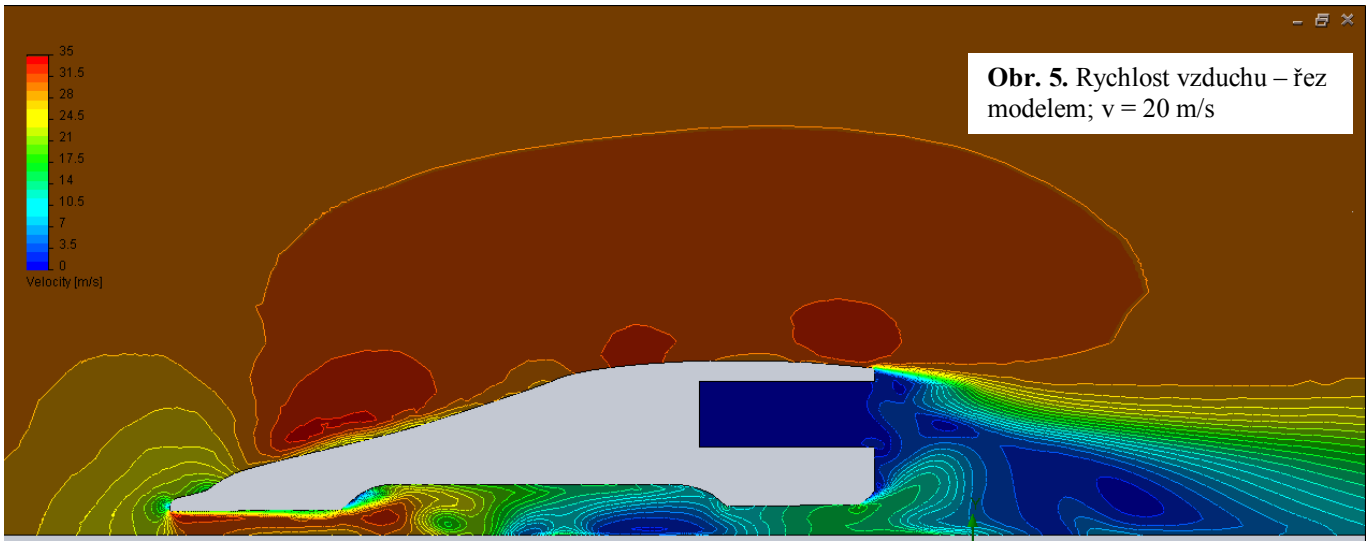


Obr. 4. Vývoj 3D modelů

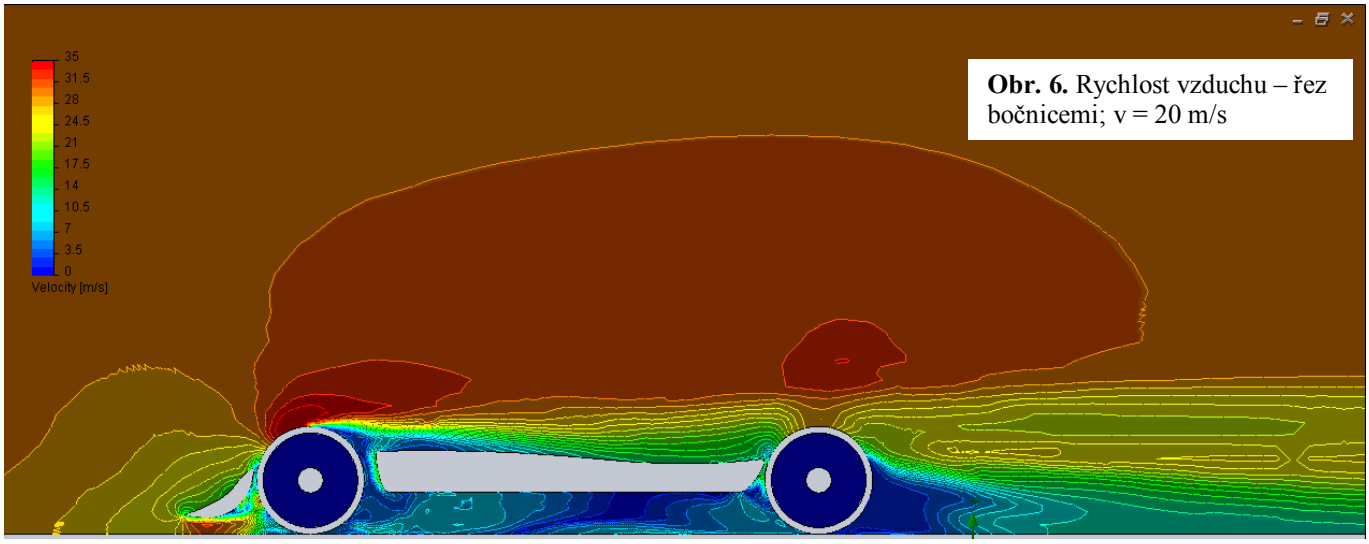
Model vozu –„vyduté dno“

Jedním z mých cílů bylo vytvořit model s lehkým balsovým tělem, a tím dát větší možnost konstruktérům na povrchové úpravy. Model měl zaujmout svou jedinečnou konstrukcí, proto jsem vymyslel model s vydutým dnem, kde se odebralo mnoho materiálu. Všechny modely této konstrukce jsem modeloval v CAD systému Solid Edge V20.

Dva typy modelu s vydutým dnem jsem obrobil a vyzkoušel na testovací dráze. Jejich čas okolo 1,28 s nepatřil k nejhorším, ovšem model „křídlo“ s rovným dnem dosahoval času o 5÷8 setin sekundy nižšího.



Obr. 5. Rychlost vzduchu – řez modelem; v = 20 m/s

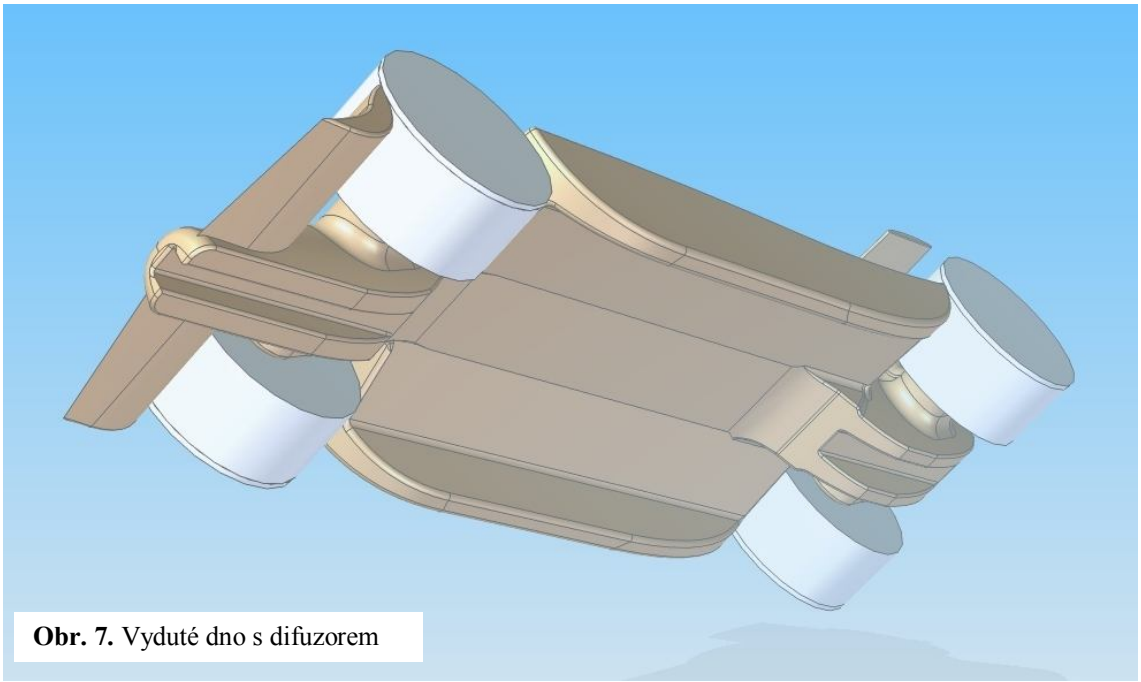


Obr. 6. Rychlost vzduchu – řez bočnicemi; v = 20 m/s

Z výsledků virtuální analýzy je patrné, že je za vozidlem a nad bočnicemi rozsáhlá oblast pomalého vzduchu, což znamená špatné obtékání vozu vzduchem a velký aerodynamický odpor. Nad odkrytými koly se sčítá rychlost proudícího vzduchu s obvodovou rychlostí kol.

Difuzor

Tento typ modelu obsahoval také difuzor. Tento prvek se dnes hojně využívá nejen u vozů formule 1. Difuzor je rozšiřující se prvek, kde protékající plyn zpomaluje, rozpíná se, a tím vzniká přítlak. Přítlak je v našem případě zcela zbytečný, a proto nás difuzor brzdí. Kdyby nám to technické zázemí dovolilo, mohl bych udělat uzavřený difuzor, který by nezpůsoboval přítlačnou sílu. Uzavřený difuzor je myšlen, jako otvor proměnného průřezu, který by vedl skrz model. Zde by se difuzor velmi uplatnil, a to díky jeho hlavní, ne příliš známé vlastnosti. Plyn tekoucí difuzorem se zpomaluje, naopak plyn obtékající model se musí zrychlovat. Za vozem se plyny mísí. Pokud by se rychlost plynu před a za vozem rovnala, nastal by ideální stav z hlediska kinetické energie modelu pohybujícího se po dráze.



Obr. 7. Vyduté dno s difuzorem

Model vozu – „křídlo“

Po několika ideových návrzích modelů jsem se díky testování rozhodl rozvíjet model, který bude mít ploché dno, celkový tvar vozu v profilu křídla a jeho kolmý průmět do plochy bude co nejmenší.

Tvar vozu musel být uzpůsoben technologickým požadavkům, obrobitelnosti materiálu, možnostem použité čtyřosé frézky a nástrojům.

Při vývoji modelu jsem se zaměřil na vlivy, které ovlivňují jeho pohyb.

Hlavní vlivy působící na model:

1) *Ploché dno a celkový tvar vozu*

- Celkový tvar vozu jsem zkonstruoval tak, aby celková přítlačná síla byla minimální.

2) *Hmotnost celku*

- Váha je jeden z klíčových faktorů ovlivňující hybnost, a proto jsem se snažil vytvořit vůz, který se váhově bude pohybovat na minimální povolené hranici.

3) *Kinematika kol*

- Odvalování kol má význam převážně na startu, kdy se energie bombičky mění na kinetickou energii modelu. Pro transformaci této energie je zapotřebí co nejmenších odporů.

4) *Aerodynamika modelu*

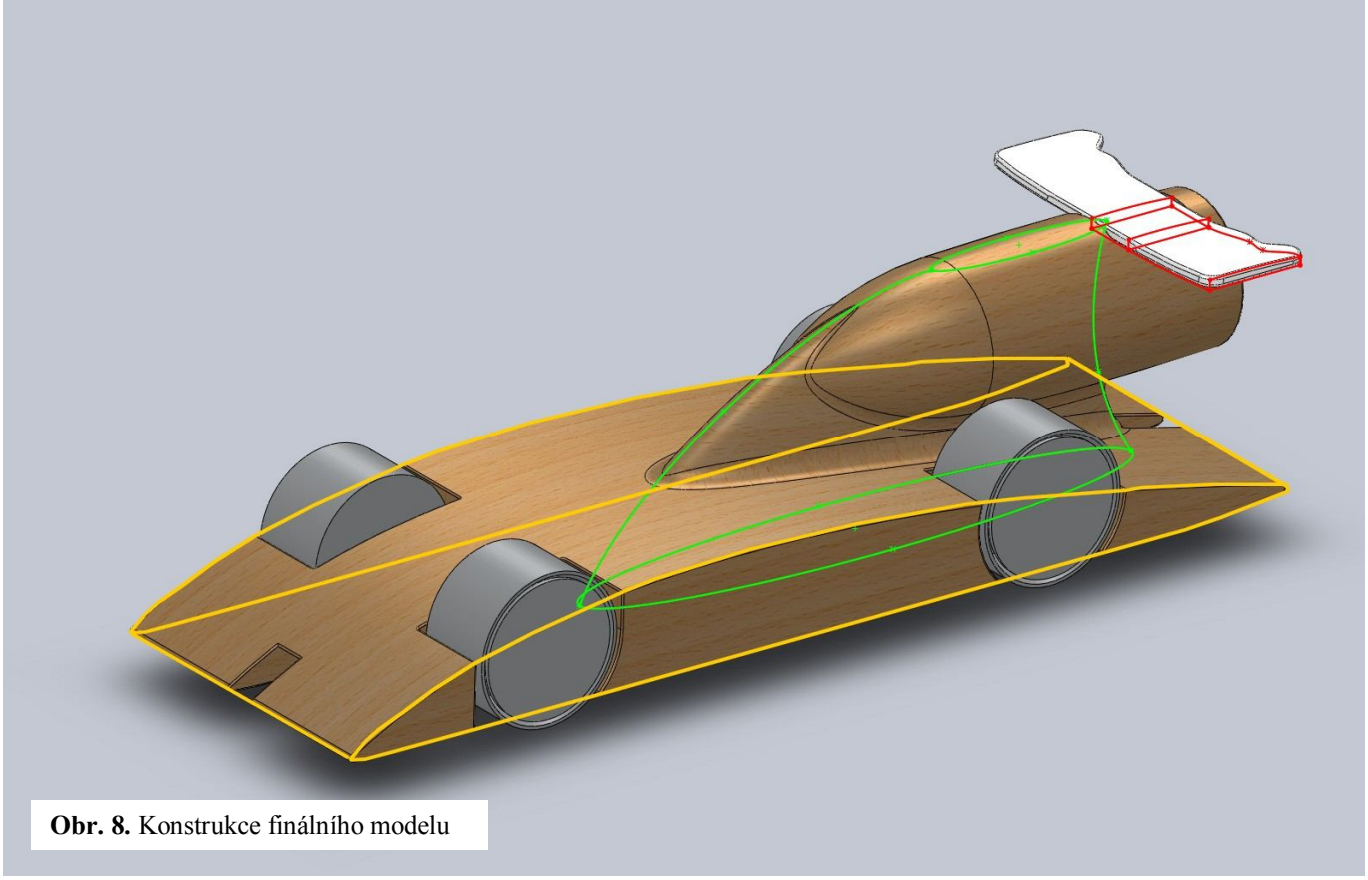
- Obtékání má vliv na přímočarý pohyb a vedení modelu na dráze. Celková studie aerodynamiky je nezbytná pro minimalizaci aerodynamických odporů.

5) *Vedení modelu*

- Vedení modelu zajišťuje struna, natažená na dráze a také směrovka na našem voze. Snažil jsem se dosáhnout přímočarého pohybu autíčka.

Vlastní modelování

Základem finálního modelu je tzv. „gondola“ na bombičku, která je vytvořena rotací, tak aby odpovídala pravidlům. Nosník „gondoly“ je vytažen ze dvou skic pomocí dvou řídících křivek. Skicy mají elipsovitý tvar umožňující dobré obtékání. Přední vodící křivka, tvořící směrovku vozu, tečně navazuje na horní hranu „gondoly“. Poté jsem vytáhl podvozek vozu ve tvaru křídla. Následovalo odřezávání děr pro kola, drážky pro vodící strunu a plošky pro přilepení zadního křídla. Díry pro osy a bombičku byly vytvořeny funkcí díra. V posledním kroku byly vytvořeny na celém modelu rádiusy. Všechny hrany byly zaobleny pro zlepšení chodu CNC stroje.



Obr. 8. Konstrukce finálního modelu

Kola, osy a puklice byly vytvořeny rotací. Zadní křídlo je taženo přes tři profily (viz. Obr. 8.) a dvě vodící křivky. Jeho tvar je tečný na tvar vozidla, a to kvůli minimálním přechodovým odporům.

Pomocí CAD systému jsem kontroloval celkovou váhu sestavy, aby byla zajištěna cílová hmotnost (55,5 g).

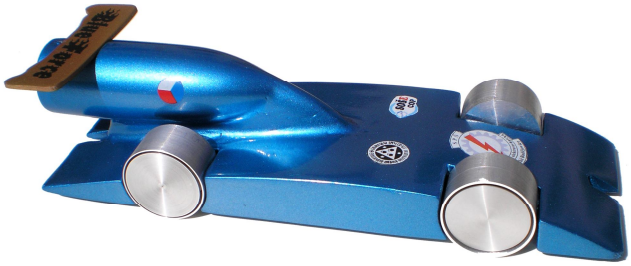
Ploché dno

Při přímočarém pohybu po testovací dráze není zapotřebí přítlačných sil, protože je model jištěn strunou. Pokud by na model působila pouze gravitační síla, považoval bych tento stav za ideální a snažil jsem se ho docílit. Pod plochým dnem vzniká vzduchový polštář na kterém auto „plave“. Profilem vozu ve tvaru křídla se snažím docílit vztlakové síly, která by se v ideálním případě měla rovnat síle přítlakové.

Na konci vozu se podvozek mírně zvedá a tím vzniká nepatrný podtlak pomocí difuzorového efektu. Pomocí tohoto prvku nadlehčujeme přední část vozu, pod kterou začne vznikat vzduchový polštář a model začne „plavat“.

Parametry finálního modelu:

- Váha vozu bez bombičky.....55,5 g
- Celková délka vozu.....190,3 mm
- Celková šířka vozu.....60 mm
- Celková výška vozu.....46,3 mm
- Čistý čas na dráze.....1,122 s.



Obr. 9. Fotografie závodního modelu pro Kolín

Obr. 10. Rendr sestavy závodního modelu

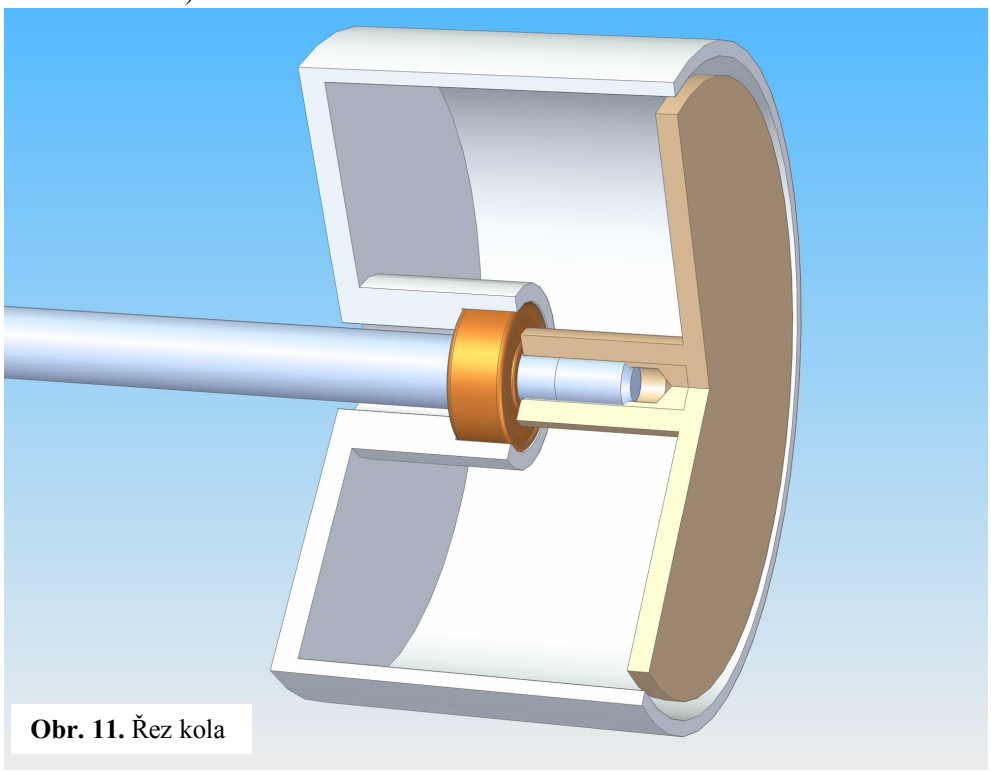
Kinematika kol

Na závodech bylo možno pozorovat zajímavý jev. Při současném startu dvou modelů měl jeden model velmi vysokou akceleraci, ale po skončení působení reaktivní síly z bombičky jeho rychlost začala prudce klesat. Oproti tomu druhý model zrychloval podstatně pomaleji, ale po skončení působení hnací síly jeho rychlost klesala mírněji, a to dokonce do té míry, že jeho průměrná rychlost byla vyšší a dorazil do cíle v kratším čase.

Kinematiku kol podrobně zkoumal můj předchůdce, Jan Frouz. Naše vysvětlení tohoto jevu je, že pokud se kola modelu při startu a jízdě dotýkají vozovky, fungují jako setrvačník, akumulují do sebe energii při působení bombičky a opět jí vydají po skončení jejího působení.

Množství akumulované energie je závislé na momentu setrvačnosti a druhé mocnině úhlové rychlosti. Moment setrvačnosti je dán hmotností kola a poloměru setrvačnosti od osy otáčení. Při letošním testování jsme zjistili, že optimální průměr kol na našem voze je 27 mm. Snadné otáčení kol snižuje ztráty na startu, kde se transformuje kinetická energie plynu, unikajícího z CO_2 bombičky, na kinetickou energii autíčka. Proto jsem se rozhodl použít valivá kuličková ložiska pro možná co nejmenší valivé odpory.

Ložiska jsou uložena na pevné ose přesně v těžišti kola. Na konci osy je vyřezán závit, na který je našroubována puklice, která se neotáčí, a tím snižuje aerodynamický odpor (viz. Aerodynamika modelu)



Obr. 11. Řez kola

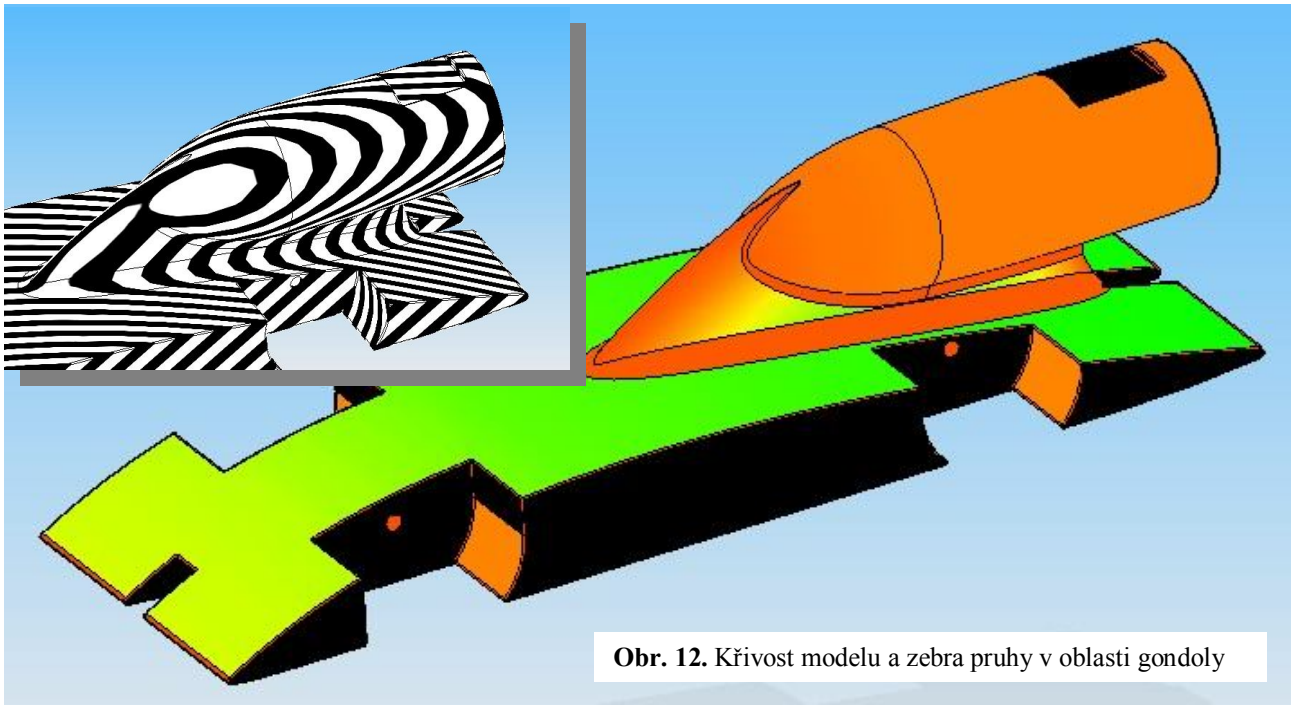
Aerodynamika modelu

Ačkoliv při rychlostech 20 m/s, ve kterých se pohybuje model, nemá aerodynamika rozhodující vliv na rychlost, bylo mým cílem navrhnout model tak, aby kladl co nejmenší aerodynamický odpor.

Aerodynamický odpor je definován jako síla, která působí proti pohybu tělesa při jeho pohybu vzduchem. Aerodynamický odpor závisí na několika hlavních faktorech. Hustota media má na odpor zásadní vliv. S hustotou se zvyšuje setrvačnost tekutiny, které je nucena změnit svoji polohu, tudíž klade i větší odpor. Odpor se dále zvyšuje s plochou pohybujícího se tělesa. A to na prvním místě s průmětem plochy průřezů tělesa do plochy kolmé ke směru pohybu. Není to však jediná plocha ovlivňující odpor, musíme brát v potaz i plochu mezi mediem a tělesem, tedy povrch tělesa, který ovlivňuje velikost viskózního odporu.

Kromě výše zmíněných faktorů je odpor ovlivňován ještě celu řadou vlivů, např. drsností povrchu tělesa, jeho tvarem, tekutostí media, stlačitelností media, velikostí mezní vrstvy apod. Tyto faktory mohou být zjednodušeně zahrnuty do odporového součinitele *Cd*.

Ze zmíněných vlivů jsem se při konstrukci zaměřil především na co nejmenší čelní průmět plochy a tvar vozidla. Tvar modelu jsem navrhoval se záměrem zabránit vzniku víření a nežádoucího odtržení proudu vzduchu. Při modelování jsem zkoumal křivost modelu, návaznost a hladké přechody sousedících ploch pro zlepšení aerodynamiky a zajištění plynulosti obrábění.



Obr. 12. Křivost modelu a zebra pruhy v oblasti gondoly

Aby bylo dosaženo souladu s pravidly a omezeními soutěže, bylo nutné začlenit do modelu také přední a zadní křídla. Jelikož u modelu nepochází hnací síla od motoru a nepřenáší se přes kola na vozovku, považuji přítlak za nežádoucí.

Přední křídlo bylo vyrobeno jako součást podvozku, aby docházelo k dobrému obtékání kol. Dolepované zadní křídlo je navrženo co nejtenčeji kvůli čelnímu odporu a jeho tvar je uzpůsoben postupnému odtrhávání proudnic vzduchu.

V zadní části vozidla jsem se snažil vytvořit kapkovitý tvar a tím omezit vznik podtlaku a následného víření, když přestane unikat plyn z bombičky. Dále jsem zvýšil účinnost bombičky po dobu jejího působení tím, že plyn z ní unikající bude obtékajícím vzduchem usměrňován do osy modelu.

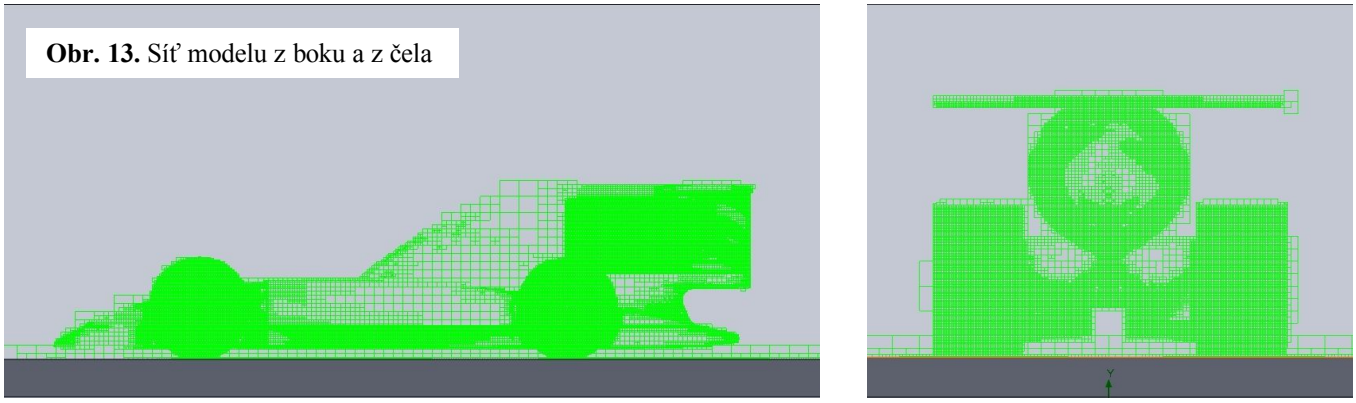
Jako značné zlepšení aerodynamických vlastností se ukázalo zakrytí kol modelu hladkými disky, které způsobují mnohem menší víření vzduchu než nekrytá kola. Při testování byl tento rozdíl téměř jedna desetina sekundy, která v závodě hraje velkou roli.

Testování ve virtuálním aerodynamickém tunelu

Pro testování ve virtuálním aerodynamickém tunelu jsem zvolil software Solid Works 2010 s doplňkovým modulem Flo Works. Výsledky jsem porovnal s mými návrhy, pečlivě analyzoval a vycházel z nich při úpravách, které vedly ke vzniku výsledného tvaru.

Flo Works využívá metodu konečných prvků, která patří mezi nejčastější metody řešení úloh z mechaniky proudění tekutin. V principu se řešený objem rozdělí na konečnou řadu menších segmentů, ve kterých se pak řeší rovnice aerodynamiky a termodynamiky postupnou iterací tak, aby byla nalezena rovnováha.

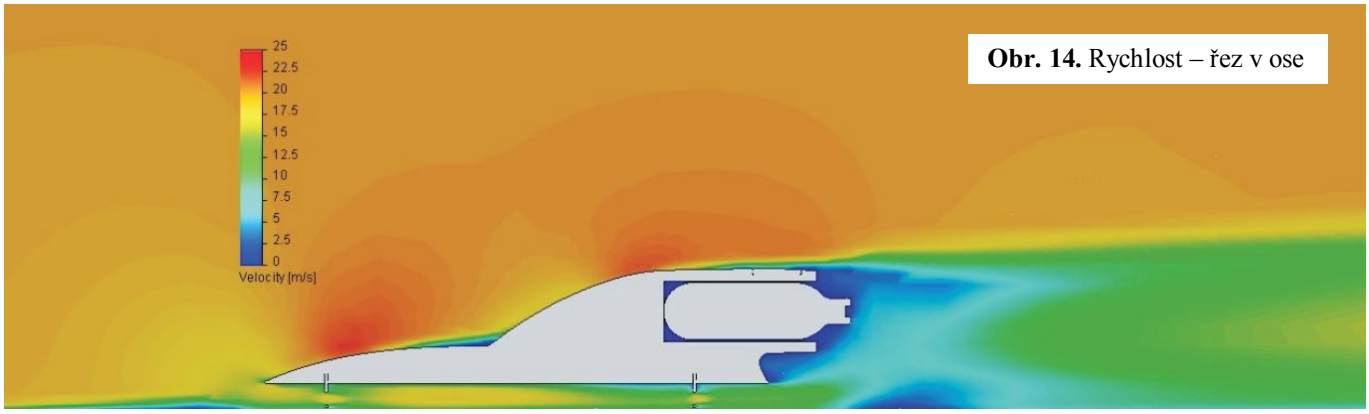
S tímto softwarem jsem byl schopen simulovat obtékání modelu včetně vlivu rotace kol a relativního pohybu vozovky vůči modelu. Model byl ofukován na dráze, která výsledky také ovlivňuje. Velikost buněk sítě jsem si nastavil podle potřeby. V místech, kde jsem nepředpokládal žádné změny, jsem nechal větší velikost buněk. Na místech, kde jsem chtěl sledovat jak se médium chová, jsem nastavil malé segmenty, které se podle předběžných výsledků mohly ještě zjemňovat.
Také jsem simuloval expanzi plynu z bombičky v závislosti na čase. (viz. Bombička)



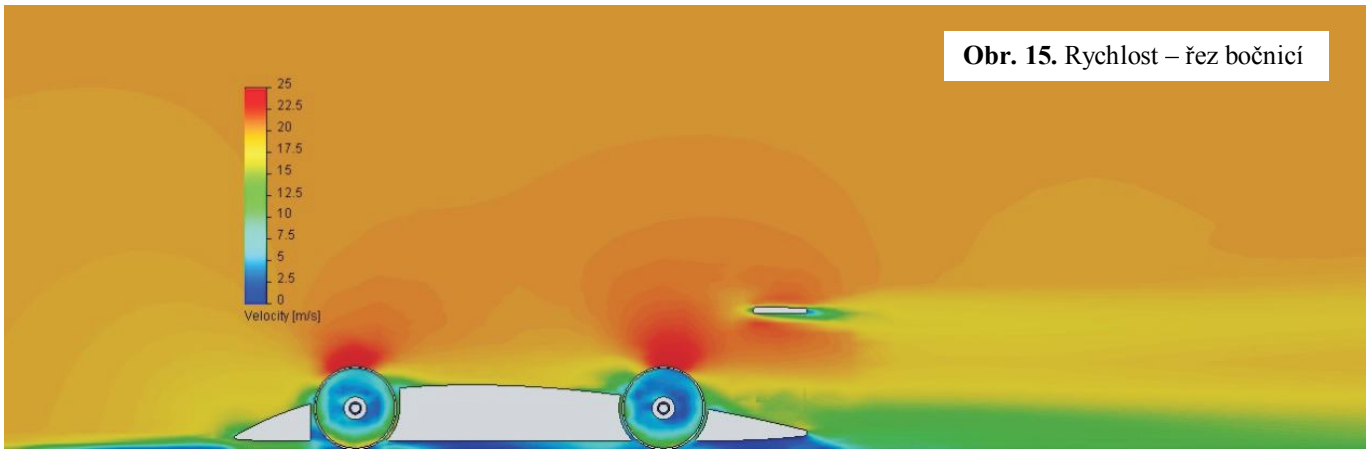
Obr. 13. Síť modelu z boku a z čela

Výsledky aerodynamického tunelu – finální model

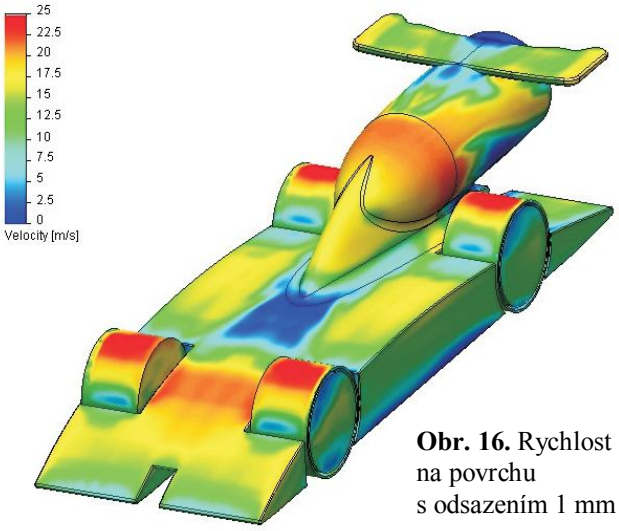
Rychlost **–** ofukováno s rychlostí vzduchu 20 m/s, měřítko rychlosti vzduchu 0÷25 m/s



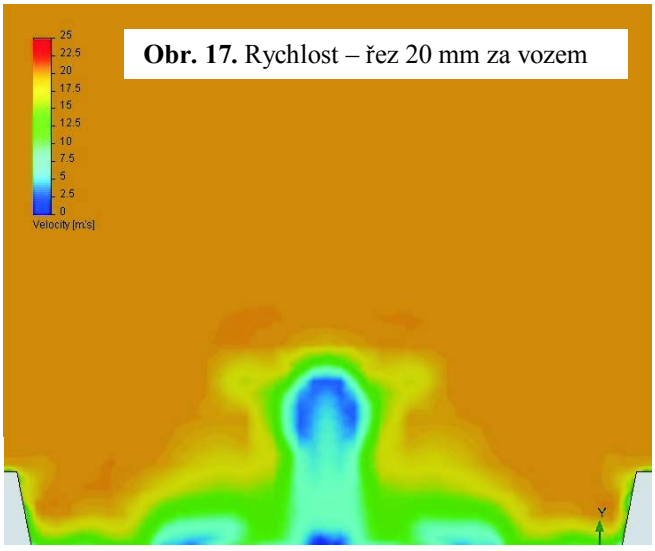
Obr. 14. Rychlost – řez v ose



Obr. 15. Rychlost – řez bočnicí

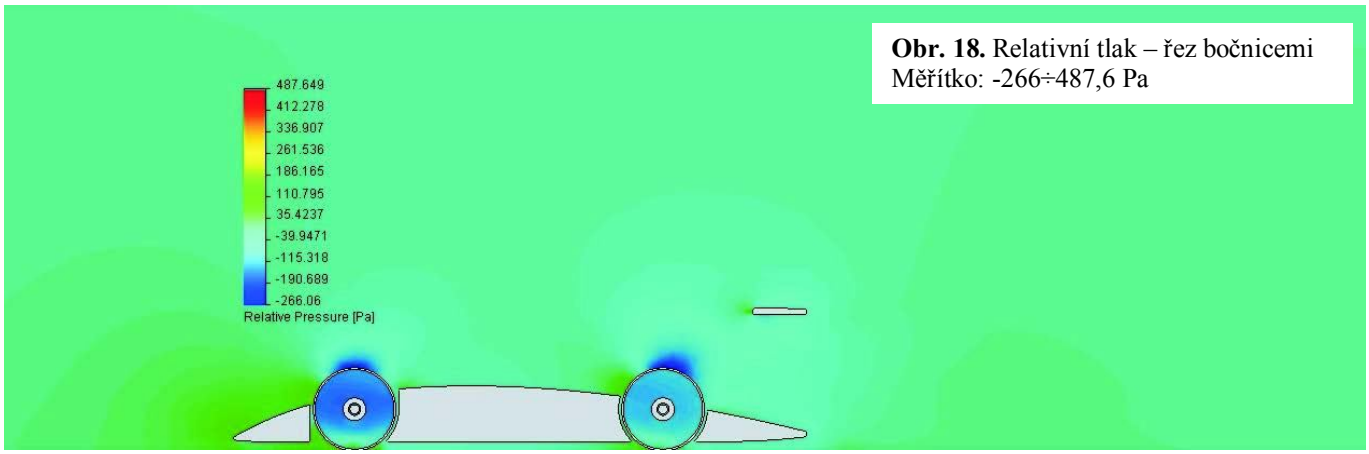


Obr. 16. Rychlost na povrchu s odsazením 1 mm

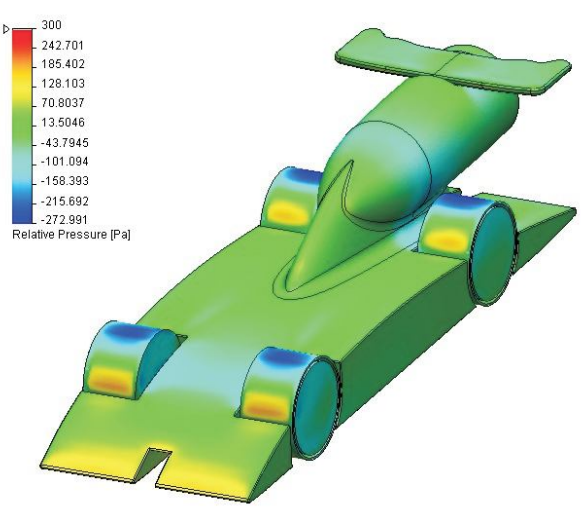


Obr. 17. Rychlost – řez 20 mm za vozem

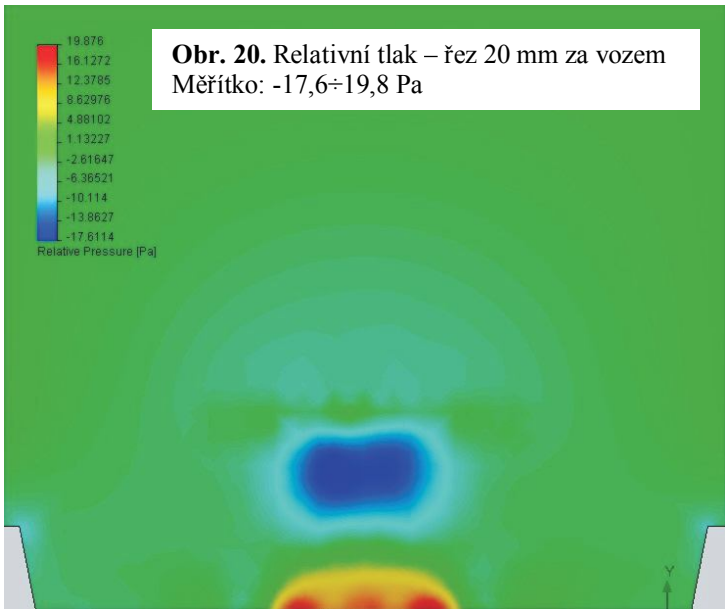
Relativní tlak



Obr. 18. Relativní tlak – řez bočnicemi
Měřítko: -266÷487,6 Pa

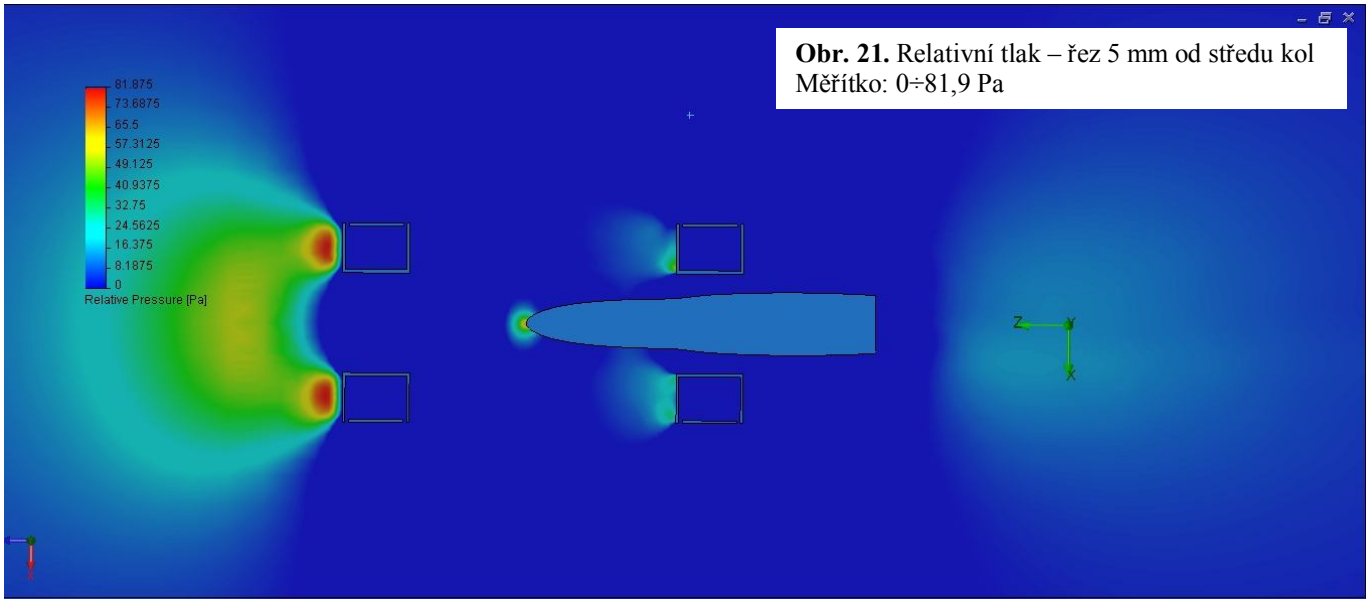


Obr. 19. Relativní tlak – na povrchu s odsazením 1 mm
Měřítko: -272,9÷300 Pa



Obr. 20. Relativní tlak – řez 20 mm za vozem
Měřítko: -17,6÷19,8 Pa

Na obr. 20. je možné sledovat přetlak, který se vytváří ve spodní části za vozem.



Obr. 21. Relativní tlak – řez 5 mm od středu kol
Měřítko: 0÷81,9 Pa

Technologie výroby

Použitá zařízení a software:

- CNC frézka: FC 16 CNC
- Dělící přístroj: DP2
- CAM: SURFCAM Velocity 4.0

Nástroje:

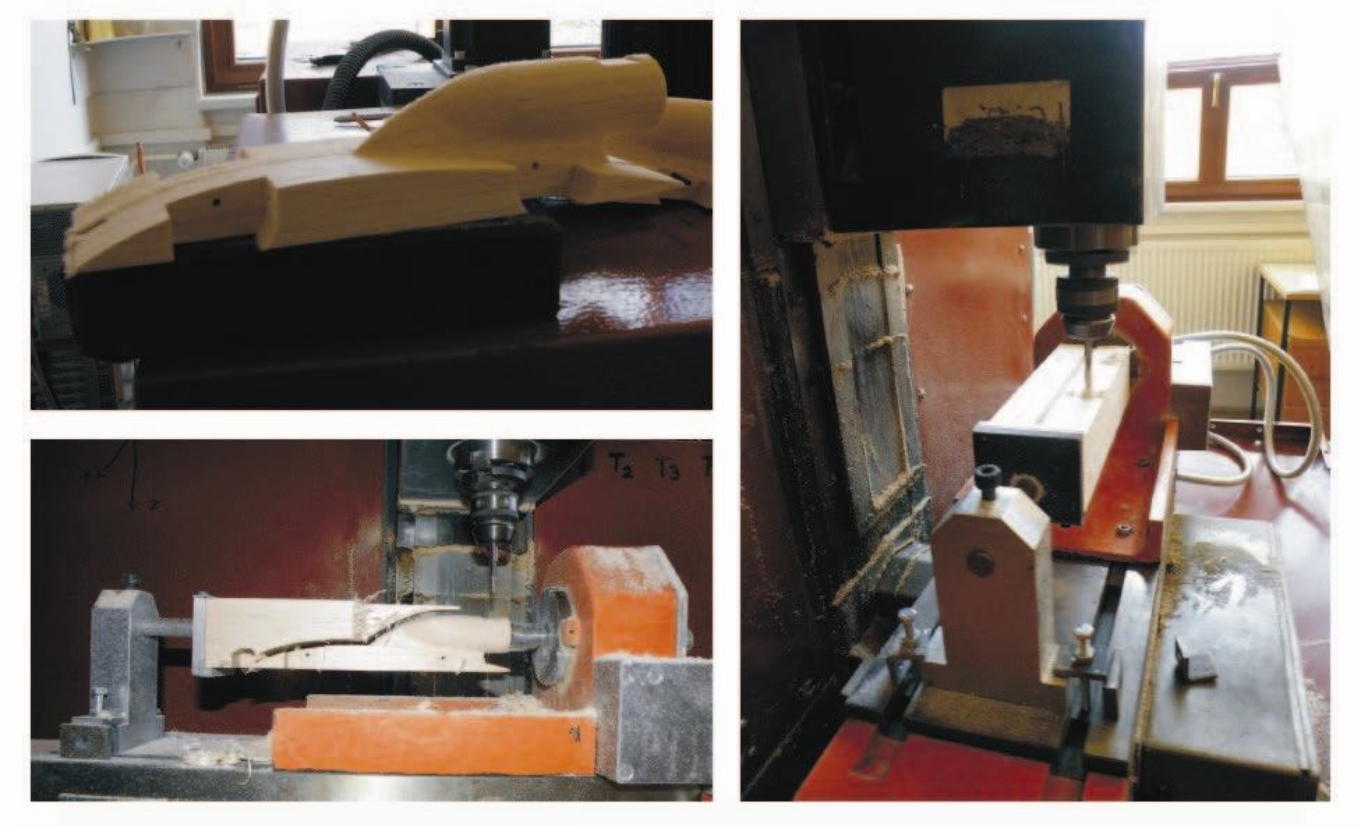
- T1 – Válcová fréza Ø 5 mm
- T2 – Rádiusová fréza Ø 4 mm; R2
- T3 – Vrták Ø 3 m

Volba technologie

Vzhledem k tvaru modelu, jsme se rozhodli obrábět model s použitím 4. osy. Proto byl realizován dřívější úmysl upravit nevyužitelný otočný stůl se svislou osou na dělicí přístroj s osou rovnoběžnou s pracovní osou „X“.

Dělící přístroj

Dělící přístroj zachoval kinematické prvky otočného stolu (šnekový převod, krokový motor a převod ozubeným řemenem) a těleso děličky bylo vytvořeno jako svařenec. Vřeteno bylo uloženo do kuželíkových ložisek a upínání obrobku jsme vyřešili pomocí kleštiny. Upnutí obrobku bylo navrženo s využitím předvrtaného otvoru pomocí upínacího trnu a z druhé strany pomocí upínacího přípravku. Tuhost tohoto upnutí je dostatečné pro navrženou technologii výroby.



Obr. 22. Upnutí modelu v dělícím přístroji DP2

Řezné podmínky

Abych si ověřil správnost zvolených řezných podmínek, provedl jsem několik modelových obráběcích operací ještě před vlastním obrobením modelu. Sledoval jsem parametry pro korekce nástrojů, podmínky, za kterých se dřevo štípe a tuhost upnutí. Díky provedenému testování bylo možno dosáhnout kvalitního povrchu i opakované přesnosti modelu.

Druh obrábění:	Sousledné obrábění
Otáčky:	8000 ot/min
Posuv:	2500 mm/min
Maximální hloubka třísky:	5 mm

Vlastní obrábění

K obrábění byl použit software SURFCAM Velocity 4.0

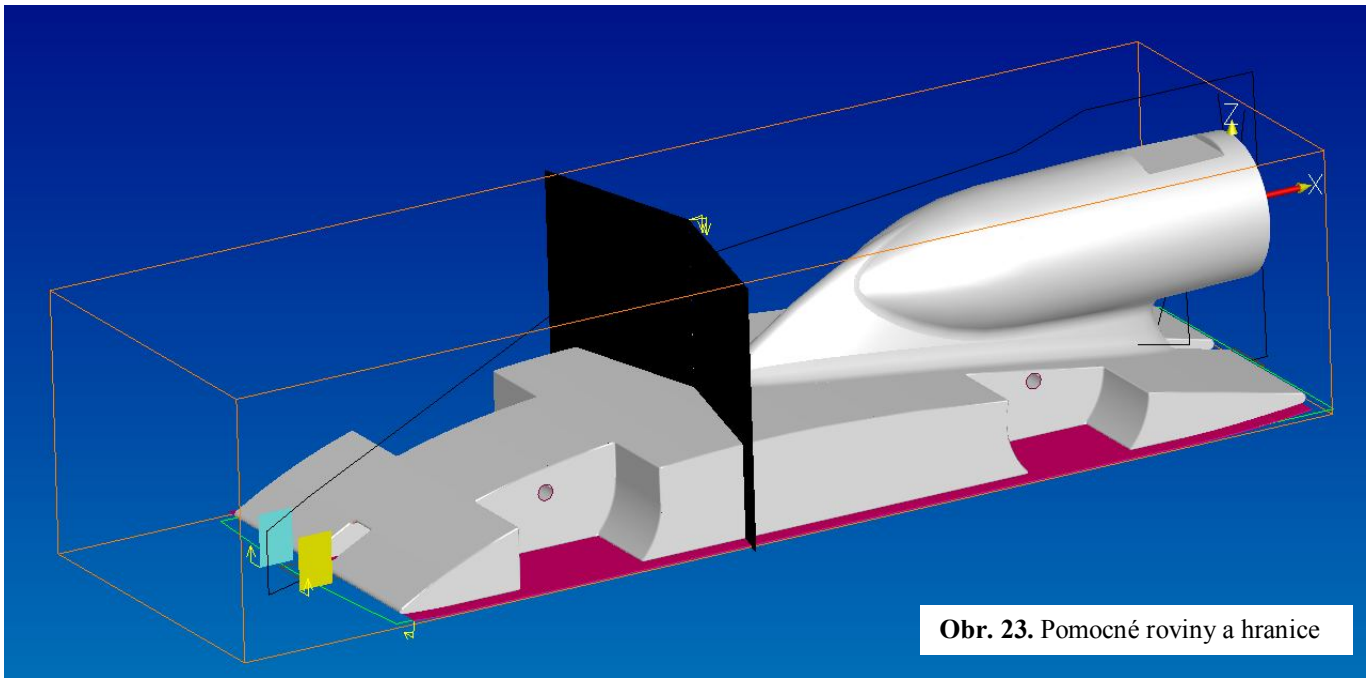
Tuhé upnutí z obou dvou stran nám umožnilo následující technologii. Zprvu jsem rovinným obráběním obrobil spodek modelu a následně byla metodou dokončování v „Z“ překlibrována šířka a hloubka drážky pro vodící strunu. Po přetočení obrobku na levý bok se funkcí „Z-hrub“ a metodou „cik-cak“, s krokem v ose „Z“ 5 mm, přídavkem 2 mm a přísuvem 4 mm, odhrubovala oblast u trupu těla a „gondoly“ na bombičku. Hrubování bylo omezeno pomocnou rovinou, aby se zbytečně neprodlužoval strojní čas a nástroj neobráběl již obrobený povrch. Následné rovinné obrábění načisto s přírůstkem 0,3 mm v ose „X“ obrobilo celý tvar modelu. Bez oboustranného upnutí by tato technologie nebyla možná, aniž by se obrobek neohruboval celý i v přední části. V místě mezi „gondolou“ a podvozkem válcová fréza nedokázala obrobit přesný požadovaný tvar, a tak bylo potřeba použít rádiusovou frézu. Pomocí dělícího přístroje jsem natočil obrobek na vhodný úhel a rovinné obrábění s přírůstkem 0,3 mm omezené hranicí odebralo rádiusovou frézou zbytkový materiál po předchozích operacích. Po této operaci jsem vyvrtal díry pro osy vrtákem o průměru 3 mm. Druhý bok se obrobil shodně jako první, ale bez operace vrtání. Poslední operací bylo rovinné obrábění plochy pro zadní křídlo s přírůstkem 0,2 mm. Tento proces byl omezen hranicí a byl nezbytný pro přesné uložení křídla.

Čtyřbřitá válcová fréza nám umožnila zavrtávání do materiálu, jelikož její břity vedly až do středu otáčení, proto jsme nemuseli řešit rampování nebo jiný druh najíždění do materiálu.

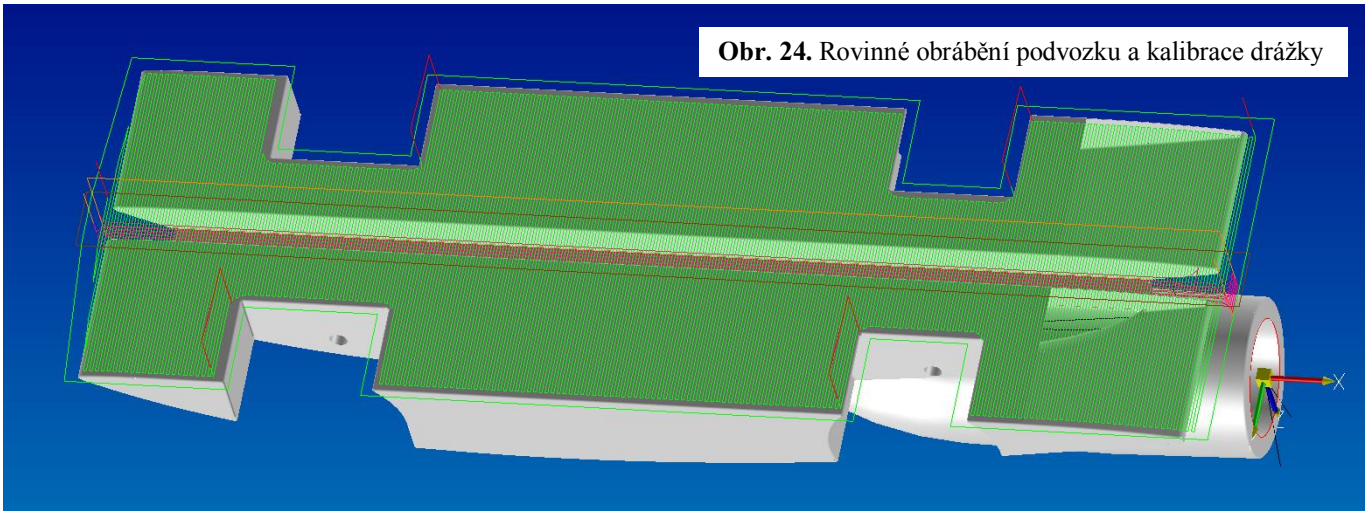
Pro značné množství jemného prachu, který při frézování vznikal, bylo k frézce připojeno odsávací zařízení.

Výsledný povrch byl čistý a hladký, a to díky testu obrobitelnosti balsového dřeva. Závodní model byl obroben i z ořechového a třešňového dřeva. Řezné podmínky pro toto obrábění byly zachovány, jen jsem zmenšil otáčky na 3000 ot/min kvůli větší třísce a menšímu zahřívání dřeva při obrábění. Tyto modely sloužili jako pomůcka při prezentacích, kde jsem ukazoval dráhy nástroje a jakým způsobem byl model obroben. Modely z ořechového či třešňového dřeva zaujaly svým designem.

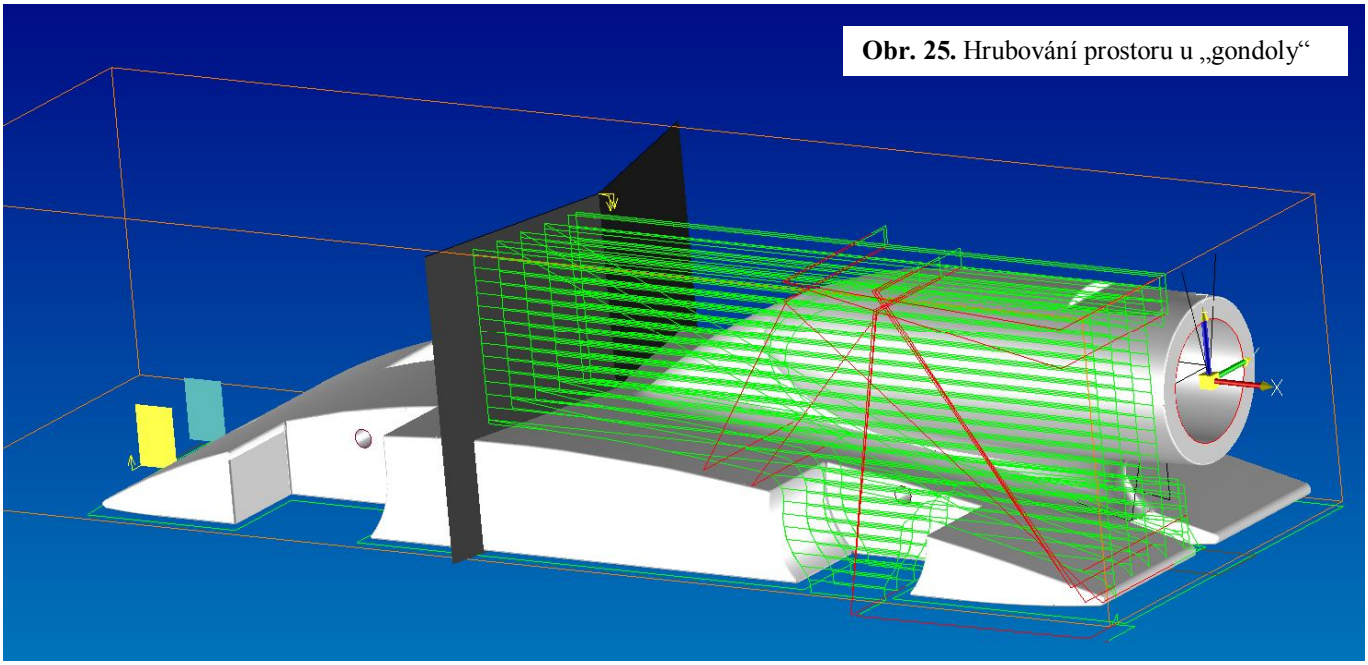
Dráha nástrojů	2887,4 m
Počet bloků programu	69341
Celkový čas obrábění	2 hod 2 min 10 s
Objem polotovaru	694,7 cm^3
Objem modelu	145,7 cm^3
Výtěžnost	20,97 %



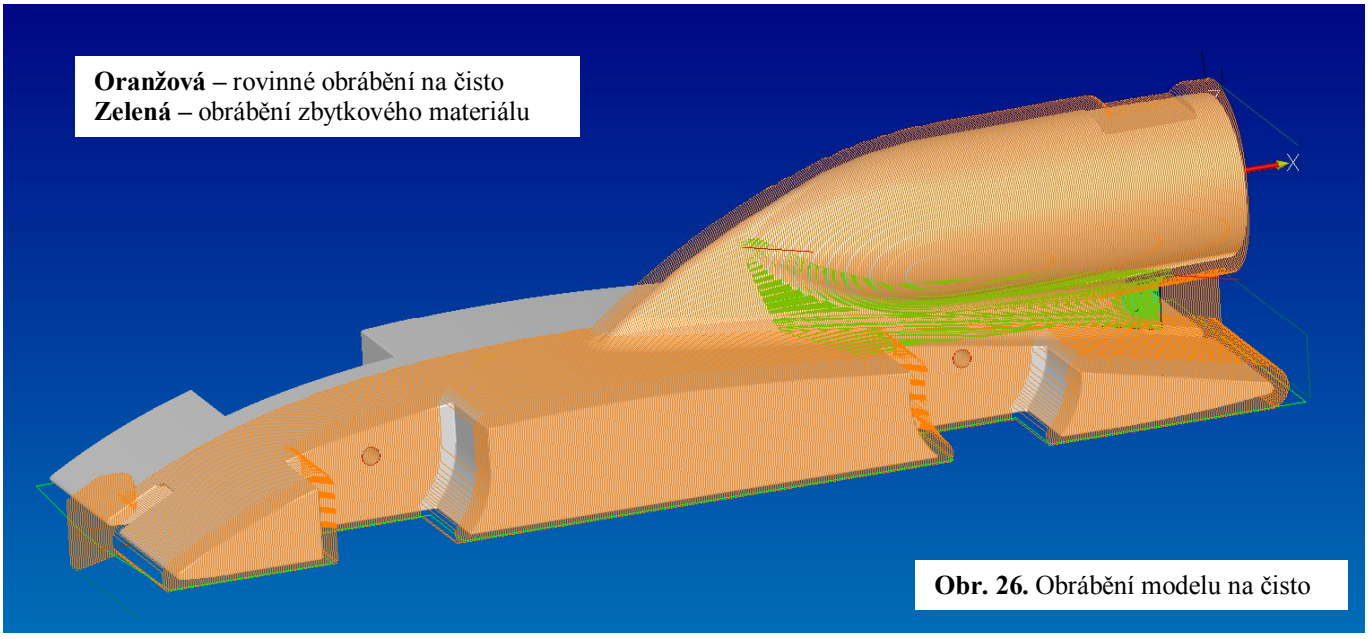
Obr. 23. Pomocné roviny a hranice



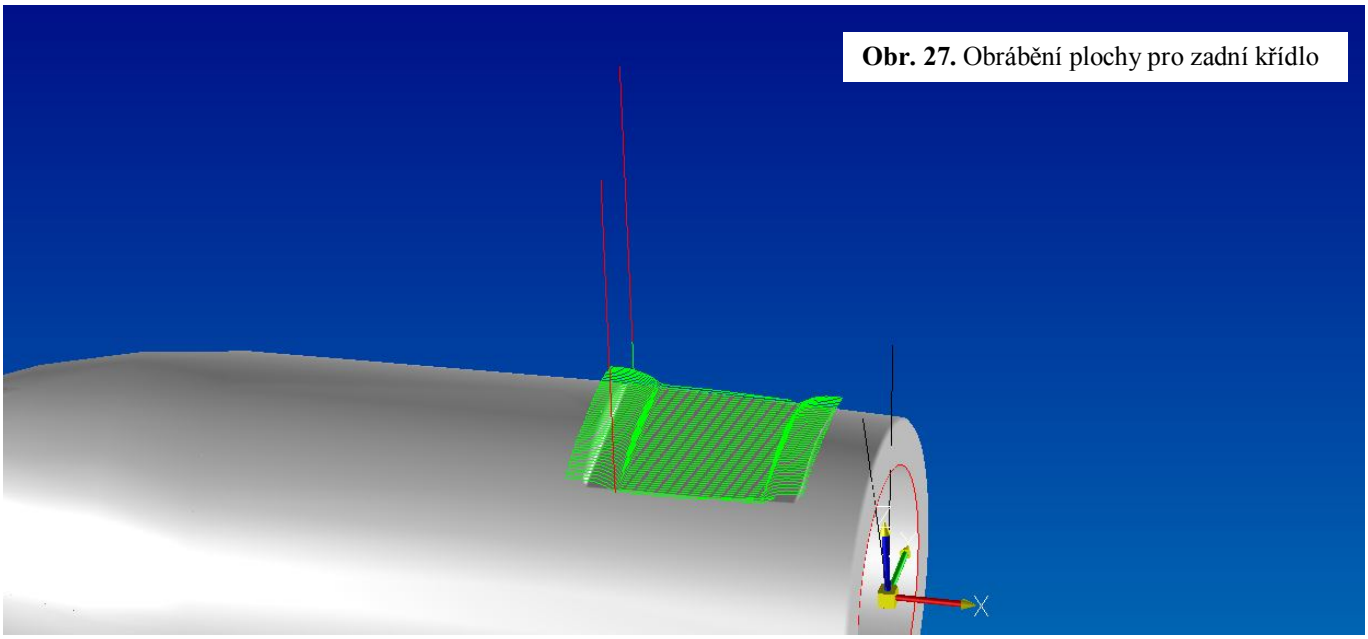
Obr. 24. Rovinné obrábění podvozku a kalibrace drážky



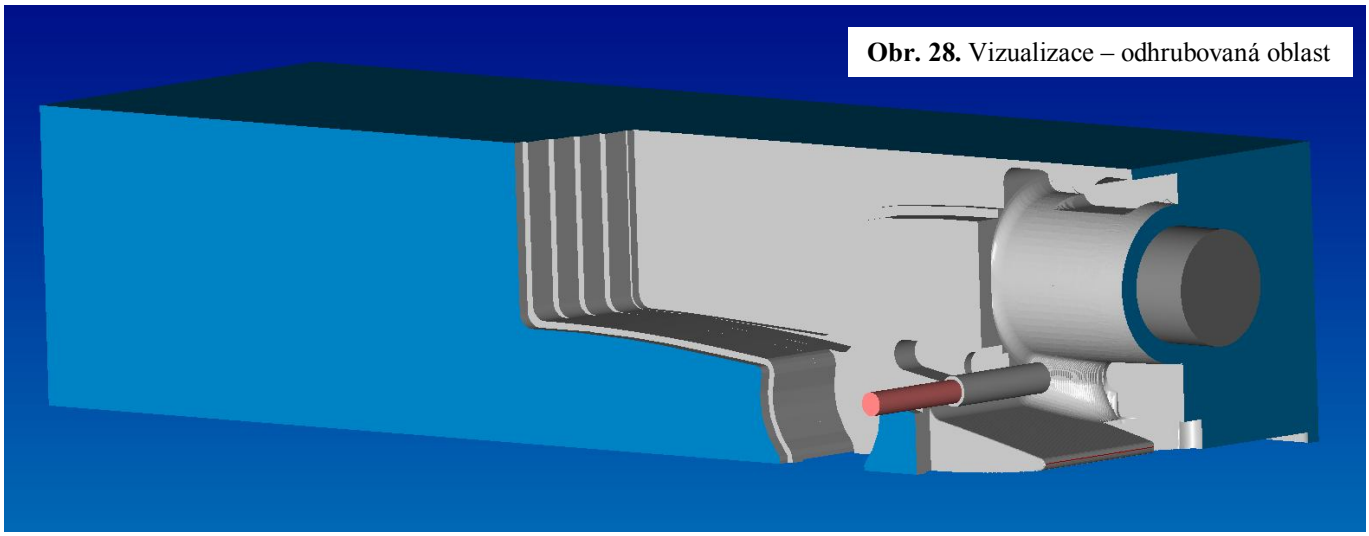
Obr. 25. Hrubování prostoru u „gondoly“



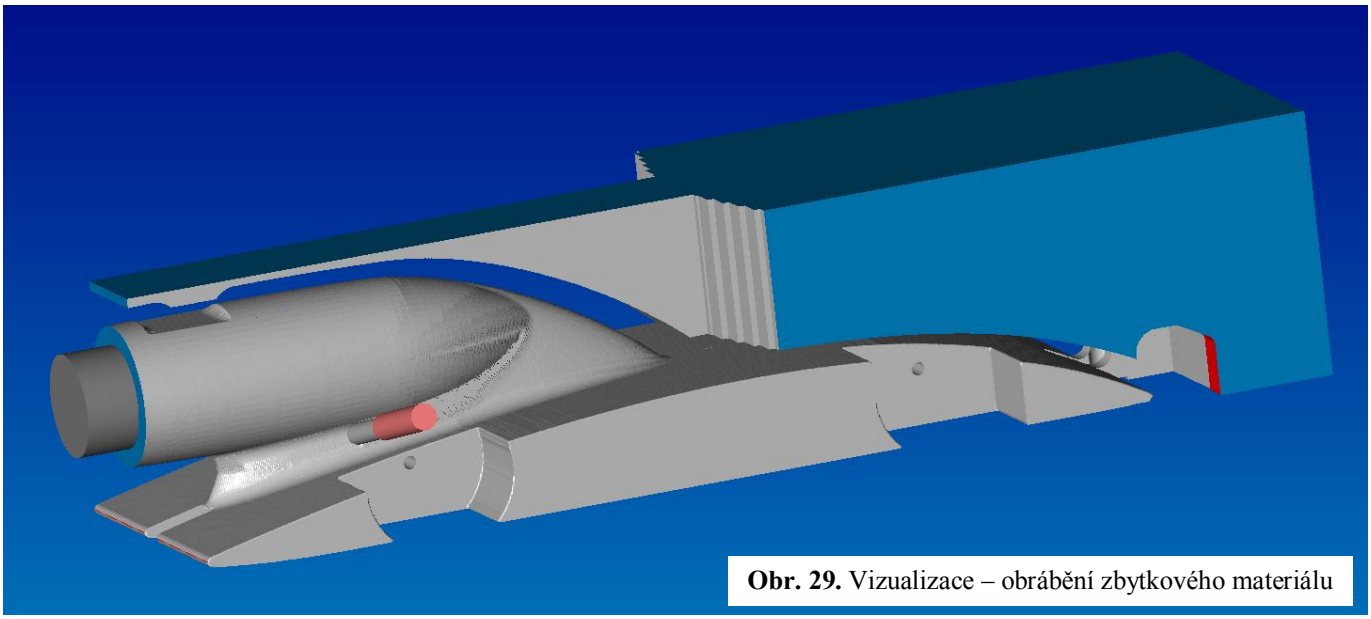
Obr. 26. Obrábění modelu na čisto



Obr. 27. Obrábění plochy pro zadní křídlo



Obr. 28. Vizualizace – odhrubovaná oblast

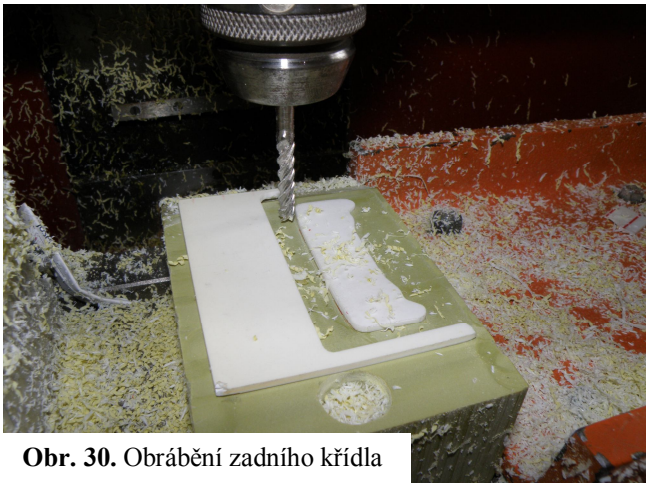


Obr. 29. Vizualizace – obrábění zbytkového materiálu

Obrábění zadního křídla

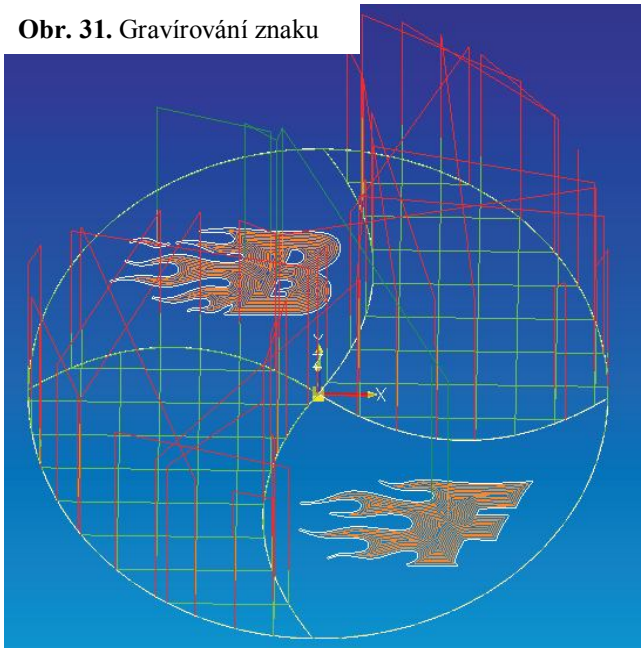
Po navržení zadního křidélka jako samostatné části jsem začal přemýšlet také o jeho výrobě. Bylo potřeba docílit přesného uložení dvou dosedajících ploch, a proto jsem jako technologii výroby volil obrábění na CNC frézce. Jako nástroj jsem použil čelní čtyřbřitou válcovou frézu o Ø 5 mm. S tímto nástrojem jsem obráběl i náš model.

První operací bylo zarovnání plochy polyuretanu (umělého dřeva), na kterou se poté nalepil sekundovým lepidlem plastový polotovar. Rovinné obrábění s přírůstkem 0,2 mm v ose „Y“ vytvořilo přesný a požadovaný tvar křídla. To se poté lehce odlouplo od základní plochy a dočistilo brusným papírem.



Obr. 30. Obrábění zadního křídla

Obr. 31. Gravírování znaku



Gravírování

Puklice kol byly ozdobeny vygravírovaným znakem, který byl vytvořen v programu Corel DRAW a následně převeden do SurfCAMU. Funkcí kapsování byly vytvořeny písmena. Obrys byl vygravírován pomocí kontury. Nástroj pro gravírování byl gravírovací, odpružený hrot. Gravírování probíhalo při 8000 ot/min do hloubky 0,1 mm.

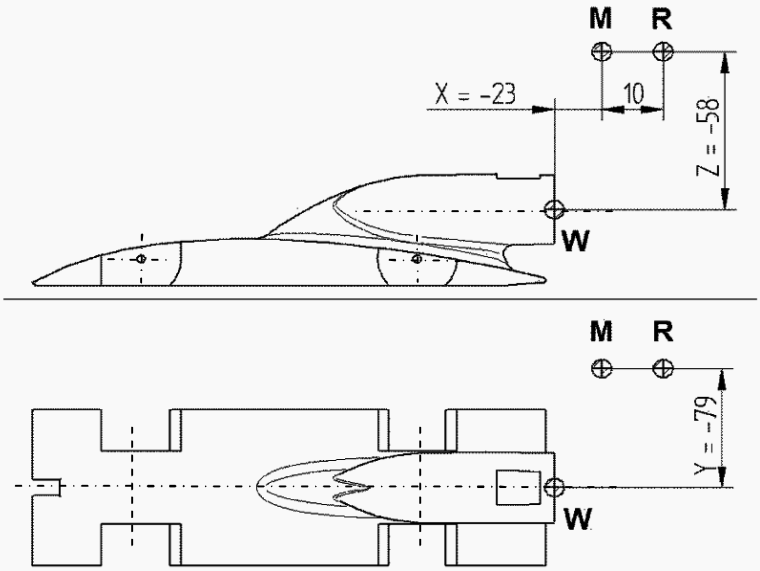
Ostatní komponenty sestavy

Pro výrobu koleček a puklic, jsem zvolil materiál dural. Slitina hliníku a mědi s příměsí křemíku disponuje přijatelnými vlastnostmi a to hlavně dostačující pevností, hustotou menší než ocel a výbornou obrobitelností. Osy jsou obrobeny z titanového drátu. Tento materiál je velmi lehký a pevný. Všechny tyto díly byly vysoustruženy na soustruhu SUV 18 RA. Shodnost jednotlivých součástí byly kontrolovány posuvným měřítkem a mikrometrem.

Návodka na frézování - BlueForce

Název součásti:	Číslo výkresu:	Operace:
Model č. 8	BF-2010-08/01	Frézování
Materiál:	**Polotovar:**	**Stroj:**
Balsové dřevo	□ 220x65x50	FC 16 CNC
Vypracoval:	**Dne:**	**Upínací přípravek:**
Petr Skřivánek	11.4.2010	DP2

Bodové schéma:



W - nulový bod obrobku
M - nulový bod stroje
R - referenční bod stroje

M = X0, Y0, Z0

Souřadnice vztažené k M

Bod	X	Y	Z
R	10	0	0
W	-23	-79	-58

Nástroje

T	*Název a norma*	*č.kor*	*Ø nástr.*	*kor.Z*	*kor.Ø*	*R nástr.*	*vyložení*
1	Čelní válcová fréza DIN 844; ISO 1641	1	5	0	- (5,17)	0	40
2	Rádiusová fréza DIN 1889; ISO 3940	2	4	0,538	- (4,05)	2	40,5
3	Vrták DIN 6537	3	3	12,919	0	-	53

Operace

č.	*Popis práce*	*T*	*č.kor*	*S [s-1]*	*F[m/min]*	*A [°]*
1	Frézování na čisto - podvozek	1	1	8000	2500	-180
2	Frézování na čisto - drážka pro strunu	1	1	8000	2500	-180
3	Hrubování - levý bok	1	1	8000	2500	-270
4	Frézování na čisto - levý bok	1	1	8000	2500	-270
5	Frézování na čisto - levý bok	2	2	8000	2500	-284,17
6	Vrtání - díry pro osičky	3	3	8000	1000	-270
7	Frézování na čisto - pravý bok	1	1	8000	2500	-90
8	Frézování na čisto - pravý bok	2	2	8000	2500	-75,825
9	Frézování na čisto - ploška pro křídlo	1	1	8000	2500	0

Bombička

Zajímali jsme se také o bombičku, ve které je stlačený CO_2. Při propíchnutí membrány bombičky reaktivní síla unikajícího plynu pohání model. Samotnou bombičku dle pravidel ovlivnit nesmíme.

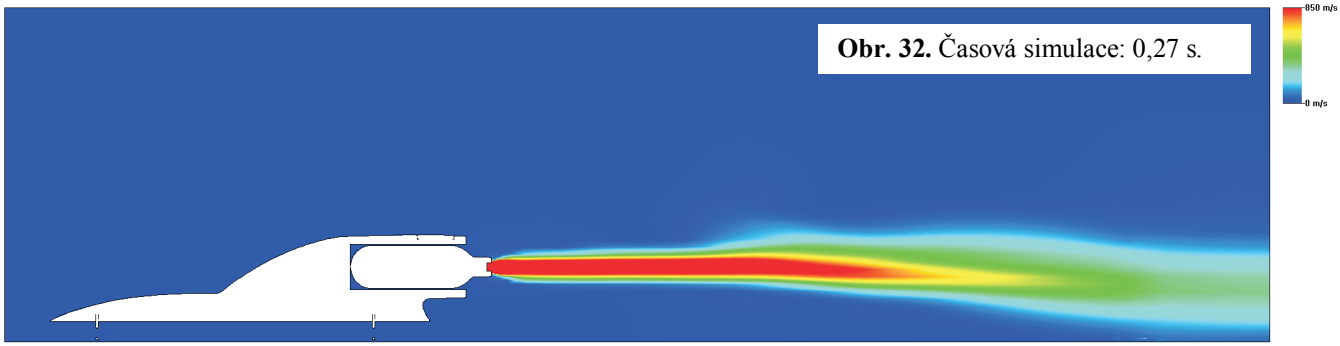
Experimentem s Janem Frouzem jsme dokázali velmi zajímavý jev. Ačkoliv by se zdálo, že čím větší teplotu bude mít bombička, tím rychlejší bude model, ale opak je pravdou. Při zahřátí bombičky stoupá tlak plynu a tím i jeho vnitřní energie. Při propíchnutí bombičky plyn rychleji expanduje, spotřebovává více tepla z okolního vzduchu a otvor zamrzne.

Simulace expanze plynu z bombičky

Vytvořil jsem časově závislou studii unikání plynu z bombičky. Tuto studii nikdo z týmů v České Republice do té doby nedělal, proto jsem hledal odborné rady v 3E Praha Engineering. Tlak v bombičce při teplotě 20°C jsem znal, stejně tak jako hmotnost plynu, objem bombičky a průměr otvoru v bombičce po jehle ve startovacím zařízení. Dobu expanze plynu z bombičky jsme odhadli pomocí měření rychlostního průběhu modelu na dráze.

Do simulace jsem zadával hmotnostní průtok. Nejvýhodnější vytékání by bylo, kdyby působila reaktivní síla plynu rovnoběžně s podložkou, v ose otvoru pro bombičku. Tím by byla pohonná síla modelu největší.

Obr. 32. Časová simulace: 0,09 s.



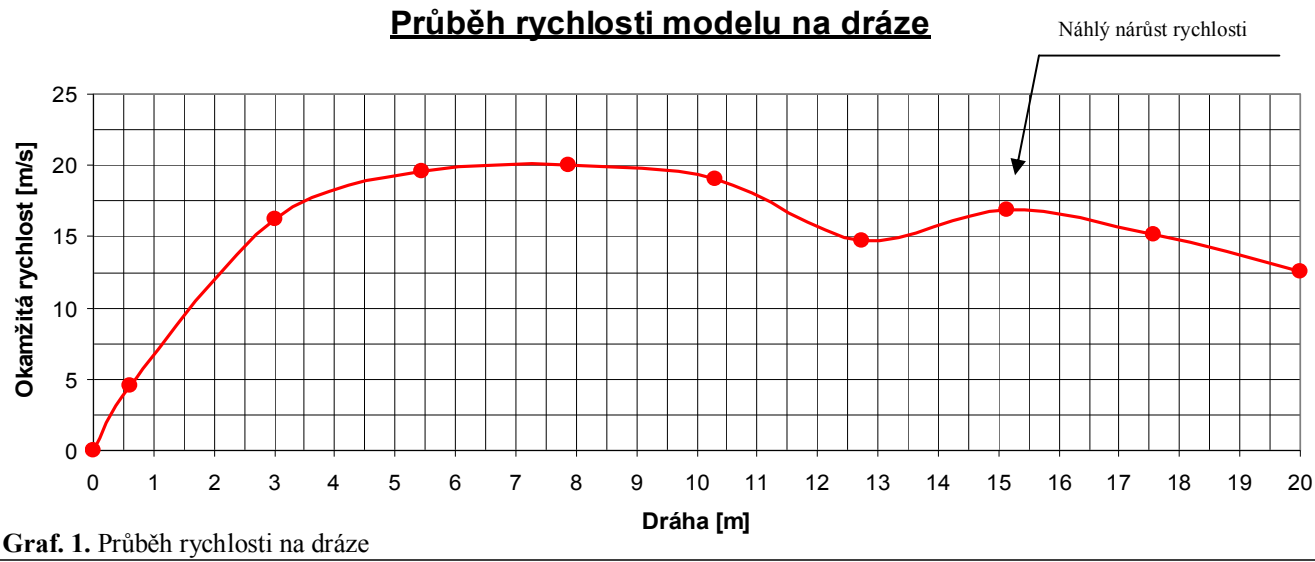
Obr. 32. Časová simulace: 0,27 s.

Měření dynamických vlastností modelu na dráze

K rozšíření teorie o kinematice kol a samotného modelu, jsem se rozhodl využít testovací centrum u nás ve škole a pomocí cílové optické závory jsem naměřil rychlostní průběh pohybu autíčka po dráze. Nejdříve jsme vyzkoušeli tři rozměrové řady kol o různých hmotnostech. Nejlepší čas měl model s koly o Ø 27 mm. Jelikož ještě nebyly vytvořeny školní optické závory, museli jsme použít jednu a to cílovou závoru, která byla součástí dráhy. Postupně jsme dráhu rozebírali a cílovou desku jsme posouvali blíže ke startu. Bohužel jsme měli k dispozici málo bombiček, tudíž jsme měření v každém místě opakovali pouze dvakrát. Tak málo měření v takovém krátkém čase je dost nepřesné.

Tab. 1. Tabulka naměřených hodnot

Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dráha [m]	0	0,6	3,025	5,45	7,875	10,3	12,725	15,15	17,575	20
čas 1 [s]	0	0,129	0,279	0,406	0,534	0,665	0,826	0,948	1,14	1,317
čas 2 [s]	0	0,133	0,281	0,401	0,515	0,639	0,807	0,973	1,101	1,309
Průměrný čas [s]	0	0,131	0,28	0,4035	0,5245	0,652	0,8165	0,9605	1,1205	1,313
Průměrná rychl. [m/s]	0	4,580153	10,80357	13,50682	15,0143	15,79755	15,58481	15,77303	15,68496	15,23229
Průměrná rychl. [km/h]	0	16,48855	38,89286	48,62454	54,05148	56,87117	56,10533	56,78293	56,46586	54,83625
Okamžitá rychl. [m/s]	0	4,580153	16,27517	19,63563	20,04132	19,01961	14,74164	16,84028	15,15625	12,5974
Okamžitá rychl. [km/h]	0	16,48855	58,5906	70,68826	72,14876	68,47059	53,06991	60,625	54,5625	45,35065



Graf. 1. Průběh rychlosti na dráze

Při pohled na graf je vidět veliké zrychlení díky reaktivnímu pohonu, následné zpomalení, ovšem poté zase zrychlení, které by nikdo nepředpokládal. Domnívám se, že druhé zrychlení je způsobeno energií naakumulovanou v kolečkách. Jakmile přestane působit reaktivní síla plynu, auto přestane „plavat“ po vzduchovém polštáři, dosedne na dráhu a kola předají modelu energii, kterou nahromadila při působení bombičky.

Tuto teorii jsem se pokusil ověřit výpočtem.

Otáčky kol při maximální naměřené rychlosti

Maximální rychlost: $v_{max} = 20{,}04$ m/s

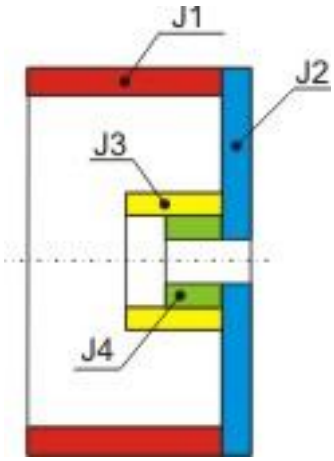
Ø kol: $d = 27$ mm

Otáčky: $n = v_{max} / \pi * d$

$n = 20{,}04 / \pi * 0{,}027$

$\underline{n = 236{,}26\ s^{-1}}$

Energie rotujících kol při maximální naměřené rychlosti



Moment setrvačnosti: $J_1 = ½\ m_1 * (r_2^2 + r_1^2)$

$J_1 = 4{,}75 * 10^{-7}\ kg * m^2$

Úhlová rychlost: $\omega = 2 * \pi * n$

$\omega = 2 * \pi * 236{,}26$

$\underline{\omega = 1484{,}5\ rad/s}$

Kinetická energie kol: $E_k = 4 * ½ * J * \omega^2$

$E_k = 4 * ½ * 4{,}75 * 10^{-7} * 1484{,}5^2$

$\underline{E_k = 2{,}093\ J}$

Energie potřebná k náhlému nárůstu rychlosti

Rychlost 1 (s = 12,725 m): $v_{12,725} = 14{,}742$ m/s

Rychlost 2 (s = 15,15 m): $v_{15,15} = 16{,}84$ m/s

Hmotnost modelu: $m = 55{,}5$ g

Hmotnost bombičky: $m_b = 25$ g

Kinetická energie při $v_{12,725}$: $E_{k1} = ½ * (m + m_b) * v_{12,725}^2$

$E_{k1} = ½ * (55{,}5 + 25) * 10^{-3} * 14{,}742^2$

$\underline{E_{k1} = 8{,}75\ J}$

Kinetická energie při $v_{15,15}$: $E_{k2} = ½ * (m + m_b) * {}_{v15,152}$

$E_{k2} = ½ * (55{,}5 + 25) * 10^{-3} * 16{,}84^2$

$\underline{E_{k2} = 11{,}42\ J}$

Rozdíl kinetických energií: $\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1}$

$\Delta E_k = 11{,}42 - 8{,}75$

$\underline{\Delta E_k = 2{,}67\ J}$

Z výpočtů je patrné, že kola nemají takovou energii, aby změnila rychlost vozu podle naměřeného průběhu pohybu, ale část energie modelu předat mohla. Náhlý nárůst rychlosti může být chyba v měření, nebo ke změně napomohl další vliv ovlivňující rychlost modelu.

Školní optické závory

Do celostátního kola v Brně jsme jeli se třemi školními optickými závorami, které vytvořil Ing. Oldřich Smutný. Závora byla tvořena infračervenou LED diodou, která vysílá nekoherentní záření a fotodiodou, která má v infračerveném rozsahu největší citlivost. Vyhodnocení se provádělo pomocí zvukové karty v notebooku. Speciální program SHOPE vytvořil ze zvukové karty osciloskop, který zaznamenával časový průběh pohybu vozu. Na zadní část vozu ve výšce závor se dal štítek o známé délce. V programu se průjezd vozu zaznamenal jako interval signálu. Pomocí programu jsem zjistil délku signálu a v závislosti na délce štítku jsem vyhodnotil okamžitou rychlost modelu.

Poděkování

V první řadě bych chtěl rád poděkovat všem okolo projektu Formule 1 ve školách a převážně celému týmu BlueForce, bez kterého by nevznikla ani tato práce.

Jmenovitě patří obrovský dík panu Ing. Vilému Čejkovi za odbornou pomoc v průběhu projektu a při vytváření této práce. Další poděkování a uznání bych rád vyjádřil řediteli školy, panu Ing. Čestmíru Tschauderovi za umožnění složení maturity v podobě maturitní práce. Nebýt pana Mgr. Milana Novotného, škola by se soutěže ani nezúčastnila. Oba ročníky byl skvělý vedoucí, oponent, poradce a tým u něj vždy viděl snahu, a tím jej dokázal motivovat.

Minulý rok nám velice pomohl Ing. Rudolf Dvořák, DrSc z Ústavu termodynamiky Akademie věd ČR. Dokázal nám dát mnoho odborných rad v oblasti aerodynamiky.

Soutěž Formule 1 ve školách by se neobešla bez hlavního porotce Ing. Josefa Malého z 3E Praha Engineering, kterému bych rád poděkoval za zprostředkování odborného školení programu Flo Works.

Na závěr bych chtěl poděkovat všem mým učitelům za toleranci, jmenovitě paním třídním učitelkám Mgr. Zuzaně Nechvátalové a Ing. Daně Paurové. Nesmím zapomenout na svou rodinu, která mě vždy podporovala a motivovala k práci.

Přílohy

- **Technická dokumentace:**
  - Sestava modelu č. 8 – „křídlo“: BF-2010-08/00
  - Model č. 8 – „křídlo“: BF-2010-08/01
  - Kolo: BF-2010-08/02
  - Osa: BF-2010-08/03
  - Puklice: BF-2010-08/04
  - Zadní křídlo: BF-2010-08/05
- **CD:**
  - Maturitní práce
  - Technická dokumentace
  - 3D model finálního vozu „křídlo“
  - Animace aerodynamiky a časová simulace
  - Program pro CNC frézku