



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# KONSTRUKČNÍ NÁVRH KOMPOZITNÍHO CHASSIS FORMULE STUDENT

COMPOSITE CHASSIS FOR FORMULA STUDENT

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Mende

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Janoušek, Ph.D.

BRNO 2021

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	<b>Bc. Milan Mende</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Michal Janoušek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2021/22

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

## **Konstrukční návrh kompozitního chassis Formule Student**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Proveďte rešerši aktuálně používaných kompozitních konstrukcí ve vozidlech Formule Student. Na základě rešerše vhodně zvolte technologii výroby a proveďte konstrukční návrh kompozitního chassis tak, aby splňovalo pravidla soutěže Formule Student.

### **Cíle diplomové práce:**

Provést rešerši používaných kompozitních konstrukcí pro chassis závodních vozidel.

Navrhnout na základě rešerše vhodnou technologii.

Navrhnout pro danou technologii konstrukční řešení.

Porovnat navržené řešení s řešením chassis vozidla Dragon 9.

### **Seznam doporučené literatury:**

ASM Handbook. Materials Park: ASM International, 2001. ISBN 0-87170-703-9.

NIU, Michael Chun-Yung. Composite airframe structures: practical design information and data. 4th published. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 2005. ISBN 962-7128-06-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou kompozitního chassis nové formule Dragon X. Uhlíkový prepreg použitý k výrobě monokoku měl být provozován při vysokých teplotách. Práce se proto zabývá aplikací kompozitních struktur v prostředí zvýšeného teplotního namáhání. V práci je také řešena problematika torzní tuhosti, která byla kromě fyzického měření také simulována MKP analýzou a výsledky byly porovnány.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Formula Student, monokok, chassis, torzní tuhost, CFRP, prepreg

## ABSTRACT

The Master's thesis deals with the design and production of a composite chassis of the new formula Dragon X. The carbon prepreg used for manufacturing of the monocoque was to be operated at high temperatures. Therefore, this thesis deals with the application of composites structures in the high temperature environment. The thesis addresses the torsional stiffness problematics and it was not only physically tested, but also simulated by FEM analysis and the results were compared.

## KEYWORDS

Formula Student, monocoque, chassis, torsional stiffness, CFRP, prepreg

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MENDE, M. *Konstrukční návrh kompozitního chassis Formule Student*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 71 s. Vedoucí diplomové práce Michal Janoušek.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Michala Janouška a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 13. srpna 2021

.....

Milan Mende

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Janouškovi, Ph.D. za odborné vedení, přínosné rady a věnovaný čas. Mé díky patří také všem členům týmu TU Brno Racing, kteří mi po celou dobu pomáhali. Vřelé díky patří také všem sponzorům a podporovatelům týmu, protože bez nich by projekt Formula Student nemohl existovat. Nakonec chci poděkovat své přítelkyni Haně Zbořilové, rodině a blízkým přátelům za jejich podporu a pochopení.

## OBSAH

Úvod.....	9
1 Formula Student.....	10
1.1 Pravidla Formule Student pro konstrukci rámu.....	10
1.2 Typy ráků v soutěži Formula Student.....	14
2 Vliv tuhostních parametrů na dynamiku vozidla.....	18
2.1 Torzní tuhost.....	18
2.2 Podélná ohybová tuhost.....	19
2.3 Příčná ohybová tuhost.....	20
2.4 Lokální tuhost.....	20
3 Kompozitní materiály.....	21
3.1 Matrice.....	21
3.2 Výztuže.....	22
3.3 Výroba kompozitů.....	24
3.4 Sendvičové struktury.....	26
4 Konstrukce chassis Dragona X.....	29
4.1 Hlavní cíle.....	29
4.2 Problém skelného přechodu kompozitu v motorovém prostoru.....	30
4.3 Návrh nového chassis.....	36
4.4 Konstrukční uzly.....	37
4.5 Skladba a její testování.....	42
4.6 MKP analýza torzní tuhosti rámu.....	46
5 Výroba rámu.....	50
5.1 Návrh a příprava pozitivních forem.....	50
5.2 Výroba negativních forem.....	52
5.3 Výroba oblouků.....	53
5.4 Výroba insertů a přípravků pro výrobu monokoku.....	53
5.5 Výroba monokoku.....	55
6 Validace rámu.....	57
6.1 Optická digitalizace.....	57
6.2 Měření torzní tuhosti.....	58
6.3 Porovnání chassis formulí Dragon 9 a Dragon X.....	61
Závěr.....	64
Použité informační zdroje.....	65
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	68



## ÚVOD

Formula SAE je mezinárodní soutěž konstruktérských studentských týmů, které mezi sebou každoročně soupeří s novým jednomístným vozidlem formulového typu. Tato soutěž vznikla v roce 1981 na Texaské univerzitě v Austinu a jejím hlavním cílem je, aby studenti získali praktické zkušenosti z oblastí návrhu, výroby, validace, ale i marketingu již během vysokoškolského studia. Soutěž se v roce 1998 rozšířila i do Evropy pod názvem Formula Student a o 12 let později vznikl tým na VUT v Brně – TU Brno Racing. Za dobu svého působení zde vzniklo 10 vozů poháněných spalovacím motorem s názvem Dragon. Zatím poslední vyrobený monopost nese označení Dragon X a návrhem jeho chassis se bude zabývat tato diplomová práce.

S každým novým vozidlem je kladen důraz na zlepšení výkonnosti v závodních disciplínách. Na rozdíl od ostatních odvětví motorsportu není v této kategorii omezena minimální hmotnost, proto je snahou týmu ušetřit při návrhu každý gram. Chassis formule je velmi omezena pravidly soutěže a přímo závislá na návrhu komponent ostatních sekcí týmu, především podvozku, čímž je snižování hmotnosti výrazně zkomplikováno. V minulosti týmu se váha chassis výrazně snížila, když byl místo původního prostorového trubkového rámu navrhnout hybridní rám složený z předního kompozitního monokoku a zadního trubkového rámu. Tato varianta rámu bývá vývojovým mezikrokem k čistě kompozitnímu monokoku, jenž se používá například v monopostech vrcholového motorsportu F1. Využití kompozitních materiálů při konstrukci chassis vozidla přináší vyšší torzní tuhost než jiné koncepty, ale především právě nízkou hmotnost, která umožňuje nejen zvětšit zrychlení dle druhého Newtonova pohybového zákona, ale také snížit spotřebu pohonných hmot nebo zvýšit dojezd vozů s elektrickým pohonem.

Kompozitní materiály jako uhlíková či skelná vlákna jsou na trhu již několik dekad a meziročně se objem jejich využití v různých průmyslových odvětvích neustále zvyšuje. Díky široké škále vláken i pryskyřic pro jejich spojení je možné vytvářet kompozitní materiály s vlastnostmi na míru jejich aplikaci, jichž by bylo téměř nemožné dosáhnout pomocí konvenčních konstrukčních materiálů. Zvláštním typem kompozitu je sendvičová struktura, která se skládá ze dvou tuhých vrstev, mezi nimiž je jádro, což je zpravidla materiál s nižší plošnou hustotou a tuhostí, jako například voština. Oproti běžnému laminátu je sendvič lehčí a tužší. Achillovou patou kompozitů je teplota skleného přechodu, při jejímž překročení dochází k prudkému poklesu mechanických vlastností, čímž je limitováno jejich uplatnění v prostředí, kde působí vysoké teploty.

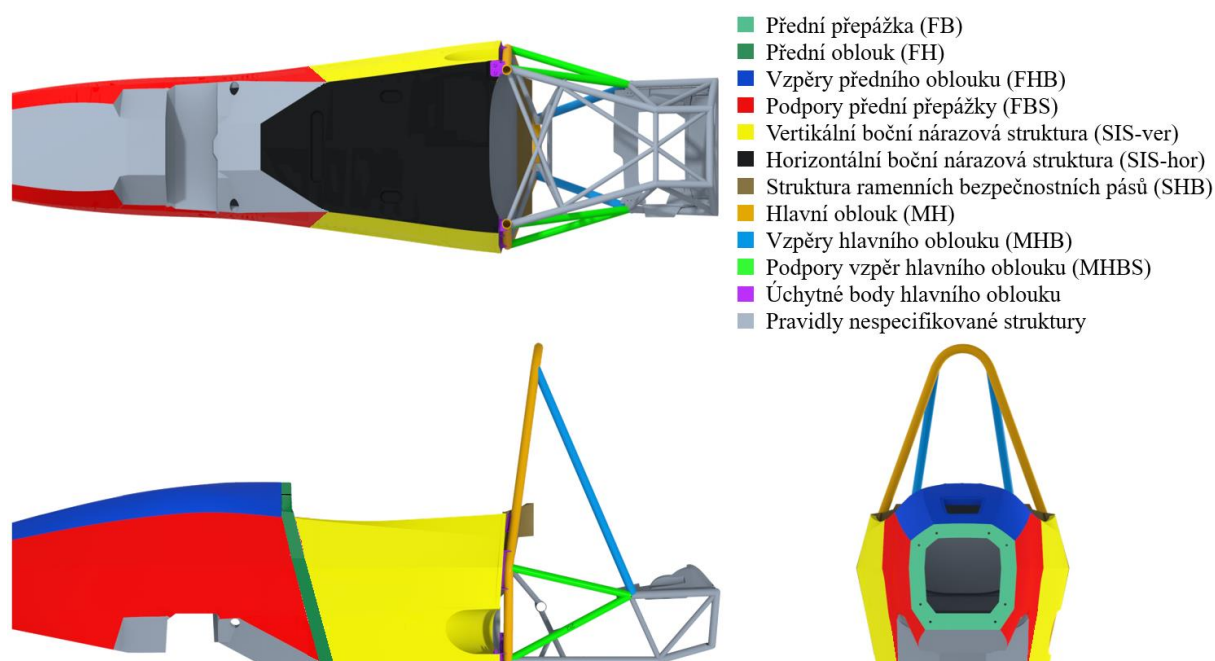
# 1 FORMULA STUDENT

## 1.1 PRAVIDLA FORMULE STUDENT PRO KONSTRUKCI RÁMU

Formule, s nimiž mají univerzitní týmy ambice zúčastnit se závodů, musí splňovat pravidla. Evropské závody se řídí pravidly [1] vydávanými pořadatelem Formula Student Germany, které se každý rok obměňují. Pro sezónu v roce 2020 se návrhem chassis zaobíralo 20 z celkových 133 stran, proto jsou níže shrnuty jen ty nejpodstatnější pro návrh chassis.

### 1.1.1 PRIMÁRNÍ STRUKTURA

Primární strukturu tvoří ty části chassis, které mají za účel ochránit řidiče v případě nehody. Je tvořena předním a hlavním obloukem, jejich vzpěrami a podporami, boční nárazovou strukturou, přední přepážkou s podporou a strukturami pro uchycení bezpečnostních pásů. Splnění požadavků na části primární struktury se dokazují v dokumentu zvaném *Structural Equivalency Spreadsheet* (SES), do něhož se vkládají naměřená data z pevnostních testů a rozměry struktur na vozidle. Všechny části primární struktury formule Dragon 9 jsou zobrazeny na obr. 1.



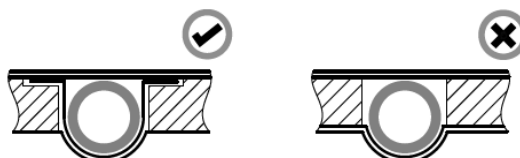
Obr. 1 Primární struktury formule Dragon 9

### PŘEDNÍ A HLAVNÍ OBLOUK

Oblouky musí tvořit konstrukci, která zabrání zranění řidiče v případě překlopení vozidla. Hlavní oblouk (MH) musí být uzavřená ohýbaná ocelová trubka, jejíž konce musí být nejnižším bodem rámu. V případě vloženého hlavního oblouku do kompozitní struktury mohou být konce vzdáleny maximálně 50 mm od vnitřního povrchu nejnižší části celého monokoku a zároveň nanejvýš 30 mm v daném místě. K boční nárazové struktuře musí být připevněn pomocí horních a dolních úchyťů. Při bočním pohledu nesmí být žádná část oblouku nad horním úchytným bodem nakloněna více než  $10^\circ$  od vertikály. Část oblouku pod horním úchytem musí být nakloněna dopředu nebo ne více než  $10^\circ$  dozadu. Pro každý

ohyb platí, že minimální rádius měřený na střednici musí být alespoň trojnásobek vnějšího průměru použité trubky.

Přední oblouk (FH) nemusí být ohýbaný ani vyrobený z oceli. V případě kompozitní konstrukce je povolen svařenec z hliníkových profilů, jenž nemusí mít kruhový průřez. Daný svařenec musí být ošetřen tepelným zpracováním, aby byly splněny materiálové požadavky na pevnost svaru. Přední oblouk nesmí být nakloněn více než 20° od vertikály při bočním pohledu a musí být do kompozitní struktury zalaminován podle *obr. 2*.



*Obr. 2 Požadovaná laminace předního oblouku do kompozitní struktury [1]*

### VZPĚRY A PODPORY OBLOUKŮ

Vzpěry hlavního oblouku (MHB) jsou tvořeny 2 rovnými ocelovými trubkami. K oblouku musí být připevněny maximálně 160 mm pod jeho nejvyšším bodem a svírat s ním úhel větší než 30°. Spodní body vzpěr musí být propojeny s horními a dolními body boční nárazové struktury pomocí systému podpor (MHBS). Pokud jsou podpory kompozitní, tak k nim musí být vzpěry připevněny minimálně jedním šroubem M10 třídy 8.8 na každé straně. Od předního oblouku k přední přepážce směřují vzpěry předního oblouku (FHB), které musí být k oblouku připevněny do 50 mm od nejvyššího bodu oblouku.

### PŘEDNÍ PŘEPÁŽKA A JEJÍ PODPORY

Přední přepážka (FB) slouží k uchycení protiprůrazového panelu s absorbérem energie, jenž slouží jako přední nárazová struktura. Materiál použitý na přední přepážku musí mít pevnost ve stříhu ekvivalentní 1,5 mm tlustému ocelovému plechu. Všechny díly vozu mimo aerodynamická zařízení a senzory musí být umístěny za zadní plochou přední přepážky a zároveň minimálně 25 mm za protiprůrazovým panelem, což je nejvyšší dovolený průhyb panelu při nárazovém testu.

Po stranách vedou od přepážky k přednímu oblouku podpory přední přepážky (FBS), které musí mít pevnost ve stříhu alespoň 4 kN a ohybovou tuhost průřezu ekvivalentní 3 ocelovým trubkám, které se kompozitem nahrazují. Jako podpory přední přepážky nejsou považovány vzpěry předního oblouku.

### BOČNÍ NÁRAZOVÁ STRUKTURA

Hlavní a přední oblouk propojuje boční nárazová struktura (SIS), která se dělí na vertikální a horizontální. Horizontální tvoří podlahu a musí mít ohybovou tuhost průřezu ekvivalentní jedné ocelové trubce. Vertikální tvoří boční strukturu do výšky 320 mm od vnitřní strany podlahy, kdy ohybová tuhost průřezu musí odpovídat 3 ocelovým trubkám, které nahrazuje. Pro vertikální část také platí, že musí při ohybu absorbovat energii ekvivalentní 2 trubkám. Obě struktury musí mít stříhovou pevnost alespoň 7,5 kN.

## STRUKTURY BEZPEČNOSTNÍCH PÁSŮ

V soutěži jsou povoleny pouze 6bodové a 7bodové bezpečnostní pásy sestávající ze dvou ramenních, dvou břišních a dvou, resp. tří pásů v rozkroku. Držáky pásů musí být připevněny vždy pomocí dvou šroubů M8 třídy 8.8 nebo vyšší k primární struktuře. Upevnění ramenních (SHB) a břišních pásů musí vydržet tah 13 kN, pásy v rozkroku 6,5 kN.

### 1.1.2 MATERIÁLOVÉ POŽADAVKY

Výše zmíněné ekvivalence ohybové tuhosti průřezu jsou vztahovány k členům primární struktury vyrobené z ocelových trubek podle *tab. 1*. SES musí obsahovat veškeré informace o kompozitních panelech jako je materiál výztuh, matrice a jader, gramáž tkanin, orientace vláken, počet vrstev nebo způsob výroby. Pro každý panel musí být provedeno testování.

*Tab. 1 Minimální požadavky na členy primární struktury vyrobené z ocelových trubek [1]*

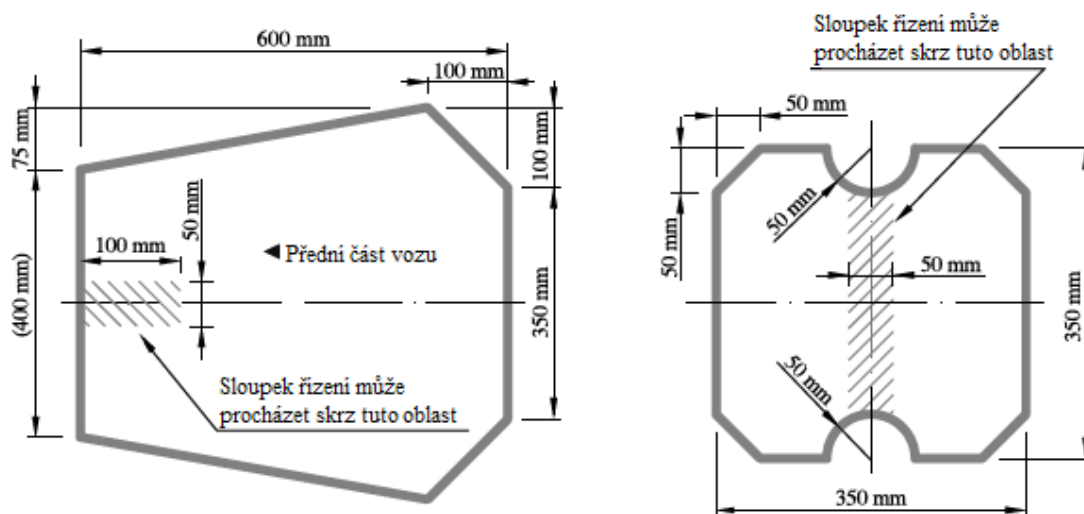
	Minimální tloušťka stěny	Minimální průřez	Minimální kvadratický moment průřezu
Hlavní a přední oblouk, struktura ramenních pásů	2,0 mm	175 mm <sup>2</sup>	11 320 mm <sup>4</sup>
Boční nárazová struktura, přední přepážka, vzpěry oblouků, držáky bezpečnostních pásů	1,2 mm	119 mm <sup>2</sup>	8 509 mm <sup>4</sup>
Podpory přední přepážky, podpory vzpěr hlavního oblouku	1,2 mm	91 mm <sup>2</sup>	6 695 mm <sup>4</sup>

Ohybová tuhost průřezu je zjišťována z trojbodového ohybu prováděném na vzorcích o rozměrech 275×500 mm. Vzdálenost podpěr má být alespoň 400 mm a aplikátor zatížení musí mít rádius 50 mm. Integrací naměřené křivky lze také vypočítat absorbovanou energii pro vertikální panel SIS. Pevnost ve střihu je testována protlačením aplikátoru o průměru 25 mm skrz panel. Pevnost upevnění bezpečnostních pásů se testuje tahem za pás pod úhlem, v němž je předpokládáno působení zatížení při nárazu. Hrana přípravku držící vzorek musí být vzdálena 125 mm od aplikátoru síly.

Novým pravidlem pro rok 2020 bylo testování přední nárazové struktury společně s 50 mm přední částí formule, jelikož u některých týmů bylo zjištěno, že v případě nárazu by se začal dříve deformovat rám, než by došlo k plné deformaci absorberu energie. Ten má absorbovat energii alespoň 7 350 J a průměrné zpomalení nesmí přesáhnout 20G, špičkové pak 40G.

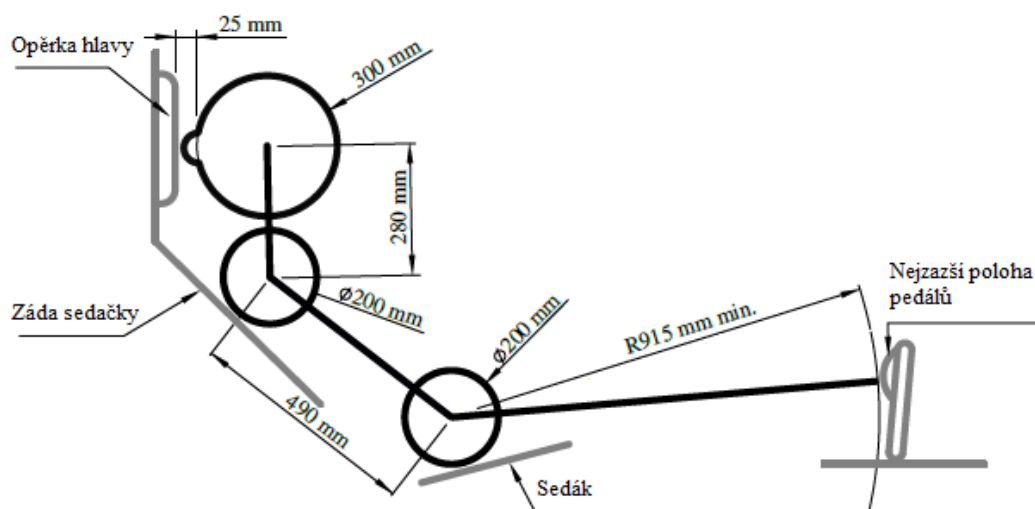
### 1.1.3 GEOMETRICKÉ POŽADAVKY

Kromě konstrukčních a materiálových předpisů stanovují pravidla i určité geometrické restriktce, které mají pomoci chránit řidiče. Definují šablony (na *obr. 3*) pro usnadnění, a tím urychlení, výstupu řidiče. Šablonu otvoru kokpitu musí být možné vertikálně vložit do výšky 320 mm nad podlahou. Při vkládání je možné odpojit volant a vyndat sedačku. Další šablona slouží k zaručení dostatečného vnitřního průřezu pro nohy řidiče a musí být možné ji horizontálně protáhnout až do vzdálenosti 100 mm od nejzazší polohy pedálů.



Obr. 3 Šablona otvoru kokpitu (vlevo) a šablona vnitřního průřezu chasis [1]

Oblouky slouží jako ochrana při překlpení, proto musí mít řidič v jízdní poloze helmu vzdálenou minimálně 50 mm od spojnice horních bodů předního a hlavního oblouku. Stejná vzdálenost musí být dodržena mezi helmou a spojnicí horního bodu hlavního oblouku s dolními body vzpěr oblouku. Vzdálenosti musí splňovat všichni řidiči, kteří se budou účastnit dynamických disciplín, a Percy, což je 95percentilní muž [1]. Jeho schéma je zobrazeno na obr. 4.



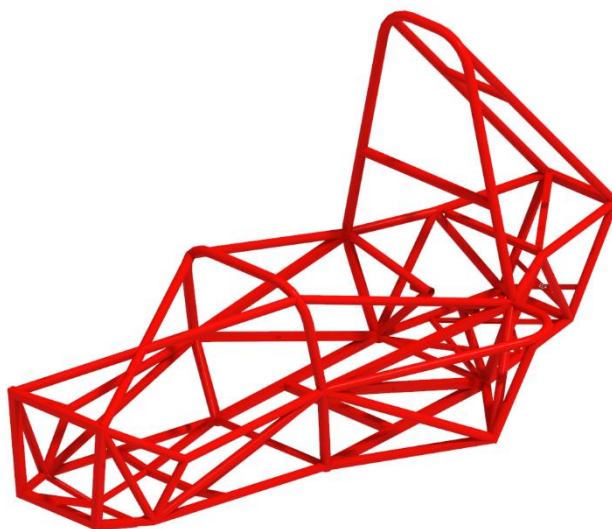
Obr. 4 Percy 95percentilní muž [1]

## 1.2 TYPY RÁMŮ V SOUTĚŽI FORMULA STUDENT

Hlavní úlohou chassis vozidla je zejména poskytnutí bezpečné konstrukce chránící posádku a pevné uložení všech komponent. Neméně důležitou rolí je vytvoření dostatečně tuhého propojení náprav, jenž ovlivňuje jízdní vlastnosti vozu. Tužší rám zvyšuje ovladatelnost a umožňuje plně využít potenciál podvozku, a tím v případě závodního monopostu zlepšit výkonnost v dynamických disciplínách. Ze stejného důvodu je snahou konstruktérů také minimalizovat hmotnost. Nejpoužívanější závodní typy chassis, jakými jsou trubkový nebo kompozitní rám, jsou osvědčené koncepce běžně používané ve všech odvětvích motorsportu. Studenti jsou při designu rámu omezeni striktními pravidly, ale ty stále nechávají dostatečný prostor pro vlastní unikátní koncepty.

### 1.2.1 PŘÍHRADOVÝ RÁM

Příhradový nebo také prostorový trubkový rám je v soutěži široce rozšířen. Preferují jej hlavně začínající týmy, protože je tato konstrukce nejlevnější a oproti ostatním možnostem i nejjednodušší na návrh a výrobu. Nevýhodou tohoto řešení je nízká torzní tuhost a vysoká hmotnost, která je zapříčiněna minimálním počtem a průřezem profilů, jak je specifikují pravidla. Průřez profilů volí týmy nejčastěji kruhový, jelikož má optimální poměr mezi kvadratickým momentem průřezu a hmotností. Jednotlivé profily jsou spojovány svařováním v přípravku, aby se zamezilo deformacím vzniklým ve svaru a zvýšila se tak přesnost výroby. Použití technologie řezání laserem na tvarované konce trubek je dalším způsobem, jak zvýšit přesnost výroby trubkového rámu.



Obr. 5 Příhradový rám formule Dragon 5

Alternativou k ocelovému svařenci může být rám z uhlíkových trubek s lepenými uzly. Toto řešení sestává z nahrazení některých ocelových trubek uhlíkovými, které jsou na koncích vlepány do ocelových koncovek a ty jsou svařeny se zbytkem rámu. Výsledkem je lehčí rám a s tím spojený lepší poměr torzní tuhosti ku hmotnosti. V porovnání s jinými konstrukcemi není přínos úměrný komplikované výrobě, proto se tento typ nepoužívá.

### 1.2.2 HYBRIDNÍ RÁM

Vývojovým mezikrokem mezi příhradovým a kompozitním chassis je hybridní rám, který se skládá z přední sendvičové skořepiny a zadního trubkového rámu. Hybridní rám je nejpoužívanějším typem chassis v soutěži Formula Student, jelikož kombinuje kladné vlastnosti obou konstrukcí a zároveň snižuje jejich negativa.

Přední skořepina zvyšuje torzní tuhost a snižuje celkovou váhu rámu, zatímco příhradový rám slouží k uložení pohonné jednotky, čímž je zamezeno degradaci kompozitu vysokými teplotami. Zadní prostorový rám navíc zajišťuje relativně jednoduchý servis, který bývá v případě monokoku značně ztížen. Nevýhodou zadního rámu je jeho vyšší hmotnost proti kompozitu a také nutnost použití speciálního přípravku pro jeho spojení s předním monokokem, aby byla dodržena vzájemná poloha úchytných bodů přední a zadní nápravy.



Obr. 6 Formule Dragon 9 s hybridním rámem [2]

### 1.2.3 KOMPOZITNÍ MONOKOK

Kompozitní rám je nejdražší a nejsložitější konstrukce závodního monopostu, která je používána nejen v závodu Formula Student, ale i ve vrcholovém motorsportu Formula 1 či Formula E. Přednostmi kompozitního rámu jsou vysoká torzní tuhost a nízká hmotnost. Kompozitní monokok je skořepina ze sendvičové struktury, kterou tvoří jádro a dva potahy. Jádro sendviče je obvykle voština a potahy jsou z kompozitních materiálů, např. uhlíkových či aramidových vláken.

Výroba monokoku může probíhat dvěma způsoby. První varianta produkce, která je používána v drtivé většině případů, je pomocí forem. Ty mohou být pozitivní i negativní. Monokok je laminován do forem buď v jednom kuse, nebo z více částí, které jsou k sobě následně přilepeny. Díky použití forem je výsledný produkt geometricky velmi přesný. Druhou možností je lepení předem vyrobených rovných panelů sendviče k sobě v přípravku. Spojené jednotlivých panelů jsou následně zpevněny dalšími vrstvami kompozitu. Nevýhodou této metody je značné tvarové omezení monokoku.

Pryskyřice propojující vlákna tkanin je náchylná na působení vibrací a může docházet k oddělování jednotlivých vrstev laminátu. Zároveň s rostoucí teplotou klesají mechanické vlastnosti kompozitu [3]. Z těchto důvodů je vhodnější používat kompozitní monokok pro formule s elektrickým pohonem, který nezpůsobuje takové vibrace ani vysoké teploty jako spalovací motor. Nicméně nejedná se o pravidlo a monokok je běžně používán i u spalovacích formulí.



Obr. 7 Formule jr19 s kompozitním monokokem týmu Joanneum racing Graz [4]

#### 1.2.4 HLINÍKOVÝ MONOKOK

Dnes již poměrně málo rozšířeným typem konstrukce je hliníkový monokok, jehož využívání v minulosti v podstatě ukončil rozmach sendvičových kompozitů. Používán je v současnosti zejména týmy, které chtějí upustit od příhradové koncepce, ale zároveň nemají dostatečné zkušenosti s výrobou uhlíkových kompozitů nebo si jejich výrobu nemohou dovolit. Hliníkový monokok je stejně jako ten kompozitní tvořen sendvičovou strukturou, ale namísto kompozitních potahů jsou k jádru přilepeny hliníkové plechy.



Obr. 8 Formule UTSME19 s hliníkovým monokokem týmu UTS motorsports electric [5]



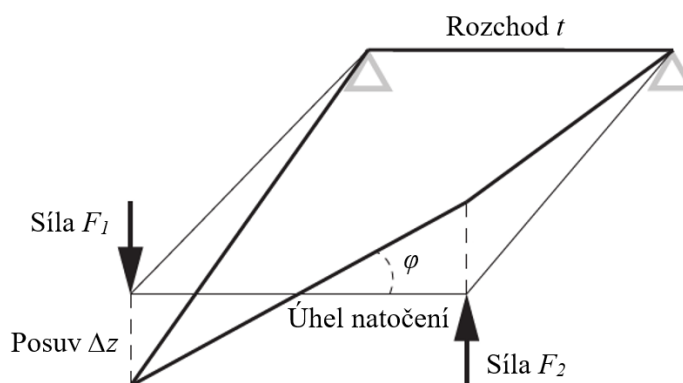
K výrobě hliníkového monokoku nejsou potřeba formy, ale pouze přípravek, ve kterém jsou k sobě lepeny či nýtovány jednotlivé panely hliníkového sendviče. Proces je velmi podobný druhé variantě výroby kompozitního monokoku popsané v předchozí kapitole 1.2.3, ale s tím rozdílem, že je možné panely i ohýbat, čímž je zlepšena kontinuita materiálu. V místech ohybů je nejprve lokálně odstraněn vnitřní potah, aby bylo vůbec možné panel ohnout, a následně je po ohnutí oblast přeplátována novým plechem. Konstrukce zajišťuje vysokou tuhost v krutu i ohybu, ale oproti kompozitní koncepci má vyšší hmotnost. Navíc i přes možnost ohýbání panelů přetrvávají tvarová omezení na rovné plochy.

## 2 VLIV TUHOSTNÍCH PARAMETRŮ NA DYNAMIKU VOZIDLA

Dostatečně tuhá karoserie automobilu je základem pro správné chování zavěšení a s tím spojené nastavení kinematiky, které je zvláště u závodních vozů stěžejní. Chassis je při jízdě zatěžováno na krut i ohyb, proto je snahou dosáhnout optimální tuhosti pro tyto stavy.

### 2.1 TORZNÍ TUHOST

Klíčovým parametrem pro návrh každého vozidla je torzní tuhost. Ta udává odolnost proti deformaci rámu vlivem krutu, který zatěžuje chassis při průjezdu zatáčkou nebo přejezdu nerovnosti jedním kolem. Torzní tuhost výrazně ovlivňuje úhly klopení jednotlivých náprav a kinematiku vozu, což má přímý vliv na ovladatelnost.



Obr. 9 Schéma torzního namáhání [6]

Schéma torzního namáhání na obr. 9 zobrazuje pevně uchycenou konstrukci na jednom konci a aplikované síly vyvolávající zkrutný moment na konci druhém. K výpočtu torzní tuhosti je nezbytné znát úhel natočení  $\varphi$ , pro který platí následující vztah:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\Delta z}{\frac{t}{2}}\right), \quad (1)$$

kde  $\Delta z$  je posuv a  $t$  je rozchod kol. Pro zkrutný moment  $M_k$  způsobující natočení platí:

$$M_k = \frac{(F_1 + F_2)}{2} \cdot t, \quad (2)$$

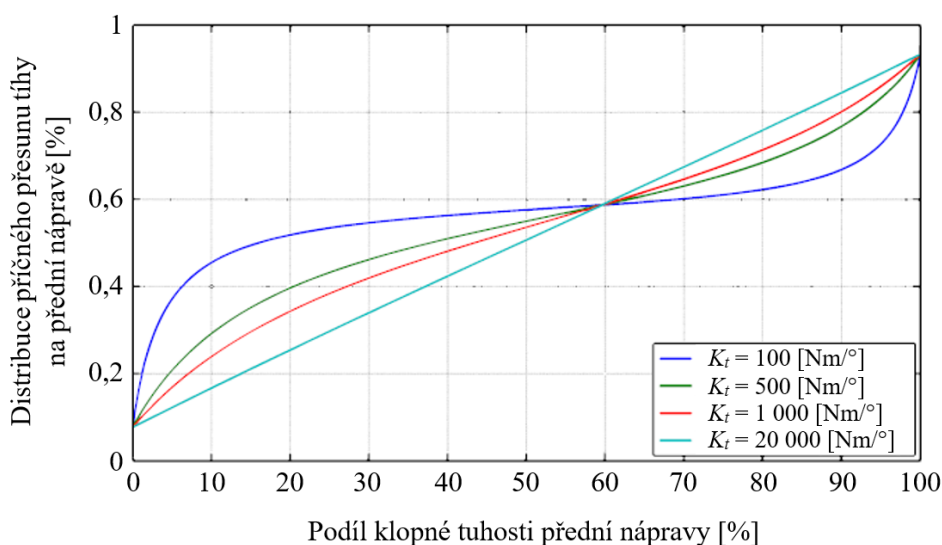
kde  $F_{1,2}$  jsou síly vyvolávající zkrutný moment. Výsledná torzní tuhost  $K_t$  se vypočte jako [6]:

$$K_t = \frac{M_k}{\varphi}. \quad (3)$$

Vliv torzní tuhosti na chování vozidla si lze představit jako systém 3 sériově řazených torzních pružin, kdy první představuje přední nápravu, druhá chassis a třetí zadní nápravu. Při aplikaci krutu na přední pružinu se celá soustava pootočí. V případě, že je prostřední pružina dostatečně tuhá, ji lze považovat za dokonale tuhé těleso a krajní pružiny se natočí o úhly dané jejich tuhostmi. Pokud by ale pružina představující chassis byla měkká, pak se obě krajní pružiny natočí o odlišné úhly než v prvním případě [7].

Úhly natočení pružin v předchozí úvaze představují úhly klopení. Ty jsou dané klopnými tuhostmi jednotlivých náprav a klopným momentem. Při klopení vozidla dochází k příčnému přesunu tíhy, který je přímo ovlivněn klopnými tuhostmi, způsobující různá zatížení pod koly. Pneumatiky na odlehčené straně jsou pak schopny přenést pouze nižší boční síly. Torzí rámu při průjezdu zatáčkou se navíc mohou zásadně měnit úhly odklonu a sbíhavosti, které jsou závislé na klopných úhlech.

Závislost příčného přesunu tíhy na rozdělení klopných tuhostí pro různé torzní tuhosti lze vidět na *obr. 10* níže. Z grafu je patrné, že s rostoucí torzní tuhostí se stává závislost lineárnější. Při nízkých hodnotách torzní tuhosti je odezva příčného přesunu tíhy na změnu rozložení klopných tuhostí minimální, což znemožňuje změnu chování vozidla, jako je přetáčivost či nedotáčivost, nastavením klopných tuhostí [6].

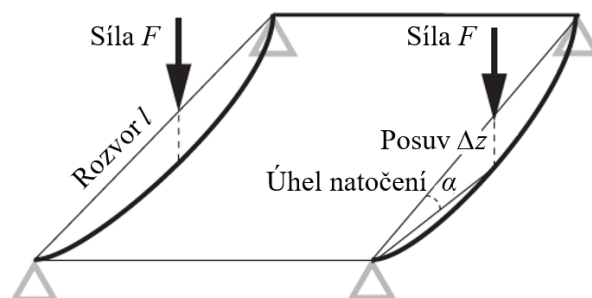


*Obr. 10* Distribuce příčného přesunu tíhy na přední nápravě pro různé torzní tuhosti v závislosti na podílu klopné tuhosti na přední nápravě [6]

Hodnoty torzní tuhosti se liší podle dané kategorie vozů. U osobních automobilů se hodnoty pohybují obvykle v rozmezí 17 000 až 40 000  $\text{Nm/}^\circ$  [6], ale monoposty Formula Student mají torzní tuhost do 4 000  $\text{Nm/}^\circ$ . Poslední brněnská formule Dragon 9 měla torzní tuhost lehce přes 2 000  $\text{Nm/}^\circ$ . Stanovit ideální hodnotu torzní tuhosti není snadné, jelikož s rostoucí tuhostí obvykle roste i váha vozidla, což je u závodního monopostu nežádoucí. Milliken [8] uvádí, že dostatečná torzní tuhost by měla být 3–5krát větší než celková klopná tuhost vozidla.

## 2.2 PODÉLNÁ OHYBOVÁ TUHOST

Zrychlením, resp. zpomalením, dochází k podélnému přesunu tíhy, který se na karoserii projeví ohybem. Ten může být vyvolán také přejezdem koly jedné nápravy po nerovnostech, proto se jako další důležitý parametr uvádí podélná ohybová tuhost. Při designu automobilu se má zpravidla za to, že vysoká torzní tuhost zajistí i dostatečnou ohybovou tuhost.



Obr. 11 Schéma podélného ohybového namáhání [6]

Ohybové zatížení na obr. 11 je ekvivalentem trojbodového ohybu. Ohybovou tuhost lze určit pomocí následujících vztahů. Pro stanovení úhlu natočení  $\alpha$  platí:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta z}{\frac{l}{2}}\right), \quad (4)$$

kde  $l$  je rozvor. Podélný ohybový moment  $M_o$  se vypočte jako:

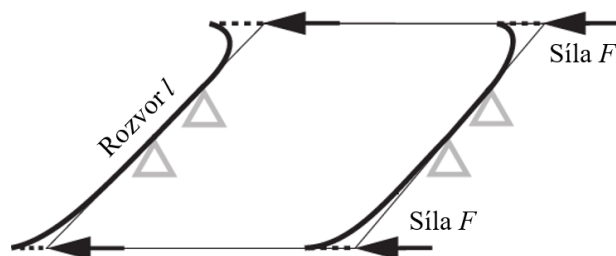
$$M_o = F \cdot \frac{l}{2}, \quad (5)$$

kde  $F$  je síla způsobující moment. Rovnice ohybové tuhosti  $K_o$  má tvar [6]:

$$K_o = \frac{M_o}{\alpha}. \quad (6)$$

### 2.3 PŘÍČNÁ OHYBOVÁ TUHOST

Příčnou tuhostí se rozumí odolnost karoserie proti ohybu vzniklého působením dostředivých sil na kolech při průjezdu zatáčkou. Schéma zatížení je na obr. 12. Tento parametr ovlivňuje chování vozidla při zatáčení, ale běžně není určován, protože více než příčná tuhost celého vozidla je důležitá lokální příčná tuhost uchycení náprav [6].



Obr. 12 Schéma příčného ohybového namáhání [6]

### 2.4 LOKÁLNÍ TUHOST

Významnou roli v chování hrají také lokální tuhosti úchytných bodů zavěšení. Nízké hodnoty lokální tuhosti mohou při zatížení měnit úhly sbíhavosti a odklonu, čímž snižují možnosti správného nastavení podvozku. Dalším negativem mohou být neočekávané deformace a zatížení podvozkových komponent způsobené průhybem nebo natočením uchycení [9].

### 3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

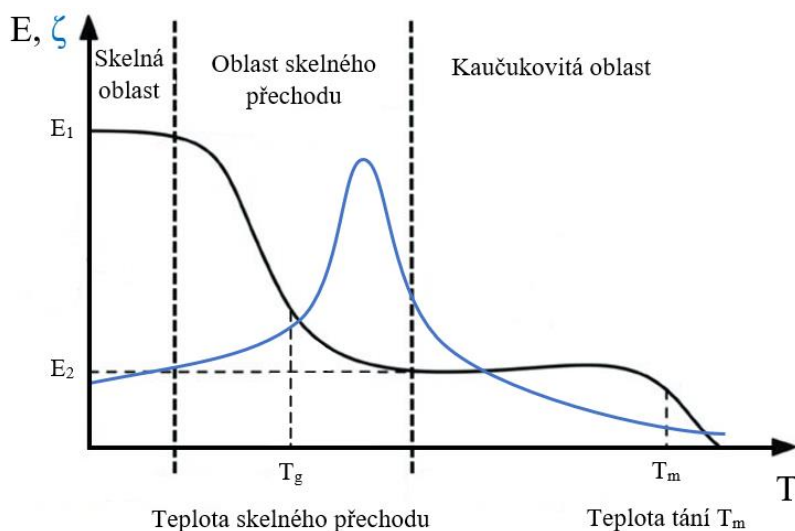
Kombinací dvou nebo více odlišných materiálů, mezi nimiž je zřetelné rozhraní, vznikne kompozitní materiál, jenž má lepší fyzikální vlastnosti než jednotlivé fáze. V této práci se omezíme jen na kompozity skládající se ze dvou součinných fází – výztuže a matrice. Pevnou složkou kompozitu jsou výztuže ve formě částic nebo vláken, zatímco matrice slouží k propojení výztuží a přenosu zatížení.

#### 3.1 MATRICE

Smyslem matrice je propojení výztuží, přenos sil mezi nimi a jejich ochrana proti poškození a degradaci. Mimo jiné drží vytvrzená matrice pevný tvar kompozitu, polohu a směrovou orientaci výztuží. Jelikož výztuže jsou zpravidla pevnější, matrice je strukturálně slabším článkem kompozitu a výsledné mechanické vlastnosti záleží na ní, což se projevuje obzvláště při provozu za zvýšených teplot. Zde se budeme zabývat pouze organickými neboli polymerními matricemi. Kompozity s tímto typem se nazývají vlákny vyztužené plasty (FRP).

Široce využívanou skupinou organických matric jsou polyesterové a vinylesterové pryskyřice, které jsou používány zejména u málo namáhaných produktů, což je dáno omezením jejich aplikace pouze pro skelná vlákna. Tato skupina pryskyřic má totiž nízkou adhezi s karbonovými a aramidovými výztužemi, které mají lepší mechanické vlastnosti, a tím je zásadně snížen přenos sil mezi vlákny takového kompozitu.

Tento problém řeší epoxidové pryskyřice, jejichž použití není limitováno materiálem výztuže, díky čemuž jde o nejrozšířenější polymerní matici. Benefity oproti předchozí skupině jsou navíc lepší zpracovatelnost a menší smrštivost při vytvrzování. Epoxidové matrice absorbují vzdušnou vlhkost v nevytvrzeném i vytvrzeném stavu, což má za důsledek snížení už tak nízké teploty skelného přechodu  $T_g$ , kterou mají přibližně 120 °C.



Obr. 13 Závislost Youngova modulu a poměrného tlumení kompozitu na teplotě [10],[11]

Teplota skelného přechodu  $T_g$  je důležitým parametrem matric, jenž udává teplotu, při které nastává změna ze skelného stavu, jenž je pevný a křehký, na kaučukovitý stav, který je měkký a vyznačuje se viskoelastickým chováním (viz obr. 13). Tento proces je vratný a ochlazením

pod teplotu  $T_g$  se materiál dostane zpět do skelného stavu. Změna mechanických vlastností je zapříčiněna zvýšenou pohyblivostí makromolekul polymeru, která je způsobena vysokou teplotou. Kromě snížení modulu pružnosti v tahu dochází i ke změně tlumení kompozitu. Určení samotné teploty skelného přechodu není jednoduché, jelikož je závislá na metodě měření, gradientu ohřevu nebo absorbované vlhkosti. Navíc je zavádějící, že je  $T_g$  zapisována jako jedna hodnota, ve skutečnosti však jde o interval teplot, během kterého dochází k výrazné změně vlastností. Hodnota  $T_g$  pak může udávat začátek, střed nebo konec tohoto intervalu v závislosti na použité metodě měření.

Vyšší teplotou skelného přechodu disponují pryskyřice bismaleimidové, polyimidové a fenolické. Prvně jmenované dosahují teploty  $T_g$  v rozmezí 170 až 230 °C, ale po vytvrzení jsou extrémně křehké. Teplota skelného přechodu nabývá stejných hodnot i u polyimidových a fenolických matric, ale při jejich vytvrzování dochází ke kondenzaci vodních par, což má za následek vznik vzduchových kapes, které iniciují delaminaci a koncentraci napětí. Tyto aspekty značně omezují jejich použití ve strukturálních aplikacích [3].

### 3.2 VÝZTUŽE

Hlavním účelem výztuží v polymerních matricích je poskytnout kompozitu vysokou pevnost a tuhost, což je ovlivněno nejen materiálem, ale i orientací a typem výztuže. Nejmenší přínos mají výztuže částicové nebo s velmi krátkými vlákny, protože zatížení přenáší především matrice. Z tohoto důvodu se používají spíše ke snížení hmotnosti a výrobních nákladů než pro jejich mechanické vlastnosti. Výrazně lepší pevnostní charakteristiky poskytují krátká vlákna, z nichž se lisováním vyrábí rohože.

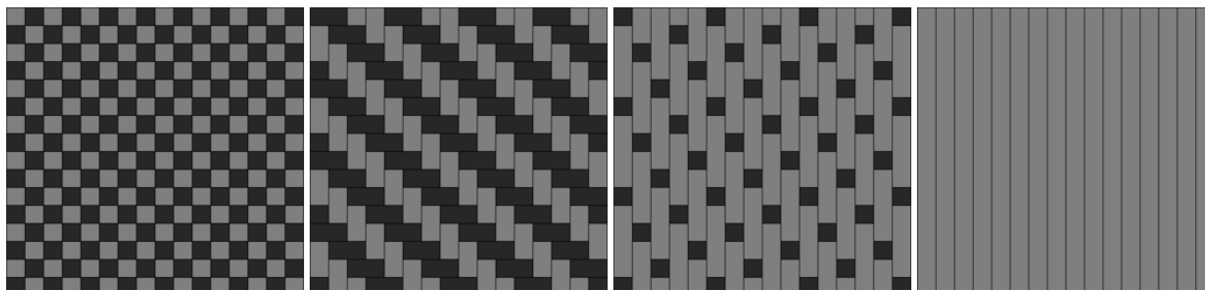
Zatížení nejlépe přenášejí dlouhá vlákna, jenž mají délku výrazně větší než průměr. Jelikož se průměr vláken pohybuje v jednotkách mikrometrů, jsou vlákna vázána do svazků po několika tisících. Tyto svazky se nazývají rovinky a používají se k výrobě součástí odvíjením z cívky nebo se z nich mohou tkát tkaniny či plést punčochy. Z punčoch se vyrábí díly válcového tvaru, zatímco tkaniny slouží k produkci plošných komponent. Díky spojení jednotlivých vláken do celků je zjednodušena manipulace a zároveň je zajištěna přesná orientace [3].



Obr. 14 Zleva: skelná rohož, uhlíkový roving a aramidová punčocha [12], [13], [14]

Tkaniny je možné rozlišovat podle způsobu tkaní na sebe kolmých pramenů osnovy a útku. Nejsoudržnější a nejhůře tvarovatelnou je plátňová vazba (*plain*). Opakem je atlasová vazba (*satín*), která se používá k velkosériové výrobě kompozitů díky lehké zpracovatelnosti, má však tu nevýhodu, že se vazba lehce rozpadá. Vhodným kompromisem tvarové poddajnosti a pevnosti vazby je kepr (*twill*), jenž vizuálně tvoří diagonální motiv. Zvláštním typem je jednosměrná tkanina (*unidirectional*, UD), která nemá útek a patří mezi netkané tkaniny. Vyráběna je pokládáním paralelních pramenů rovinku vedle sebe a jejich spojením například

skelnou nití. UD tkaninu lze lehce tvarovat podél vláken, ale obtížně napříč. Díky orientaci všech vláken pouze v jednom směru má jednosměrná tkanina několikanásobně vyšší modul pružnosti v podélném směru než v příčném, zatímco předchozí typy tkanin mají v obou směrech modul pružnosti přibližně stejný.



Obr. 15 Zleva: vazba plátnová, keprová, atlasová a jednosměrná [15]

Konstrukční využití kompozitu určují jeho vlastnosti a lze ho ovlivnit použitým materiálem výztuže, který neovlivňuje pouze strukturální charakteristiky, ale i elektrickou a tepelnou vodivost, odolnost vůči opotřebení nebo vlivům prostředí. Používanými materiály pro výrobu vláken vyztužených plastů jsou zejména sklo, uhlík a aramid. V minulosti se používala také bórová vlákna, která ale byla z trhu téměř vytlačena uhlíkovými vlákny, protože jsou výrazně levnější na výrobu a disponují stejnými nebo lepšími mechanickými vlastnostmi [3].

### 3.2.1 SKLO

Nejrozšířenějším materiálem pro výrobu výztuží je sklo. Skelná vlákna se vyrábí extruzí taveniny  $\text{SiO}_2$  a dalších oxidů jako jsou např.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{MgO}$ , které určují výsledné vlastnosti skla. Díky různým příměsím se rozlišuje několik typů skelných vláken pro široké spektrum použití. E-sklo se vyznačuje především velmi nízkou elektrickou vodivostí a dobrými mechanickými vlastnostmi, proto jde o nejpoužívanější skupinu skelných vláken, které nachází své uplatnění jak v elektronice při výrobě plošných spojů, tak i v leteckém nebo automobilovém průmyslu. Mezi materiály pro speciální aplikace patří S-sklo, které má oproti E-sklu vyšší pevnost až o 15 %, ale hlavním benefitem je možnost provozu i za vysokých teplot [3].

### 3.2.2 UHLÍK

Z uhlíkových nebo též karbonových vláken jsou v současné době běžně vyráběny komponenty pro automobilní, leteckou a lodní dopravu, tlakové nádoby, sportovní náčiní nebo rotory větrných elektráren. Za svůj rozmach vděčí skvělému poměru mezi mechanickými vlastnostmi a nízkou hmotností a také zvyšující se cenové dostupnosti. Karbonové filamenty mají výrazně vyšší pevnost a modul pružnosti než běžné konstrukční kovy. Výhodou je také vysoká odolnost proti únavovému poškození a působení chemikálií. Pro kompozity s uhlíkovými vlákny s polymerní matricí se používá zkratka CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*).

Drtivá většina uhlíkových vláken je dnes vyráběna karbonizací polyakrylonitrilových (PAN) vláken v inertní atmosféře. Pokud navíc dojde po karbonizaci ke grafitizaci, pak mluvíme o grafitových vláknech, která se vyznačují vyšším modulem pružnosti. Menší podíl na objemu výroby mají vlákna vyráběná z mezofázové smoly, jenž je produkována z ropných derivátů, stejným postupem jako u první metody. Získaná uhlíková vlákna mají nejen velmi vysoký

modul pružnosti, ale také cenu. Vlákná při výrobě musí projít chemickou povrchovou úpravou, díky které dojde ke zvýšení vazebných sil s matricí kompozitu, jelikož s ní uhlíková vlákna oproti skelným nevytváří chemické vazby.

Karbonová a grafitová vlákna se dělí do skupin podle míry pevnosti a pružnosti. Uhlíková vlákna vyrobená z PAN filamentů patří většinou do skupin s průměrnou (AS) nebo vysokou pevností (HS) či středním modulem pružnosti (IM), zatímco grafitová mají vysoký modul pružnosti (HM). Vlákná ze smoly pak náleží do kategorie s velmi vysokým (VHM) nebo ultra vysokým modulem pružnosti (UHM) [3].

### 3.2.3 ARAMID

Slovo aramid je zkratka pro aromatické polyamidy, ze kterých jsou tyto vlákna tvořeny. Aramidová vlákna jsou známa spíše pod obchodními názvy jejich izomerů jako je Kevlar nebo ohnivzdorný Nomex. Stejně jako předchozí materiály disponují vysokou pevností a modulem pružnosti, ale mají zásadně vyšší abrazivní odolnost. Nevýhodou aramidů je degradace vzdušnou vlhkostí a UV zářením způsobující ztrátu mechanických vlastností. Kevlar se využívá v pneumatikách nebo neprůstřelných vestách, Nomex pak slouží k výrobě voštin do sendvičových kompozitů a protipožárních kombinéz používaných hasiči nebo řidiči v motorsportu. Kombinací kevlarových a uhlíkových nebo skelných rovingů vznikají hybridní tkaniny [3]. Srovnání vláken s konstrukčními kovy nabízí *tab. 2*.

*Tab. 2 Porovnání základních mechanických vlastností kompozitů a konstrukčních kovů [3, 16, 17]*

	E [GPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	ρ [g·cm <sup>-3</sup> ]
E-sklo	76–81	3 100–3 800	2,54
S-sklo	88–91	4 350–4 600	2,48
HS uhlík	340–450	3 450–5 550	1,90
UHM uhlík	690–970	1 900–2 400	2,20
Kevlar	80–180	2 800–4 000	1,47
Konstrukční oceli	200–210	360–690	7,85
Hliníkové slitiny	68–72	190–370	2,69
Titanové slitiny	100–120	900–1 400	4,50

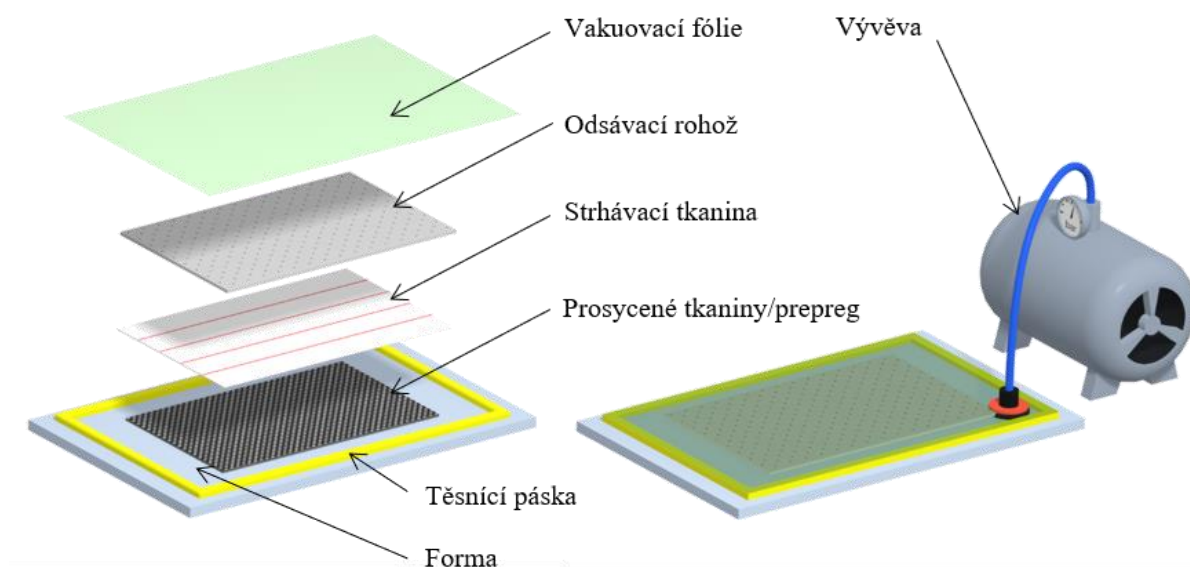
### 3.3 VÝROBA KOMPOZITŮ

Kompozitní díly mohou být vyráběny pomocí široké škály technologií od ručního laminování až po plně automatizovanou laminaci pomocí robotů a je jasné, že s použitou metodou se bude lišit především cena výrobku. Určujícím faktorem pro výběr technologie může být kromě nákladů také počet vyráběných kusů, velikost a tvarová složitost dílu, požadované mechanické vlastnosti či kvalita povrchu. V rámci projektu Formule Student jsou vyráběny pouze jednotky kusů, a proto jsou níže popsány pouze ty metody, které jsou na kusovou výrobu nejvhodnější a v univerzitním prostředí realizovatelné. Jedná se o laminaci s ručním sycením, infuzní laminaci a laminaci prepregovými tkaninami.

Pro všechny je společné, že k laminaci vyžadují předem připravenou formu, která udává výsledný tvar dílu. Oddělení laminátu a formy po vytvrzení zajišťuje vrstva separátoru.



Laminace s ručním sycením je nejjednodušší metodou a spočívá v sycení položených tkanin pryskyřicí pomocí štětce. Jednou z nevýhod metody je fakt, že součástí dílu se stává i přebytečná pryskyřice. Navíc je vytvrzený díl pórovitý kvůli vzduchovým bublinám vzniklým zpěněním pryskyřice při nanášení štětcem. Oba nedostatky řeší přidavné vakuování pomocí vývěvy. Laminace probíhá stejným způsobem, ale navíc je na poslední vrstvu výztuží položena strhávací tkanina a odsávací rohož. Laminát je následně vzduchotěsně uzavřen pružnou vakuovací fólií a těsnicí páskou. Odčerpáním vzduchu vývěvou dojde k vytvoření podtlaku a přebytečná pryskyřice je nasáta odsávací rohoží. Touto technologií byl vyroben monokok formule Dragon 7.



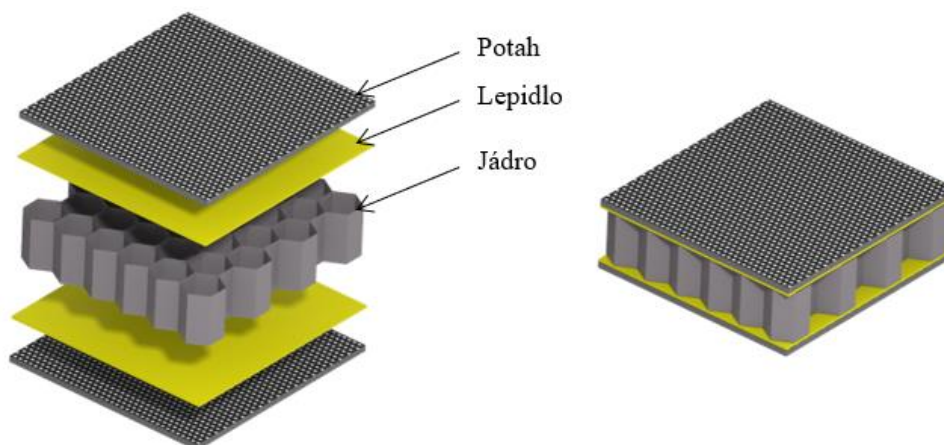
Obr. 16 Výroba kompozitního dílu laminací s přidavným vakuováním

Druhou možností je infuzní laminování, které se liší tím, že výztuže nejsou před utěsněním vakuovací fólií nasyceny matricí. Pryskyřice je nasávána z vnější nádoby mezi výztuže podtlakem vytvořeným vývěvou a rozváděna systémem kanálek. Výsledkem je kvalitní kompozit s výborným povrchem. Při výrobě však hrozí riziko, že nedojde k dokonalému prosycení celé plochy komponenty v případě nesprávně navržené soustavy rozváděcích kanálek. Po započítí infuze nelze jakkoliv do procesu zasahovat a případný špatný rozvod pryskyřice opravit. Z tohoto důvodu, a také kvůli nemožnosti použití k výrobě sendvičových struktur s voštinovým jádrem, je metoda nevhodná pro výrobu monokoku.

Prepreg je tkanina výztuží, která je již předsycena pryskyřicí, jejíž vytvrzovací reakce se aktivuje zvýšením teploty, a proto je nutné jej skladovat v mrazících boxech. Při správném skladování mají prepregy životnost přibližně rok, kdy po uplynutí této doby dochází k degradaci pryskyřice, což může mít za následek neprosycené oblasti kompozitu se zhoršenými vlastnostmi. K degradaci také přispívá vlhkost, která může pryskyřici z tkaniny odmočit. Nespornou výhodou prepregových tkanin je manipulace a zpracovatelnost, jelikož odpadá časové omezení tvrdnutí matrice při samotné laminaci, jako je tomu u ruční laminace. Navíc je výrobcem přesně dán optimální poměr matrice ku výztužím, a tedy ideální výsledná hmotnost. V neprospěch prepregů hraje jejich pořizovací cena a také nutnost vytvrzení v autoklávu, vysokotlaké peci.

### 3.4 SENDVIČOVÉ STRUKTURY

Typická sendvičová struktura sestává ze dvou tenkých kompozitních potahů přilepených k lehkému jádru. Obě komponenty jsou samy o sobě flexibilní a málo pevné, ale jejich kombinací vznikne rigidní a lehká struktura. Tlakové a tahové síly vzniklé ohybem panelu sendviče přenáší potahy, zatímco jádro přenáší smykové zatížení. Mimo lepší poměry ohybové tuhosti a pevnosti ku hmotnosti přináší sendvič další benefity, jakými jsou vysoká únavová a rázová odolnost nebo možnost ovlivnění přenosu tepla a izolačních charakteristik. Potahovým materiálem mohou být výše popsané kompozity, ale také hliník či ocel [3].

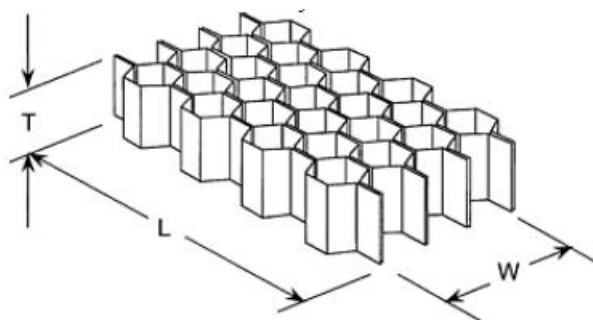


Obr. 17 Sendvičová struktura

#### 3.4.1 JÁDRA

Strukturální jádra by měla být především lehká, vzhledem k tomu se používají zejména polymerní pěny a voštiny. Pěny jsou levnější, chovají se izotropně, ale obecně mají horší mechanické vlastnosti než voštiny. PVC pěny s obchodním názvem Airex<sup>®</sup> a PMI pěny známé pod označením Rohacell<sup>®</sup> disponují nejlepšími vlastnostmi, a z tohoto důvodu se obě používají v lodním a leteckém průmyslu. Rohacell<sup>®</sup> má navíc tu výhodu, že na rozdíl od ostatních pěn odolává teplotám dosahovaných v autoklávu, proto jej lze použít s prepregovými tkaninami [3].

Voštiny získaly svůj název podle včelích pláství, které svým vzhledem evokují, což je zřejmé z obr. 18. Buňky voštiny jsou vyráběny lepením ohnutých listů materiálu k sobě. Nejčastěji jsou složeny z pravidelných šestihranných buněk, ale mohou být i protažené ve směru W, což umožňuje jednodušší tvarování v onom směru. Anizotropní chování je definováno směry L, W a T, kdy L je podélný směr, ve kterém je list spojitý, W je příčný směr, ve kterém jsou lepeny listy k sobě a T udává směr po tloušťce voštiny. Významnou charakteristikou měřenou v T směru je pevnost v tlaku, která je v ostatních směrech téměř nulová. Neméně důležitá je smyková pevnost měřená v L a W směru.



Obr. 18 Voština se směry  $W$ ,  $L$  a  $T$  [3]

Nejlepší poměr pevností ku hmotnosti poskytují hliníkové voštiny díky nízké hustotě a velmi tenkým stěnám buněk. Pevnější hliníkové voštiny lze i frézovat, což může najít své uplatnění u tvarově složitých komponent. Nomexové voštiny mají nižší pevnost, ale za to jsou daleko lepšími izolanty, a proto je možné jejich použitím ovlivňovat přestup tepla panelem [3]. Flexibilita aramidových voštin umožňuje tvarování do relativně malých rádiusů, což hliníkové nedovolují.

### 3.4.2 INSERTY

Připojení jiných komponent k sendvičovému panelu je možné pomocí šroubových spojů, ale utahováním může dojít k plastické deformaci struktury projevující se zborštěním jádra. Pevnost v tlaku závisí pouze na vlastnostech jádra, proto je v místě spoje vhodné nahradit jádro hutnějším materiálem, jenž bude tlaku lépe odolávat. Takové náhrady se nazývají inserty a nejčastěji jsou z technických plastů či kovů, např. ertalonu nebo hliníku. Neslouží jen k zabránění zborštění, ale také zajišťují bezpečnost spoje. Málo zatížené spojení lze realizovat i bez insertů, vysoce zatížené však nikoliv, jelikož by došlo ke stříhu potahů a vytržení šroubů z panelu. Rozhodujícím parametrem insertu vzhledem k bezpečnosti proti vytržení je jeho obvod, jenž můžeme vypočítat podle následujícího vztahu:

$$o = \frac{F_N}{\tau_{max} \cdot t_p}, \quad (7)$$

kde  $F_N$  je normálová složka síly působící na insert,  $\tau_{max}$  vyjadřuje pevnost ve stříhu potahu a  $t_p$  značí tloušťku potahu. U asymetrické skladby potahů okolo jádra je nutné rozlišovat, zda dochází k zatěžování spoje tahem či tlakem, a tedy kontrolovat správný potah. V případě cyklického zatížení je nezbytné hodnotu vztahovat ke slabšímu potahu. Výsledná hodnota odpovídá bezpečnosti 1, proto je potřebné obvod navíc vynásobit požadovanou hodnotou bezpečnosti.

### 3.4.3 VLIV SKLADBY NA TUHOST

Na výsledné mechanické vlastnosti kompozitu, ať už holého nebo sendviče, má výrazný vliv orientace vláken. Optimalizací skladby se zaměřením na monokok Formule Student se detailně zabývali studenti týmu z Cornell University [9]. Práce vznikala v době, kdy nebyla v platnosti určitá pravidla omezující směry vláken, ale zjištěné výsledky lze částečně aplikovat. Sekvenci tkanin a jejich orientaci je potřeba optimalizovat nejen pro torzní namáhání vozu, ale i na ohybovou tuhost panelu danou pravidly.

Abychom mohli skladbu optimalizovat vzhledem k torzní tuhosti, je potřeba určit vstupní data. Určujícím parametrem, jenž je dán materiálem, nikoliv geometrií, je modul pružnosti ve smyku. Úpravou rovnice 8 pro úhel natočení v krutu dostaneme výpočetní vztah pro torzní tuhost, z něžž je vliv modulu pružnosti ve smyku zřejmý:

$$\varphi = \frac{M_k \cdot L}{J \cdot G}, \quad (8)$$

$$K_t = \frac{J \cdot G}{L}, \quad (9)$$

kde  $J$  označuje polární kvadratický moment průřezu,  $G$  je modul pružnosti ve smyku a  $L$  vyjadřuje charakteristickou délku průřezu. Maximální modul pružnosti ve smyku je u kompozitních tkanin při natočení vláken pod  $45^\circ$ , z čehož vyplývá, že torzní tuhost se bude zvyšovat s narůstajícím podílem tkanin orientovaných pod tímto úhlem. Výsledky práce [9] poukazují na fakt, že pozice tkanin pod  $45^\circ$  ve skladbě nemá vliv na torzní tuhost.

Obdobně lze postupovat i u ohybové tuhosti panelu, na niž má materiál vliv skrz modul pružnosti v tahu. Z rov. 10 pro úhel natočení při trojbodovém ohybu je možné odvodit vztah pro ohybovou tuhost:

$$\alpha = \frac{F \cdot L^2}{16 \cdot E \cdot I} = \frac{M_o \cdot L}{8 \cdot E \cdot I}, \quad (10)$$

$$K_o = \frac{8 \cdot E \cdot I}{L}, \quad (11)$$

kde  $E$  je Youngův modul a  $I$  definuje kvadratický moment průřezu. Modul pružnosti v tahu je maximální ve směru vláken, ohybovou tuhost panelu lze tedy zvyšovat orientací vláken pod úhlem  $0^\circ$ . Na rozdíl od torzního namáhání v tomto případě záleží i na pořadí v sekvenci tkanin, konkrétně čím budou silnější tkaniny více vzdáleny od neutrální osy, tím poskytnou vyšší tuhost. Optimální rozložení tkanin tedy je, aby vrstvy s vlákny pod úhlem  $45^\circ$  byly nejbližší jádru, zatímco vrstvy s vlákny pod  $0^\circ$  by byly od jádra nejvzdálenější.

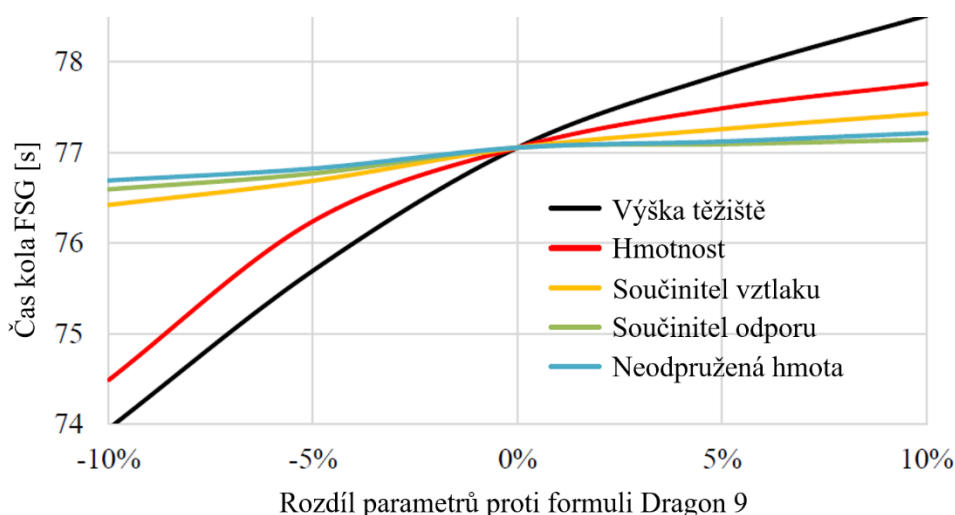
Tým z Cornellovy univerzity toto dokázal jednoduchou MKP simulací vzorků se symetrickou skladbou kolem jádra sestávající ze 4 vrstev tkanin s orientací  $0^\circ$  a 3 vrstev pod úhlem  $45^\circ$  na jeden potah. První vzorek měl střídavě vrstvy  $0^\circ$  a  $45^\circ$ , zatímco druhý měl všechny tkaniny orientované pod úhlem  $0^\circ$  na vnějšku a pod úhlem  $45^\circ$  uvnitř u jádra. Pouhým přeskládáním skladby došlo ke zvýšení ohybové tuhosti o 22 % při zachování torzní tuhosti.

Tuhostní charakteristiky lze mimo orientaci vláken ovlivnit také tloušťkou jádra. S rostoucí tloušťkou se zvyšuje ohybová tuhost díky dříve popsanému jevu. Dochází i ke zvýšení torzní tuhosti, ale jen ve velmi omezené míře. Studenti z Cornellovy univerzity uvádí, že přidání jedné vrstvy tkaniny pod  $45^\circ$  mělo v jejich případě větší efekt na torzní tuhost než zvětšení jádra o 6 mm [9].

## 4 KONSTRUKCE CHASSIS DRAGONA X

### 4.1 HLAVNÍ CÍLE

Cílem každé sezóny je navrhnout lepší vůz, než byl ten předchozí – v tomto případě Dragon 9 (D9). Dlouhodobou týmovou strategií je minimalizovat váhu a těžiště monopostu, což se projevuje při rozhodování o konceptu vozidla. Vliv nejen těchto parametrů na rychlost formule je zřetelný z lap time simulace závodu FSG 2019 Pavla Gellnera na obr. 19.



Obr. 19 Lap time simulace závodu Formula Student Germany [18]

Primárním cílem pro formuli Dragon X (DX) byl návrh a výroba prvního zcela kompozitního rámu, jenž by přinesl kýžené zlepšení výkonnosti. Kompozitní rám by se zasloužil především o výrazné snížení hmotnosti, ale pro reálný odhad redukce váhy je potřeba vypočítat bilanci hmotnosti (viz tab. 3). Na základě této bilance byla stanovena cílová hmotnost o 4 kg nižší, než v případě Dragona 9, jehož váha monokoku s rámem byla 32 kg (viz tab. 4).

Tab. 3 Odhad změny hmotnosti rámu DX oproti D9 při použití zcela kompozitního chassis

	Rozdíl hmotnosti [g]
Zadní trubkový rám	-6 500
Kompozitní monokok	+5 200
Kompozitový panel za zády řidiče	-1 800
Firewall za zády řidiče	+300
Výztuha trubkového rámu	-640
Inserty	+100
Držáky trubkového rámu	-700
<b>Celkový rozdíl</b>	<b>-4 040</b>

Klopná tuhost pro DX byla Markem Urbanem navržena na 971 Nm/° [19] a dle informací z kapitoly 2.1 by byla dostatečná torzní tuhost 2 913 Nm/°, což je téměř o 900 Nm/° více, než

jakou měla formule D9. Při dřívějším přechodu z prostorového rámu na hybridní variantu došlo ke zvýšení torzní tuhosti o  $851 \text{ Nm}^\circ$  [20], ale v našem případě by byla nahrazena kompozitem výrazně menší část konstrukce, proto nelze očekávat, že by došlo k tak výraznému navýšení. Torzní tuhost by bylo možné zvýšit zesílením potahu sendviče, ale to by vedlo ke zvýšení hmotnosti, což je v přímém rozporu s týmovou strategií, proto byla stanovena cílová torzní tuhost na  $2\,400 \text{ Nm}^\circ$ .

Tab. 4 Základní parametry hybridního chasis D9

Parametr	Hodnota
Hmotnost [kg]	32
Torzní tuhost [ $\text{Nm}^\circ$ ]	2 032
Výška těžiště [mm]	322
Délka / výška / šířka [mm]	2 271 / 1 035 / 686
Moment setrvačnosti okolo osy Z [ $\text{kg}\cdot\text{mm}^2$ ]	$1,2\cdot 10^7$

Nahrazení zadního trubkového rámu s sebou nese i značné nevýhody. Jednou z nich je zvýšení těžiště, jelikož těžké trubky byly položeny nízko a těžiště snižovaly. Na první pohled se může zdát, že je to taktéž proti týmovým cílům, ale polohu těžiště lze na rozdíl od hmotnosti korigovat výškovým snížením hmoty v jiných částech chasis. Výroba je v případě kompozitního monokoku komplikovanější než u hybridního chasis, stejně tak i servis pohonné jednotky. Náhradou profilů kompozitem okolo motoru se značně zhorší přístup, proto je na toto nutné brát zřetel při návrhu. Usnadnění a tím pádem i urychlení oprav závad na závodech může rozhodovat o úspěchu či neúspěchu celého týmu.

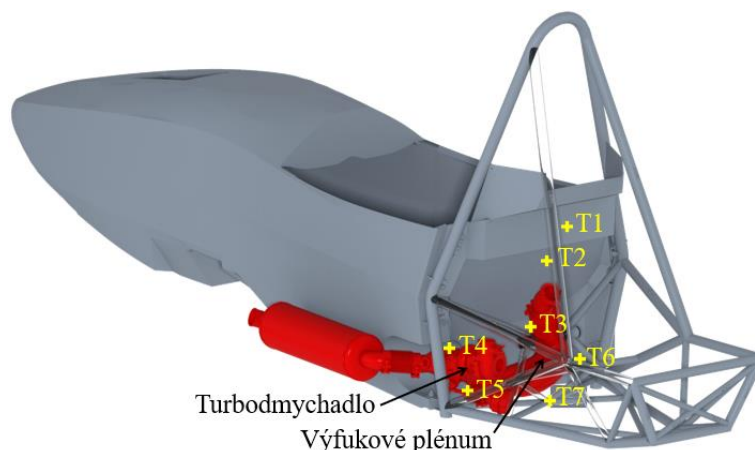
Zdaleka největším problémem je však uzavření pohonné jednotky v kompozitní struktuře. Jak již bylo řečeno v kapitole 3.1, vysoké teploty přesahující teplotu skelného přechodu způsobují degradaci vlastností matrice kompozitu. Změknutí pryskyřice způsobuje snížení tuhosti i pevnosti kompozitu, což v extrémním případě může mít za následek až úplné porušení struktury, a tím destrukci monokoku. Na tento problém byla proto soustředěna zvláštní pozornost a jeho vyřešení byl další z hlavních cílů.

## 4.2 PROBLÉM SKELNÉHO PŘECHODU KOMPOZITU V MOTOROVÉM PROSTORU

Pohon brněnské formule je zajišťován jednoválcovým motorem Husqvarna FE 501 přeplňovaným turbodmychadlem. Ve výfukovém systému je před turbínou zařazeno výfukové plénium, jenž omezuje pulzace výfukových plynů před turbodmychadlem, ale zároveň je kvůli své velké ploše největším zdrojem tepla v motorovém prostoru formule. U všech předchozích modelů byla celá pohonná jednotka uložena v prostorovém rámu, jehož mechanické vlastnosti nejsou citlivé na zvýšené teploty, a k tepelnému ovlivnění docházelo u hybridního chasis pouze v zadní části kompozitního monokoku. Tato oblast není kromě přípojních bodů trubkového rámu nijak namáhána, proto změny pevnosti kompozitu vlivem vyšších teplot nebyly považovány za kritické.

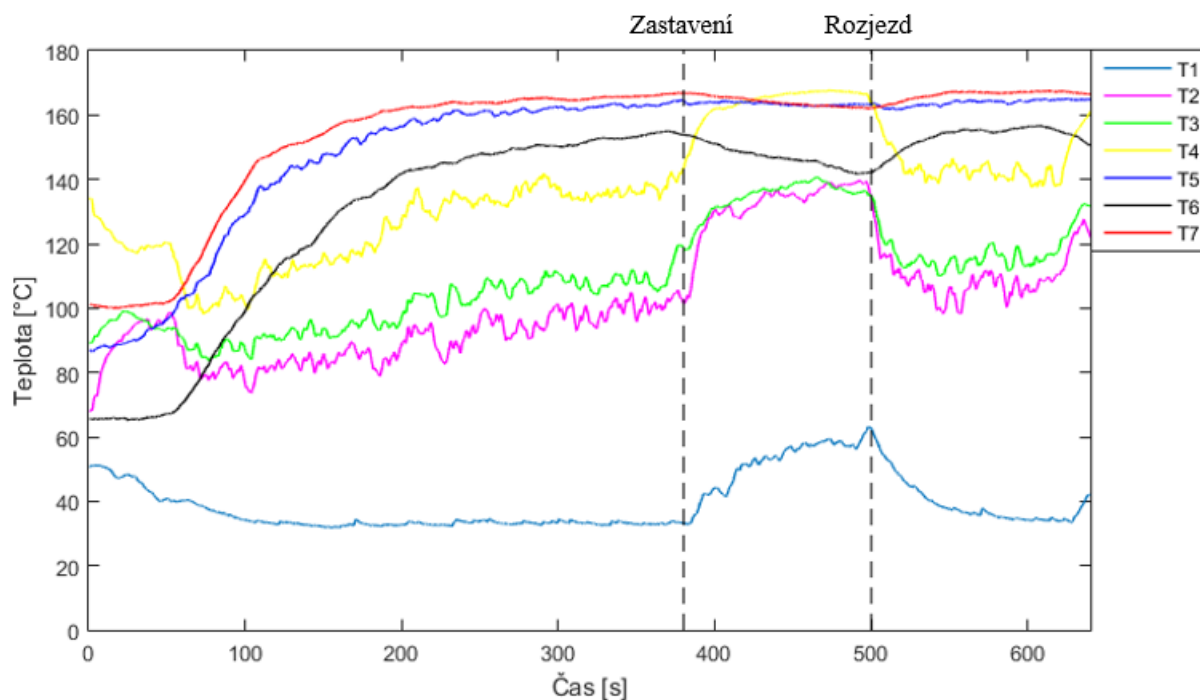
Úspěšné využití kompozitního monokoku místo zadního prostorového rámu je limitováno teplotami v motorovém prostoru, a s tím spojeného tranzitního chování kompozitů. Aby bylo možné začít hledat řešení tohoto problému, bylo nejprve nutné dané teploty změřit, k čemuž posloužil monopost Dragon 9. Zadní kompozitní část byla částečně simulována zakrytím

trubkového rámu uhlíkovými panely pokrytými z vnitřní strany termoreflexní fólií. Teplotní senzory byly umístěny převážně v blízkosti turbodmychadla a výfukového pléna, kde byly očekávány nejvyšší teploty. Jejich rozložení je zřejmé z *obr. 20*.



*Obr. 20 Umístění teplotních senzorů na formuli Dragon 9*

Samotné měření probíhalo při jízdě na testovací trati sloužící k tréninku dynamických disciplín. Před jízdou se motor nechal zahřát, poté řidič jel po trati zhruba 6 minut, než došlo k ustálení teplot. Následně na 2 minuty zastavil, aby byl zřejmý vývoj teplot ihned po jízdě, a po jejich uplynutí strávil na trati další 2 minuty. Průběh teplot na jednotlivých senzorech v závislosti na čase je zobrazen na *obr. 21*. Podobných jízd bylo provedeno celkem deset, vždy s obdobným průběhem teplot. Z grafu je patrné, že nejvyšší teploty 172 °C bylo dosaženo v těsné blízkosti výfukového pléna na kříži profilů trubkového rámu (senzor T7), který se nachází pod ním. Nižších hodnot nabývaly teploty na senzorech umístěných na levé i pravé straně monokoku na úrovni výfukového pléna, resp. ve vybrání monokoku pro výfukové potrubí. Senzory T1, T2 a T3 upevněné za zády řidiče v různých výškách ukazují na očekávaný pokles teplot s rostoucí vzdáleností od zdroje tepla, ale také prudký nárůst po zastavení vozidla vlivem kumulace tepla a stoupajícího horkého vzduchu, což lze pozorovat i u senzoru T4 ve vybrání u výfuku.



Obr. 21 Průběh naměřených teplot v motorovém prostoru

Maximálních teplot je dosahováno u podlahy a teplota klesá s rostoucí vzdáleností od zdrojů tepla, což znamená, že na horní a boční stěny monokoku nebudou působit tak vysoké teploty. V případě plně kompozitního chasis by za zády řidiče nebyl strukturální panel, ale jen ochranná ohnivzdorná stěna, u níž tranzitní chování nemá smysl řešit, jelikož nebude silově namáhána. Primárně je tedy potřeba se zaměřit na podlahu pod motorem a případně na chlazení motorového prostoru.

#### 4.2.1 NÁVRHY ŘEŠENÍ

K výrobě monokoku byl objednan uhlíkový prepreg od firmy Meem impregnovaný epoxidovou pryskyřicí ER 38, která má teplotu skelného přechodu  $T_g$  130 °C [21]. Při porovnání s výsledky z předchozího měření je zřejmé, že tato teplota bude výrazně překročena a bylo tedy nezbytné navrhnout řešení, které by zamezilo nebo alespoň snížilo negativní vlivy měknutí matrice. Toto řešení by mělo brát ohled především na nízkou cenu a hmotnost a zároveň by mělo docházet k co nejmenším zásahům do konstrukce jiných součástí.

K ochraně kompozitních dílů před vysokými teplotami byla u předchozích modelů používána termoreflexní fólie ZircoFlex<sup>®</sup>, což je hliníková fólie s keramickým nástřikem sloužící jako tepelný štít. Jedna vrstva této fólie by měla odstínit 65 % vyzářeného tepla, dvě vrstvy 77 % a tři vrstvy až 85 % [22]. S využitím fólie ZircoFlex<sup>®</sup> se počítalo i nadále, ale její účinnost by již nemusela být dostačující.

#### VYSOKOTEPLTNÍ PRYSKYŘICE

Nasadě je použití odlišného materiálu, který by vysoké teploty vydržel. Pryskyřice s vysokými teplotami skelného přechodu jsou vypsány v kapitole 3.1 i s jejich nedostatky. Kompozit s těmito matricemi je obvykle velmi pórovitý, což by v kombinaci s jednoválcovým



motorem, který se vyznačuje velkými vibracemi, téměř jistě vedlo k delaminaci vrstev tkanin a k uvolnění uložení motoru.

Vysokoteplotní prepregy mají obecně horší mechanické vlastnosti než běžné prepregy a k získání vysoké tepelné odolnosti je potřeba je podrobit speciálnímu vytvrzovacímu cyklu, který se neshoduje s vytvrzovacím cyklem jiných prepregů. Aby bylo možné efektivně využít vysokoteplotní prepreg, bylo by nutné jej vytvrzovat v jiném kroku než ostatní tkaniny, což by prodloužilo a prodražilo výrobu. Z těchto důvodů je použití vysokoteplotních prepregů nevhodné.

### **AKTIVNÍ CHLAZENÍ**

Běžně aplikovaným řešením při nutnosti chlazení je použití ventilátoru, který do chlazeného prostoru vhání chladný vzduch nebo odsává horký. Ventilátor by mohl posloužit i v tomto případě, ale za cenu vyšší hmotnosti. Mimo váhu samotného ventilátoru by hmotnost narostla i kvůli akumulátoru, po němž by byla vyžadována větší kapacita, a ten by tak byl těžší a rozměrnější.

Možným způsobem chlazení by mohl být externí ventilátor s vlastní baterií, který by se k vozidlu připojil vždy při zastavení. Během testování mají členové týmu k formuli volný přístup, a tudíž by s chlazením nebyl problém. Na závodech je situace odlišná, jelikož do závodního prostoru je omezený přístup. Krátké disciplíny trvají jen několik vteřin, takže by chlazení nebylo třeba. U delších by bylo možné použít vnější ventilátor jen mezi jednotlivými pokusy, což by nebylo dostačující a bylo by nezbytné najít jiný způsob chlazení, který by pomáhal chladit motorový prostor i během delších disciplín. Nicméně toto řešení je přijatelné, a proto byl do pravé strany monokoku vytvořen velký otvor (viditelný na *obr. 25*), kterým může být vzduch vháněn do motorového prostoru externím ventilátorem. V případě, že by navržené chlazení nebylo dostatečné, tak by zde mohl být ventilátor upevněn natrvalo.

### **PASIVNÍ CHLAZENÍ**

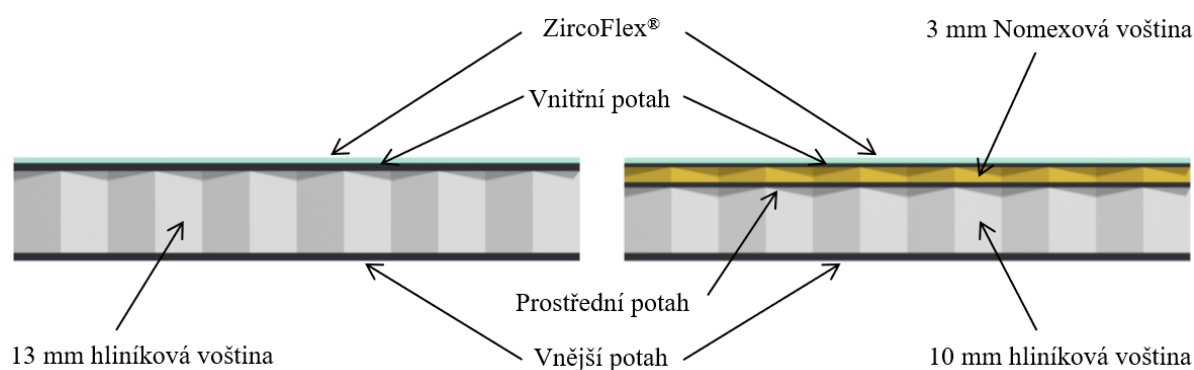
Náhradou za ventilátor při jízdě by mohlo být pasivní chlazení, tedy proudící okolní vzduch svedený náfuky do motorového prostoru. Problémem je, že se motor nachází vzadu, čímž jsou omezeny konstrukční možnosti, kudy proud vzduchu směřovat. Odebírání vzduchu z pod formule by bylo kontraproduktivní, jelikož by došlo ke značnému poklesu aerodynamického přitlaku. Velké otvory v systému podpor vzhledu hlavního oblouku nejsou pravidly povoleny a odvod vzduchu za krkem řidiče, jenž by byl určen k chlazení motorového prostoru, bylo nemožné navrhnout, jelikož se v této oblasti měly nacházet náfuky pro mezichladič. Jedinou zbývající možností bylo směřovat vzduch skrz boční otvor, jenž pravidla povolují. Takovým byl otvor v boční nárazové struktuře, kterým mělo procházet výfukové potrubí z monokoku do boční podlahy. Směrování vzduchu by pak zajišťoval náfuk v levé boční podlaze.

### **IZOLACE**

Snížení teploty dosahované na povrchu kompozitního panelu by mohlo být zajištěno také pomocí tepelné izolace. Většina u nás dostupných izolantů je určena pro stavební průmysl a mají maximální provozní teplotu okolo 100 °C, což je činí v této aplikaci nevyužitelnými. V zahraničí dostupnou alternativou je aerogel s obchodním názvem Pyrogel<sup>®</sup>, extrémně lehký izolant, který vydrží teploty až 650 °C. Nicméně obrovskou nevýhodou aerogelů je jejich cena, kdy 1 m<sup>2</sup> izolační tkaniny o tloušťce 10 mm stojí přes 12 000 Kč [23]. S ohledem na tento aspekt je použití izolace nevhodné.

### SENDVIČ S DVOJITÝM JÁDREM

Předchozí varianty řešení teplotního problému byly zaměřeny komplexně na celé okolí motoru, ale nikoliv konkrétně na inkriminovanou podlahu. Ta musí být i v ohřátém stavu dostatečně pevná kvůli uložení motoru. Zástavba pohonné jednotky neumožňuje jakékoliv navýšení tloušťky podlahy, tudíž by řešení nemělo tloušťku pozměnit, což splňuje sendvič s dvojitým jádrem. Sendvič s více jádry na sobě se v běžných aplikacích nepoužívá, ale zkoumá se díky dobré absorpci nárazové energie, čehož je příkladem ochrana mostních konstrukcí [24]. V našem případě však nejde o využití této vlastnosti, ale o schopnost sendviče s dvojitým jádrem upravovat průstup tepla panelem. Schéma takového sendviče v porovnání s klasickým je na *obr. 22* níže.



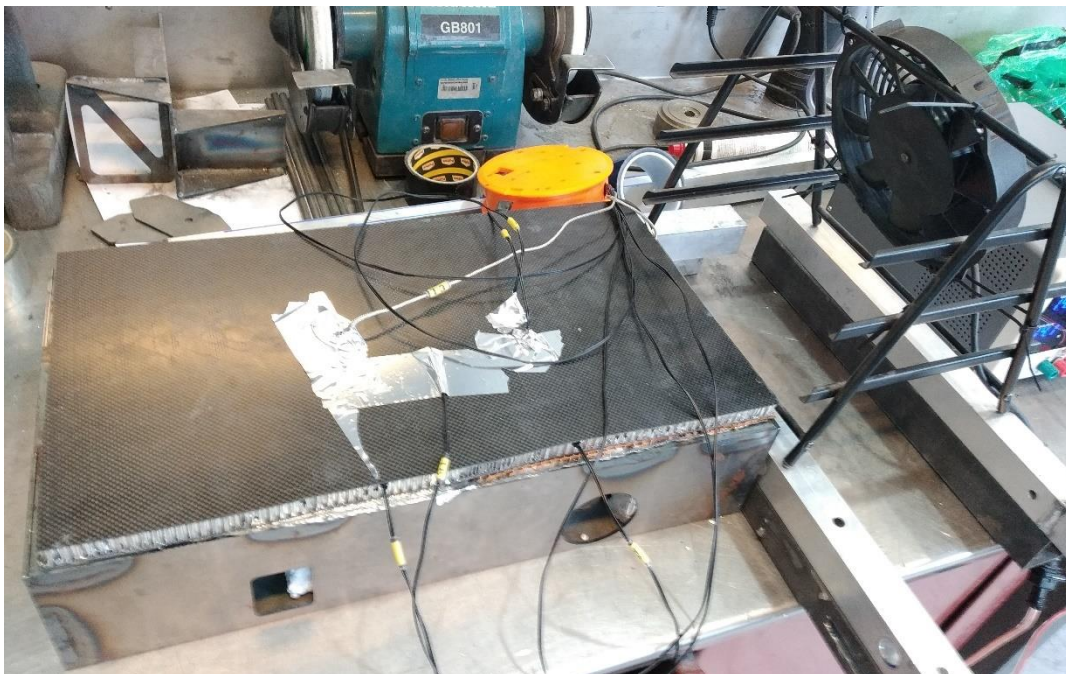
*Obr. 22 Originální panel (vlevo) a sendvič s dvojitým jádrem*

Průstup tepla sendvičem lze nejvýrazněji měnit tloušťkou voštin, jelikož většinu jejich objemu tvoří vzduch. Dostatečným snížením teploty voštinou na vnitřní straně monokoku dojde k zachování pevnosti a tuhosti prostředního potahu, čímž se na celkové tuhosti panelu bude podílet především část sendviče složeného z vnějšího a prostředního potahu, zatímco podíl horkého vnitřního potahu bude minimální kvůli ztrátě mechanických vlastností. Při srovnání s klasickým sendvičem by tak měl mít sendvič s dvojitým jádrem nižší tuhost v chladném stavu, jelikož jsou vlákna blíže k neutrální ose, ale vyšší tuhost v zahřátém stavu, protože u klasického sendviče dojde ke zhoršení vlastností vnitřního potahu.

Průstup tepla a s ním spojené teploty potahů by bylo možné vypočítat za pomoci vztahů pro hustotu tepelného toku složenou stěnou, ale jelikož se teplota v motorovém prostoru s časem mění, tak se jedná o nestacionární problém a výsledky by tak neodpovídaly realitě. Nestacionární vedení tepla je možné řešit výpočetní technikou, ale jako daleko jednodušší a časově méně náročnější se jeví fyzické měření. Studentská formule je jednoúčelové vozidlo, u nějž známe podmínky, ve kterých bude provozováno a stačí tak řešení dimenzovat jen na ně. Nejnáročnější a nejdelší závodní disciplína je vytrvalostní závod Endurance na 22 km, při kterém se po polovině závodu mění řidiči. Na tuto výměnu jsou vymezeny 3 minuty, které se do celkového času nezapočítávají [1]. Dragon 9 zajel Endurance na závodě Formula Student Germany za 1 431 sekund [25], což je necelých 24 minut.

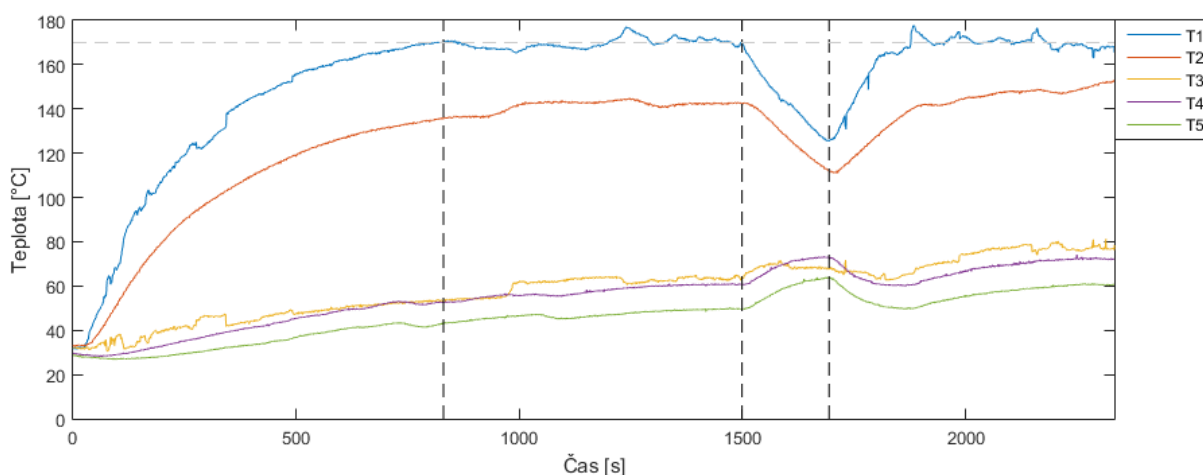
Pro měření byl vyroben panel, jehož jedna polovina byl klasický sendvič a druhou polovinu tvořil sendvič s dvojitým jádrem. Vnitřní potah panelu byl oblepen fólií ZircoFlex®. K panelu bylo upevněno pět termočlánků a termistorů. Termočlánek T1 byl umístěn na fólii ZircoFlex®, T2 mezi fólií a vnitřním potahem a T3 pod vnitřním potahem klasického sendviče. Termistor T4 měřil teplotu pod vnitřním potahem dvojitého sendviče a T5 pod jeho

prostředním potahem. Ze strany vnitřního potahu byl panel zahříván, zatímco z vnější byl chlazen ventilátorem, čímž bylo napodobeno proudění vzduchu pod podlahou během jízdy. Sestava měření je na *obr. 23* níže:



*Obr. 23 Sestava měření teplot na děleném panelu s klasickým i dvojitým jádrem*

Samotné měření spočívalo v simulaci disciplíny Endurance. Nejprve proběhlo zahřátí vnitřního prostoru na přibližně 170 °C na základě předchozího měření (viz *obr. 21*) a následně byla teplota udržována po dobu 12 minut. Poté bylo na 3 minuty vypnuto chlazení a snížen výkon topného tělesa, aby byla zohledněna výměna řidičů. Po uplynutí této doby bylo chlazení i topení navraceno do původního stavu na dalších 12 minut. Průběh naměřených teplot je možné vidět na *obr. 24*. Svislé čáry v grafu oddělují výše popsané fáze měření, vodorovná čára pak odpovídá hodnotě 170 °C.

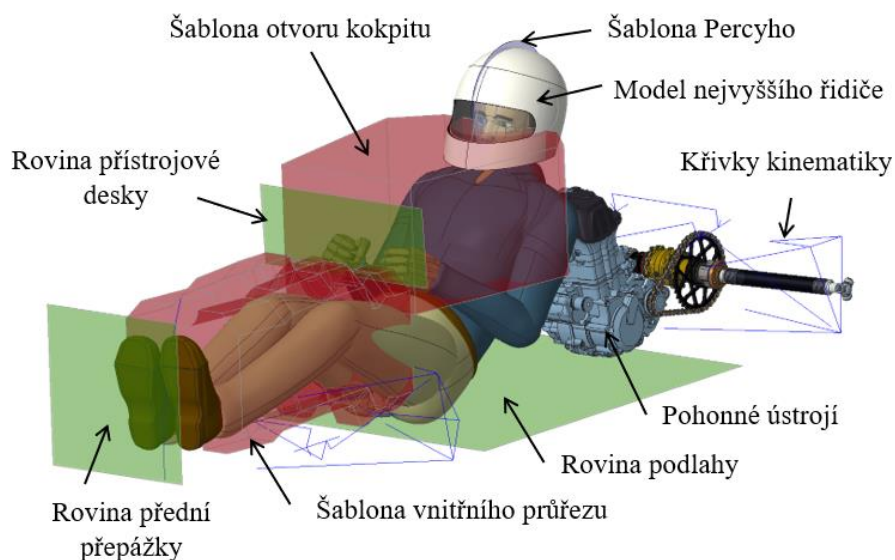


Obr. 24 Průběhy teplot na testovacím panelu během simulace Endurance FSG

Z průběhu teplot na termočláncu T1 je zřejmé, že teplota kolísala okolo hodnoty 170 °C, což nepředstavuje problém, jelikož při jízdě teplota také není konstantní. Na senzoru T2 bylo naměřeno maximálně 153 °C, na T3 81 °C, na T4 74 °C a na T5 64 °C. U obyčejného sendviče se tedy teplota vnitřního potahu během Endurance bude pohybovat mezi 81 a 153 °C, což znamená, že bude velice pravděpodobně přesažena teplota skelného přechodu 130 °C. Na druhou stranu u sendviče s dvojitým jádrem bude na prostředním nosném potahu teplota v rozmezí 64 až 74 °C. Z toho vyplývá, že sendvič s dvojitým jádrem splnil očekávání ve smyslu snížení teploty nosného potahu, a proto byl použit.

### 4.3 NÁVRH NOVÉHO CHASSIS

Design celé formule včetně chassis kompletně probíhal v softwaru *Creo Parametric 5.0*. Prvním krokem při návrhu bylo umístění základních bodů konstrukce – motor s diferenciálem a poloosami, kinematika D9 a základní roviny, mezi které patří podlaha, přední přepážka a přístrojová deska. Následovalo usazení modelu nejvyššího řidiče a Percyho, jejichž poloha zůstala po zkušenostech řidičů Dragona 9 nezměněna, čímž byla rovnou vyřešena otázka ergonomie. Nakonec byly přidány i šablony otvoru kokpitu a vnitřního průřezu. Počáteční stav návrhu je vidět na obr. 25. Jelikož vývoj všech sekcí probíhal zároveň, tak křivky kinematiky předchozí formule sloužily pouze k počátečnímu návrhu monokoku.



Obr. 25 Základní body na počátku návrhu

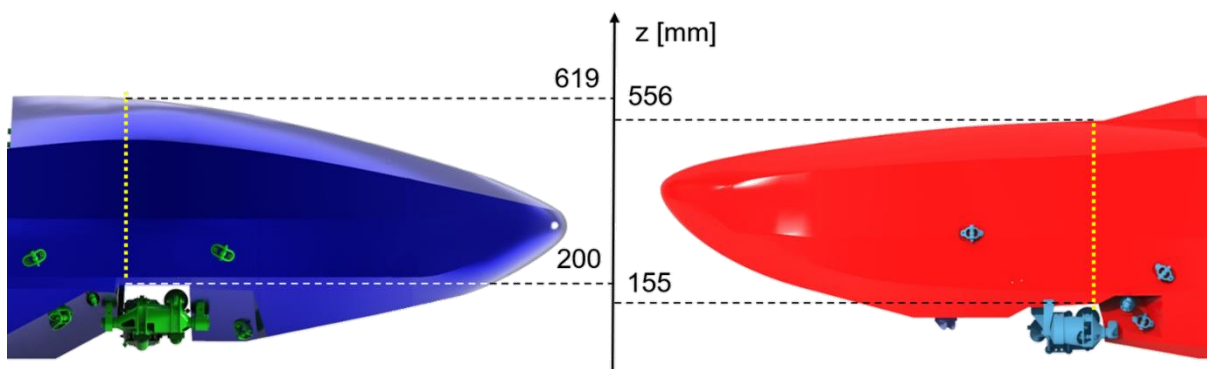
Sekce zabývající se aerodynamikou provedla CFD optimalizaci monokoku Dragona 9 a vznikl tak zjednodušený model, jenž posloužil jako základní kámen pro návrh nového monokoku. Ten vznikl tvarováním 3D křivek, a jejich následným potažením plochami, kterým byla nakonec přiřazena tloušťka podle síly sendviče v daném místě. Byla snaha navrhnout co možná nejjednodušší tvar, ale kvůli složitosti zástavby pohonné jednotky a odpružení toho nebylo zcela dosaženo, protože tvar chassis se musel těmito komponentám přizpůsobit. Nejdůležitější prvky konstrukce jsou shrnuty v následující kapitole.

## 4.4 KONSTRUKČNÍ UZLY

### 4.4.1 ULOŽENÍ VAHADEL A TLUMIČŮ

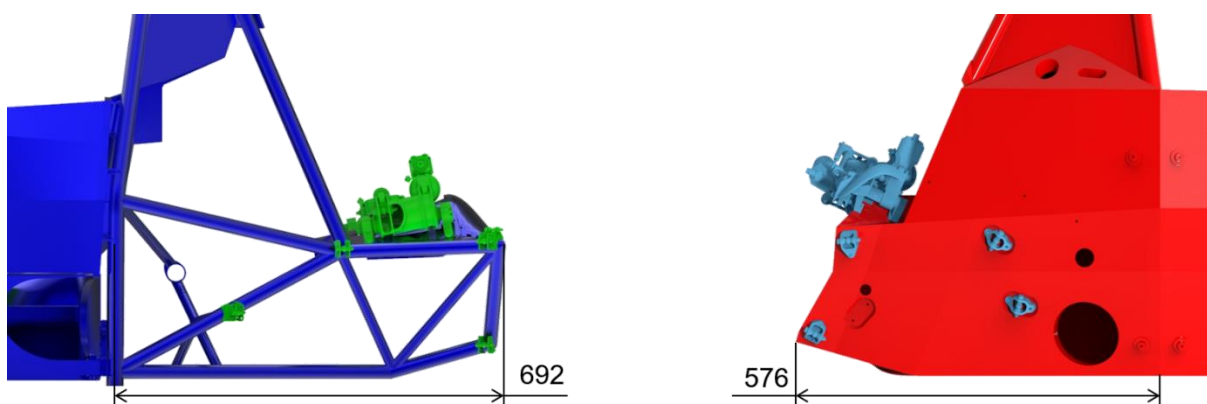
Stejně jako u Dragona 9 byl na obou nápravách použit systém odpružení typu roll-heave, který má příčně uložené tlumiče. To způsobuje problém především na přední nápravě, kde je odpružení uloženo pod monokokem, jelikož tento typ odpružení je rozměrný a musí se v tomto místě nadzvednout podlaha monokoku. Aby byl zajištěn průchod šablony vnitřního průřezu, tak se musí nadzvednout i horní stěna monokoku. Sekce podvozku se zasloužila o kompaktnější konstrukci odpružení a zároveň jej posunula níže, díky čemuž bylo možné obě stěny snížit, a tím pádem snížit hmotnost i výšku těžiště. Popsaná změna je zřetelná z obr. 26.

Změn doznalo i uložení hřebene řízení, který byl namísto volného průchodu skrz stěnu monokoku podepřen insertem. Stěna monokoku tak v daném místě musela být kolmá na hřeben a kvůli těsné blízkosti držáků zadního dolního ramene a vahadla vznikla tvarově komplikovaná oblast, kterou bylo následně obtížné vylaminovat.



Obr. 26 Porovnání uložení předního odpružení roll-heave Dragona 9 a Dragona X (vpravo)

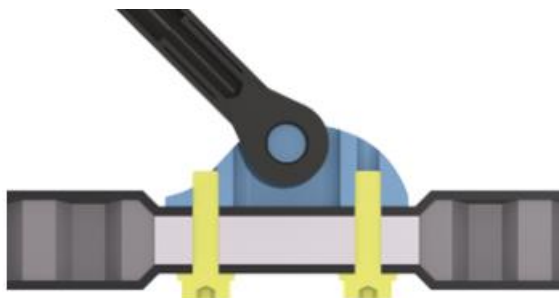
Ve spolupráci s oddělením podvozku se podařilo výrazně zkrátit zadní část monopostu změnou kinematiky popsanou v diplomové práci Marka Urbana [19]. V současné konfiguraci se hnací poloosy nachází až za zadními body ramen, zatímco na předchozím modelu procházely mezi trubkami rámu. Zadní roll-heave byl na D9 uložen na kompozitní výztuze rámu, obdobná struktura vznikla integrovaně na monokoku i zde, ale zkrácením došlo ke zhoršení realizace upevnění odpružení, jelikož nebylo kde uchytit zadní držáky vahadel. Připevnění umožnilo až posunutí heave tlumiče do převisu a přemístění zadních držáků vahadel z kraje do pozice mezi tlumiči, což lze vidět na obr. 27. Díky tomuto řešení bylo možné značně snížit hmotnost i moment setrvačnosti okolo osy Z.



Obr. 27 Porovnání uložení zadního odpružení roll-heave Dragona 9 a Dragona X (vpravo)

#### 4.4.2 VYZTUŽENÍ ZAVĚŠENÍ

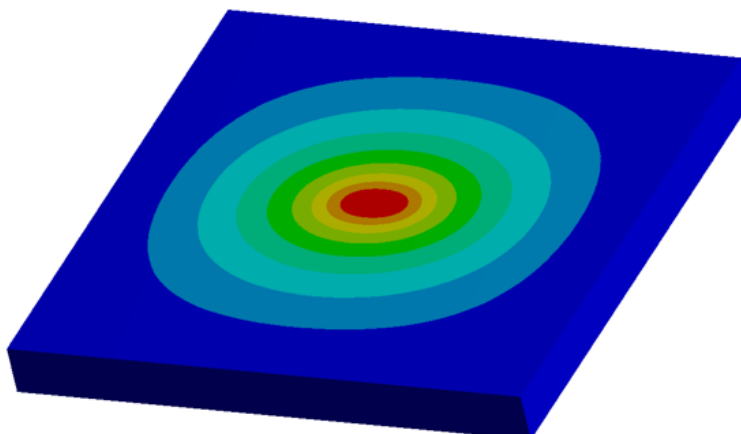
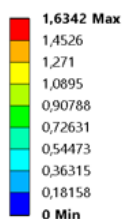
Jedním z požadavků na nový monokok bylo vyztužení předních horních bodů ramen přední nápravy. Ty se nachází na velké ploše bez blízké hrany, čímž při působení sil v nápravě vzniká nezanedbatelný průhyb, který má za následek nežádoucí změnu kinematiky. Zvýšení lokální tuhosti v okolí ramen bylo realizováno pomocí zapuštění insertu do struktury panelu. Zapuštěním insertu dojde k nasměrování většího objemu uhlíkových vláken do směru působení síly a dochází tak ke zvýšení lokální tuhosti. Stejný efekt by mělo i vyvýšení insertu ze struktury, ale to by bylo výrobně složitější. Snížení insertu bylo kromě předního horního bodu přední nápravy použito i u dalších bodů, které se nacházely na větší ploše, tzn. zadní horní bod na přední nápravě a přední body zadní nápravy.



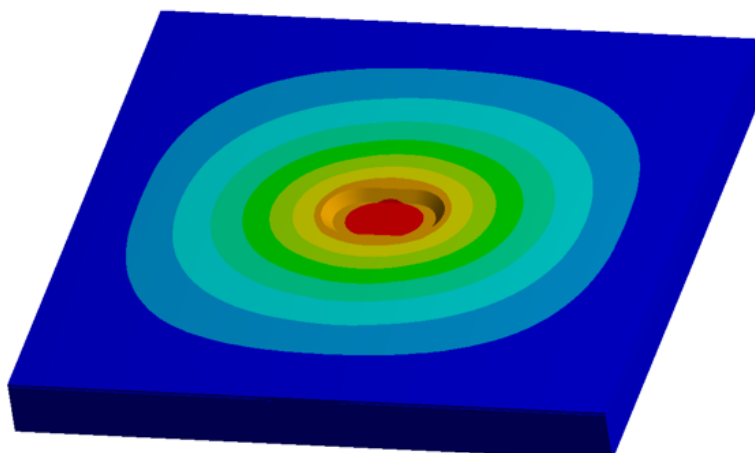
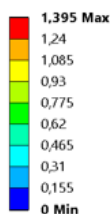
Obr. 28 Zapuštěný insert do kompozitní struktury

Chování lokální výztuhy bylo nasimulováno v prostředí *Ansys Workbench* a především v kompozitním modulu ACP (více o ACP v kapitole 4.6). Srovnány byly dva panely o rozměrech 300×300 mm a se skladbou FBS (viz *tab. 7*), kdy jeden byl rovný, zatímco druhý měl ono zapuštění. Zátěžná síla pro oba panely byla 5 000 N v místě uchycení držáku ramene. Deformace panelu se zapuštěním byla o 15 % nižší než u rovného. Porovnání obou simulací je na *obr. 29*.

D: sestava sendvic  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1



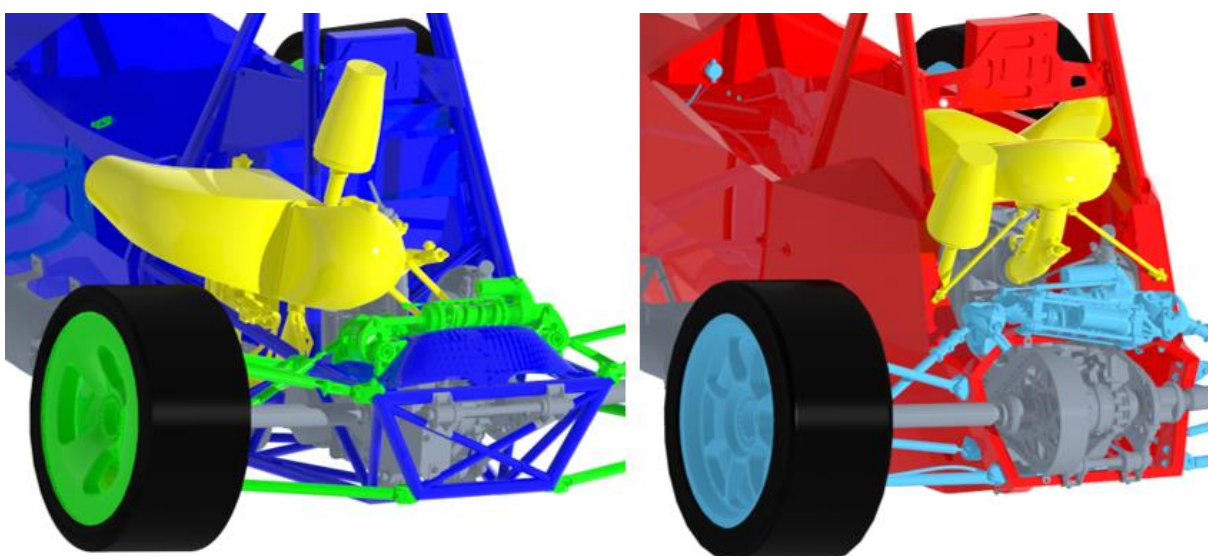
Q: zapusteni  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1



Obr. 29 Porovnání deformace rovného panelu (nahore) a panelu se zapuštěním (dole)

#### 4.4.3 ZÁSTAVBA POHONNÉ JEDNOTKY

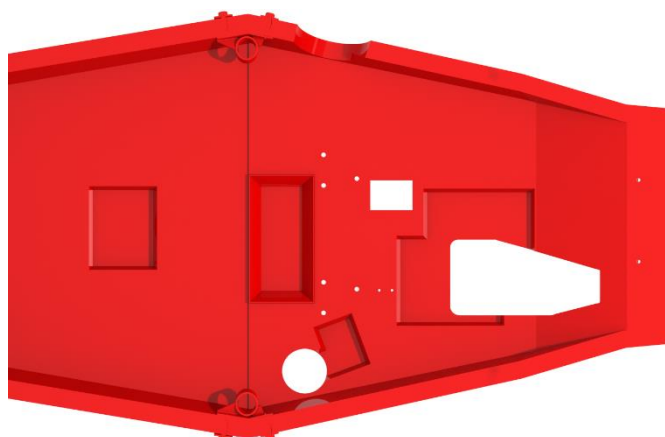
Komplikace v podobě teplotní degradace kompozitu v motorovém prostoru byla již vyřešena v kapitole 4.2.1, proto se tato kapitola bude zabývat jen zástavbou pohonné jednotky. Zástavba se ukázala jako poměrně složitý úkol, jelikož na předchozích modelech byla pohonná jednotka uložena v prostorovém rámu a pro použití s kompozitním monokokem nebyla uzpůsobena. Náfuk na mezichladič se na D9 nacházel na levé straně na úrovni řídicích ramen, což je v případě monokoku kvůli kompozitnímu MHBS neproveditelné a byl tak přesunut přímo za krk řidiče. To mělo za následek kompletní změnu konstrukce sání motoru viditelnou na *obr. 30*. V reakci na přeskupení sacího traktu vznikl v monokoku velký otvor za zády řidiče, kterým prochází mezichladič, sací plénium a koleno sání se vstříkovači. Tento otvor ve struktuře narušuje skořepinu a významně snižuje torzní tuhost, nicméně zde nebylo jiného řešení, aby zůstala zadní část kompaktní.



*Obr. 30 Změna konstrukce sání (žlutě) na Dragonu X (vpravo) oproti Dragonu 9*

V prostorovém rámu D9 byly určité komponenty pohonu umístěny tak, aby se nenacházely v místě trubek, ale mezi nimi, čímž mohly být položeny níže kvůli výšce těžiště. Pod těmito součástmi bylo navrženo odebrání jádra sendviče, čímž by jejich poloha mohla být zachována, ale za cenu lokálního oslabení struktury. Zredukovaný panel se nachází pod motorem, nádrží, výfukovým plénem a turbodmychadlem. U posledních dvou jmenovaných je vzdálenost mezi díly a monokokem větší než u ostatních, aby při vibracích soustavy nedošlo ke styku kompozitu s rozžhaveným kovem, a tím ke vzplanutí.





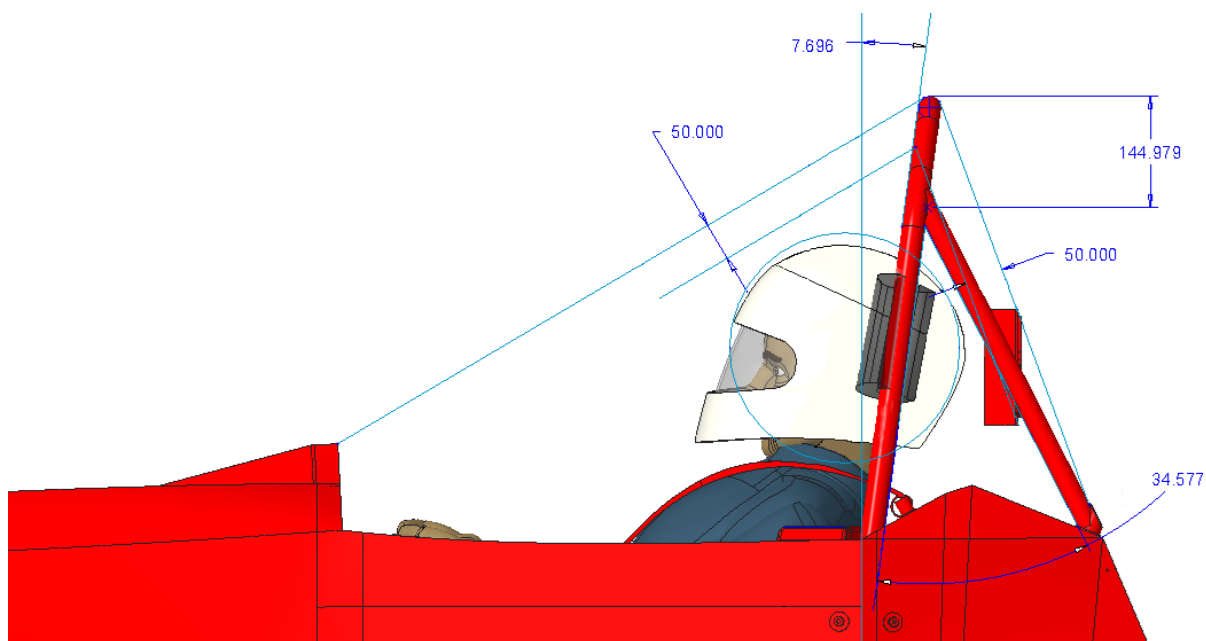
Obr. 31 Snížení panelu a otvory pro servis

Samotný motor je vkládán skrz kokpit a k chassis je upevněn na čtyřech místech. Vepředu je přichycen pomocí vyjmutelné konstrukce k hlavnímu oblouku a podlaze, zatímco vzadu je držáky diferenciálu upevněn nahoře a dole k monokoku. Pro umožnění servisu byly navrženy malé otvory ve struktuře, aby bylo možné prostrčit nástroj skrz panel a manipulovat tak se šrouby spojující jednotlivé komponenty. Některé z nich lze vidět na *obr. 27* a *obr. 31*. Pro těžce dostupné spoje bylo nezbytné navrhnout a vyrobít jednorúčelové nástroje.

#### 4.4.4 HLAVNÍ, PŘEDNÍ A ZADNÍ OBLOUKY

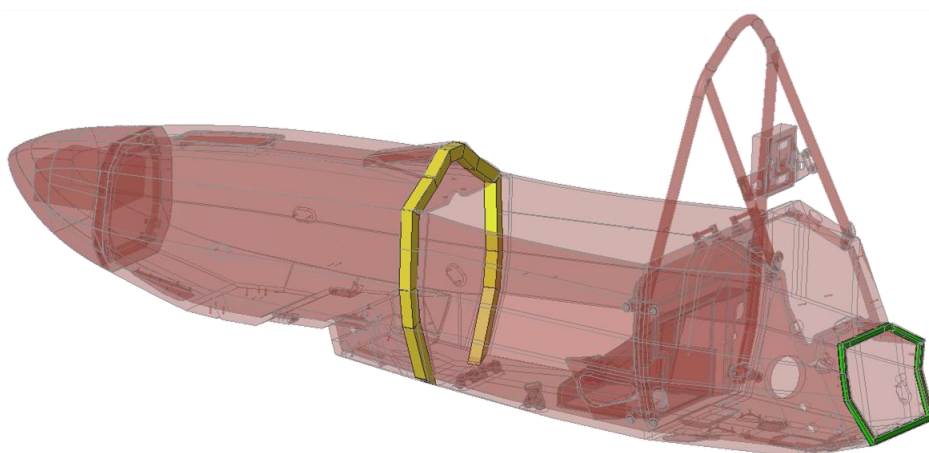
Hlavní oblouk tvoří ohýbaná trubka z CrMo oceli o průměru 30 mm a tloušťce stěny 2 mm. Oproti Dragonu 9 musel být v horní části rozšířen kvůli výše zmíněnému přeskupení sání motoru. K monokoku je uchycen pomocí vzpěr hlavního oblouku a také dvěma držáky na každé straně, které mohly být odlehčené, jelikož již nenesou váhu celé zadní části formule, jako tomu bylo u hybridního chassis. Dodržení vzdáleností a úhlů daných pravidly z kapitoly 1.1.3 ilustruje *obr. 32*.

Společně s hlavním obloukem tvoří ochranu proti překlopení přední oblouk, který byl navržen jako svařenec čtvercových profilů z hliníkové slitiny EN AW 6082 T6 o délce hrany 30 mm a tloušťkou stěny 3 mm. Svařováním dojde ke zhoršení mechanických vlastností v místě svaru, ale náležitou tepelnou úpravou je možné původní vlastnosti navrátit. Tepelné zpracování se skládá z rozpouštěcího žíhání a následného umělého stárnutí. Přední oblouk musí přesně kopírovat tvar monokoku, proto jsou jednotlivé kusy svařence vůči sobě mírně pootočené. Aby bylo dodrženo pravidlo o vzdálenosti mezi spojnicí bezpečnostních oblouků a helmou řidiče, musel být oblouk před řidičem vyvýšen, čímž vznikla tzv. kaplička.



Obr. 32 Kontrola pravidel spojených s bezpečnostními oblouky

Novinkou je zadní oblouk, který není dán pravidly, a opět jde o svařenec ze stejného materiálu, ale čtvercový profil má délku hrany 15 mm a tloušťku stěny 1,5 mm. Umístěn je na úplném konci monokoku a slouží ke zpevnění oblasti, ve které jsou připojeny zadní body zavěšení, držáky vahadel tlumičů a držáky diferenciálu. Otevřené konce kompozitní struktury se běžně vyztužují vytvořením lemu ve tvaru L, jako je např. přední přepážka, ale zde takovéto řešení nedovolovaly rozměry zadní části, jelikož by docházelo ke kolizi s řetězem sekundárního převodu.



Obr. 33 Umístění předního a zadního oblouku ve struktuře chassis Dragona X

#### 4.5 SKLADBA A JEJÍ TESTOVÁNÍ

Potahy sendvičových panelů monokoku byly navrženy z prepregové uhlíkové tkaniny s keprovou vazbou. Vlákna tkaniny nesou označení T300 a jde o uhlíková vlákna se standardním modulem od firmy Toray. Tkanina byla impregnována v plzeňské firmě Meem

epoxidovou pryskyřici ER 38. Původně bylo plánováno použití i UD tkaniny, ale kvůli finanční situaci a dlouhého času dodání od toho bylo upuštěno.

Tab. 5 Mechanické vlastnosti použitého prepregu [21, 26]

	$E_1$ [GPa]	$E_2$ [GPa]	$R_m$ [MPa]	$T_g$ [°C]	$\rho$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	$h$ [mm]	označení ve skladbě
T300	140	140	1 820	130	1,76	0,25	T

Jako jádro sendviče byly vybrány hliníkové voštiny výrobce Plascore® s označením PAMG-XR1 5056. Zkratka XR1 v názvu udává, že jde o pochromovanou voštinu, která má vysokou odolnost vůči korozi. Tyto hliníkové voštiny byly použity v tloušťkách 10, 15, 20 a 25 mm. Nomexová voština pro dvojité sendvič v motorovém prostoru nese označení PN1 a byla použita v tloušťce 3 mm.

Tab. 6 Mechanické vlastnosti použitých voštin [27, 28]

	velikost buňky [mm]	pevnost v tlaku [MPa]	pevnost ve smyku L [MPa]	pevnost ve smyku W [MPa]	$\rho$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	$h$ [mm]	označení ve skladbě
PAMG-XR1	3,2	2,41	1,95	1,01	50	10	AL10
PAMG-XR1	3,2	2,41	1,95	1,01	50	15	AL15
PAMG-XR1	3,2	2,41	1,95	1,01	50	20	AL20
PAMG-XR1	3,2	2,41	1,95	1,01	50	25	AL25
PN1	3,2	3,38	1,65	0,88	64	3	AR3

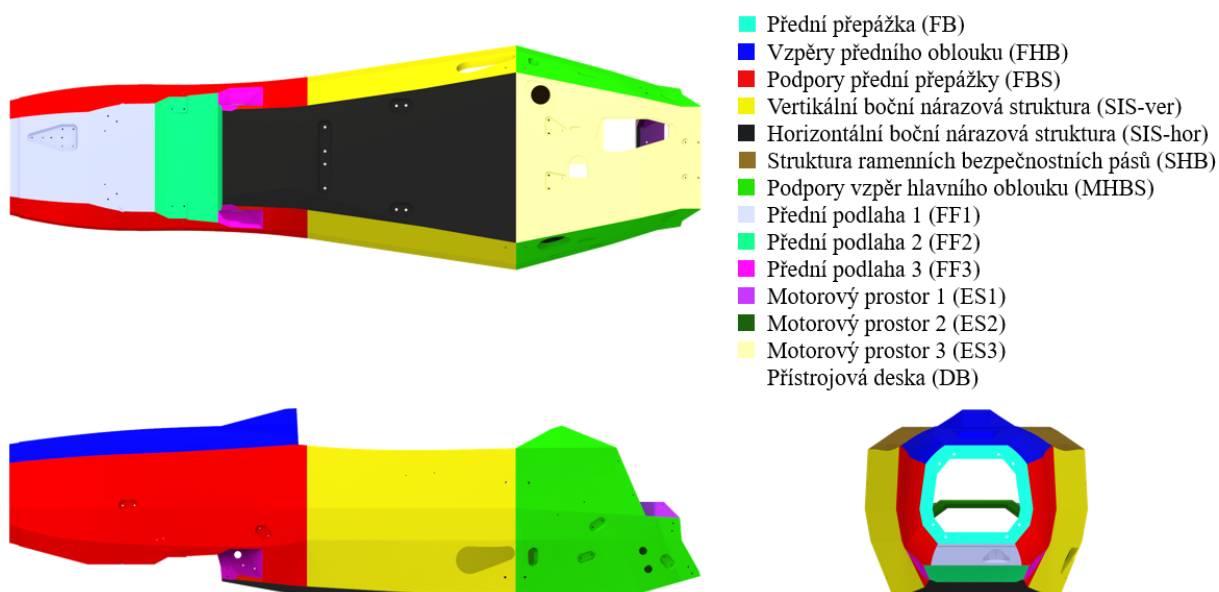
Návrh skladby kompozitních panelů byl proveden pomocí tabulky Microsoft Excel, kterou v minulosti připravil Tomáš Žídek [29], který se zasloužil o rozšíření sendvičových struktur v brněnském týmu. Dokument umožňuje rychlý analytický výpočet vlastností panelů pomocí klasické teorie laminátů. Skladba byla navíc optimalizována na základě zkušeností z předchozích let a poznatků z kapitoly 3.4.3. Její finální podoba je v následujících tabulkách:

Tab. 7 Skladba panelů primární struktury

Panel	Skladba
FHB, FBS	T [0] <sub>3</sub> , T [45] <sub>5</sub> , AL25, T [45] <sub>4</sub> , T [0] <sub>2</sub>
FB	T [0] <sub>5</sub> , T [45] <sub>5</sub> , AL25, T [45] <sub>5</sub> , T [0] <sub>5</sub>
SIS-ver, SHB, MHBS	T [0] <sub>2</sub> , T [45] <sub>5</sub> , AL20, T [45] <sub>4</sub> , T [0] <sub>2</sub>
SIS-hor	T [0] <sub>3</sub> , T [45] <sub>5</sub> , AL10, T [45] <sub>4</sub> , T [0] <sub>2</sub>

Tab. 8 Skladba panelů pravidly nspecifikovaných struktur

Panel	Skladba
FF1	T [0] <sub>2</sub> , T [45] <sub>4</sub> , AL15, T [45] <sub>4</sub> , T [0] <sub>2</sub>
FF2, FF3	T [0] <sub>2</sub> , T [45] <sub>4</sub> , AL10, T [45] <sub>4</sub> , T [0] <sub>2</sub>
ES1	T [0] <sub>3</sub> , T [45] <sub>5</sub> , AL15, T [45] <sub>4</sub> , T [0] <sub>2</sub>
ES2	T [0] <sub>3</sub> , T [45] <sub>5</sub> , AL10, T [45] <sub>4</sub> , T [0] <sub>2</sub>
ES3	T [0] <sub>2</sub> , T [45] <sub>4</sub> , AL10, T [45] <sub>2</sub> , T [0] <sub>3</sub> , AR3, T [45] <sub>1</sub> , T [0] <sub>2</sub>
DB	T [0] <sub>3</sub> , T [45] <sub>5</sub> , AL10, T [45] <sub>4</sub> , T [0] <sub>2</sub>

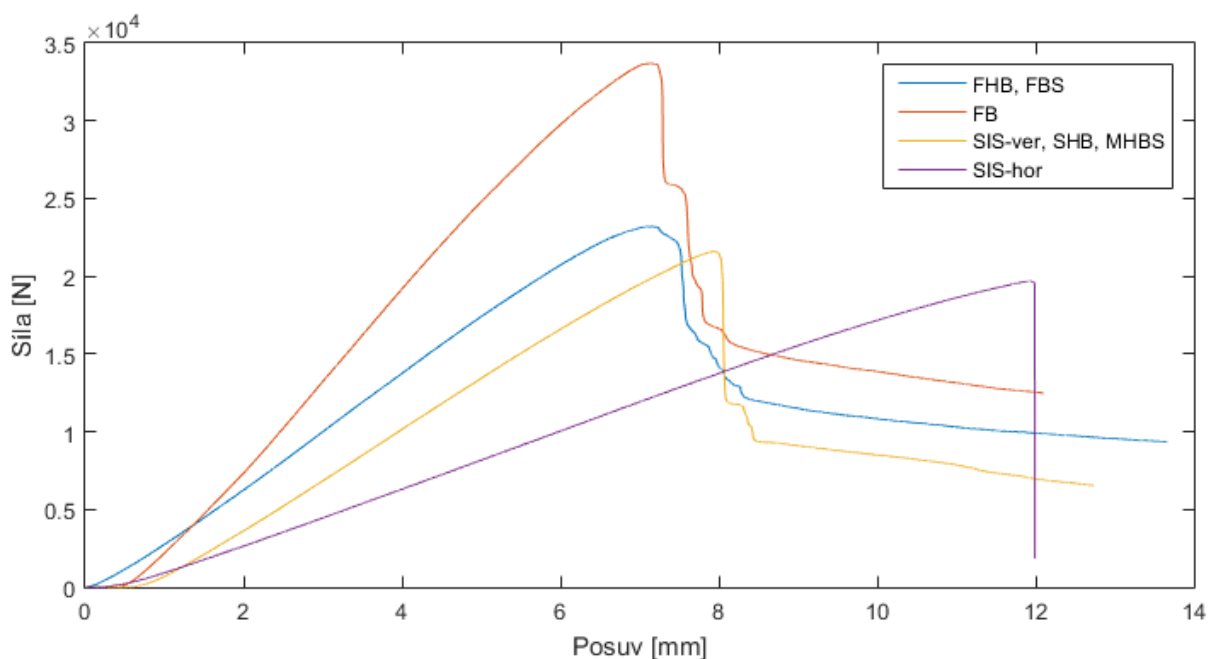


Obr. 34 Kompozitní panely monokoku Dragona X

#### 4.5.1 TESTOVÁNÍ VZORKŮ

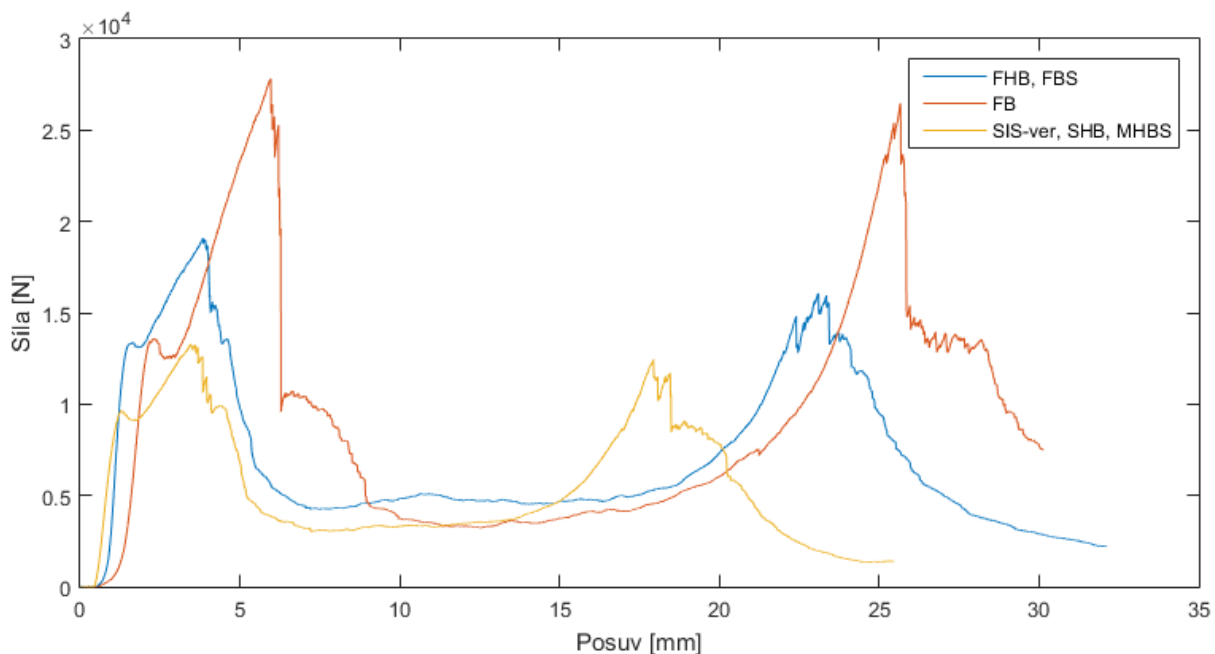
Všechny panely primární struktury (*tab. 7*) musí být podrobeny zkouškám, aby byla dokázána jejich ekvivalence s ocelovými trubkami. Na vzorcích je ověřována ohybová tuhost a stříhová pevnost. Rozměry zkušebních vzorků i testovacích zařízení jsou popsány v 1.1.2. Testy byly provedeny na zkušebním stroji LabTest 6.500, jenž umožňuje vyvinout zatížení až 500 kN [30] a nachází se v prostorách Leteckého ústavu na FSI VUT v Brně.

Prvním testem byla zkouška trojbodovým ohybem, při které je vzorek zatížen silou mezi dvěma podporami. Vyvolaný ohybový moment způsobuje v sendvičovém panelu tlakové napětí v horním potahu a tahové v dolním, zatímco jádro přenáší smykové zatížení. Cílem této zkoušky je zjistit hodnoty modulu pružnosti panelu a meze pevnosti potahů, které je možné vypočítat na základě směrnice lineární oblasti tahového diagramu a maximální síly, při níž dojde k porušení vzorku. Tyto výpočty jsou přednastaveny v dokumentu SES, v němž je také provedeno porovnání s ocelovými trubkami. Směrnice lineární oblasti naměřených dat sendvičového panelu je v SESu korigována na základě naměřených dat pro ocelové trubky pomocí tzv. *Rig Compliance*, což je korekce zkušebního zařízení na základě porovnání teoretické a testované tuhosti ocelových trubek. Závislost zátěžné síly na posuvu během trojbodového ohybu je na *obr. 35*.



Obr. 35 Graf naměřených dat ze zkoušky trojbodovým ohybem

Druhým podstoupeným testem byla zkouška stříhem, při níž je skrz panel protlačován razník kruhového průřezu. Tato zkouška slouží ke zjištění pevnosti ve stříhu obou potahů, z níž je následně v SESu počítána únosnost potahu proti vytržení insertů. Tato zkouška je nezbytná jen u sendvičových panelů FB, FBS, SIS-ver a MHBS. Průběhy zatížení na posuvu během zkoušky stříhem jsou na obr. 36.



Obr. 36 Graf naměřených dat ze zkoušky stříhem

V tab. 9 jsou uvedeny výsledky z výše popsaných zkoušek. V případě trojbodového ohybu došlo kromě SIS-hor vždy k selhání voštiny před potahem, což znamená, že není využit plný

potenciál konkrétní skladby. To je možné vidět i z maximálních sil, které se kromě FB výrazně nemění právě od panelu SIS-hor. Pokud by nedošlo k selhání voštiny, tak by maximální síly byly vyšší. Toto by mohlo být v budoucnu zlepšeno pomocí použití voštiny s vyšší pevností v tlaku nebo další optimalizací skladby, která je v tomto případě lehce předdimenzována. Pevnost ve střihu dosáhla pro panely FB, FBS a FHB materiálových limitů daného prepregu, jelikož i přesto, že je na vnitřním potahu panelu FB o 3 vrstvy tkaniny více, tak je mez pevnosti téměř stejná a již nerostla.

Tab. 9 Výsledky zkoušek trojbodovým ohybem a střihem pro panely primární struktury

Panel	Maximální síla při ohybu [N]	Modul pružnosti [GPa]	Mez pevnosti [MPa]	Mez pevnosti ve střihu [MPa]
FHB, FBS	23 196	61,8	192	136,3
FB	33 701	167,8	194	134,7
SIS-ver, SHB, MHBS	21 588	64,2	240	105,5
SIS-hor	19 698	100,0	397	–

Kromě testování vlastností samotných panelů je v SESu také dokazována únosnost uchycení bezpečnostních pásů. Zkušebním strojem je vyvíjen tah na uchycení pásů, které jsou v přípravku upevněny pod předpokládaným úhlem, pod kterým bude docházet k zatížení na vozidle. Limitní hodnoty požadované pravidly jsou 13 000 N pro břišní a ramenní pásy a 6 500 N pro pásy v rozkroku. Maximální síla při zkoušce byla pro ramenní pásy 16 153 N, pro břišní pásy 15 634 N a pro pásy v rozkroku 11 100 N. Ani v jednom případě nedošlo k porušení panelů nebo držáků, ale zkoušky byly zastaveny, jelikož požadované hodnoty byly výrazně přesaženy.

## 4.6 MKP ANALÝZA TORZNÍ TUHOSTI RÁMU

Navržený tvar monokoku i jeho skladbu bylo potřeba ověřit, zda bylo dosaženo požadované torzní tuhosti chasis. K tomu posloužil software *Ansys Workbench* včetně jeho modulu určeného pro zkoumání laminátů – *Ansys Composite PrepPost* (ACP). V preprocesoru tohoto modulu je možné skořepině přiřadit skladbu i se směry vláken. Postprocesor pak slouží k vyhodnocení bezpečnosti a kritických míst kompozitu na základě kritérií základní laminátové teorie.

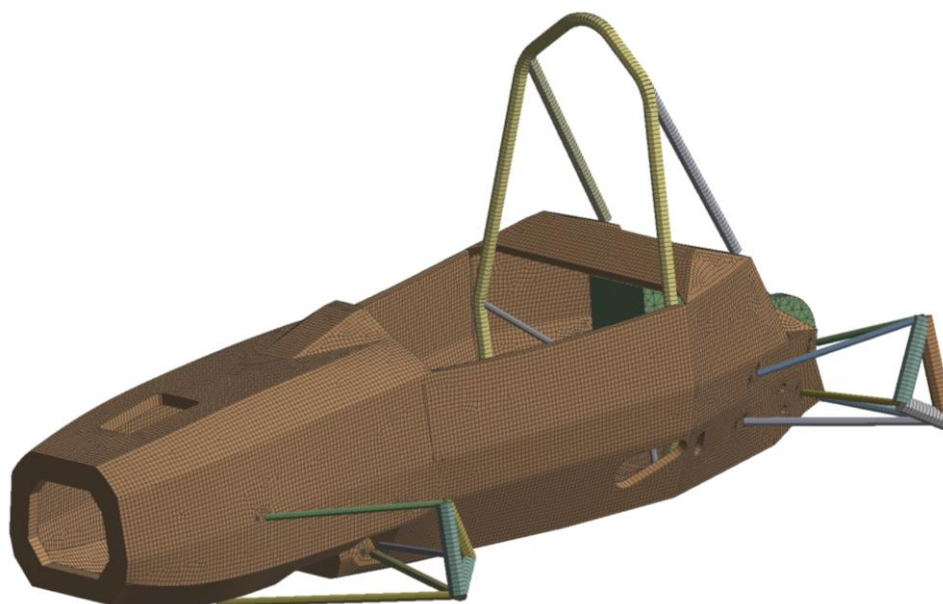
### 4.6.1 TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Přednastavené kompozitní materiály se vlastnostmi neshodovaly s námi použitými, proto bylo nezbytné si nadefinovat vlastní. Mechanické vlastnosti uhlíkových tkanin i voštin byly do bloku *Engineering data* definovány podle informací z předchozí kapitoly 4.5.

Torzní tuhost neovlivňuje pouze chasis, ale i další komponenty jako jsou např. ramena náprav nebo motor, které je potřeba do simulace zahrnout, aby bylo dosaženo co možná nejrealističtějších výsledků. Modul ACP vyžaduje, aby byl model naimportován jako skořepina, proto byl monokok zadán jako plošný model, který byl částečně zjednodušen již v softwaru *Creo Parametric*. K dalšímu zjednodušení geometrie monokoku posloužil implementovaný CAD modelář *Spaceclaim*. Ramena náprav a bezpečnostní oblouky byly importovány jako křivky, kterým byly v *Design Modeleru* přiřazeny průřezy. Zjednodušený model motoru

s držáky diferenciálu pak byl vložen jako objemové těleso. Materiálové vlastnosti komponent kromě monokoku byly vybrány z knihovny materiálů Ansysu. Sestava hlavního oblouku byla z konstrukční oceli (*Structural Steel*), hliníková slitina (*Aluminum Alloy*) byla přiřazena sestavě motoru, předního oblouku a těhlicím a uhlíkový jednosměrný prepreg (*Epoxy Carbon UD Prepreg*) ramenům. Uhlíkové trubky, z nichž jsou ramena vyrobena, jsou koupeny, a tudíž nám není známa přesná skladba, proto je použití jednosměrného prepregu značné zjednodušení a vnáší do simulace chybu.

Síť monokoku byla vytvořena pomocí 10 mm lineárních čtvercových elementů (*PLANE182*), zatímco model motoru byl vysítován kvadratickými čtyřstěny (*SOLID187*) o velikosti 15 mm. Na bezpečnostních obloucích byla definována síť z 10 mm prutových prvků (*BEAM188*) stejně jako u profilů ramen, kde ale byla velikost prvku dána tak, aby byl pouze jeden prvek na jednom profilu. Síť sestavy je na obr. 37 níže. Nutností pro správné nastavení kompozitů v modulu ACP je použití funkce *Named Selection*, díky které je možné definovat v preprocesoru skupiny ploch, na kterých má být stejná skladba.



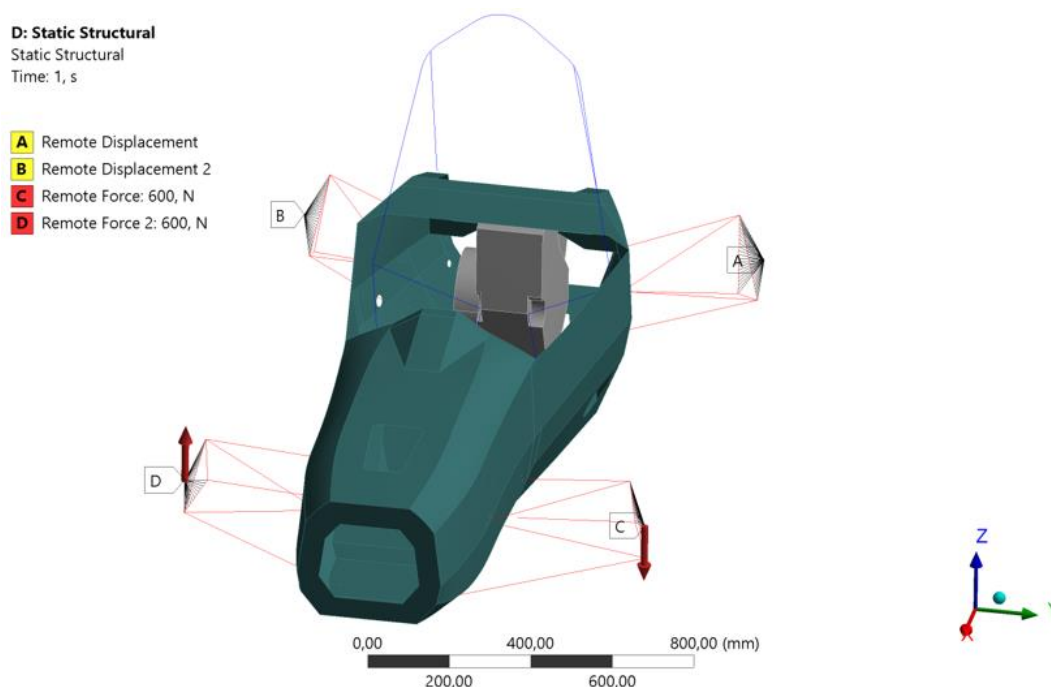
Obr. 37 Síť sestavy pro simulaci torzní tuhosti (síť monokoku již po zpracování v ACP)

V preprocesoru je možné pomocí materiálů z *Engineering Data* vytvořit modely tkanin a voštin a přiřadit jim odpovídající tloušťku. Směr vláken tkanin se v ACP odvíjí od souřadného systému (tzv. *Rosette*), který může být globální, nebo může být přiřazen každé *Named Selection* zvlášť. Vrstvy tkanin pak mohou být pokládány jednotlivě nebo sdruženě pomocí tzv. *Stackups*, což ulehčuje práci v případě, že je jednotná skladba na více panelech, což je i tento případ, nebo se v jednom laminátu opakuje vícekrát. Takto vytvořený model je následně možné exportovat do *Static structural* buď jako skořepinu, nebo objemový model. Největší rozdíl mezi těmito variantami je ve velikosti sítě, jelikož při exportu objemového modelu je z počáteční plošné sítě vytvořen objemový prvek zvlášť pro každou vrstvu tkaniny či jádra s vlastnostmi dané vrstvy (např. pro skladbu FB je z jednoho plošného prvku vytvořeno 21 objemových prvků, protože je na tomto panelu celkem 20 vrstev tkaniny a 1 jádro), zatímco pro skořepinu je z jednoho plošného elementu vytvořen jeden objemový, který má materiálové vlastnosti celého panelu. V případě monokoku by síť objemového

modelu obsahovala téměř 13krát více uzlů než u skořepiny, proto byla použita právě skořepina.

#### 4.6.2 SIMULACE TORZNÍ TUHOSTI

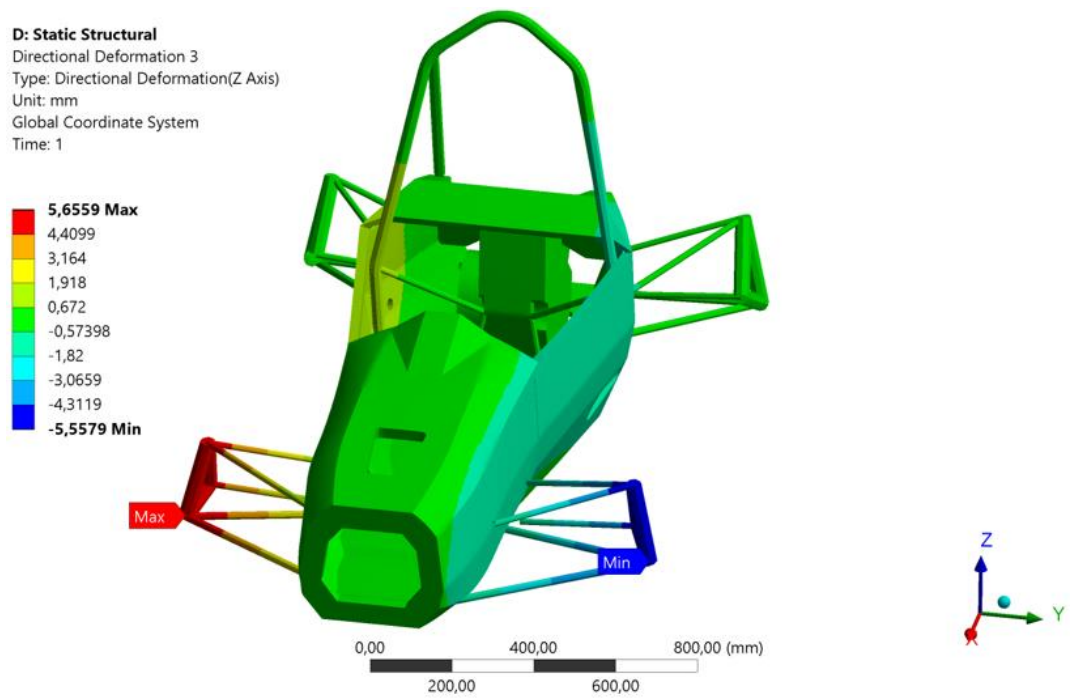
Ve *Static structural* byly jednotlivé komponenty spojeny vazbami *Bonded* nebo *Spot Weld*. Vazby *Bonded* mezi profily ramen a monokokem měly navíc definován *Pinball Region*, který zvětšuje oblast pro definici vazby, jelikož na sebe díly přímo nedoléhaly kvůli zanedbání držáků ramen a zjednodušení geometrie monokoku. Okrajové podmínky pro simulaci torzní tuhosti byly stejné jako ty, podle kterých bylo provedeno fyzické testování (viz 6.2), aby bylo možné výsledky vůči sobě porovnat, tzn. zadní nápravě byl zamezen jakýkoliv pohyb a na přední byl aplikován zkrutný moment pomocí silového zatížení 600 N. Silová dvojice měla působiště na těhlicích, což je jinde než při reálném testování, ale zkrutný moment byl ekvivalentní. Vizualizace okrajových podmínek pro zatížení je na *obr. 38*.



*Obr. 38 Okrajové podmínky simulace torzní tuhosti DX*

Výsledkem simulace bylo zjištění deformace v ose Z, která je viditelná na *obr. 39*. Z deformací byla za pomoci rovnic 1, 2 a 3 vypočítána hodnota torzní tuhosti chassis 2 501 Nm/°. Torzní tuhost celého monopostu pak byla 1 423 Nm/°. Výsledná tuhost vyrobeného monokoku byla samozřejmě očekávána nižší, ať už kvůli výrobním nepřesnostem či nepřesnému nastavení materiálu ramen v simulaci, nicméně tyto hodnoty byly uspokojivé a bylo možné přistoupit k výrobě.



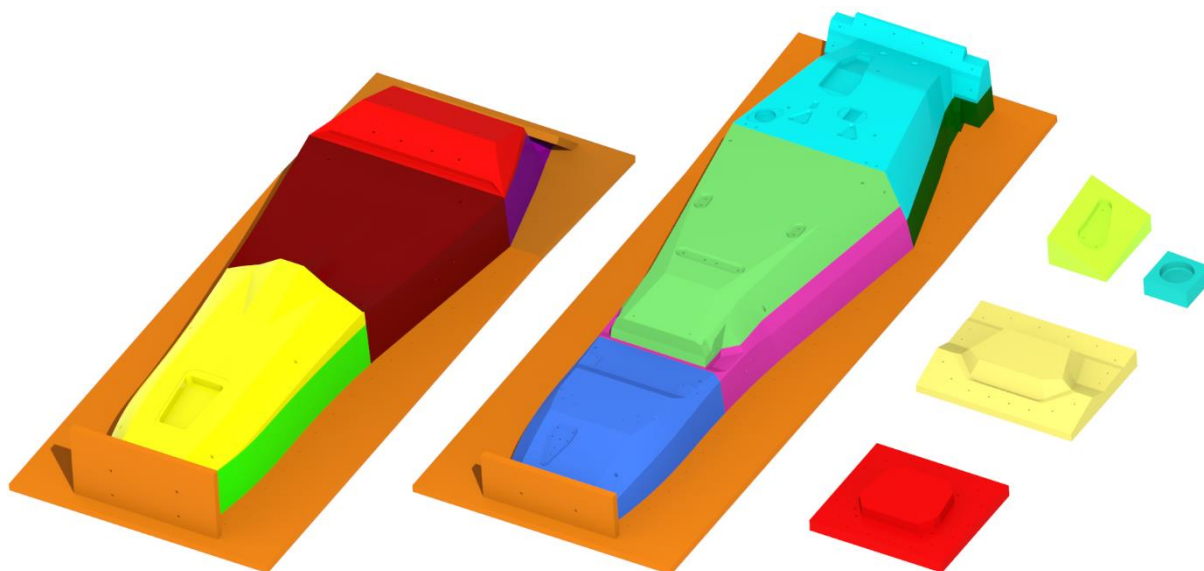


Obr. 39 Deformace v ose Z při simulaci torzní tuhosti DX

## 5 VÝROBA RÁMU

### 5.1 NÁVRH A PŘÍPRAVA POZITIVNÍCH FOREM

Prvním krokem výrobní fáze byl návrh pozitivních forem, z nichž se později vyrobily negativní určené pro laminaci monokoku. Laminace je metoda výroby, při které výrobek přesně kopíruje tvar formy, a po vyrobení se běžně nikterak neobrábí, proto je potřeba dbát už při návrhu výrobku na technologické aspekty výroby. Umožnění odformování výrobku zajišťují úkosy, kdy doporučený minimální úhel úkosů je  $3^\circ$ . Především však nesmí při návrhu vzniknout místo, jež by mělo záporný sklon. Dalším důležitým faktorem, který musí být brán v potaz je dělicí rovina forem. Po zkušenostech z předchozí sezóny bylo rozhodnuto, že se monokok bude vyrábět v jednom kuse a hlavní dělicí rovina forem bude horizontální. Kvůli zadnímu panelu pro uchycení odpružení, který se nachází pod úrovní dělicí roviny přední části, bylo potřeba udělat změnu v dělení forem. Vznikla tak lomená dělicí rovina, jejíž přední část po hlavní oblouk je vodorovná, zatímco zadní část je skloněná dolů pod úhlem  $3,4^\circ$ .



Obr. 40 Modely pozitivních forem s barevně odlišenými bloky pro obrábění

Jelikož se jedná o skořepinu, tak není vhodnou metodou pro tvorbu modelu forem odebrání materiálu z bloku Booleovými logickými operacemi. Namísto toho byl plošný model upraven dodatečnými plochami *Boundary Blend* tak, aby vznikl uzavřený útvar forem, který byl následně spojen funkcí *Merge* a zhmotněn pomocí *Solidify*. Pozitivní formy se skládají ze 2 velkých kusů – horní a dolní poloviny, 2 středně velkých sloužících jako příložky pro přední a zadní část a 2 malých pro jádra otvorů pro výfukové potrubí a externí ventilátor. K velkým formám bylo navíc připojeno celkem 7 MDF desek, které sloužily k vytvoření lemu pro spojení vylaminovaných negativních forem. Vše je viditelné na obr. 40.

Každá velká forma byla navíc rozdělena na 5 menších částí, aby bylo umožněno obrobení na pětiosém CNC obráběcím centru. Menší části navíc znamenají jednodušší a rychlejší programování obrábění, a tedy nižší cenu. Polotovarem pro výrobu byly slepené bloky z umělého dřeva Sika M450, které byly v nefunkčních místech nahrazeny polystyrenem kvůli odlehčení. Obrábění forem a MDF desek proběhlo ve firmě PP Model hobby.



*Obr. 41 Lepení pozitivních forem*

Obrobené kusy forem byly vůči sobě polohovány pomocí kolíků a přilepeny. Polotovár během skladování navlhnul, což se bohužel projevilo po slepení, kdy po vyschnutí obrobku došlo na přední části spodní formy ke zkroucení síkabloku. V místě přední přepážky vznikla zhruba 7 mm mezera, která musela být zatmelena. Tmelem byly dále opraveny přechody mezi slepenými kusy, díry po polohovacích kolíčích a všechny vady povrchu, které by se jinak přenesly na negativní formy.

Před laminací je potřeba řádně připravit povrch, aby byla kvalita povrchu výrobku co nejlepší. Umělé dřevo je velmi pórovité, z tohoto důvodu se nejprve lehce přebrousí a natře plničem pórů zředěným acetonem. Broušení a nátěr plničem pórů se několikrát opakuje s klesající koncentrací acetonu. Po zaplnění póru následuje nástřik akrylátovým plničem, který se po zaschnutí opět přebrousí. Nástřik s broušením se znovu několikrát opakuje, dokud není kvalita povrchu formy uspokojivá. Dokonale hladkého povrchu je pak dosaženo lehkým přebroušením pod vodou a vyleštěním.



*Obr. 42 Pozitivní formy po nástřiku akrylátovým plničem*

Do všech děr, které bylo potřeba přenést na negativní formy, byly umístěny teflonové kolíky. Finálním krokem před započítím laminace bylo nanesení několika vrstev separátoru.

## 5.2 VÝROBA NEGATIVNÍCH FOREM

Geometrická přesnost výrobku je ovlivněna teplotní roztažností a odolností forem, proto je potřeba na to dbát při výrobě. Monokok je z uhlíkových vláken, z toho důvodu byl k výrobě forem použit stejný materiál, a tím byla zajištěna stejná teplotní roztažnost. Odolnost vůči vysokým teplotám je dána pryskyřicí použitou k sycení tkanin, proto byla použita epoxidová pryskyřice GRM LG 112, která má teplotní odolnost po teplotě až 150 °C [31]. Její nevýhodou je krátká doba zpracovatelnosti – pouze 2 hodiny, kvůli čemuž musela být výroba obou velkých forem rozdělena do dvou kroků. Použitou technologií byla ruční laminace s přidávným vakuováním.



Obr. 43 Nanesený gelcoat při laminaci horní negativní formy

Pro vytvoření tvrdého a hladkého povrchu posloužila povrchová pryskyřice Biresin S8, tzv. gelcoat. Před ztuhnutím bylo potřeba zamezit vzniku vzduchových bublin v gelcoatu, k čemuž posloužil ohřev horkovzdušnou pistolí. Když začala povrchová pryskyřice gelovatět, mohly se pokládat uhlíkové tkaniny, v prvním kroku to bylo 6 vrstev s gramáží 200 g/m<sup>2</sup>. Poté následovala vakuace a umístění do provizorní pece pro urychlení reakce tvrdnutí pryskyřice. Po 24 hodinách proběhl druhý krok laminace, ve kterém bylo prosyceno dalších 6 vrstev s gramáží 600 g/m<sup>2</sup>, následovaný stejným procesem.

Po vyjmutí laminovaných forem byly opraveny povrchové i skryté vady, především zbylé vzduchové kapsy, protože zahřátím vzduchu v autoklávu by mohlo dojít k defektu formy roztržením gelcoatu. Opravené formy se spojily šrouby a jejich spoje se přetmelily a přebrousily. V tomto stavu se nechaly temperovat v autoklávu, čímž bylo dosaženo požadované tepelné odolnosti, ale vzniklo několik defektů, které bylo potřeba znovu opravit. Simulací cyklu vytvrzování monokoku byla dodatečně zkontrolována kvalita poslední opravy. Tentokrát již žádné další vady nevznikly a formy tak byly připraveny na výrobu monokoku.



Obr. 44 Připravené negativní formy

### 5.3 VÝROBA OBLOUKŮ

Ohyb hlavního oblouku i pálení tvarovaných konců profilů proběhlo ve společnosti KOSTKA – kolobka. Aby byla zajištěna co možná nejvyšší geometrická přesnost, byly pro všechny tři oblouky navrženy svařovací přípravky z výpalků z ocelového plechu. Jejich účelem bylo správné ustavení dílců a minimalizace deformací při svařování. Po upevnění profilů do přípravku byly oblouky svařeny certifikovaným svářečem kvůli zajištění kvality svaru. U předního a zadního oblouku následovalo rozpouštěcí žihání a umělé stárnutí kvůli navrácení mechanických vlastností. K sestavě hlavního oblouku se vzpěrami byly svařeny všechny držáky a následně byla celá sestava ošetřena nástřikem černého komaxitu.



Obr. 45 Přední a zadní oblouk v přípravcích na svařování

### 5.4 VÝROBA INSERTŮ A PŘÍPRAVKŮ PRO VÝROBU MONOKOKU

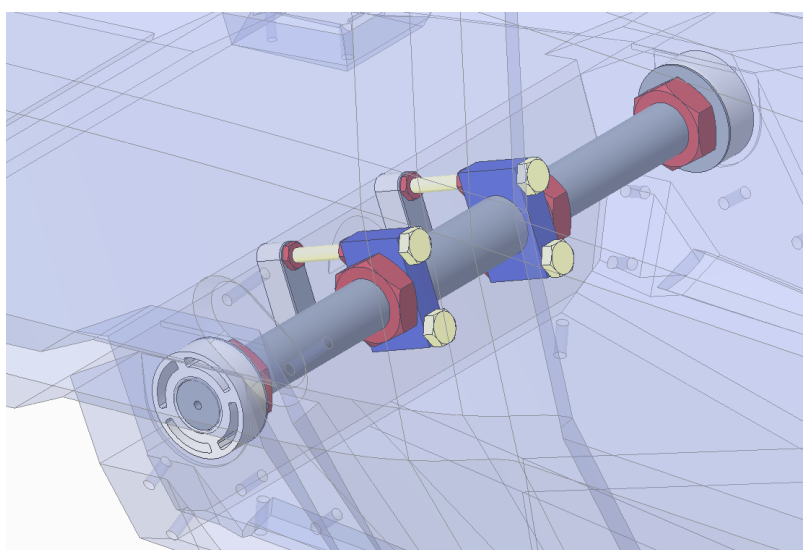
Před začátkem laminace monokoku bylo potřeba také vyrobit inserty a přípravky potřebné k výrobě. Návrh insertů se řídil rovnicí 7 tak, aby byla vždy bezpečnost proti vytržení alespoň 3. Polotovarem k výrobě insertů byly desky technického plastu ertalonu, z nichž byly vodním paprskem vyřezány. Inserty pod držáky motoru a diferenciálu musely mít proměnlivou tloušťku kvůli zapaštění hlav šroubů, proto byly ještě navíc obrobeny.



Obr. 46 Jádra pro zapuštění ramen a servisní otvory

Výroba zapuštění pro vyztužení zavěšení z 4.4.2 vyžadovala přípravu malých jader, které by se přišroubovaly k vnitřnímu povrchu negativní formy. Plocha pro držáky ramen je pro všechny stejná, což ulehčilo programování obrábění, ale dosedací plocha se liší podle tvaru monokoku v daném místě. Obrobeny byly z hliníku stejně jako jádra pro servisní díry. Ty sloužily k tomu, aby byl uhlíkový potah i uvnitř servisních děr a nevznikaly tak místa iniciující delaminaci. Obrobená jádra pro zapuštění i některé servisní otvory jsou na obr. 46.

Další přípravek bylo nezbytné navrhnout pro polohování insertů hřebene řízení. Jelikož bylo požadováno zajistit sousost krajních průchozích insertů a polohu neprůchozích insertů na středu monokoku, tak byl přípravek navrhnout jako hřídel s osazením a se závitem z obou stran. Na ten by se navlékly přírůbky pro polohování středových insertů a dotáhly se maticemi stejně jako nasazené inserty na okraji hřídele. Umístění krajních insertů na hřídeli znemožnilo její nedestruktivní vytažení, proto se počítalo s jejím vyříznutím po zalaminování insertů. Celá sestava přípravku je na obr. 47.

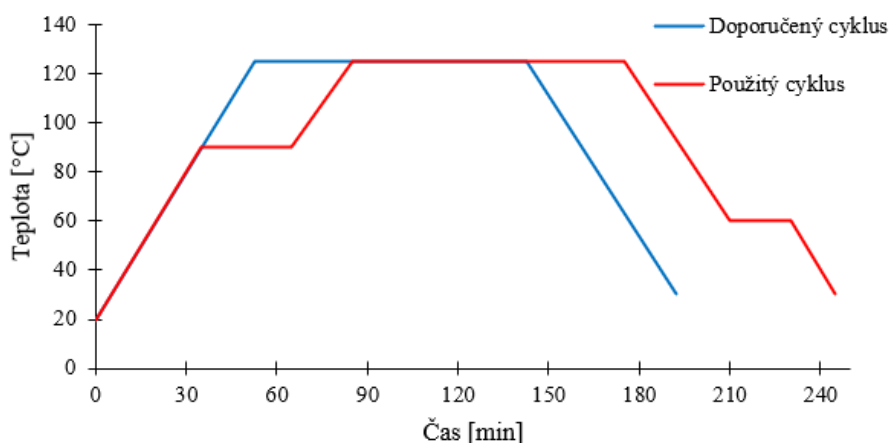


Obr. 47 Přípravek na polohování insertů hřebene řízení

## 5.5 VÝROBA MONOKOKU

Na základě tzv. plybooku, což je dokument obsahující informace o skladbě kompozitu a jejím konkrétním umístění na výrobku, byly vytvořeny šablony nástřihů potahu. Tyto nástřihy byly posléze z keprové tkaniny vyřezány na plotru, čímž byla zajištěna geometrická přesnost směru vláken  $0^\circ$  a  $45^\circ$ , ale především tento proces zkrátil čas přípravných prací a urychlil tak výrobu. Každý nástřih měl navíc 5 mm technologický přídavek, který sloužil k zajištění dostatečného překrytí jednotlivých tkanin.

Laminace monokoku byla rozdělena do tří fází. Během prvního kroku byly do naseparované formy položeny všechny vrstvy vnějšího potahu. Při pokládání pohledové keprové tkaniny byl brán ohled na směr diagonálního vzoru, aby vznikl na horní straně viditelný šípový motiv. Po uložení technologických vrstev materiálu (viz 3.3) byla celá forma zavakuována. Vytvrzovací proces proběhl v autoklávu olomoucké firmy Tomuli Carbon Composites podle upraveného cyklu (obr. 48) oproti doporučenému výrobcem. Upravený cyklus měl navíc půlhodinovou výdrž na  $90^\circ\text{C}$  při růstu teploty a dvacetiminutovou výdrž na  $60^\circ\text{C}$  při poklesu teploty, aby docházelo k rovnoměrnému ohřevu, resp. ochlazení, formy i výrobku, čímž bylo předcházeno povrchovým vadám kompozitu a vzniku nechtěných deformací. Přetlak v autoklávu byl 4 bary.



Obr. 48 Porovnání doporučeného vytvrzovacího cyklu a použitého při výrobě

Po vytažení z autoklávu byly odstraněny technologické vrstvy a pokračovalo se druhou fází, která sestávala z položení vrstvy fóliového lepidla, do něž byly vtačeny voštiny a překryty další vrstvou fóliového lepidla, ale tentokrát navíc s jednou vrstvou vnitřního potahu. Hrany voštin musely být zkoseny, aby na sebe navazovaly a doléhaly až do hran formy, ale jelikož se zkosení dělalo ručně, tak napojení nebylo vždy ideální, proto byly spoje opravovány pomocí odřezků voštiny, pěny Rohacell<sup>®</sup> nebo epoxidovým lepidlem. Vysoký tlak v autoklávu může způsobit zborcení voštiny v L či W směru, což hrozí především na otevřených hranách, na nichž může tlak působit přímo na stěny buněk voštiny. Příkladem je hrana otvoru v přední přepážce nebo spodní hrana přístrojové desky. V kritických místech byla proto voština přilepena vysokoteplotním epoxidovým lepidlem Loctite<sup>®</sup> 9492.

V tomto kroku byly navíc do monokoku vloženy oba hliníkové oblouky a byly přelaminovány tak, aby splňovaly požadavky pravidel. Uloženy byly také veškeré inserty, které byly buď nasazeny na kolíky ve formě, čímž byla dána jejich přesná poloha, nebo za pomoci dřívě

zmíněných přípravků pro polohování. Následovalo další vytvrzování v autoklávu, ale tentokrát s přetlakem pouze 2 bary, aby bylo minimalizováno riziko zborcení voštin.



*Obr. 49 Monokok DX po vytažení z forem*

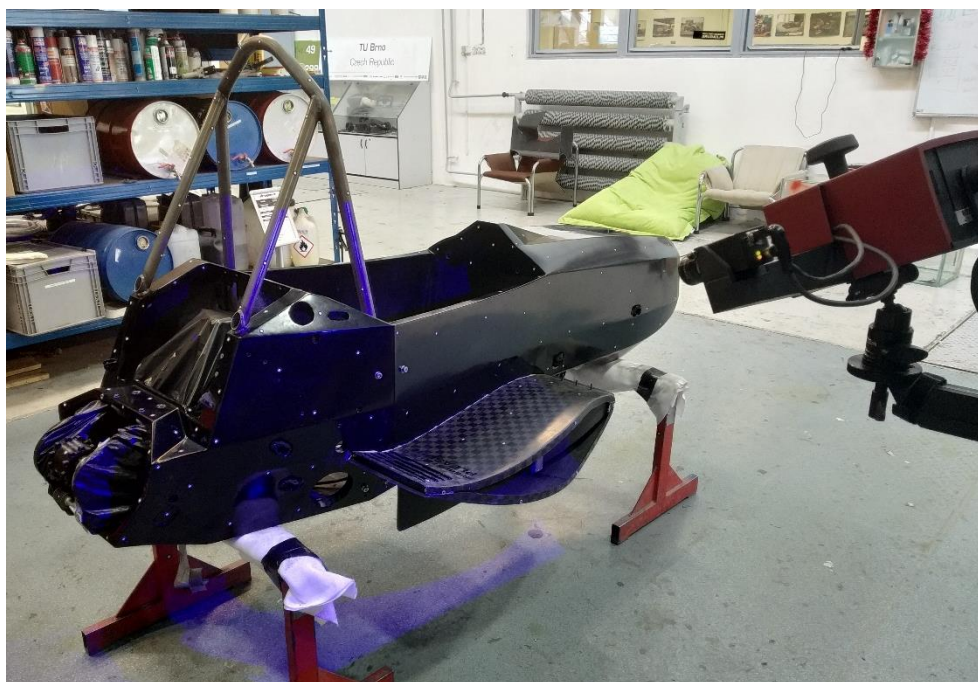
Posledním cyklem v autoklávu (opět za přetlaku 4 bary) byly vytvrzeny zbývající vrstvy vnitřního potahu. Po rozebrání forem a vytažení hotového monokoku, který je vyfocen na *obr. 49*, byly odřezány přebytečné hrany a vyřezána zahloubení v podlaze pro motor, plenum atp. (viz *obr. 31*). Po opravě drobných estetických vad byl povrch monokoku rozleštěn. Sestava hlavního oblouku byla do monokoku namontována před vylepením celého motorového prostoru stříbrnou termoreflexní fólií ZircoFlex<sup>®</sup>. Váha monokoku po opracování byla 29,5 kg.



## 6 VALIDACE RÁMU

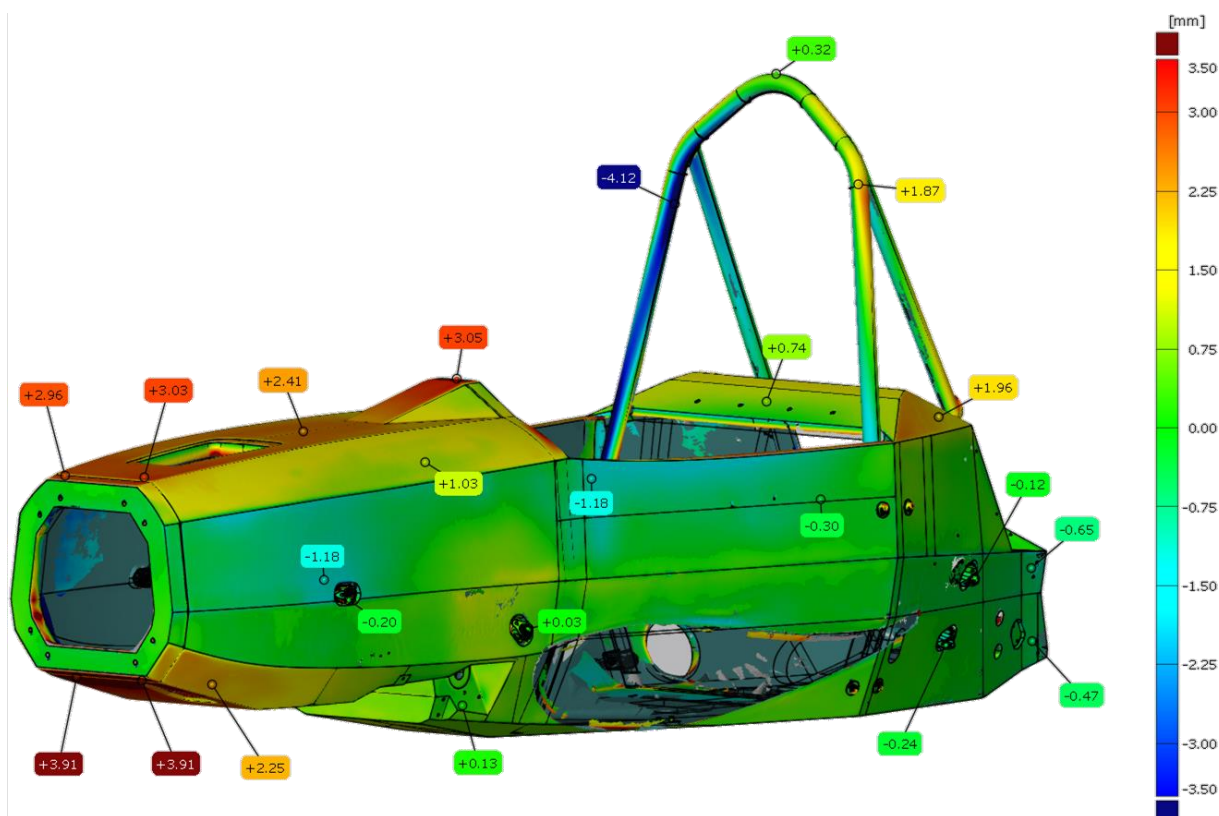
### 6.1 OPTICKÁ DIGITALIZACE

Monokok i jeho formy byly vyráběny a opracovávány ručně, proto bylo vhodné zjistit, s jakou přesností se nám jej podařilo vyrobit. Skenování povrchu bylo provedeno i s nainstalovanými držáky ramen náprav a sestavou hlavního oblouku, jelikož nás zajímaly i odchylky, které by mohly mít vliv na dynamiku vozu nebo splnění pravidel soutěže. K bočním nárazovým strukturám byly v té době již přilepeny boční podlahy, proto byly naskenovány taktéž, ale tato data byla následně z validace vyjmuta. K ověření přesnosti výroby posloužil 3D skener ATOS Compact Scan z Ústavu automobilního a dopravního inženýrství.



Obr. 50 3D skenování chassis *Dragona X*

Naměřená data byla vyhodnocena v softwaru *GOM Inspect*, v němž byla vykreslena mapa odchylek, kterou je možné vidět na obr. 51. Referenční plochou pro srovnání byla podlaha monokoku. Největší deviace celého chassis od CAD modelu je 4,12 mm na hlavním oblouku, který sice byl svařován v přípravku, ale jeho držáky byly polohovány přímo v monokoku, čímž vznikla tato deformace, která naštěstí nemá na nic vliv. Maximální odchylka samotného monokoku je 3,91 mm a podle předpokladu se nachází v přední části panelu FF1, což v součtu s odchylkou na FHB dává přibližně oněch 7 mm z kapitoly 5.1. Odchylky u držáků ramen byly ve všech případech pod 1 mm, což znamená, že nebylo potřeba nijak upravovat. Obecně se odchylky pohybovaly do 2,5 mm a jen výjimečně tuto hodnotu přesáhly. Při délce monokoku 2 153 mm vyráběného ručně je taková deviace od modelu poměrně obzvlášť.

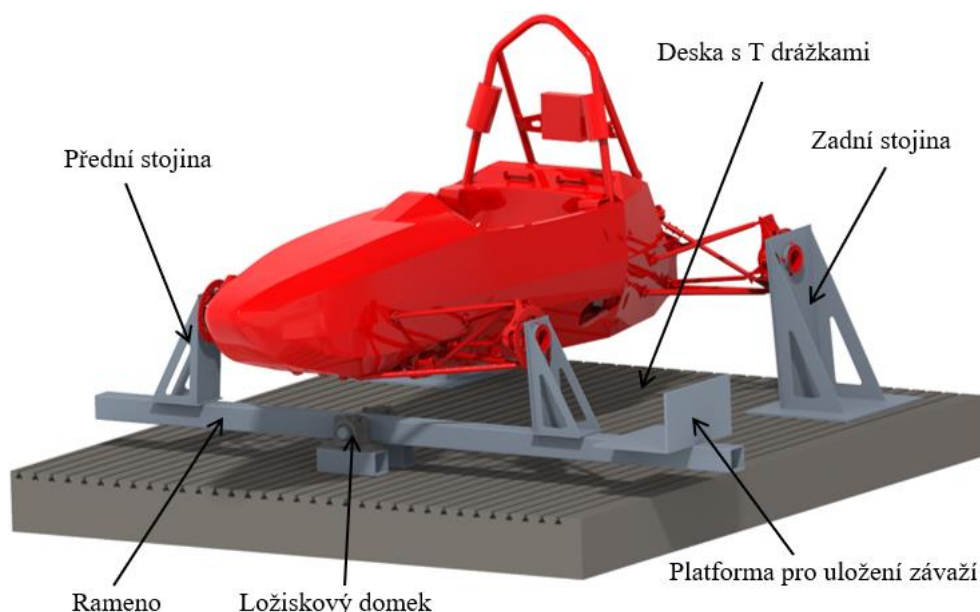


Obr. 51 Mapa odchylek z 3D skenování

## 6.2 MĚŘENÍ TORZNÍ TUHOSTI

Torzni tuhost Dragona X byla změřena na rámové houpačce, kterou navrhl Pavol Petro s Martinem Děrdou [20, 32] a následně zdokonalil Lukáš Gregor [33]. Ten ke zjištění výchylek použil měřicí systém ATOS Tritop, jenž umožňuje měřit statické deformace a zároveň zjistit výchylky na celém vozidle, což úchylkoměr, který byl dříve používán, neumožňoval.

Měřicí přípravek (na obr. 52) byl navržen tak, aby jej bylo možné připnout k desce s T drážkami na Leteckém ústavu. Zadní náprava je pomocí stojin připevněna rovnou k desce, zatímco přední je upevněna stojinami k ramenu, které je otočně uloženo v ložiskových domcích přichycených k desce s drážkami. Rameno je vůči ose otáčení nesymetrické, protože na jeho delší části je plocha pro uložení závaží, kterými je vyvoláván zkrutný moment. Nápravy jsou ke stojinám připojeny přímo náboji kol, ale dříve byly součástí přípravku i náhrady těhlic, aby nedošlo k poškození těhlic používaných v provozu. Díly přípravku sestávají z 5 a 8 mm hrubých plechů a profilů 80×80×5 z konstrukční oceli, aby byla konstrukce přípravku dostatečně tuhá a vnášela tak do měření co možná nejmenší chybu [20].



Obr. 52 Model rámové houpačky pro měření torzní tuhosti

### 6.2.1 POSTUP MĚŘENÍ

Cílem měření bylo zjistit torzní tuhost celé formule, nikoliv jen chassis, proto byla ve vozidle ponechána pohonná jednotka i všechny součásti podvozku kromě tlumičů. Ty byly vyměněny za tuhé hliníkové náhrady, aby nedocházelo k pohlcení zatížení odpružením. Odstraněny byly komponenty aero paketu, které tuhost neovlivňují, ale zato zhoršují manipulaci s vozem.

Zkrutný moment na přední nápravě byl vyvoláván pokládáním závaží působícími silami 100 N a 50 N na rameni o délce 1 150 mm. Na začátku měření byl celý rám zatížen momentem vyvolaným silou 200 N, díky čemuž došlo k vymezení vůlí. Tento předepjatý stav byl naskenován a posloužil jako referenční stav, ke kterému byly následné deformace vztahovány. Přidáváním závaží byla zatěžující síla zvyšována po 100 N až na konečných 1 000 N a po každém kroku byly skenovány statické deformace formule. Maximální zkrutný moment tak byl 1 150 Nm. Pro vytvoření dostatečného statistického souboru dat bylo měření opakováno celkem třikrát.

Data ze skenování Tritopem byly v *GOM Inspectu* proloženy CAD modelem chassis. Naměřené odchylky od referenčního stavu pak byly vztahovány ke globálnímu souřadnému systému vloženého společně s modelem.

### 6.2.2 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Aplikací závaží na otočné rameno docházelo k jeho deformaci, která vnášela do měření chybu, proto bylo potřeba provést korekci. Ta spočívala ve vypočtení úhlu natočení obou předních stojin a jejich odečtení. Rozdílem těchto úhlů pak bylo korigováno natočení předních téhlic, potažmo bodů monokoku na úrovni otočného ramene. Korekce lineárně klesala směrem k zadním stojinám. Výpočet korekce byl uskutečněn pomocí následující rovnice:

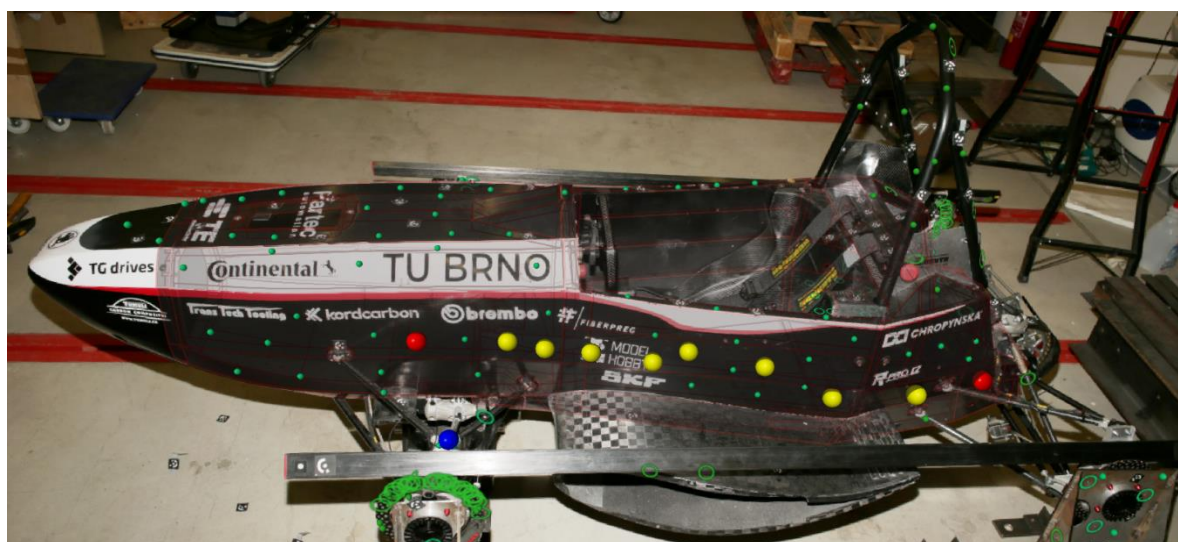
$$\kappa_{\text{připravek}} = \left| \arctan \left( \frac{\Delta z_{\text{leva\_stojina}}}{y_{\text{leva\_stojina}}} \right) - \arctan \left( \frac{\Delta z_{\text{prava\_stojina}}}{y_{\text{prava\_stojina}}} \right) \right|, \quad (12)$$

kde  $\Delta z$  jsou posunutí bodu ve směru Z na levé a pravé stojně a  $y$  jsou vzdálenosti stojin od osy otáčení ve směru Y. Zpracování dat bylo uskutečněno na základě rovnic 1, 2 a 3. Tyto rovnice byly upraveny, a navíc rozšířeny o složku posuvu ve směru osy Y, jelikož se vliv této složky ukázal jako nezanedbatelný. Výsledná soustava rovnic pro výpočet úhlu natočení libovolného bodu chassis měla následující podobu:

$$\Delta d = \sqrt{\Delta y + \Delta z}, \quad (13)$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\Delta d}{y}\right) - \kappa_{\text{pripiravek}} \cdot \frac{l_x}{l}, \quad (14)$$

kde  $\Delta d$  je celkové posunutí bodu,  $\Delta y$  je posunutí bodu ve směru Y a  $y$  přísluší vzdálenosti bodu od osy otáčení ve směru Y,  $l$  označuje rozvor a  $l_x$  vzdálenost od zadních stojin, čímž je zajištěn lineární pokles korekce s klesající vzdáleností k zádi formule.



Obr. 53 Fotografie z měření s vyznačenými body, které byly použity pro vyhodnocení

Torzni tuhosti byly vypočítány dvě – monokoku a celé formule. Jednodušší je výpočet torzní tuhosti celého vozu, který se řídí rovnicí 3. Úhel natočení byl brán pro bod na vrcholu levé přední těhlice (modrý bod v obr. 53). U samotného rámu byly pro výpočet tuhosti použity úhly natočení dvou bodů monokoku (červené body v obr. 53), jeden na úrovni přední těhlice a druhý na úrovni zadní těhlice. Podílem zkrutného momentu a rozdílu úhlů byla získána torzní tuhost chassis podle následujícího vztahu:

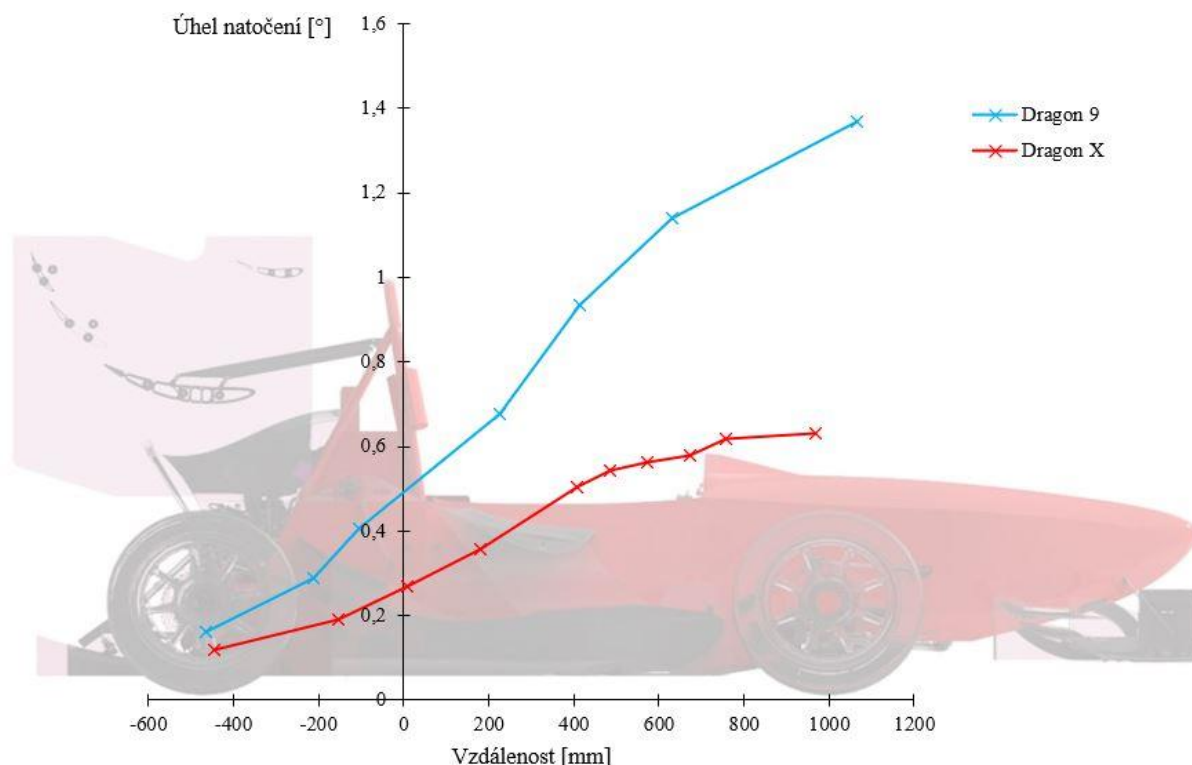
$$K_{t\_monokok} = \frac{M_k}{\varphi_{\text{predni}} - \varphi_{\text{zadni}}}, \quad (15)$$

kde  $\varphi_{\text{predni}}$  je úhel natočení bodu rámu na úrovni přední těhlice a  $\varphi_{\text{zadni}}$  na úrovni zadní těhlice. Obě tuhosti byly vypočteny pro všechna zatížení i měření. Zprůměrováním hodnot byla získána torzní tuhost monokoku 2 558 Nm/° a celé formule 1 398 Nm/°. V tabulce níže je porovnání s výsledky ze simulace, která se ukázala jako velmi přesná:

Tab. 10 Porovnání torzních tuhostí DX naměřených na vozidle a vypočtených ze simulace

	Simulace [Nm/°]	Fyzické měření [Nm/°]	Rozdíl [%]
Torzní tuhost chasis	2 501	2 558	+2,3
Torzní tuhost formule	1 423	1 398	-1,8

Výhodou fotogrammetrického měření oproti měření úchylkoměrem je fakt, že je možné zkoumat posunutí všech bodů na vozidle. Toho lze využít k odhalení slabých míst chasis a zaměřit se na ně při vývoji dalšího monopostu. V následujícím grafu na obr. 54 je srovnání úhlů natočení chasis po délce formule pro monoposty Dragon 9 a Dragon X (červené a žluté body z obr. 53). Při měření torzní tuhosti D9 byla zatížení stupňována po 300 N, proto se jako nejsrovnatelnější jevílo zatížení 600 N. Z grafu je zřejmé, že slabým místem DX je přechod mezi otvorem kokpitu a přídílí, jelikož křivka zde má výraznou změnu směrnice. Nicméně D9 má nižší tuhost, a tím větší úhly natočení po celé délce monopostu.



Obr. 54 Srovnání úhlů natočení po délce monopostů pro zatížení 600 N

### 6.3 POROVNÁNÍ CHASSIS FORMULÍ DRAGON 9 A DRAGON X

Srovnání nové generace formule s původním konceptem je nasnadě. Design použitého konceptu byl o něco náročnější než v případě hybridního chasis, protože jednodušší prostorový rám byl nahrazen plošnou skořepinou, která je na návrh složitější. Výrobní náročnost vzrostla několikanásobně. Při výrobě hybridního rámu je možné pracovat současně na kompozitní i trubkové části, což v případě kompozitního monokoku možné není. Kvůli laminaci do uzavřené formy se navíc nemohli na výrobě současně podílet více než tři lidé. Výhodou výrobní fáze pak byl fakt, že nemusel být složitě spojován ocelový rám se

skořepinou, čímž bylo také zamezeno odchylkám kinematických bodů podvozku. Naneštěstí se významně zhoršila možnost servisu pohonné jednotky, přestože byl na umožnění servisu kladen velký důraz.

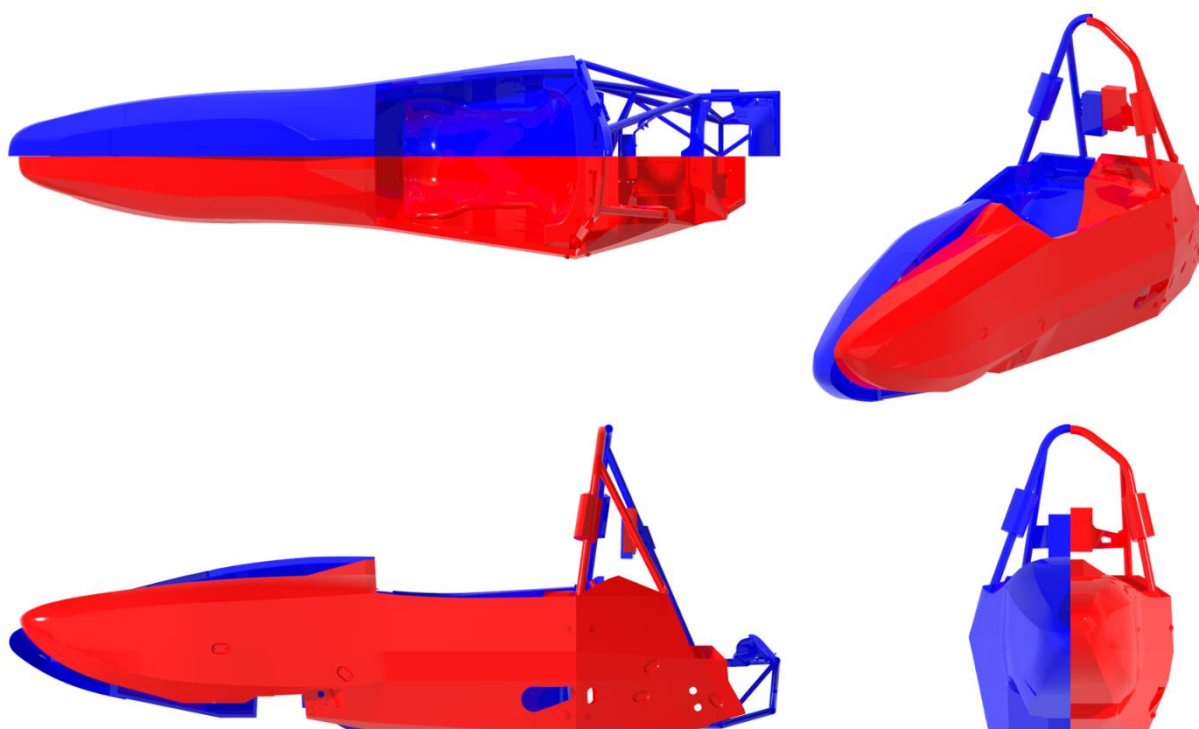
Tab. 11 Porovnání parametrů chassis Dragona 9 a Dragona X

Parametr	Dragon 9	Dragon X
Hmotnost [kg]	32,0	34,5
Torzni tuhost [Nm/°]	2 032	2 558
Výška těžiště [mm]	322*	341*
Délka / výška / šířka [mm]	2 271 / 1 035 / 686	2 153 / 1 029 / 698
Moment setrvačnosti okolo osy Z [kg·mm <sup>2</sup> ]	1,2·10 <sup>7</sup> *	9,4·10 <sup>6</sup> *

\* data z CAD modelu

Za úspěch považuji výrazné zvýšení torzní tuhosti, které předčilo veškerá očekávání. Hodnota torzní tuhosti 2 558 Nm/° splňuje stanovený cíl. Značný vliv na zvýšení tuhosti mělo nahrazení trubkové části skořepinou, ale také optimalizace skladby. Měření torzní tuhosti ukázalo, že nejslabším místem monokoku je otvor kokpitu, proto by se měla sekce vývoje chassis na toto místo zaměřit, aby byl zdokonalen další monopost. Vzhledem k tomu, že tuhost chassis je téměř dvojnásobná oproti celému vozu, tak by bylo potřeba se v budoucnu také více zaměřit na tuhost profilů ramen.

Nevýhodou je vysoká hmotnost chassis, jenž je dokonce vyšší než u D9, která je způsobena především změnou skladby monokoku. Na D9 byla použita kromě keprové i jednosměrná tkanina, jež měla výrazně vyšší modul pružnosti a nižší plošnou hmotnost, zatímco na DX byla použita pouze tkanina s keprovou vazbou. V důsledku toho musela být nižší ohybová tuhost vzorků DX vykompenzována větším počtem vrstev tkaniny, čímž došlo k nárůstu hmotnosti. Rozdíl oproti cílené váze 28 kg způsobilo také použití hliníkového zadního oblouku, se kterým nebylo v hmotnostní bilanci kalkulováno.



*Obr. 55 Vizuální porovnání chasis Dragona 9 (modře) a Dragona X (červeně)*

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl návrh a výroba chassis desátého monopostu z dílny týmu TU Brno Racing, který nese označení Dragon X. Vůbec poprvé v historii týmu byl použit plně kompozitní monokok. Implementace tohoto konceptu s sebou nesla celou řadu komplikací a výzev, přesto bylo možné monokok v přední části snížit a zkrátit jeho zád.

Největší výzvou byla zástavba pohonné jednotky formule, protože vysoké teploty motorového prostoru, které byly naměřeny na D9, způsobují degradaci pryskyřice kompozitu a mohly by zapříčinit jeho selhání. Nejkritičtější byla podlaha motorového prostoru, proto byla vyrobena ze sendvičové struktury s dvojitým jádrem. Ochlazování motorového prostoru bylo vyřešeno pomocí pasivního chlazení vzduchem vedeným boční podlahou a chlazením externím ventilátorem.

Výroba navrženého monokoku je v práci detailně popsána od návrhu forem až po opracování finálního produktu. Výrobu komplikoval složitý tvar monokoku, především v oblasti předního odpružení roll-heave, čemuž by bylo vhodné se v budoucnu vyvarovat a design zjednodušit, ať už kvůli výrobě nebo zamezení vzniku defektů. Následná validace ukázala přesnost výroby i navržené torzní tuhosti. Porovnáním naměřených dat se simulací byla ověřena přesnost nastavení analýzy pro budoucí vývoj.

Zmenšováním rozměrů monokoku již nebude možné hmotnost zásadně snižovat, protože současný model je již na pokraji možností. Největší potenciál do budoucna, co se snižování hmotnosti chassis týče, je v použití kvalitnějších vysokomodulových tkanin, ideálně jednosměrných, a v optimalizaci skladby za pomoci simulačních nástrojů. Při správném složení skladby a se správnými materiály by bylo teoreticky možné snížit hmotnost až o 8 kilogramů. Jako příklad optimalizace může posloužit skladba přední přepážky, na kterou jsou kladeny vysoké nároky kvůli odolání možnému nárazu. Na DX je po vzoru D9 skladba kombinovaná ze směrů 0° a 45°, ale jelikož přepážka nepřenáší torzní zatížení, pak by bylo vhodnější použití pouze směru 0°, který bude mít lepší výsledky ze zkoušky trojbodovým ohybem. Díky tomu by bylo možné snížit počet vrstev, a tím hmotnost.

Tým se s Dragonem X zúčastnil závodů v Nizozemsku, Česku a Maďarsku. Design chassis sklídl u rozhodčích úspěch, kdy se tým nejen díky němu dostal do finále disciplíny inženýrského návrhu na prvních dvou zmíněných závodech. Na českých závodech tuto disciplínu dokonce vyhrál. V celkovém hodnocení skončil tým v Nizozemsku i Česku na druhém místě, v Maďarsku pak na sedmém.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Formula Student rules 2020 V1.0. *Formula Student Germany* [online]. 13. 9. 2019 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2020/rules/FS-Rules\\_2020\\_V1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf)
- [2] Album: FS Germany 2019. *TU Brno Racing* [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/media/588-2/?album=2833>
- [3] MIRACLE, D. B. a Steven L. DONALDSON, ed. *ASM handbook*. Volume 21, Composites. Materials Park: ASM International, 2001. ISBN 0-87170-703-9.
- [4] Milestones season 2019. *Joanneum Racing Graz* [online]. 6. 7. 2020 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.joanneum-racing.at/language/en/milestones-season-2019/>
- [5] UTS Motorsports Electric. *Facebook* [online]. 11. 6. 2020 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/UTSMotorsports/photos/3373438972688113>
- [6] DANIELSSON, Oskar a Alejandro González COCAÑA. *Influence of Body Stiffness on Vehicle Dynamics Characteristics in Passenger Cars* [online]. Göteborg, Sweden, 2015 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/219391>. Master's thesis. Chalmers University of Technology.
- [7] SAMPÒ, Enrico. *Modelling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation* [online]. Guildford, United Kingdom, 2011 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://epubs.surrey.ac.uk/782825/>. Dissertation thesis. University of Surrey.
- [8] MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. *Race Car Vehicle Dynamics*. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1995. ISBN 15-609-1526-9.
- [9] WU, Jingsi, Owusu AGYEMAN BADU, Yonchen TAI a Albert R. GEORGE. Design, Analysis, and Simulation of an Automotive Carbon Fiber Monocoque Chassis. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* [online]. 2014, 7(2), 838-861 [cit. 2021-03-12]. ISSN 1946-4002. Dostupné z: doi:10.4271/2014-01-1052
- [10] LIN, Jeffrey Chun-Hui. *MEMS for Glaucoma* [online]. Pasadena, California, 2012 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:05192012-003206031>. Dissertation thesis. California Institute of Technology.
- [11] ZHANG, Y., R. D. ADAMS a Lucas F. M. DA SILVA. A Rapid Method of Measuring the Glass Transition Temperature Using a Novel Dynamic Mechanical Analysis Method. *The Journal of Adhesion* [online]. 2013, 89(10), 785-806 [cit. 2021-03-11]. ISSN 0021-8464. Dostupné z: doi:10.1080/00218464.2013.763677
- [12] Rohože ze sekaných skelných vláken CSM 300, 450, 600. *Composites for Czech* [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <http://www.composites4c.cz/rohoze.html>

- [13] Uhlíkový roving 30g. *TOPMODEL CZ* [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: [https://www.topmodelcz.cz/resources/upload/eshop\\_231371.jpg](https://www.topmodelcz.cz/resources/upload/eshop_231371.jpg)
- [14] Aramid sleeve. *SILTEX* [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.siltex.eu/aramidsleeve.html>
- [15] Carbon Fiber Weaves: What they are and why to use them. *Elevated materials* [online]. 17. 1. 2019 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://www.elevatedmaterials.com/carbon-fiber-weaves-what-they-are-and-why-to-use-them/>
- [16] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3513-1.
- [17] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [18] GELLNER, Pavel. *Design book of TU Brno Racing Dragon 9*. Brno, 2019.
- [19] URBAN, Marek. *Návrh zavěšení kol Formule Student* [online]. Brno, 2020, 138 s. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124572>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Porteš, Ph.D.
- [20] DĚRDA, Martin. *Návrh rámu vozidla Formule Student* [online]. Brno, 2017, 72 s. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=101756](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=101756). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.
- [21] *Epoxidová pryskyřice ER 38*. MEEM, Plzeň, 2020.
- [22] ZircoFlex® I – A Flexible Ceramic Heatshield. *Zircotec* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.zircotec.com/zircoflex-heat-shields-for-the-automotive-industry/zircoflex-i/>
- [23] Spaceloft® Blanket. *Buy Aerogel* [online]. [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <http://www.buyaerogel.com/product/spaceloft/>
- [24] CHENG, Shi, Pizhong QIAO a Fangliang CHEN. *Numerical analysis of I-Lam honeycomb sandwich panels for collision protection of reinforced concrete beams* [online]. 2017, **19**(4), 497-522 [cit. 2021-03-11]. ISSN 1099-6362. Dostupné z: doi:10.1177/1099636215623816
- [25] FSG: Results FSG 2019. *Formula Student Germany* [online]. [cit. 2021-7-14]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/results/2019/>
- [26] T300 Standard Modulus Fiber: Technical Data Sheet. *Toray* [online]. [cit. 2021-7-15]. Dostupné z: <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T300-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf>

- [27] PAMG-XR1 5056 Aluminum Honeycomb. *Plascore* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: [https://www.plascore.com/download/datasheets/honeycomb\\_data\\_sheets/PLA\\_PAMG-XR1-5056\\_1-29-21.pdf](https://www.plascore.com/download/datasheets/honeycomb_data_sheets/PLA_PAMG-XR1-5056_1-29-21.pdf)
- [28] PN1 Commercial Grade Meta-Aramid Fiber Honeycomb. *Plascore* [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: [https://www.plascore.com/download/datasheets/honeycomb\\_data\\_sheets/PLA\\_PN1.pdf](https://www.plascore.com/download/datasheets/honeycomb_data_sheets/PLA_PN1.pdf)
- [29] ŽÍDEK, Tomáš. *Aplikace sendvičové konstrukce na formulový vůz* [online]. Brno, 2016, 99 s. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=92809](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=92809). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. František Löffelmann.
- [30] Elektromechanické zkušební stroje LabTest 6.500 až 6.600. *LaborTech* [online]. 2017 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://www.labortech.cz/wp-content/uploads/2018/08/labtest-6.500-600-v1.0-2017.pdf>
- [31] Pryskyřice a tužidla. *GRM Systems* [online]. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/pryskyrice-tuzidla>
- [32] PETRO, Pavol. *Torzní tuhost rámu vozidla Formula Student* [online]. Brno, 2016, 70 s. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=92215](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=92215). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Blaták, Ph.D.
- [33] GREGOR, Lukáš. *Návrh konstrukce kompozitního chassis vozidla Formule Student* [online]. Brno, 2018, 60 s. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=109689](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=109689). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal Mališ, Ph.D.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Seznam použitých symbolů

$\Delta d$	mm	celkový posuv
$\Delta y$	mm	posuv ve směru Y
$\Delta z$	mm	posuv ve směru Z
$\Delta z_{leva\_stojina}$	mm	posuv levé stojiny ve směru Z
$\Delta z_{prava\_stojina}$	mm	posuv pravé stojiny ve směru Z
$E$	GPa	Youngův modul
$E_1$	GPa	Youngův modul v bodě 1 ( <i>obr. 13</i> )
$E_1$	GPa	Youngův modul v podélném směru
$E_2$	GPa	Youngův modul v bodě 2 ( <i>obr. 13</i> )
$E_2$	GPa	Youngův modul v příčném směru
$F$	N	síla
$F_1$	N	síla 1 ze silové dvojice
$F_2$	N	síla 2 ze silové dvojice
$F_N$	N	normálová síla
$G$	GPa	modul pružnosti ve smyku
$h$	mm	tloušťka materiálu
$I$	mm <sup>4</sup>	kvadratický moment průřezu
$J$	mm <sup>4</sup>	polární kvadratický moment průřezu
$K_o$	Nm/°	ohybová tuhost
$K_t$	Nm/°	torzní tuhost
$K_{t\_monokok}$	Nm/°	torzní tuhost monokoku
$l$	mm	rozvor
$L$	mm	charakteristická délka průřezu
$l_x$	mm	vzdálenost od zadních stojin ve směru X
$M_k$	Nm	zkрутný moment
$M_o$	Nm	ohybový moment
$o$	mm	obvod
$R_m$	MPa	mez pevnosti
$t$	mm	rozchod
$T$	°C	teplota

$T_g$	°C	teplota skelného přechodu
$T_m$	°C	teplota tání
$t_p$	mm	tloušťka potahu
$y$	mm	vzdálenost bodu od osy otáčení ve směru Y
$y_{leva\_stojina}$	mm	vzdálenost levé stojiny od osy otáčení ve směru Y
$y_{prava\_stojina}$	mm	vzdálenost pravé stojiny od osy otáčení ve směru Y
$\alpha$	°	úhel natočení
$\zeta$	-	poměrné tlumení
$\kappa_{pripriavek}$	rad	úhlová korekce přípravku
$\rho$	[g·cm <sup>-3</sup> ]	hustota
$\tau_{max}$	MPa	pevnost ve stříhu
$\varphi$	°	úhel natočení
$\varphi_{predni}$	°	úhel natočení na úrovni přední těhlice
$\varphi_{zadni}$	°	úhel natočení na úrovni zadní těhlice

### Seznam použitých zkratk

<i>3D</i>	3 Dimensional
<i>ACP</i>	Ansys Composites PrepPost
<i>AS</i>	Average Strength
<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>CFRP</i>	Carbon Fiber Reinforced Plastic
<i>CNC</i>	Computer Numeric Control
<i>D9</i>	Dragon 9
<i>DB</i>	Dashboard
<i>DX</i>	Dragon X
<i>ES1</i>	Engine Space 1
<i>ES2</i>	Engine Space 2
<i>ES3</i>	Engine Space 3
<i>F1</i>	Formula 1
<i>FB</i>	Front Bulkhead
<i>FBS</i>	Front Bulkhead Support
<i>FEM</i>	Finite Element Method

---

<i>FF1</i>	Front Floor 1
<i>FF2</i>	Front Floor 2
<i>FF3</i>	Front Floor 3
<i>FH</i>	Front Hoop
<i>FHB</i>	Front Hoop Bracing
<i>FRP</i>	Fiber Reinforced Plastic
<i>FSG</i>	Formula Student Germany
<i>FSI</i>	Fakulta strojního inženýrství
<i>HM</i>	High Modulus
<i>HS</i>	High Strength
<i>IM</i>	Intermediate Modulus
<i>L</i>	Length
<i>MDF</i>	Medium Density Fiberboard
<i>MH</i>	Main Hoop
<i>MHB</i>	Main Hoop Bracing
<i>MHBS</i>	Main Hoop Bracing Support
<i>MKP</i>	metoda konečných prvků
<i>PAN</i>	polyakrylonitril
<i>PMI</i>	polymethakrylimid
<i>PVC</i>	polyvinylchlorid
<i>SAE</i>	Society of Automotive Engineers
<i>SES</i>	Structural Equivalency Spreadsheet
<i>SHB</i>	Shoulder Harness Bracing
<i>SIS</i>	Side Impact Structure
<i>SIS-hor</i>	Horizontal Side Impact Structure
<i>SIS-ver</i>	Vertical Side Impact Structure
<i>T</i>	Thickness
<i>T1–T7</i>	označení teplotních senzorů
<i>TU</i>	Technical University
<i>UD</i>	Unidirectional
<i>UHM</i>	Ultra High Modulus
<i>UTS</i>	University of Technology Sydney
<i>UV</i>	Ultra Violet

---

<i>VHM</i>	Very High Modulus
<i>VUT</i>	Vysoké učení technické v Brně
<i>W</i>	Width
<i>X, Y, Z</i>	osy globálního souřadného systému