



**FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

Studijní program: Strojní inženýrství

Číslo studijního programu: B0715A270013

Studijní specializace: Konstruování strojů a technických zařízení

NÁVRH SKOŘEPINOVÉHO KOMPOZITNÍHO RÁMU PRO VŮZ KATEGORIE FORMULE STU- DENT S ELEKTRICKÝM POHONEM

Bakalářská práce

Autor práce: Ondřej Rota

Vedoucí práce: Ing. František Sedláček, Ph. D.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej ROTA**
Osobní číslo: **S20B0229P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Konstruování strojů a technických zařízení**
Téma práce: **Návrh skořepinového kompozitního rámu pro vůz kategorie formule student s elektrickým pohonem**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Vypracování řešerše v aktuálních trendech konstrukce kompozitních skořepinových rámu používaných u jednosedadlových závodních vozů s elektrickým pohonem. Základní návrh konstrukce skořepinového kompozitního rámu vozu kategorie formule student s elektrickým pohonem. Přičemž návrh musí zajišťovat plnou kompatibilitu s navazujícími systémy vozu a splňovat všechny požadavky kladené pravidly FSAE. Vypracování CAD modelů a základní výkresové dokumentace.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny příloze zadání.

Osnova práce:

1. Vypracování řešerše na dané téma.
2. Specifikace požadavků.
3. Vypracování koncepčních variant skořepinových rámu.
4. Návrh skořepinového rámu.
5. Zhodnocení návrhu a výkresová dokumentace.

Konzultant: Ing. Michal Skovajsa

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

[1]Trzesniowski Michael. Rennwagentechnik: Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme (ATZ/MTZ-Fachbuch). Springer Vieweg; vydání 4. 2014 DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-04919-5>

[2]Formula SAE Rules 2023, dostupná online: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=96d652ca-a506-444e-917a-dbf695321ab3>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Sedláček, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Ing. Zdeněk Chval, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval/a samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v Seznamu použitých zdrojů, který je součástí této práce a na základě konzultací s vedoucím práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

V Plzni dne:

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Františku Sedláčkovi, Ph. D. a Ing. Michalovi Skovajsovi, Ph. D. za jejich nesmírnou trpělivost a cenné rady při mé tvorbě této práce. Dále bych poděkoval členům týmu UWBe Racing za tuto zkušenost a těším se na další úžasné věci. Nesmím opomenout poděkovat mé výborné rodině bez jejichž finanční a psychické podpory bych nebyl, kde jsem. Děkuji.

Abstrakt

Tato práce pojednává o základním návrhu a výrobě kompozitní skořepinové struktury rámu vozu typu formule s elektrickým pohonem, která se bude účastnit soutěže Formule Student. Povrchově seznamuje čtenáře s problematikou návrhu kompozitních skořepinových struktur, které jsou spolu s trubkovým rámem a hybridní konstrukcí nejvíce se vyskytujícími v soutěži FS. Tým Západočeské univerzity v Plzni, UWBe Racing, má několikaletou zkušenost s návrhem trubkových rámu pro vůz formulového typu. Experimenty s nahrazením těžké ocelové konstrukce lehčím kompozitem počalo před pár lety. Když se k tomu přičte protlačování elektrického pohonu nad spalovací agregáty, tak výsledkem je elektricky poháněná formule postavená na konstrukci skořepinového kompozitního rámu.

Byly vytvořeny tři koncepční varianty kompozitních rámu, hybridní, dělený kompozitní a jednodílný kompozitní rám. Vybranou variantou nakonec byla koncepce děleného kompozitního rámu. Ačkoliv jej převyšuje svými vlastnostmi jednodílný kompozitní rám, není pro jeho výrobu v laboratořích ZČU dostatečně velký autokláv. Navíc dělený kompozitní rám umožňuje snížení vynaloženého času a finančních prostředků při jeho návrhu a výrobě. Toho bylo docíleno převzetím základní geometrie přední kompozitní části rámu a několika navazujících systémů z UWB06. Zadní kompozitní sendvičová struktura nahrazuje dosavadní trubkový rám. Výstupem této práce je CAD model a základní výkresová dokumentace, kterou následuje výroba navrženého rámu.

Klíčová slova

Formule Student; monocoque; kompozitní sendvičové struktury; elektrický pohon

Abstract

This thesis deals with the basic design and fabrication of a composite shell structure for the frame of an electrically powered formula car that will participate in the Formula Student competition. It superficially introduces the reader to the design issues of composite shell structures, which, along with tubular frame and hybrid structures, are the most common in FS competition. The team of the University of West Bohemia in Pilsen, UWBe Racing, has several years of experience in designing tubular frames for the formula car. Experimentation with replacing the heavy steel structure with a lighter composite started a few years ago. Add to that pushing electric propulsion over combustion units, the result is an electrically powered formula built on a shell composite frame design.

Three composite frame concepts have been developed, hybrid, split composite, and one-piece composite frames. The split composite frame concept was the selected variant in the end. Although the one-piece composite frame is superior in its properties, there is not an autoclave enough large for its production in the laboratories of UWB. In addition, the split composite frame allows a reduction in the time and financial resources spent in its design and manufacture. This was achieved by adopting the basic geometry of the front composite frame section and several downstream systems from UWB06. The rear composite sandwich structure replaces the existing tubular frame. The output of this work is a CAD model and basic drawing-documentation followed by the fabrication of the designed frame.

Key words

Formule Student; monocoque; composite sandwich structure; electric propulsion

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Formule Student	13
2.1	Historie	13
2.2	Průběh soutěže	13
3	Současný stav v oblasti konstrukce skořepinových rámuů závodních vozů	15
3.1	Historie.....	15
3.2	Prostorový trubkový rám.....	15
3.3	Jednodílný kompozitní monocoque	16
3.4	Hybridní rám.....	17
4	Stávající řešení konstrukce skořepinového rámu	19
5	Specifikace požadavků	24
5.1	Obecná specifikace požadavků.....	24
5.2	Požadavky kladené pravidly FS	24
6	Koncepční návrh skořepinového rámu.....	30
6.1	Varianta I. - Hybridní rám	30
6.2	Varianta II. - Dělený skořepinový rám.....	31
6.3	Varianta III. - Jednodílný skořepinový rám.....	32
6.4	Morfologická analýza.....	33
7	Návrh skořepinového rámu.....	35
7.1	Šroubový spoj s insertem	35
7.2	Skladba laminátu sendvičového panelu	35
7.3	Návrh předního skořepinového rámu	36
7.4	Návrh zadního skořepinového rámu	42
7.4.1	Kontrola šroubového spoje	45
8	Technologie výroby	47
8.1	Formy předního skořepinového rámu.....	48
8.2	Formy zadního skořepinového rámu.....	48
8.2.1	Návrh pozitivní formy.....	49
8.2.2	Návrh negativní formy	50
9	Implementace do sestavy vozu	52

10	Závěr	55
	Reference	56

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Monopost UWB Racing Pilsen na soutěži Formula Student Italy 2019 [2]	14
Obr. 3.1 První použití skořepinového rámu u francouzského sportovního letadla [6]	15
Obr. 3.2 Příklad prostorového trubkového rámu vozu Formule Student [7]	16
Obr. 3.3 Příklad jednodílného monocoqueu vozu Formule Student [10]	17
Obr. 3.4 Příklad hybridního rámu vozu UWB06	17
Obr. 4.1 Nárazový prvek (žlutě zvýrazněný) v řezu sestavou UWB06	19
Obr. 4.2 Systém předního a zadního zavěšení (oranžově zvýrazněné) v sestavě UWB06	20
Obr. 4.3 Systém řízení (oranžově zvýrazněno) v řezu sestavou UWB06	21
Obr. 4.4 Prostor kokpitu pilota (oranžově zvýrazněno) v řezu sestavou UWB06	21
Obr. 4.5 Systém pohonné jednotky (oranžově zvýrazněno) v řezu sestavou UWB06	22
Obr. 4.6 Aerodynamická soustava vozu (oranžově zvýrazněno) v sestavě UWB06	23
Obr. 5.1 Požadavky na laminaci předního oblouku [3]	25
Obr. 5.2 Požadavky na podpory hlavního a předního oblouku [3]	25
Obr. 5.3 Boční nárazová struktura monocoqueu [3]	26
Obr. 5.4 Šroubový spoj podpěr oblouku [3]	27
Obr. 5.5 Šablona otvoru pro kokpit (vlevo) a šablona vnitřního průřezu kokpitu (vpravo) [3]	27
Obr. 5.6 Minimální vzdálenosti od helmy [3]	28
Obr. 5.7 Skica 95procentního muže [3]	29
Obr. 6.1 Konceptní návrh hybridního rámu	30
Obr. 6.2 Konceptní návrh děleného skořepinového rámu	31
Obr. 6.3 Konceptní návrh jednodílného skořepinového rámu	32
Obr. 7.1 Zleva šroubový spoj bez vyztužení insertem, spoj vyztužený průchozím insertem	35
Obr. 7.2 Struktura sendvičového kompozitního panelu [4]	36
Obr. 7.3 Schéma skladby tkaniny	36
Obr. 7.4 Změny provedené na předním monocoqueu (červeně-změna polohy, zeleně-změna geometrie)	37
Obr. 7.5 Změna geometrie přední přepážky	38
Obr. 7.6 Boční pohled na změny předního monocoqueu (červená-nová geometrie, modrá-původní geometrie)	38
Obr. 7.7 Pohled na boční výřez chlazení battery boxu	39
Obr. 7.8 Posunutí hlavního oblouku	40

Obr. 7.9 Změna zadní části předního monocoqueu (červená-nová geometrie, modrá-původní geometrie)	41
Obr. 7.10 Přední uchycení battery boxu k rámu	41
Obr. 7.11 Schéma zadního monocoqueu a navazujících funkčních celků	42
Obr. 7.12 Přední pohled na zadní monocoque	42
Obr. 7.13 Umístění otvorů pro uchycení navazujících prvků	43
Obr. 7.14 Zadní část monocoqueu.....	44
Obr. 7.15 Připojení battery boxu a víka k rámu	44
Obr. 7.16 Řez zadním monocoquem odhalující střídač a box baterky uvnitř.....	45
Obr. 7.17 Nákres šroubového spoje namáhaného na stříh	45
Obr. 8.1 Vývojový diagram návrhu a výroby forem skořepinových rámu	47
Obr. 8.2 Schéma dvou-cyklického formování [4]	47
Obr. 8.3 Sestava čtyř dílné formy pro přední skořepinový rám [4]	48
Obr. 8.4 Zvolené dělicí roviny a úkosy na modelu	49
Obr. 8.5 Sestava pozitivní formy pro spodní část zadního monocoqueu	49
Obr. 8.6 Výroba negativní formy přední přepážky předního monocoqueu	50
Obr. 8.7 Sestava čtyř dílné formy pro zadní skořepinový rám	51
Obr. 9.1 Řez sestavou navazujících funkčních celků	52
Obr. 9.2 Přední a zadní monocoque v sestavě s navazujícími prvky	53
Obr. 9.3 Přední a zadní monocoque v sestavě s navazujícími prvky	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 Morfologická tabulka, 1- nejhorší, 5 - nejlepší.....	33
--	----

1 Úvod

Cílem této práce je základní návrh konstrukce skořepinového kompozitního rámu vozu kategorie formule student, který je určen pro 7. generaci vozu s elektrickým pohonem (u dosavadních řešení se využívalo spalovacího agregátu), která by se účastnila soutěží v roce 2024. Z tohoto důvodu se jedná pro tým Západočeské univerzity v Plzni o zcela novou oblast konstrukce, která skýtá spoustu příležitostí a výzev. Přičemž je cíleno na to, aby nová konstrukce co nejvíce vycházela (či využívala klíčových prvků) z předchozího řešení, které je ověřeno a z hlediska funkčních vlastností a parametrů se řadí mezi špičku.

Práce na začátku přibližuje v krátkosti soutěž Formule Student, dále se zabývá současnými konstrukčními návrhy skořepinových rámu závodních vozů. Následně je představeno stávající řešení skořepinového rámu formule spolu s komponenty ovlivňující návrh nového kompozitního rámu. Práce pokračuje stanovením a popsáním požadavků a důvodů, jenž limitují určité koncepční návrhy, mimo jiné pravidla soutěže Formule Student. Poté následuje samotný návrh skořepinového rámu. Nejprve jsou představeny různé koncepční návrhy. Z nich je vybrán ten nejlépe splňující požadované vlastnosti. Návrh vybrané varianty je dále podrobně popsán. Závěrem se práce věnuje technologickým úpravám modelu spolu se samotnou výrobou forem a funkčního dílu a jeho implementace do celkové sestavy monopostu. V závěru, uzavírající tuto práci, jsou shrnuty vstupní požadavky, důležité kroky návrhu a zhodnocení výsledného řešení s možnými budoucími inovacemi.

2 Formule Student

2.1 Historie

Formule Student je mezinárodní soutěž, které se účastní zejména technické univerzity. Tato soutěž byla poprvé založena univerzitami v USA v roce 1981. V roce 1998 se tyto závody přesunuly i do Evropy. Nyní probíhá každý rok 12 soutěží po celém světě, kterých se účastní na půl tisíce týmů ze všech koutů světa.

Prvním českým týmem v této soutěži byl CTU CarTech ze Strojní fakulty ČVUT založený v roce 2007. V roce 2009 se účastnili soutěže s jejich prvním monopostem FS.01. Použitý rám byl svařovaný trubkový z konstrukční oceli, který vážil 339 kg. Tento monopost byl poháněn řadovým čtyřválcem o objemu 599 cm³ a výkonu 85 koní. Od té doby zkonstruovali v Praze 14 generací. S vozem FS.05 byli první u nás, kdo použil kompozitní rám z uhlíkových vláken. Pátá generace používala stejný motor jako FS.01. Oproti 1. generaci došlo k snížení hmotnosti o více než 100 kg. Revolučním vozem se stal FS.14, jenž je prvním hybridním monopostem na světě. Od svých předchůdců převzal spalovací čtyřválec, ke kterému se přidali dva elektromotory v předních kolech. [1]

Západočeská univerzita v Plzni se, pod názvem UWB Racing Pilsen, této soutěže účastní od roku 2009. Doposud bylo postaveno šest generací formulí, všechny poháněny spalovacím motorem uloženým v zadní části vozu. Prvním představeným monopostem byl UWB01, vzadu uložený benzínový motor Honda CBR600RR poskytoval zadní nápravě až 98 koní. Při váze 298 kg byl vůz schopen zrychlit až na 150 km/h. Změna přichází s nejnovější 7. generací vozu, který je čistě elektricky poháněný čtyřmi elektromotory v kolech s celkovým výkonem 80 kW. [2]

2.2 Průběh soutěže

Cílem soutěže je zkonstruovat, postavit a pilotovat vůz kategorie formule. Tak aby splňoval pravidla stanovené organizátory soutěže. FSG určuje pravidla evropských soutěží a FSAE závodů ve zbytku světa. Univerzitní tým může být složen pouze ze studentů bakalářského a navazujícího studia. To samé platí i pro pilota. Týmy mohou soutěžit ve třech kategoriích, CV – vozy poháněné spalovacím motorem, EV – elektricky poháněné formule, a nakonec DV – vozy s autonomním systémem řízení. [3]

Formule Student nevyhraje ten, kdo projede cílem jako první, tato soutěž má několik disciplín. V nich lze celkem získat až 1000 bodů. Dělí se na statické a dynamické. Do statických disciplín patří Engineering design, Cost manufacturing a Business presentation, kde týmy prezentují a obhajují jejich postup při konstrukci vozu, finanční analýzu výroby prototypu a prezentaci fiktivnímu investorovi. Mezi dynamické disciplíny se řadí Skid pad, Acceleration, Autocross, Endurance a Efficiency. Jedná se o jízdu po trati tvaru osmičky, měření maximálního zrychlení vozu, jízdu po trati o délce 1 km, vytrvalostní závod dlouhý 22 km a hodnocení účinnosti monopostu. [3]



Obr. 2.1 Monopost UWB Racing Pilsen na soutěži Formula Student Italy 2019 [2]

3 Současný stav v oblasti konstrukce skořepinových rámců závodních vozů

3.1 Historie

Skořepinový rám, ve světě také pod označením „monocoque“ (mono \approx „jedno“ a coque \approx „skořepina“), je druh konstrukce umožňující přenášet obecné zatížení vnější kapotáží vozu. První použití skořepinového rámu je přisuzováno francouzskému závodnímu letadlu Aeroplanes Deperdussin z roku 1912. Závodní vozy si museli na hliníkový monocoque počkat až do roku 1962, kdy se při závodech Formule 1 objevil Lotus 25. Dalším skokem v evoluci byl závodní vůz F1 McLaren MP4/1 používající skořepinový rám tvořený uhlíkovými vlákny. [4] [5]



Obr. 3.1 První použití skořepinového rámu u francouzského sportovního letadla [6]

3.2 Prostorový trubkový rám

Momentálně se lze setkat se třemi typy konstrukce rámců závodních vozů. Nejpoužívanějším typem v soutěži Formule Student je prostorový trubkový rám. Jeho největší výhodou je jeho konstrukční jednodušost, relativně snadná výroba a možnost opravitelnosti. Zpravidla se jedná o mnoho ocelových někdy hliníkových trubek. Ty jsou nařezány na kusy a svařeny k sobě, tvoříc prostorový rám. Pro zlepšení aerodynamiky celého vozu se na takový rám ještě aplikovat nenosná karosérie.



Obr. 3.2 Příklad prostorového trubkového rámu vozu Formule Student [7]

3.3 Jednodílný kompozitní monocoque

Protikladem k trubkovému rámu je jednodílný kompozitní monocoque. Sendvičové struktury se obvykle skládají z lehkého jádra a potahu s velkým modulem pružnosti v tahu. Materiál potahu bývá uhlíkový, aramidový nebo skelný laminát. Pro zvýšení tuhosti sendvičového kompozitu je jádro vyrobeno například z hliníkové voštiny, PUR pěny nebo balsového dřeva. S rozkvětem výpočetní techniky se zjednodušuje a zpřesňuje jeho návrh, čímž se stává dostupnějším. Stále je však tento typ konstrukce finančně i technologicky náročný. Výhodou této struktury je odstranění nepřesností vzniklé při lepení monocoqueu, který se skládá z více částí. Samotná technologie návrhu a výroby skořepinových rámu z uhlíkových vláken je stále do značné míry „know-how“ závodních týmů využívající je ve svých monopostech. Obecně výroba kompozitních skořepinových rámu může probíhat několika způsoby. [4] [8]

Jeden způsob počíná návrhem a výrobou pozitivní formy, její tvar a rozměry jsou shodné s tvarem a rozměry výsledného skořepinového rámu. Z této formy se zhotoví několikadílná negativní forma, která je použita na laminaci výsledného kompozitního rámu. Jelikož je výsledkem celý díl, který se po laminaci již neobrábí a přebírá charakter povrchu formy, je nutné vrstvit kompozitní vlákna od pohledové strany.

Další způsob je zjednodušen pouze na návrh a výrobu negativní formy, například z hliníku. Všechny negativní formy se laminují jako v předešlém případě. Změna přichází v tom, že výsledkem je několik separátních částí rámu, které se následně lepí k sobě. Tento způsob je levnější a lépe zhotovitelný v menších dílnách.

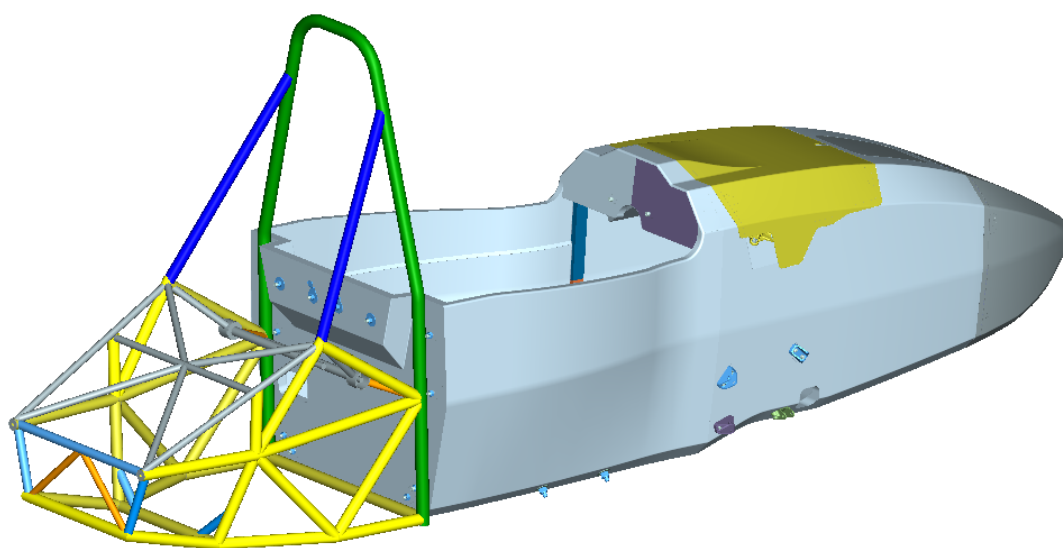
Třetím způsobem je použití již předem vytvořených sendvičových panelů určitého tvaru, které se lepí, popřípadě nýtují k sobě nebo na hliníkový rám. Při návrhu modelu je potřeba myslet na správné odformování výsledného dílu, to je docíleno vhodně zvolenou dělicí rovinou a vhodnými úkosy se záporným sklonem (nejčastěji od 1,5°). [4] [8]



Obr. 3.3 Příklad jednodílného monocoqueu vozu Formule Student [10]

3.4 Hybridní rám

Mezistupněm mezi předešlými jmenovanými je hybridní rám. Tato konstrukce spojuje kompozitní skořepinový rám s ocelovým trubkovým. Nejčastěji je kompozitní přední část zahrnující systémy řízení i zavěšení a kokpit s řidičem. Zadní část nesoucí pohonnou jednotku bývá nejčastěji ocelový trubkový svařenec. Důvodem pro tento typ konstrukce může být vysoká cena nebo složitá výroba jednodílného monocoque. Výhodou hybridního rámu je ku příkladu odstranění degradace uhlíkového kompozitu vlivem tepla od spalovacího motoru. [8]

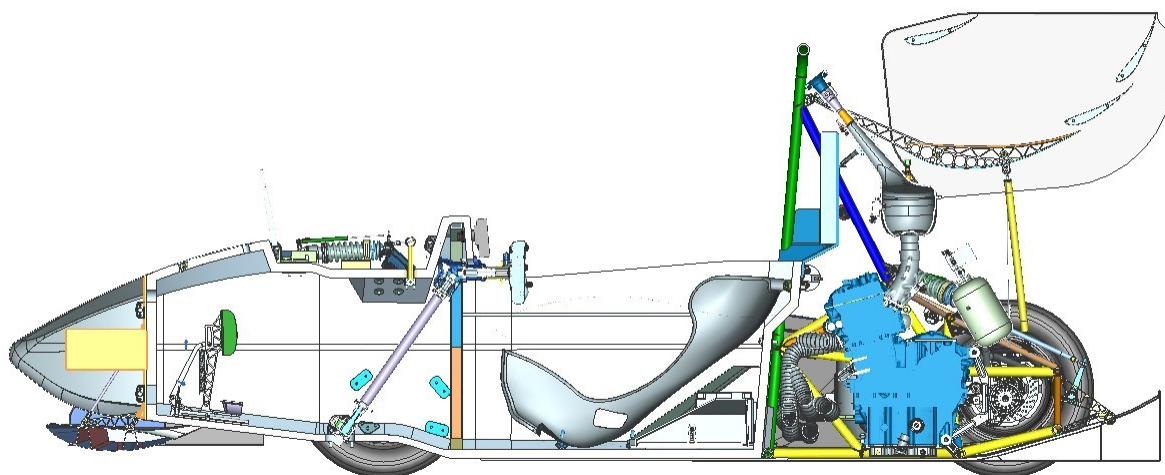


Obr. 3.4 Příklad hybridního rámu vozu UWB06

Nejstarší tým Formule Student v naší zemi CTU CarTech poprvé použil kompozitní monocoque v roce 2013 na voze FS.05. Rám byl hybridní. Přední část ocelového trubkového rámu byla nahrazena monocoquem. Ten se skládal ze sendvičového uhlíkového kompozitu. Zadní část nesoucí pohonné ústrojí byla vyrobena jako u předchozích verzí ze svařeného trubkového rámu. Tentokrát byla použita vysokopevnostní ocel. Skořepinový rám byl zhotovován ze dvou polovin, které se následně lepili k sobě. Jádro kompozitu byla použita pěna od firmy Rohacell, ta byla zvnějšku opatřena kompozitem z uhlíkových vláken. V dalších generacích bylo pěnové jádro nahrazeno hliníkovou voštinou a monocoque byl laminován v celku jako jeden kus. [9]

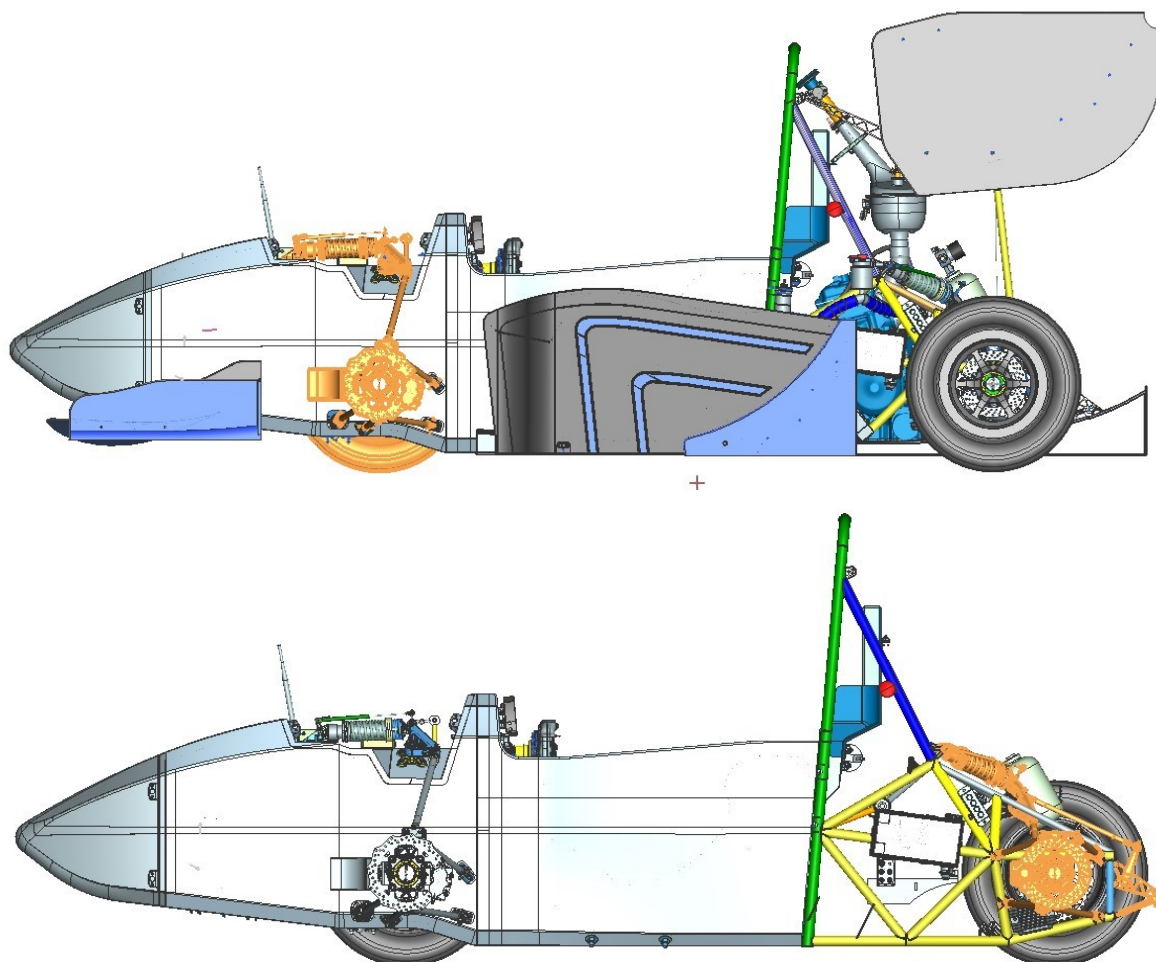
4 Stávající řešení konstrukce skořepinového rámu

Poslední generací (resp. stávajícím řešením) monopostu týmu ZČU v Plzni je vůz s označením UWB06. Z hlediska jeho koncepce je tato konstrukce tvořena šesti systémy, nárazový prvek, přední a zadní zavěšení, prostor kokpitu, pohonná jednotka a aerodynamická soustava. Jedním z těchto systémů, který je uložen v přední části vozu, je nárazový prvek (tzv. "crash box") (Obr. 4.1). Je to blok z hliníkové voštiny sloužící k absorpci energie při čelním nárazu, čímž přispívá k vyšší bezpečnosti pilota. Rozměry tohoto bloku jsou stanoveny pravidly soutěže na 100x200x200 mm. Tento nárazový prvek je připevněn k hliníkové desce, která je přišroubována ke kompozitnímu skořepinovému rámu, přesněji k přední přepážce. Přičemž jeho klíčové parametry jsou přesně definovány samotnými pravidly Formule Student (resp. SAE).



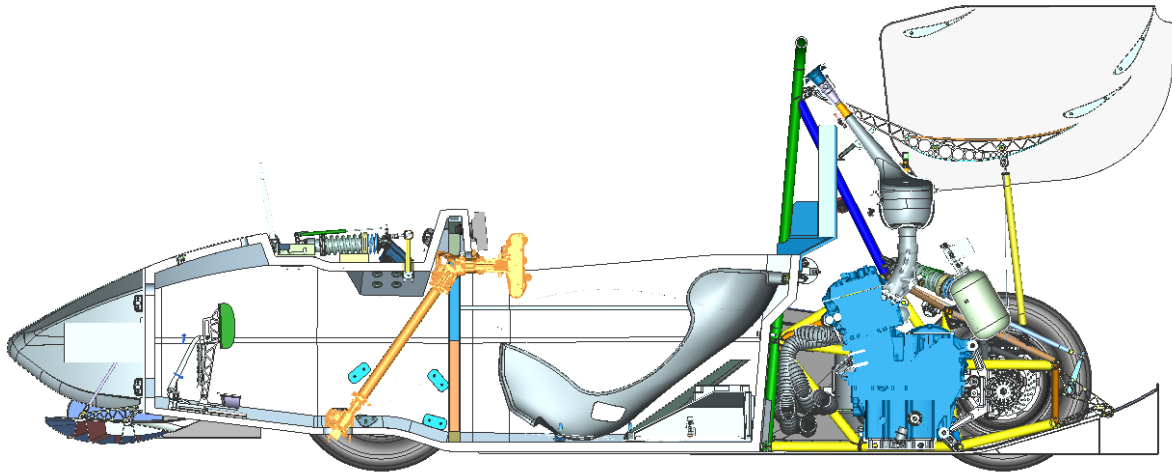
Obr. 4.1 Nárazový prvek (žlutě zvýrazněný) v řezu sestavou UWB06

Přední kola jsou připojena k přednímu monocoqueu pomocí pružného zavěšení. Sestává se ze dvou dvojitých ramen stavěných ve tvaru písmene "A". Samotné tlumiče jsou uloženy na vrchu skořepinového rámu ve výklenku (Obr. 4.2), lichoběžníkového tvaru, ve směru podélné osy vozu. Tlumič je ovládán tlačnou tyčí, která přenáší síly od pohybu předních kol pomocí přepákování. Toto rozložení umožňuje jednoduchý servis předních tlumičů. Přední tlumiče jsou chráněny kompozitním krytem. Na stejném principu pracuje i zadní zavěšení zadních kol. V tomto případě jsou tlumiče ukotveny k podpoře hlavního oblouku (fialová trubka na obr. 4.2). Přenos sil od pneumatik je zprostředkován stejně jako vpředu pomocí přepákování a táhla. Stabilizátory nejsou jako vpředu paralelně uloženy s tlumiči, nýbrž směřují dozadu.



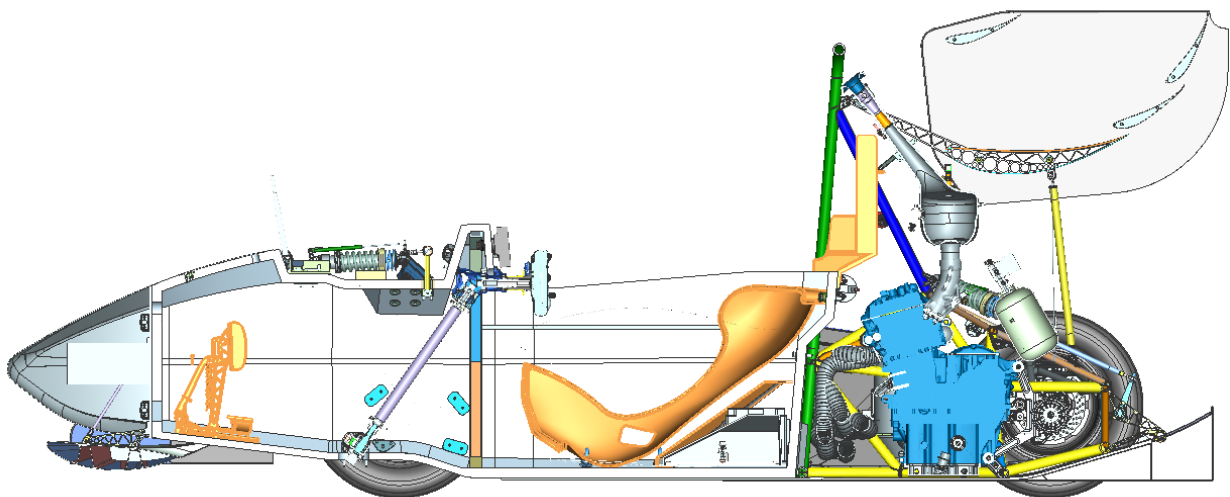
Obr. 4.2 Systém předního a zadního zavěšení (oranžově zvýrazněné) v sestavě UWB06

Pro ovládní směru jízdy vozu slouží systém řízení (Obr. 4.3). Skládá se z volantu, volantové tyče, domku řízení a převodky řízení. Volant tvaru obdélníku je vyroben z laminátu s uhlíkovými vlákny. Tvar madel byl přímo vytvořen skenováním otisků rukou pilota. Volant je připojen k volantové tyči pomocí rovnobokého drážkování s vynecháním jedné drážky tak, aby bylo možné volant usadit jen v jedné poloze a nedošlo k přesazení řízení. Volant je osově zajištěn kuličkou, jenž se uvolní posunutím talířového náboje. Na přední straně volantu se nachází sada ovládacích prvků. Na zadní straně volantu jsou dvě řadící pádla, ovládající sekvenční převodovku za využití pneumatického systému řízení. Volantová tyč přenáší kroučící moment od volantu k převodce řízení pomocí kuželového soukolí. Ty jsou uloženy v držáku (tzv. domku řízení), který je připevněn ke dvěma vertikálním plochám monocoqueu v místě předního oblouku. Převodka řízení obsahuje ozubené kolo s přímým ozubením a ozubený hřeben, který převádí rotační pohyb volantu na příčný posuv táhla připojeného ke kolům. Převodka řízení je umístěna uvnitř monocoqueu. K podlaze je připevněna čtyřmi šroubovými spoji M6.



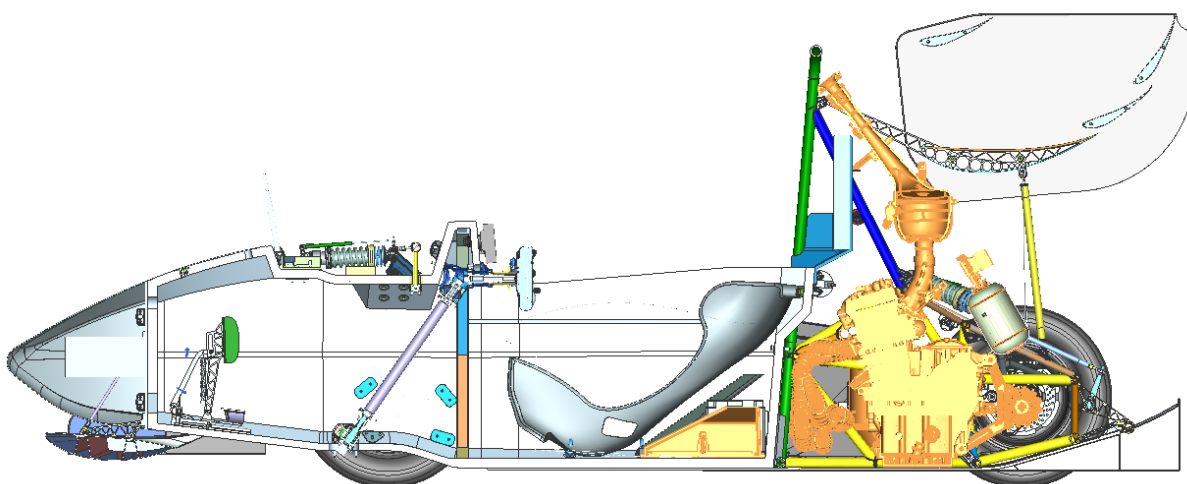
Obr. 4.3 Systém řízení (oranžově zvýrazněno) v řezu sestavou UWB06

Prostor kokpitu (Obr. 4.4), kde se nachází řidič, se sestává z pedálové soustavy, sedačky, firewallu a opěrky hlavy. Pedálová soustava se nachází za přední přepážkou a je připevněna k podlaze vozu pomocí kolejnič umožňující podélný posuv pedálů. Výhodou je vlastní nastavení ergonomie řidiče. Nachází se zde jak pedál ovládající přívod vzduchu do motoru, tak i pedál hydraulicky ovládající brzdovou soustavu. Ta je z hlediska bezpečnosti rozdělena na dva samostatné okruhy, přední a zadní. Sedačka je stejně jako opěrka hlavy vyrobena z uhlíkového kompozitu. Sedačka je vytvořena na základě 3D skanu otisku těla řidiče v modelovací pěně z uhlíkového laminátu a pomocí čtyř úchytů je připevněna k vnitřní stěně rámu. Pod sedačkou se nalézá bezpečnostní přepážka (tzv. firewall), který chrání pilota před vysokými teplotami, které jsou zapříčiněny činností spalovacího motoru, a také před možným požárem, než se pilot dostane ven z vozu. Stavba firewallu je dána pravidly soutěže. V tomto případě je zaručena izolace minimálně 25 mm vzduchovou mezerou a tepelným štítem o tloušťce 0,5 mm.



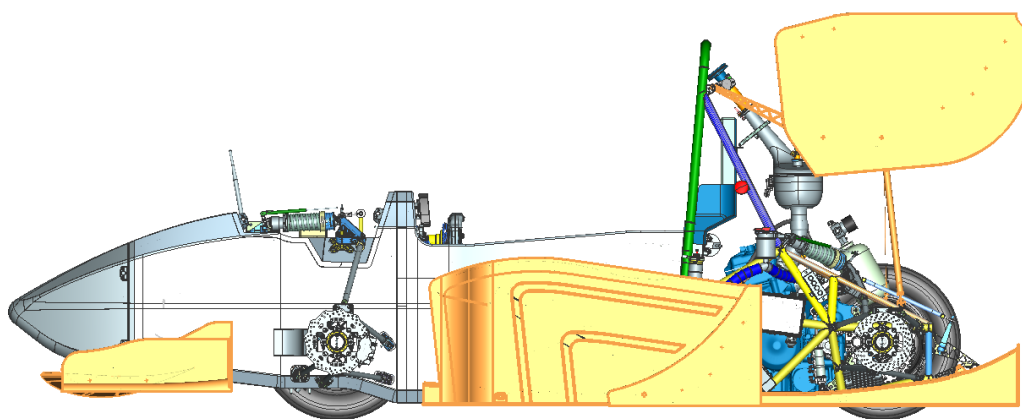
Obr. 4.4 Prostor kokpitu pilota (oranžově zvýrazněno) v řezu sestavou UWB06

V zadní části vozu se nachází pohonná jednotka (Obr. 4.5). Patří k ní spalovací motor, chladicí systém, palivový systém, sání vzduchu, převodovka a sekundární převod. Zážehový čtyřdobý řadový čtyřválec Yamaha R6 2013 je uložený pomocí dvou silentbloků k zadnímu trubkovému rámu. Dosahuje výkonu až 98 koní při 11 500 ot/min a točivého momentu až 65 Nm při 9 200 ot/min. Pomocí spojky ovládané pádly pod volantem je výkon předáván ke čtyřstupňové převodovce. Ta je přišroubovaná k bloku spalovacího motoru. Stejně jako motor je uložena rovnoběžně s osou zadní nápravy. Převodovka je sekvenční, ovládaná stlačeným vzduchem, ten je uskladněn v nádrži nad převodovou skříň. Na výstupu se nachází řetězové kolo sekundárního převodu. Ten trojnásobně snižuje výstupní otáčky z převodovky. Řetězový převod používá článkový válečkový řetěz. Výstupní kolo je uloženo na dutém hřídeli, který je vstupním hřídelem diferenciálu Drexler FS2010. Ten je pomocí dvou ložiskových domků přišroubovaný k převodové skříni. Diferenciálem je výkon přerozdělován na poloosy. Ty jsou kloubově spojeny s diferenciálem a nábojem zadního kola. Levá prochází dutým hřídelem řetězového kola. Nad hlavou motoru je k hlavnímu oblouku připevněno potrubí sání, kde se mimo jiné nachází i škrtková klapka ovládaná pedálem plynu. Sací potrubí přivádí do spalovacího prostoru vzduch nasávaný nad hlavou pilota. Za firewallem pod sedačkou řidiče se nachází palivová nádrž. Chladič je uložený v levém sidepodu. Jeho chladicí účinnost je zvýšena dvěma 185 mm ventilátory. Uvnitř pravého sidepodu se nachází tlumič výfuků. Zde se také nachází vývod výfukových plynů. [2]



Obr. 4.5 Systém pohonné jednotky (oranžově zvýrazněno) v řezu sestavou UWB06

Aerodynamická soustava (Obr. 4.6) monopostu UWB06 je složena z předního křídla, sidepodů, podlahového difuzoru a zadního křídla. Vzduch proudící kolem vozu se prvně setkává s předním křídlem, důsledkem geometrie křídla vzniká přitlačná síla. Tato síla přitlačuje vůz k trati, čímž zlepšuje trakci a ovladatelnost. Přední křídlo se sestává z jednoho hlavního křídla a čtyř menších vedlejších, které usměřují proud vzduchu směrující na přední kola. Dále vzduch proudí přes sidepody, což jsou části vozu lemující boky kompozitního rámu. Stejně jako přední křídlo vytvářejí přitlačnou sílu, mimo to také usměřují proud vzduchu mířící na zadní kola a stabilizují turbulence vzniklé od předních kol. Uvnitř pravého sidepodu se nachází tlumič výfukového potrubí. Na levé straně je ukryt chladicí systém spalovacího motoru. Pod motorem je umístěna další část aerodynamické soustavy, podlahový difuzor. Ten pracuje na principu Venturiho efektu. Vzduch jím proudí čtyřmi postupně se zvětšujícími kanály, kde se urychluje. V důsledku čehož se snižuje jeho tlak a vzniká přitažlivá síla, přitahující vůz k trati. Difuzor proud vzduchu usměřňuje a na výstupu přibližuje jeho rychlost okolí. Tím redukuje odpor vzduchu. Nad zadní nápravou se nachází zadní křídlo. To se skládá z velkého primárního křídla a tří kratších vedlejších. Největší měrou se podílí na vzniku přitlačné síly, a to v oblasti hnací nápravy. Všechny tyto prvky jsou vyrobené z kompozitních materiálů. Boční stěny křídel se skládají z PUR pěny obklopené laminátem s uhlíkovými vlákny. Samotná křídla jsou dvě kompozitní skořepiny s uhlíkovými vlákny spojena lepeným spojem.



Obr. 4.6 Aerodynamická soustava vozu (oranžově zvýrazněno) v sestavě UWB06

5 Specifikace požadavků

5.1 Obecná specifikace požadavků

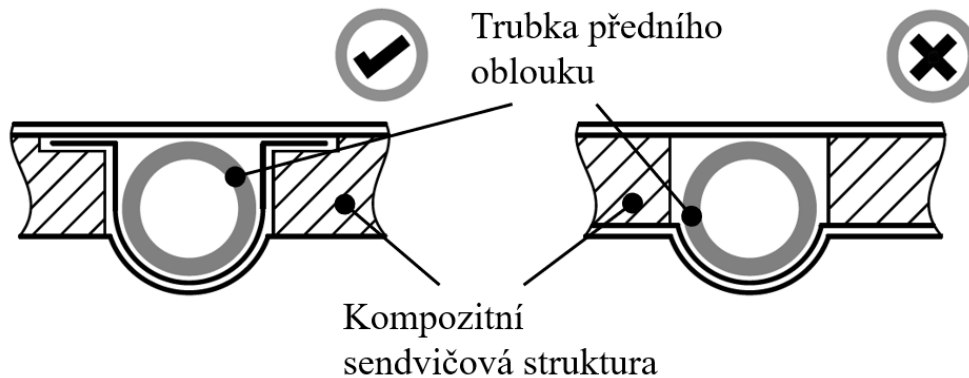
Nejdůležitějším obecným požadavkem kladeným na kompozitní skořepinový rám jsou jednak jeho funkční vlastnosti vůči jeho samotné hmotnosti taktéž i technologie jeho výroby. Monocoque je nejčastěji vyráběn laminováním z negativní formy. Z důvodu jednoduchého vyjmutí dílu z formy je do modelu potřebné začlenit zkosení. Velikost tohoto zkosení se volí nejčastěji min 1,5°. Při přechodu k čistě elektricky poháněnému vozu je také potřeba monocoque přizpůsobit battery boxu, střídači a dalším s nimi spojenými komponenty (kabelové svazky apod.). Battery box je nejčastěji podélně uložen za sedačkou řidiče a pokračuje až do zadní části skořepinového rámu. Tam je poté potřeba vybudovat otvor pro vyjmutí baterie z vozu. Střídač je poté nejčastěji uložen nad baterkou a z vozu se vyjme tažením vpřed po vyjmutí sedačky. K tomu je důležité vytvořit otvor jak pro baterku, tak měnič. V případě děleného skořepinového rámu je důležité zabezpečit správné lícování přední a zadní části vozu z důvodu přenosu zatížení, estetické stránky a z hlediska aerodynamiky. Toho je docíleno stejným tvarem a rozměry stykových ploch, které jsou spojeny pomocí šroubových spojů (viz Pravidlo T 3.16). Boky zadní části monocoque jsou jednoduché rovinné plochy, tím se značně zjednoduší ustavování přípojných bodů zadního zavěšení. Taky plocha, na kterou se připojí podpory hlavního oblouku jsou rovinné, aby došlo k ideálnímu usazení.

5.2 Požadavky kladené pravidly FS

Soutěž Formule Student je od začátku až do konce řízena obsáhlými pravidly. Přičemž FSG určuje pravidla evropských soutěží a FSAE závodů ve zbytku světa. Tyto pravidla se každým rokem obměňují a jejich dodržování je kritické pro splnění technické kontroly a následného připuštění na samotný závod.

Pravidlo T 3.9 přední oblouk

Přední oblouk musí být navržen jako kontinuální a uzavřený díl. Pokud je vyroben z více částí, musí být podpořen uzal-uzal strukturou nebo její ekvivalencí. V bokorysu nesmí žádná část předního oblouku být odkloněna od svislice více než 20°. Je vyžadováno šest přípojných bodů, dva na každé straně připojené k podpoře přední přepážky a dva k podporám předního oblouku, taktéž je nutné dokázat únosnost na 180 kN. Je možná laminace předního oblouku do kompozitní struktury, tj. oblouk musí být obklopený laminátem po celém svém obvodu (viz obr. 5.1). Toto obklopení musí přesahovat nejméně 25 mm na každé straně. Laminát musí mít stejné rozložení jako struktura, ke které se připojuje. [3]



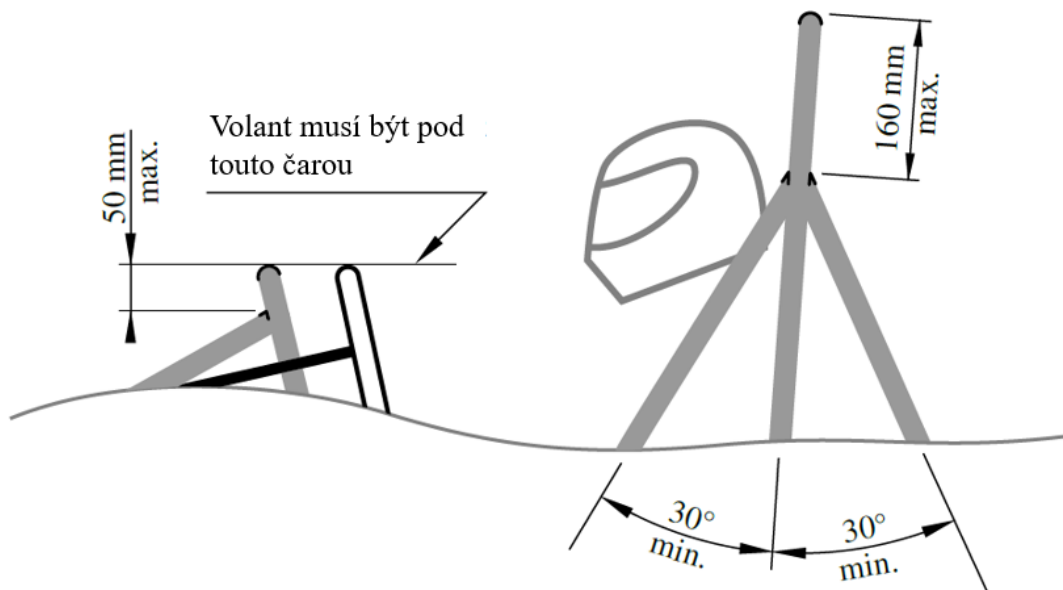
Obr. 5.1 Požadavky na laminaci předního oblouku [3]

Pravidlo T 3.10 podpory hlavního oblouku

Hlavní oblouk musí mít podporu trubkou na každé straně. Podpory hlavního oblouku musí být připojeny k hlavnímu oblouku výše než 160 mm od horního okraje oblouku. Úhel tvořený hlavním obloukem a podporami nesmí být menší než 30° . Podpory musí být rovné a ukotveny přes boční nárazovou strukturu zpět do horního a spodního úchyty hlavního oblouku pomocí uzel-uzel struktury nebo ekvivalentní kompozitní struktury. Pokud nějaký díl připojený k podporám hlavního oblouku přesahuje primární strukturu je potřeba další podpory pro zabránění ohybu při překlopení vozu. [3]

Pravidlo T 3.11 podpory předního oblouku

Podpory předního oblouku nesmí být níže než 50 mm od horní hrany oblouku. Pokud je přední oblouk nakloněn dozadu více než 10° , je potřeba dalších podpor směřujících dozadu. [3]



Obr. 5.2 Požadavky na podpory hlavního a předního oblouku [3]

Pravidlo T 3.13 přední přepážka

Jakýkoliv materiál použitý na přední přepážku musí mít pevnost ve stříhu ekvivalentní 1,5 mm ocelovému plechu. Pokud je přední přepážka částí kompozitní struktury a má průřez tvaru L, její součin modulu pružnosti v tahu a kvadratického momentu průřezu (EI) kolem svislé a boční osy musí být ekvivalentní ocelové trubce splňující požadavky na přední přepážku. Délka úseku kolmého na přední přepážku může být maximálně 25 mm měřené od nejzazšího čela přepážky. [3]

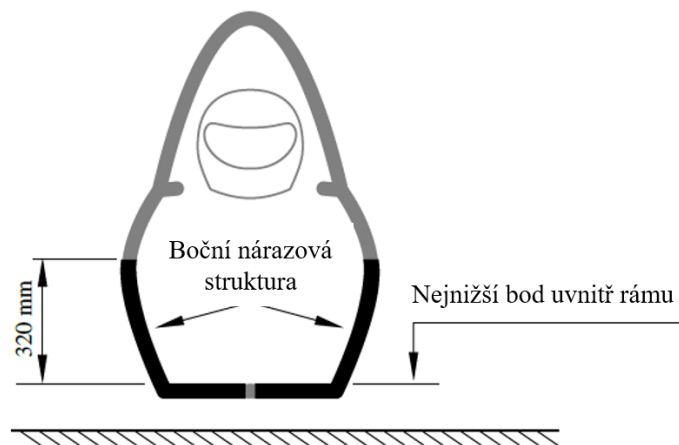
Pravidlo T 3.14 podpory přední přepážky

Pokud jsou přední podpory přední přepážky součástí kompozitní struktury, musí jejich EI být ekvivalentní součtu EI šesti trubek, které je nahrazují. EI svislé strany podpory přední přepážky musí být přinejmenším rovno EI jedné trubce, která ji nahrazuje. Laminát podpor přední přepážky musí mít pevnost ve stříhu minimálně 4 kN. [3]

Pravidlo T 3.15 nárazová struktura

Pokud je boční nárazová struktura součástí kompozitní konstrukce musí splňovat následující:

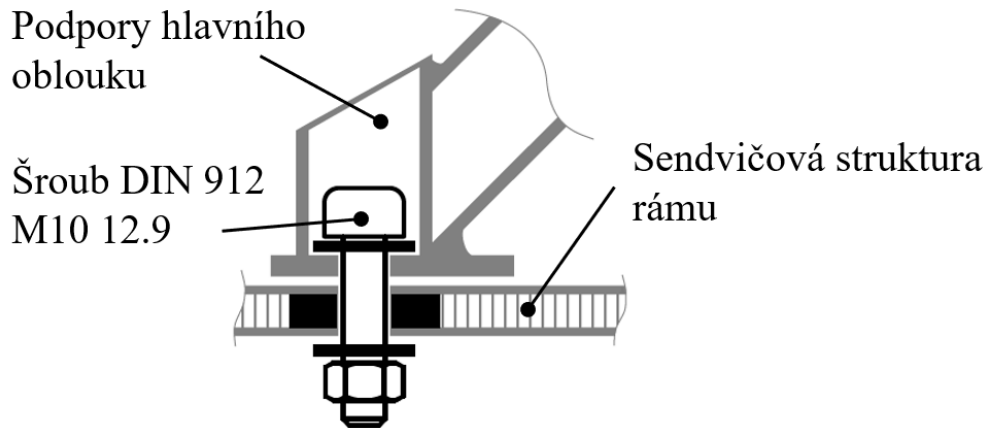
Část konstrukce do výšky 320 mm nad nejnižším bodem uvnitř rámu mezi předním a hlavním obloukem musí mít EI ekvivalentní třem trubkám, jenž je nahrazují. Příklad boční nárazové struktury je na obr 5.3. Svislá nárazová struktura musí mít EI ekvivalentní dvěma ocelovým trubkám a půlka vodorovné podlahy musí mít EI ekvivalentní jedné ocelové trubce. Svislá nárazová struktura musí absorbovat energii odpovídající energii absorbované dvěma ocelovými trubkami a přesahující 65 J. Pevnost ve stříhu po obvodě musí být nejméně 7,5 kN. [3]



Obr. 5.3 Boční nárazová struktura monocoque [3]

Pravidlo T 3.16 šroubové spoje primární struktury

Jsou-li dvě primární struktury přišroubovány k sobě, musí každý přípojný bod přenést 30 kN v každém směru. Každý přípojný bod vyžaduje minimálně dva 8 mm metrické šrouby s třídou pevnosti 8.8 a ocelovou podložku o minimální tloušťce 2 mm. Pro připojení podpor předního oblouku, podpor hlavního oblouku a podpěr podpor hlavního oblouku k primární struktuře je dostačující použití jednoho 10 mm metrického šroubu s třídou pevnosti 8.8, jestliže leží šroub na ose trubky, viz obr. 5.4. [3]



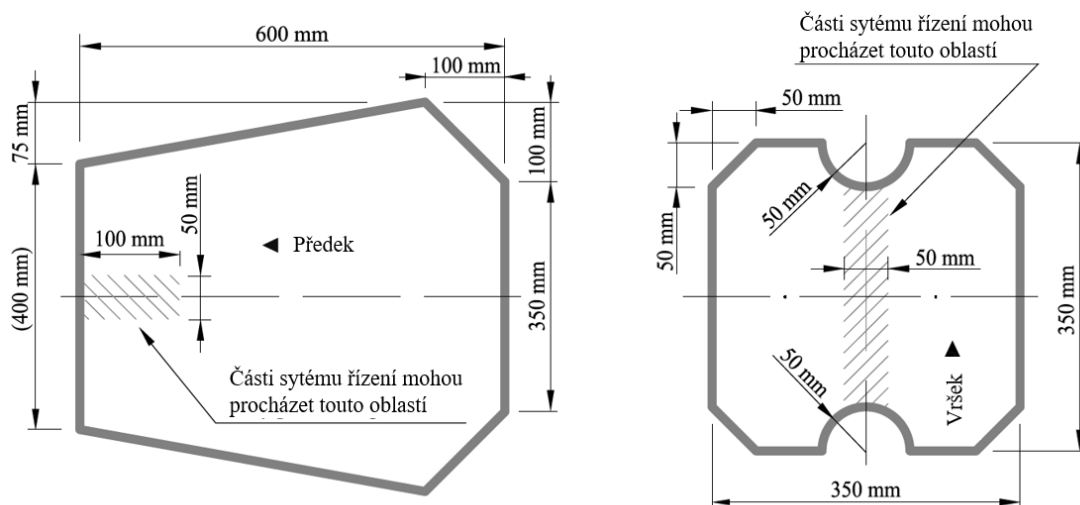
Obr. 5.4 Šroubový spoj podpěr oblouku [3]

Pravidlo T 4.1 otvor kokpitu

Otvor pro kokpit musí být dostatečně veliký pro šablonu ukázanou vlevo na obr.5.5. Tak aby se ve vodorovné pozici vešla ve svislém směru do otvoru kokpitu až po spodní část boční nárazové konstrukce. Šablona může být posunuta dopředu i dozadu. Pokud se boční nárazová struktura neskládá z trubek, pak šablona musí projít otvorem kokpitu až do výše 320 mm nad nejnižším vnitřním bodem rámu mezi předním a hlavním obloukem. Volant, sedačka a všechna vnitřní výplň může být v prostoru šablony zanedbána. [3]

Pravidlo T 4.2 vnitřní průřez kokpitu

Kokpit musí mít volný vnitřní průřez pro umístění šablony jako je vpravo na obr. 5.5. Toto musí splnit od otvoru kokpitu až do 100 mm od pedálů směrem dozadu, které jsou ustaveny v nejzadnější poloze. Šablona může být posunuta nahoru i dolů. Volant a jakkoliv výplň, která lze vyjmout bez použití nářadí a s řidičem v sedačce, může být zanedbána v prostoru šablony. Dolní končetiny řidiče musí být celé uvnitř primární struktury v normální poloze řidiče s chodidly na pedálech. V bočním ani v předním pohledu nesmí žádná část dolních končetin řidiče přesahovat primární strukturu. [3]



Obr. 5.5 Šablona otvoru pro kokpit (vlevo) a šablona vnitřního průřezu kokpitu (vpravo) [3]

Pravidlo T 4.3 Percy

Když je normálně usazen a připoután zádržným systémem musí helma 95procentního muže a všech týmových pilotů splňovat následující:

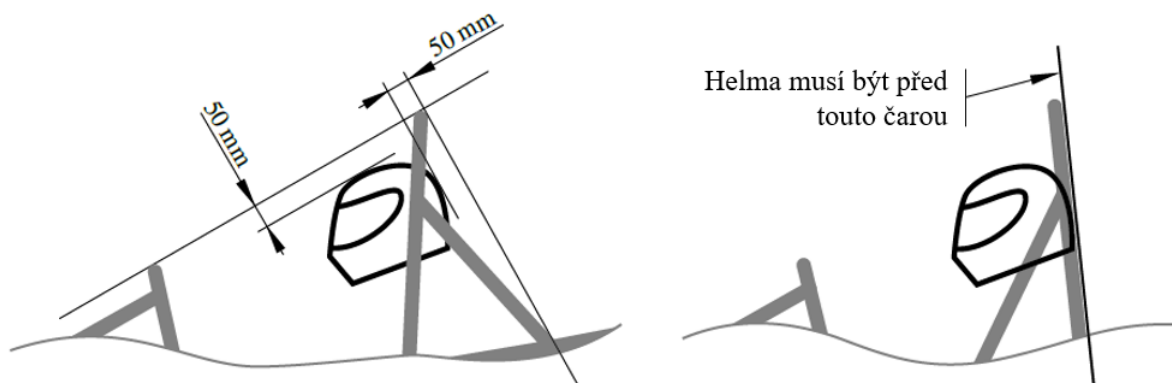
- musí být minimálně 50 mm od spojnice vršků hlavního oblouku a předního oblouku
- musí být minimálně 50 mm od spojnice vršku hlavního oblouku a spodního bodu podpor hlavního oblouku, pokud směřuje dozadu
- nesmí být dál vzadu než hlavní oblouk, pokud podpory hlavního oblouku směřují vpřed

95procentní muž je reprezentován 2D skicou sestávající se z dvou kružnic o průměru 200mm spojených 490mm dlouhou čarou a kružnice o průměru 300mm, která je spojena s horní kružnicí 280mm čarou (viz Obr. 5.7).

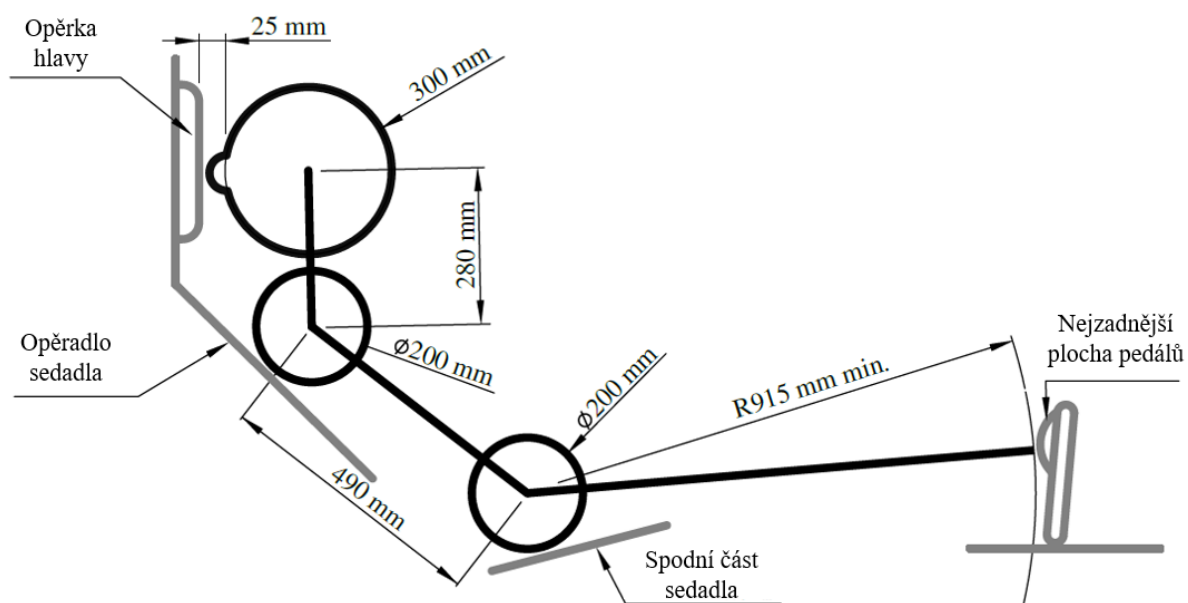
Skica musí být uložena ve voze následovně:

- Sedačka v nejzazší poloze
- Pedály v nejpřednější poloze
- Spodní kružnice uložena na spodku sedačky, vzdálenost od pedálu musí být minimálně 915 mm
- Prostřední kružnice uložena na zadní straně sedačky
- Horní kružnice uložena 25 mm před opěrkou hlavy

[3]



Obr. 5.6 Minimální vzdálenosti od helmy [3]



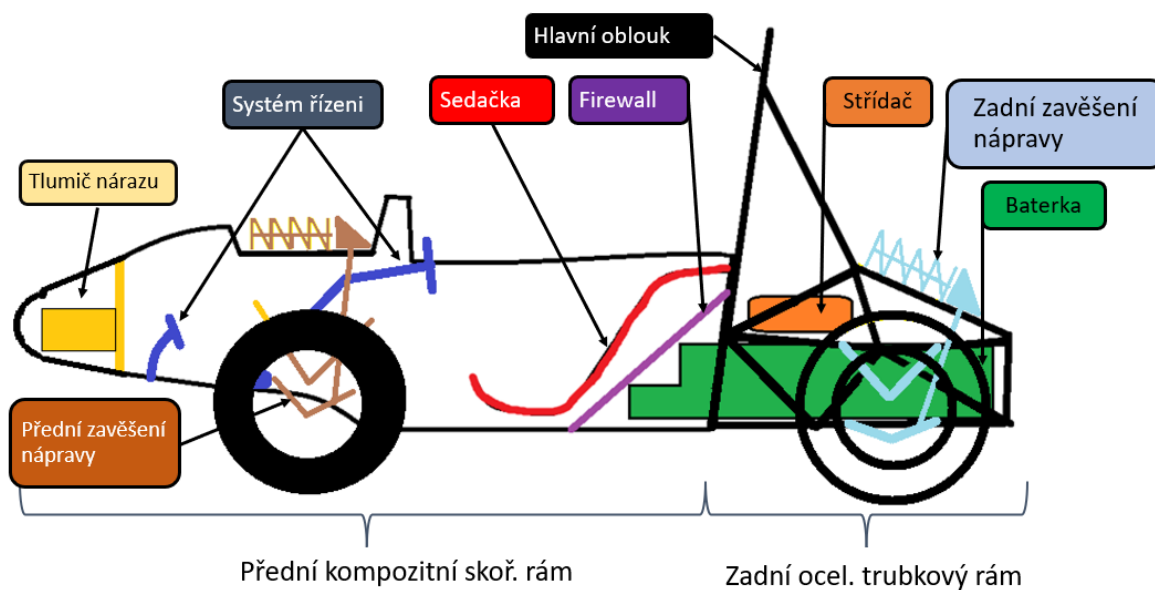
Obr. 5.7 Skica 95procentního muže [3]

6 Konceptní návrh skořepinového rámu

Při návrhu skořepinového rámu byly vytvořeny tři základní konceptní varianty řešení. Každá varianta má své silné a slabé stránky, a tak nelze jednoznačně vybrat to nejlepší řešení. Pomocí morfologické tabulky byla zvolena varianta, která splňuje požadované vlastnosti (nízká hmotnost, výrobitelnost apod.)

6.1 Varianta I. - Hybridní rám

V této variantě je využito tzv. hybridního rámu, který je tvořen kombinací předního kompozitního skořepinového rámu a zadního ocelového trubkového rámu. Konceptce v hlavních prvcích vychází z předchozího monopostu s označením UWB06 z roku 2019. Přední část bude kompozitní skořepina s minimálními úpravami pro splnění nových pravidel. Bude spojit prvky jako prostor kokpitu, nárazový prvek, přední zavěšení nebo aerodynamické prvky. Zadní část bude svařovaný trubkový rám. Nebude nyní obsahovat motor a převodovku, ale battery box pohánějící elektromotory v kolech a střídač měnící velikost stejnosměrného napětí. V předním skořepinovém rámu je zapotřebí otvoru dostatečně velkého pro battery box, který bude uložen za sedačkou pilota a částečně zasahovat do prostoru předního monocoqueu. Na tento trubkový rám se přišroubuje kompozitní karosérie z uhlíkových vláken. Na trubkový rám se připojí také zadní přitlačné křídlo.



Obr. 6.1 Konceptní návrh hybridního rámu

Výhody

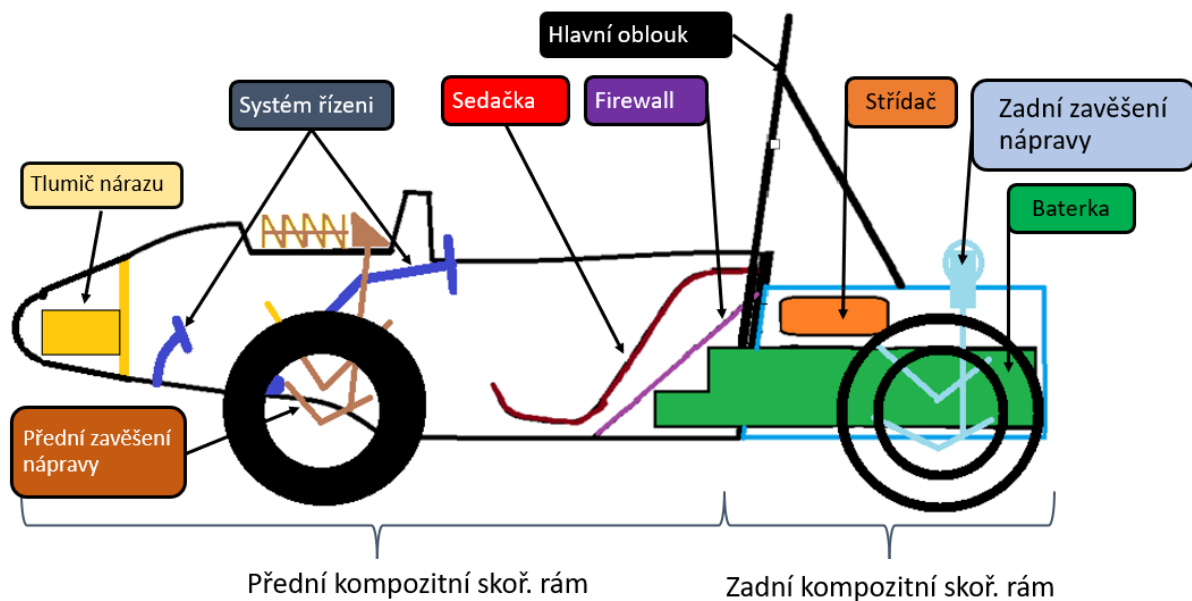
- Jednoduchý návrh (úprava existujícího konceptu)
- Jednoduchá výroba (úprava existujících forem)
- Méně finančně nákladná výroba (oproti jednodílnému monocoqueu)
- Výrobitelnost (omezený prostor autoklávu v laboratořích ZČU)

Nevýhody

- Vyšší hmotnost (oproti jednodílnému monocoqueu)
- Potřeba separátní karosérie

6.2 Varianta II. - Dělený skořepinový rám

U této varianty bylo použito kombinace kompozitního skořepinového rámu totožné konstrukce jako u předchozí varianty. Přední část monocoqueu taktéž spojuje stejné prvky jako prostor kokpitu, crash box, přední zavěšení a aerodynamické prvky. Avšak zadní část není tvořena prostorovým trubkovým rámem, ale též skořepinovou kompozitní strukturou. Hlavní oblouk byl přesunut blíže k řidiči a byl připojen nikoliv, jak to bylo doposud k zadní stěně monocoqueu, ale k vnitřní boční stěně. Zadní část rámu je stejně jako přední část vozu vyrobena z uhlíkového laminátu. Obě poloviny poté byly spojeny šroubovými spoji. V zadní polovině monocoqueu byla uložena baterka a nad ní střídač. V zadní stěně vozu byl navržen otvor sloužící k vyjmutí battery boxu z vozu. Střídač se bude vyndávat na opačnou stranu. K tomu byla potřeba navrhnout vhodný otvor ve stěně mezi oběma polovinami rámu. Tento otvor musel být dostatečně velký i pro battery box, který byl uložen za sedačkou pilota a tím částečně zasahoval do prostoru předního monocoqueu. Zadní polovina monocoqueu také slouží i jako nosný prvek pro zadní křídlo, podpory hlavního oblouku a zadního zavěšení nápravy. Tlumiče byly uloženy na vrchu zadního poloviny vozu rovnoběžně s osou kol.



Obr. 6.2 Konceptní návrh děleného skořepinového rámu

Výhody

- Menší hmotnost oproti trubkovému rámu
- Vyšší torzní tuhost
- Není potřeba separátní karoserie

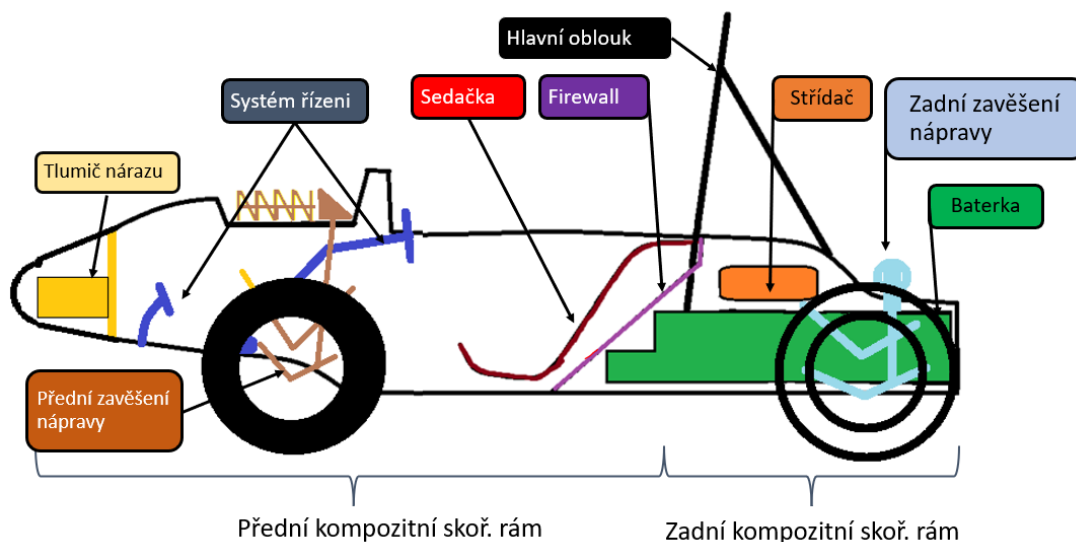
- Lze použít menší autokláv

Nevýhody

- Vyšší hmotnost než jednodílný skořepinový rám
- Komplikovanější výroba (je potřeba více forem)
- Vyšší výrobní náklady (oproti trubkovému rámu)
- Kritický spoj přední a zadní části
- Tvar omezený technologií (nutné dělicí roviny a úkosy k odformování)
- Konstrukčně náročnější

6.3 Varianta III. - Jednodílný skořepinový rám

Tato koncepce spočívá v návrhu zcela nového rámu, který bude tvořen kompozitní skořepinovou strukturou vyrobenou z jednoho celistvého dílu. Z hlediska usnadnění výroby se ponechá nynější koncept předního zavěšení vozu. Tlumiče budou uloženy ve výklenku na vršku rámu, rovnoběžně s osou vozu. Budou absorbovat energii od vertikálního pohybu kol pomocí přepákování. Z monopostu UWB06 se také převeze vpředu uložený tlumič nárazu, i s podpůrnou hliníkovou deskou a systémem řízení předních kol. Prostor kokpitu bude obsahovat sedačku pilota, ochranný firewall, chránící pilota před vysokými teplotami, a částečně i elektroinstalaci. Ta bude z velké části ležet v oblasti zadní nápravy. Pro jednodušší uchycení budou ramena uložena na rovinné boční ploše monocoqueu. Tlumiče budou ležet na vrchu zadní poloviny vozu, rovnoběžně s osou kol. Budou ze shora zakryté zadním přitlačným křídlem. Elektroinstalace bude obsahovat baterku a střídač nad ní. Za firewallem bude uložen i hlavní oblouk a uchycení ramenních pásů.



Obr. 6.3 Konceptní návrh jednodílného skořepinového rámu

Výhody

- Nízká hmotnost
- Odstranění kritického spojení přední a zadní části monocoqueu
- Není potřeba separátní karoserie

Nevýhody

- Nemožné vyrobit v našich podmínkách (malý autokláv)
- Komplikovaný návrh
- Drahá výroba
- Tvar omezený technologií (dělicí rovina a úkosy k odformování)

6.4 Morfologická analýza

Tabulka 1 Morfologická tabulka, 1- nejhorší, 5 - nejlepší

	Hybridní skoř. rám	Dělený skoř. rám	Jednodílný skoř. rám
Cena	4	3	2
Tuhost	2	4	5
Hmotnost	1	4	5
Vyrobitelnost	4	3	2
Návrh	3	4	1
Celkem	14	18	15

V tabulce 1 jsou v prvním řádku tři varianty možných konstrukcí monocoqueu, mezi kterými byla vybrána ta nejlepší. V prvním sloupci jsou pak vypsány nejdůležitější vlastnosti, podle kterých byla vyhodnocována každá varianta. Každá charakteristika byla ohodnocena jedním až pěti body. V tomto případě byla prvořadým charakterem cena. Jednou z disciplín v soutěži Formule Student je i tzv. Cost Report (každý tým zpracovává analýzu vydaných finančních prostředků na nákup potřebného materiálu a výrobu dílů na monopost, kterou na soutěži i prezentují). Tato disciplína je hodnocena až 100 body z celkových 1000. Nejhorší známkou byl v této kategorii ohodnocen jednodílný monocoque. Kdy výroba forem a velké množství kompozitních materiálů je finančně náročné. [3]

Následující rozhodovací charakteristikou byla tuhost celé konstrukce. Tuhost je důležitým atributem podílejícím se na jízdních vlastnostech vozu při průjezdu zatáčkami. To může velice ovlivnit cílový čas při dynamických disciplínách. Tady vítězí jednodílný monocoque, který nemá žádné spoje a má po celé dále konstantní tuhost.

Neopomenutelnou charakteristikou byla i hmotnost monocoqueu. Poněvadž je rám největší součástí vozu, ovlivňuje výrazně její celkovou hmotnost. Ta je rozhodujícím prvkem v dynamických disciplínách. Čím lehčí vůz, tím rychlejší a lépe ovladatelný. Zde byl ohodnocen pouhým jedním bodem hybridní rám, protože jeho svařovaná trubková konstrukce nemůže konkurovat kompozitním strukturám.

Posledním rozhodujícím prvkem byl návrh. Toto kritérium nikterak neovlivňuje úspěšnost vozu při soutěži, ale dělí jednotlivé varianty podle obtížnosti jejich návrhu a tím i potřebného času při něm stráveného. K tomu se váže i další druhořadá vlastnost, vyrobiteľnosť. Tím je myšlena jak fyzická, tak i finanční časová náročnosť. Nejméně body byl ohodnocen jednodílný skořepinový rám. Důvodem je nesnadnosť technologie a nutnosť většího autoklávu, než který je k dispozici v laboratořích ZČU.

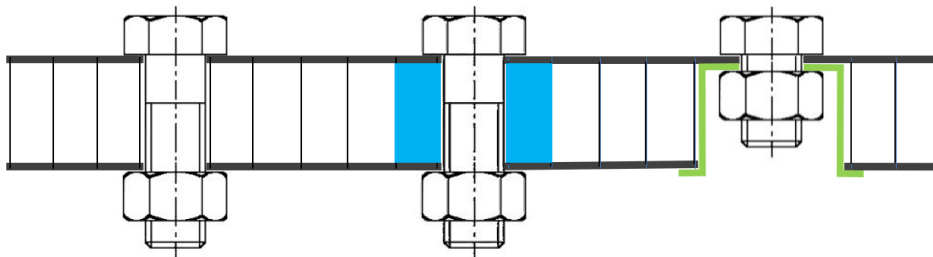
Z tabulky 1 je zřejmé, že v tomto případě nejvýhodnější variantou je dělený skořepinový rám. Výrazným důvodem je omezená velikost dostupného autoklávu v laboratořích ZČU. Taky nelze opomenout vlastnosti uhlíkového kompozitu převyšující vlastnosti ocelového rámu.

7 Návrh skořepinového rámu

7.1 Šroubový spoj s insertem

Při použití klasického šroubového spoje pro spojení skořepinových dílů může docházet vlivem tlaku předpětí ke zborcení jádra. Použitím vložky (insertu) se tak zabrání selhání šroubového spoje. Nicméně oblast insertu je stále nejslabším místem kompozitní struktury. Proto je návrh takového spoje komplexní záležitostí závislá na vzdálenosti od hrany spojovaných součástí, materiálu a rozměrech insertu, druhu lepidla nebo i namáhání. Během působení vnějšího zatížení hrozí nebezpečí vytržení insertu z kompozitní skořepiny. To lze snížit použitím podložek, které rozloží působící tlak. Podložky jsou stejného tvaru a rozměru jako samotný insert. Provedení insertů není normalizované a je tak jejich návrh zcela na vůli konstruktéra. Inserty lze rozdělit podle typu vlepění do sendvičové struktury na teplý a studený lepený spoj. Rozdíl je, zda se insert vlepí do skořepiny před anebo po laminaci dílu. Dále se lze setkat s průchozími nebo neprůchozími inserty. [4]

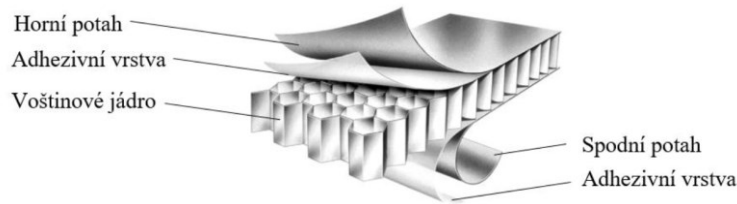
Pro zvolenou koncepční variantu bylo vybráno stejné provedení insertů jako v případě UWBO6, a to teplé lepené spoje s průchozími inserty (viz Obr. 7.13 - uprostřed). Důvodem bylo použití osvědčeného konceptu z předešlých let. Materiál insertů musí být v tomto případě odolný vůči vysokým teplotám, mít příhodné adhezní vlastnosti pro lepení a samozřejmě odolný vůči namáhání v tlaku. Mezi možné materiály patří polymer PEEK CF30, hliníková slitina EN AW 7075 nebo CFRP vložka. Na základě nízké hustoty a ceny byl vybrán polymer s obsahem uhlíkových vláken PEEK CF30. Odlišný přístup byl použit při návrhu insertů pro uchycení boxu baterky. Aby ze spodu nevyčníval zbytek šroubu s maticí, což by mohlo být nebezpečné při světlé výšce vozu pouhých 50 mm, byl navržen speciální insert miskovitěho tvaru (viz Obr. 7.13 - vpravo). Kvůli tenké stěně by dříve použitý polymer nevydržel zatížení. Proto byli tyto inserty obráběny z hliníkové slitiny EN AW 7075. Inserty byli vlepěny do otvorů v sendvičové struktuře až po laminaci. [4]



Obr. 7.1 Zleva šroubový spoj bez vyztužení insertem, spoj vyztužený průchozím insertem
a spoj vyztužený miskovitým insertem

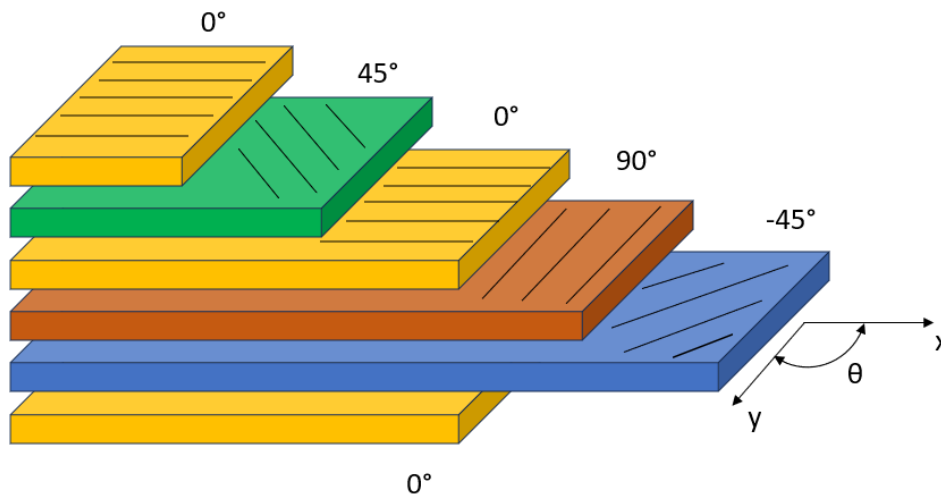
7.2 Skladba laminátu sendvičového panelu

Sendvičové kompozitní panely mají relativně nízkou hmotnost při zachování celkové tuhosti. Sendvičový panel se skládá z vnějšího potahu, který má vysoký modul pružnosti v tahu, a z vnitřního jádra, který má nízkou měrnou hmotnost a vysoký modul pružnosti ve smyku. Materiál potahu bývá nejčastěji uhlíkový nebo skelný laminát, lze se též setkat i s hliníkovými deskami nebo aramidovým laminátem. Jádra bývají nejčastěji z polyuretanové pěny, hliníkové voštiny nebo balzového dřeva. Volba použitého materiálu závisí na zatížení, vlivu okolního prostředí, ceně a způsobu výroby. [4] [9]



Obr. 7.2 Struktura sendvičového kompozitního panelu [4]

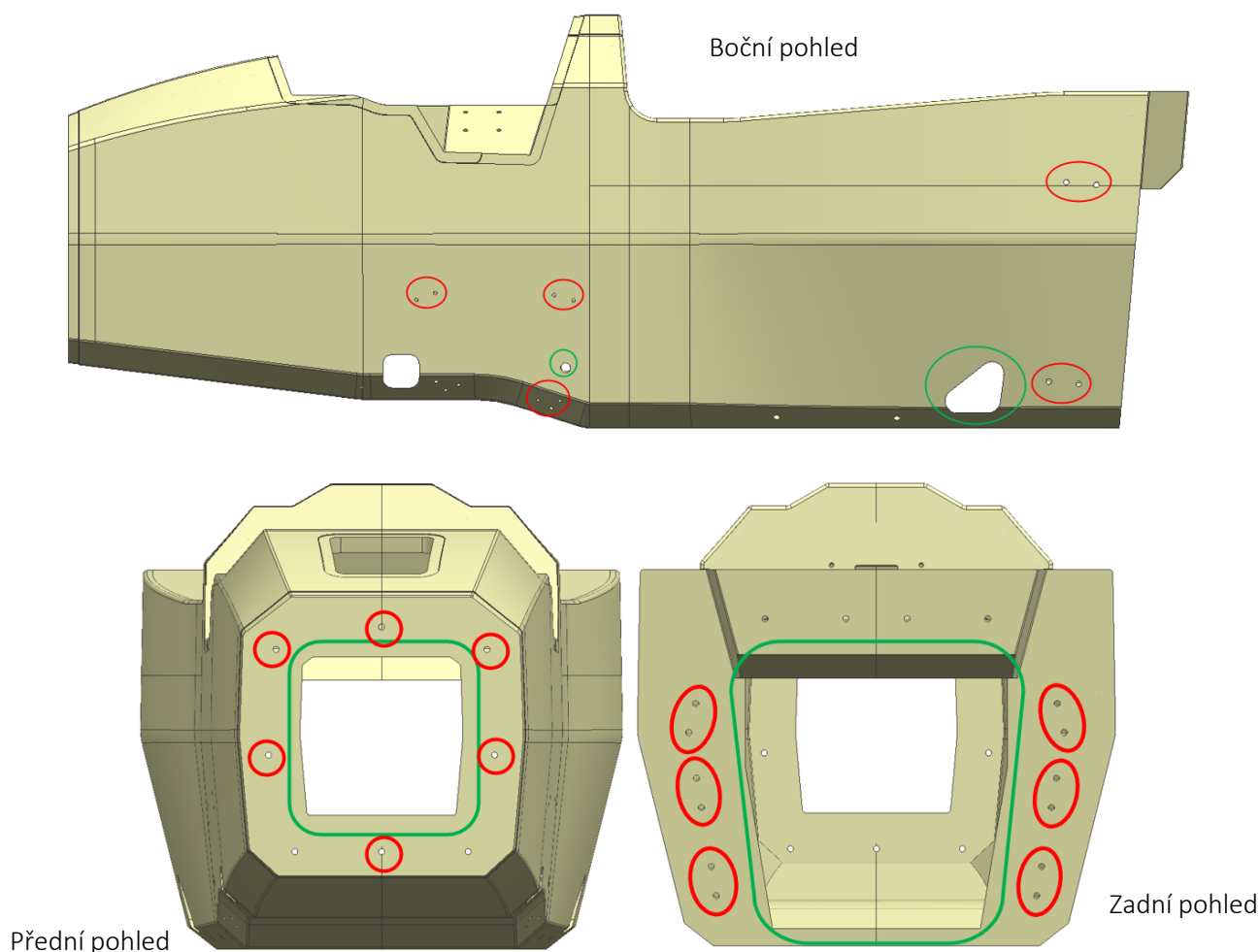
Struktura sendvičového kompozitu monocoqueu byla z velké části převzata z předešlého vozu UWB06. Jednak je tato struktura prověřená, druhak se řadí mezi ty nejlepší vyskytující se v soutěži FS, a to díky nízké hmotnosti a vysoké tuhosti. Na potah panelu byla vybrána předimpregnovaná tkanina CC 200 od firmy Kordcarbon. Vlákna jsou uhlíková Toray T300 a matrice kompozitu je epoxidová pryskyřice. Vnější potah byl složen ze šesti vrstev se skladbou tkaniny [0/45/0/90/-45/0] (Obr. 7.3), jedinou výjimkou je vnější potah přední přepážky ten je složen z 12 vrstev se skladbou [0/45/0/90/-45/0/0/45/0/90/-45/0]. Na vnitřní potah byla vybrána stejná tkanina jako na vnější potah. Zachovala se i skladba jednotlivých vrstev laminátu. Jedinou změnou je skladba vnitřního potahu zadní plochy na spoji předního a zadního monocoqueu, která má nyní 12 vrstev. Kdežto vnitřní potah přední přepážky má pouze šest vrstev. Tloušťka šesti vrstev je 1,3 mm. Jádro je tvořeno voštinou z hliníkové slitiny EN AW 5056. Voština je složena z buněk, ty představují trubičky s tloušťkou stěny 0,2 mm a průřezem pravidelného šestiúhelníku o výšce 3,2 mm. Tloušťka jádra je 20 mm. [4]



Obr. 7.3 Schéma skladby tkaniny

7.3 Návrh předního skořepinového rámu

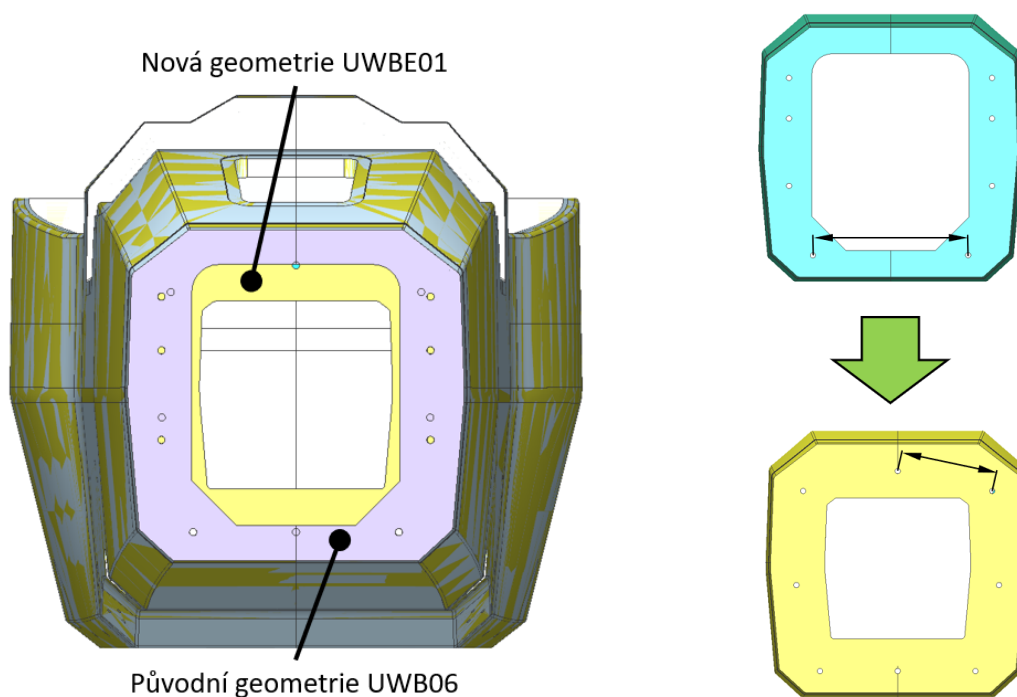
Z předchozího monopostu UWB06, postaveného v roce 2019, byla převzata základní geometrie skořepiny. Výhodou je možnost znovu použít již vyrobené formy, což značně snižuje výrobní náklady, zjednodušuje práci a umožňuje se soustředit na komplikovanější prvky vozu. Velkou výhodou je také znovupoužití odzkoušeného a použitého konceptu z minulých let. S možným odstraněním nedostatků, které se projeví až při provozu.



Obr. 7.4 Změny provedené na předním monocoqueu (červeně-změna polohy, zeleně-změna geometrie)

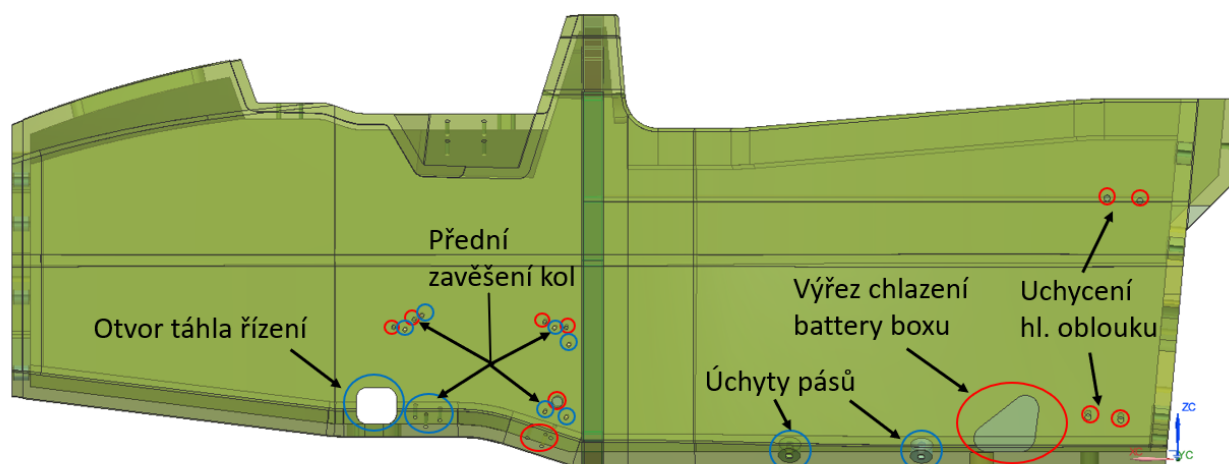
Jelikož se některé části pravidel od roku 2019 změnili, byla potřeba určité části jim přizpůsobit. K největšímu přepracování došlo v oblasti přední přepážky. Pravidla nově určují minimální vzdálenosti mezi šrouby, aby byly rovnoměrně rozprostřeny po obvodu spojovaných součástí. Pomocí nich byl k monocoqueu připevněn nárazový prvek a přední křídlo. Jediné krajní spodní šrouby (neoznačené na Obr. 7.4 – přední pohled) byly ponechány na stejném místě, protože jejich poloha nebyla v rozporu s požadavky pravidel. Navíc by se jejich posunutím muselo znovu navrhnut uchytení předního křídla, a to by byl nepotřebný, časově i finančně náročný, zásah.

Další omezující podmínkou je minimální vzdálenost otvoru od hrany kompozitního panelu. Pokud by byl šroubový spoj moc blízko hraně skořepiny mohlo by dojít k vytržení šroubového spoje spolu s insertem. Jedná se tedy o slabé místo. Dále je potřeba dodržet minimální šířku kompozitního panelu. Všechny tyto hodnoty jsou určeny v závislosti na materiálu, počtu a orientaci vrstev kompozitu, průměru šroubů a dalších parametrech pomocí excelových tabulek vytvořených přímo pořadatelem soutěže.



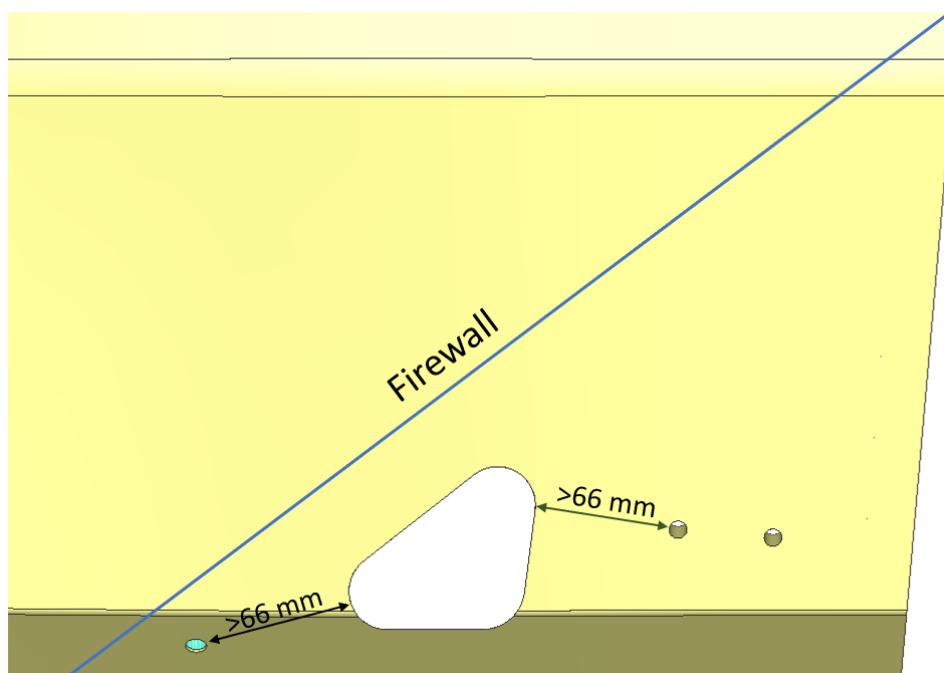
Obr. 7.5 Změna geometrie přední přepážky

Při přechodu k čistě elektrickému pohonu byly umístěny do nábojů kol elektromotory. Důsledkem toho muselo být nově navrženo zavěšení kol a jeho uchycení na monocoqueu. V bočním pohledu je tak zřejmé jiné rozmístění otvorů pro uchycení předního zavěšení. Jedinou výjimkou je přední spodní uchycení, kde bylo možno použít staré přípojné body, přičemž se jen prodloužilo vysunutí konzolového držáku. Eliminace potřeby dalších nových otvorů ve formě, zase o něco snížila časovou i finanční náročnost. Ze stejného důvodu bylo i uložení systému řízení předních kol, včetně otvorů pro táhla řízení, převzato z UWB06. Protože je energie od střídače vedena k motorům kabely, které podle pravidel musejí být umístěny uvnitř ochranné obálky, tj. rámu. Musí být v místě předního zavěšení vytvořen otvor pro přivedení kabelů k motorům. Tento otvor má průměr 15 mm.

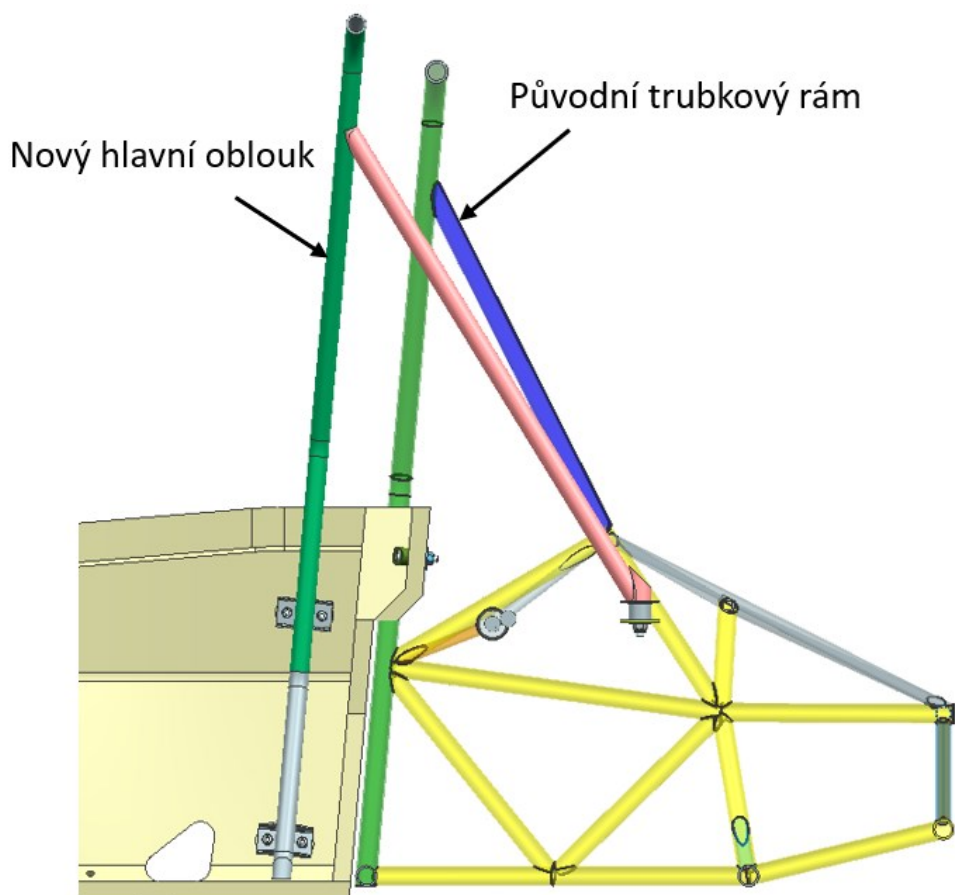


Obr. 7.6 Boční pohled na změny předního monocoqueu (červená-nová geometrie, modrá-původní geometrie)

V zadní části se přesunuly otvory pro přišroubování hlavního oblouku k rámu. Ten byl součástí trubkového rámu u předchozího vozu. Začlenění uchycení hlavního oblouku do místa připojení obou částí rámu by bylo složité jak z pohledu pevnostního, tak i zástavbového prostoru. Proto byl nyní posunut více dopředu do prostoru kokpitu. Z původní pozice na zadní straně monocoqueu se přesunuly díry na bok monocoqueu. Kde se vespod také nachází otvor pro přívod vzduchu do monocoqueu. Články v battery packu se při zatížení zahřívají a v teplejších oblastech provozu by to mohlo výrazně snížit kapacitu. Pro tento stav se se přes krátký svod vhání k battery boxu vzduch. Ten je dovnitř tlačěn přirozeně při jízdě. Samotný otvor je trojúhelníkového tvaru. Na jedné straně je omezen firewallem, na druhé straně otvory pro připojení hlavního oblouku, od kterých musí mít dostatečnou vzdálenost, jinak by mohlo dojít k vytržení insertu.

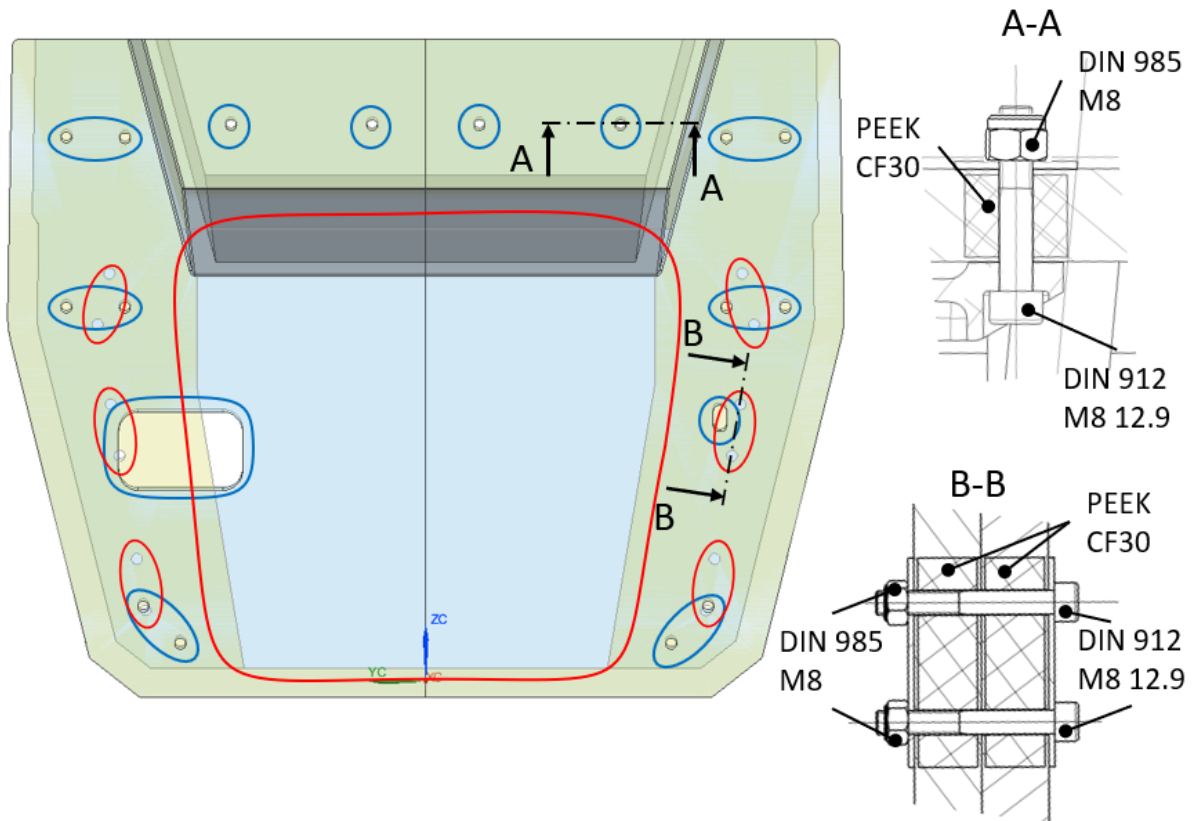


Obr. 7.7 Pohled na boční výřez chlazení battery boxu



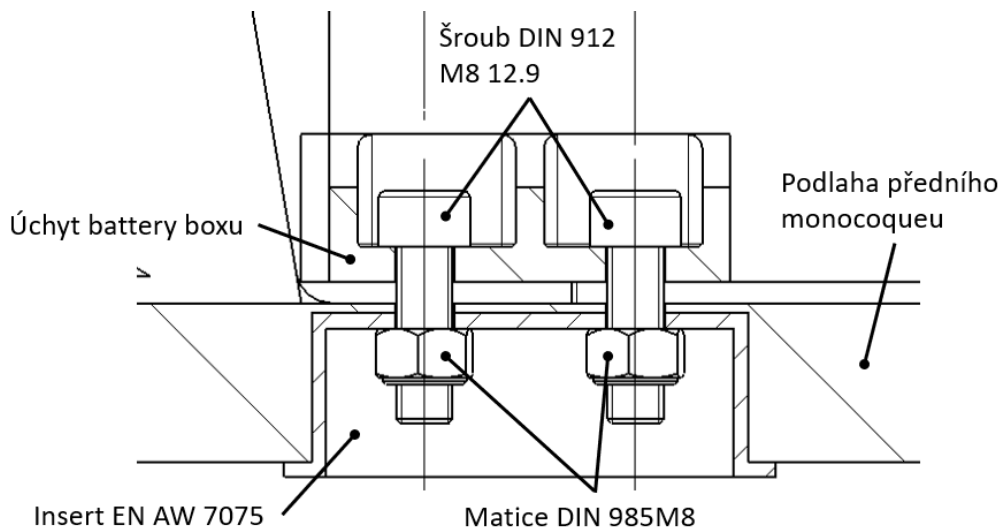
Obr. 7.8 Posunutí hlavního oblouku

Nyní bylo nutné energii potřebnou pro pohon motorů uskladnit. K tomu slouží battery box. Ten se nachází za sedačkou řidiče a směřuje dále do zadního monocoque. Bylo snahou umístit battery box co nejbližší středu vozu a co nejnižší, jelikož se svou hmotností ~ 65 kg má značný vliv na výsledné rozložení hmotnosti vozu a jeho dynamické vlastnosti během jízdy. V zadní ploše předního rámu bylo nutné vytvořit otvor pro vyjmutí boxu. S ohledem na ergonomii při vyjímání boxu z vozu by bylo příhodné volit větší rozměry otvoru. Avšak byla potřeba dodržet minimální vzdálenost 66 mm od šroubových spojů k hraně laminátu. Kompromisem je tedy otvor tvaru lichoběžníku se vzdáleností od battery boxu 5 mm ve spodu. Navrchu navazuje na otvor pro střídač, který přeměňuje výstupní hodnoty z battery boxu pro fungování motorů a dalších zařízení. Střídač byl umístěn 5 mm nad battery boxem, aby se dodržela mezní výška panelu pro ramenní pásy. A nedošlo k jeho prolomení při zatížení. Nakonec došlo ke změně rozmístění přípojných bodů předního a zadního monocoque a odstranění původních otvorů pro palivové potrubí a kabeláž. Beze změny se převzali i přípojné body ramenních pásů.



Obr. 7.9 Změna zadní části předního monocoqueu (červená-nová geometrie, modrá-původní geometrie)

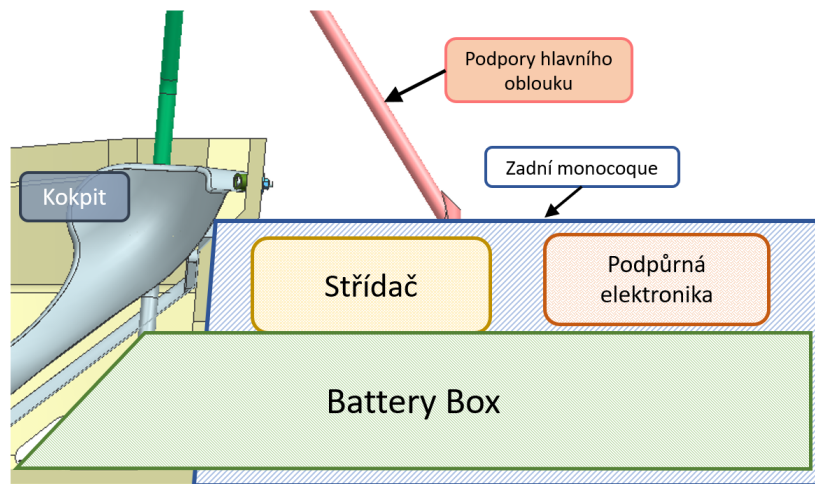
Převážná část geometrie podlahy rámu byla převzata z UWB06. K jediné změně došlo při vytvoření kapes pro dva miskovitá inserty. Ty jsou součástí úchytů battery boxu k podlaze monocoque. K tomuto řešení se dospělo, poněvadž při použití klasického insertu by podložka, matice a konec šroubu byli nebezpečně blízko země.



Obr. 7.10 Přední uchycení battery boxu k rámu

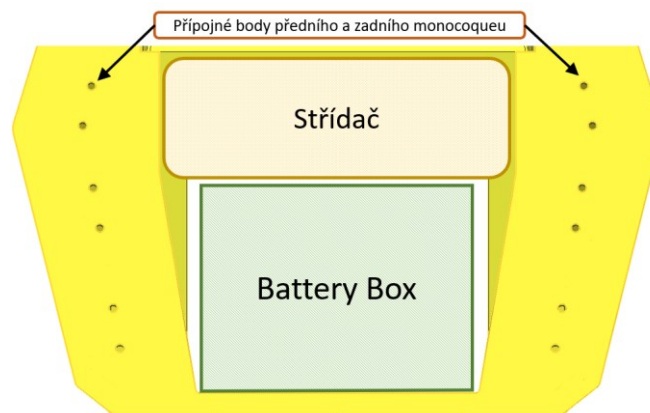
7.4 Návrh zadního skořepinového rámu

Zadní část monocoqueu byl navržen jako náhrada pro předešlý trubkový rám, který nesl spalovací motor. Návrh navazuje na zvolenou koncepční variantu s děleným kompozitním skořepinovým rámem (viz kapitola 6.2). Zadní monocoque musí uvnitř pojmout baterku i se střídačem, jelikož pravidla nařizují jejich ochranu nárazovou strukturou. Taktéž je chrání před vlivy okolního prostředí jako je prach nebo voda. K rámu je taktéž připojeno zadní křídlo a zavěšení zadních kol.



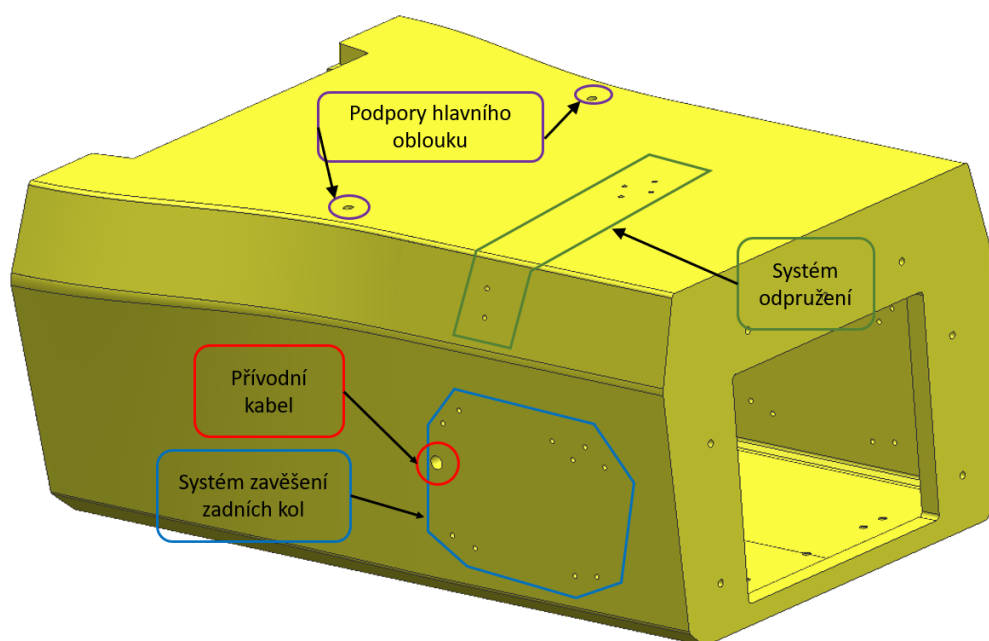
Obr. 7.11 Schéma zadního monocoqueu a navazujících funkčních celků

K přední struktuře je zadní skořepinový rám připojen šesti šroubovými spoji na každé straně. Každý přípojný bod, tj. dva šroubové spoje se společným oválným insertem, je dimenzován na zatížení silou o 30 kN ve všech směrech. V předu navazuje zadní monocoque na zadní plochu předního monocoqueu, tím dojde ke správnému dosednutí ploch a aerodynamicky hladkému přechodu. Dosedací plochy jsou navíc slepeny vysokopevnostním lepidlem ve formě MS polymeru (Mamut Glue). Jednak to zabraňuje vniknutí vody k elektronice a taktéž přispívá k tuhosti a pevnosti spoje. Výhodou tohoto typu lepidla je možnost snadného odstranění z kontaktních ploch. Nad předním otvorem pro box baterky bylo potřeba vytvořit vybrání pro panel ramenních pásů, které zčásti zasahují do stropu zadního monocoqueu. Jde o kompromis mezi výškou panelu ramenních pásů a boční nárazové struktury.



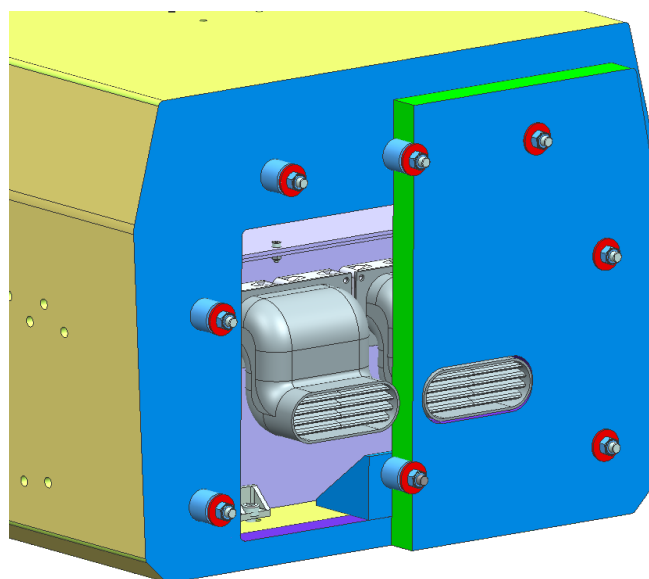
Obr. 7.12 Přední pohled na zadní monocoque

Do zadní části monocoqueu byla dále potřeba vytvořit otvory pro uložení zadního zavěšení, držáků pro systém odpružení a podpor hlavního oblouku. Nejdůležitějšími přípojnými body jsou ty pro uložení zadního zavěšení. Jejich přesné uložení je klíčové pro správnou kinematiku zadních kol a chování zadní části vozu při jízdě. Každý přípojný bod obsahuje dva šrouby DIN 912 M6 s třídou pevnosti 12.9, oválný insert a dvojici podložek a pojistných matic. Obdobně i přípojný body pro držáky tlumičů a podpor hlavního oblouku jsou složeny z dvojice šroubů, plastového insertu, podložek a pojistných matic. Všechny tyto otvory jsou zhotoveny již při výrobě pozitivní formy. Tím je zaručena jejich přesná poloha. V zadní části skořepinového rámu bylo obdobně jako u přední části dále provedeno vytvoření otvoru pro přívodní kabelový svazek k elektromotorům umístěných v kolech vozu. Jako jediný neobsahuje insert, a proto je možné jej zhotovit až do hotového dílu.



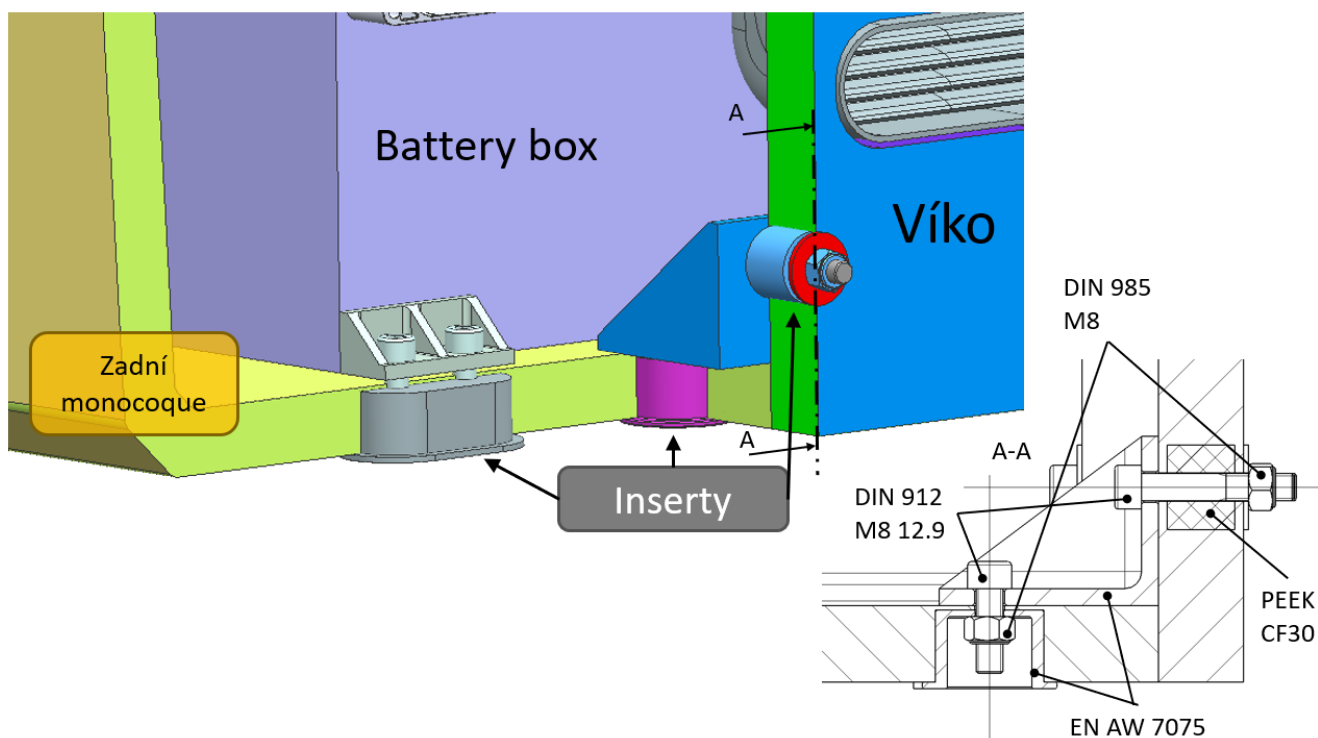
Obr. 7.13 Umístění otvorů pro uchycení navazujících prvků

V zadní části byl vytvořen otvor pro vyjmutí battery boxu. Pro zakrytí byla navržena krycí kompozitní deska se stejným lay-upem kompozitní sendvičové struktury jako samotný skořepinový rám. Po obvodu je připojen k rámu osmi šrouby M8. Jelikož je pro manipulaci s battery boxem výhodou rovná podlaha monocoqueu, byla potřeba vyřešit problém s připojením spodního prostředního šroubu. Pravidla nařizují rovnoměrnou osovou vzdálenost mezi šrouby, a proto bylo potřeba mít i jeden uprostřed. Výsledkem je spojovací úhelník se dvěma žebry. Stejně jako box baterky je přišroubován k podlaze rámu pomocí speciálního insertu. Na druhé straně je přišroubován k víku s insertem. Ve víku se taktéž nachází otvory pro výfuk vzduchu, který ochlazuje bateriové články.



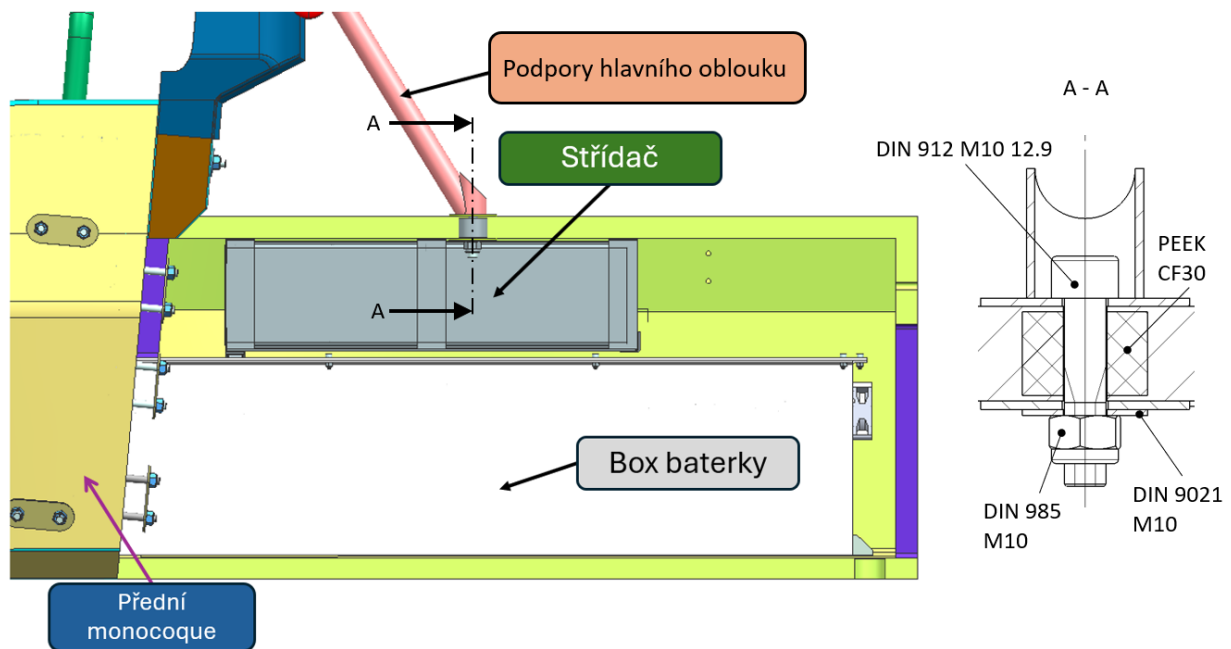
Obr. 7.14 Zadní část monocoqueu

Battery box je připojen k podlaze monocoqueu čtyřmi přípojnými body v rozích. Tato varianta uložení zvyšuje torzní tuhost celého rámu. V každém z nich jsou dva šrouby M8, které byly podle pravidel pevnostně dimenzované na čtyřicetinasobek hmotnosti boxu, která je ~65 kg. Aby ze spodu nevyčníval zbytek šroubu s maticí, což by mohlo být nebezpečné při světlé výšce vozu pouhých 50 mm, byl navržen speciální miskovitý insert (Obr. 7.10 a Obr. 7.15) obráběný z hliníkové slitiny.



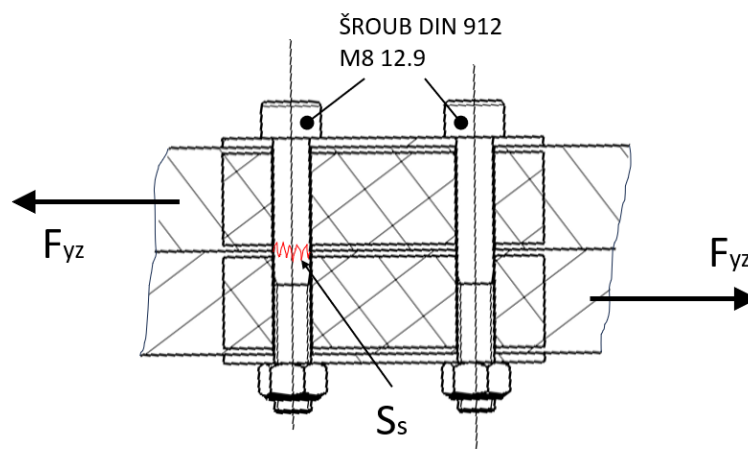
Obr. 7.15 Připojení battery boxu a víka k rámu

Střídač bylo potřeba taktéž připevnit k rámu, aby nedošlo k jeho poškození. Jelikož je střídač malé hmotnosti kolem 7 kg byl navržen jednoduchý kompozitní rám, který byl vyráběn laminací ze stejného uhlíkového kompozitu jako laminát rámu, včetně orientace skladby. Počet vrstev tkaniny je šest s celkovou tloušťkou kompozitu 1,3 mm. Tento rám je přilepen ke stropu zadního monocoqueu. Pro zamezení pohybu do stran, byl rám jednoduše přilepen k vnitřním stěnám pomocí tištěných držáků. Aby bylo možné vyjmout střídač pro případný servis, byl připojen přes čelní desku k rámu čtyřmi šroubovými spoji. Do kompozitního rámu byly umístěny nýtovací matice. Za střídačem je volný prostor pro příslušenství a kabelové svazky.



Obr. 7.16 Řez zadním monocoquem odhalující střídač a box baterky uvnitř

7.4.1 Kontrola šroubového spoje



Obr. 7.17 Nákres šroubového spoje namáhaného na střih

Početně byl zkontrolován šroubový spoj spojující přední a zadní monocoque. Spoj je tvořen dvěma šrouby M8x65 s délkou závitu 28 mm a s třídou pevnosti 12.9. FS pravidla předepisují, že spoj částí primární struktury musí být pevnostně dimenzován na sílu 30 kN ve všech navzájem kolmých směrech. Jelikož je návrh vytvořen pomocí excelových tabulek vytvořenými přímo pořadatelem soutěže, byl spoj kontrolován při mezním stavu, kdy dojde k odlehnutí a šrouby jsou namáhané na stříh (Obr. 7.15).

Síla F_{yz} působící kolmo k ose šroubu se určí:

$$F_{yz} = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} = \sqrt{2} \cdot F = \sqrt{2} \cdot 30000 = 42426 \text{ N}$$

Střížná plocha S_s se určí:

$$S_s = \frac{\pi \cdot d_d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 7,78^2}{4} = 47,539 \text{ mm}^2$$

Kde d_d je průměr dříku šroubu.

Napětí ve stříhu τ_s se určí:

$$\tau_s = \frac{F_{yz}}{2 \cdot S_s} = \frac{42426}{2 \cdot 47,539} = 446 \text{ MPa}$$

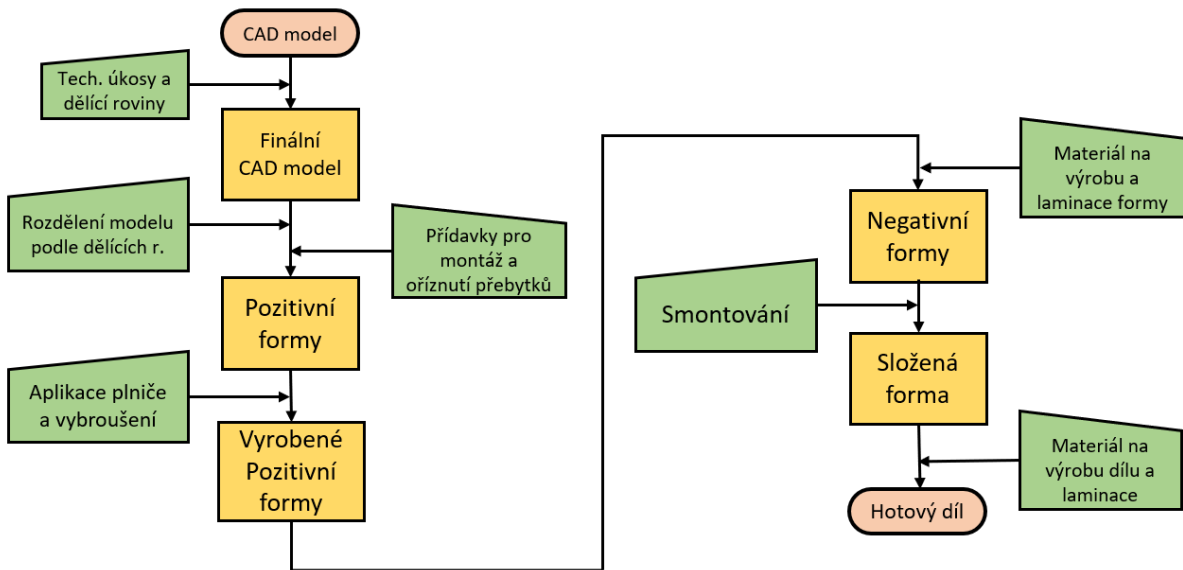
Bezpečnost spoje při stříhu:

Třída pevnosti šroubu je 12.9 → minimální mez kluzu šroubu $\sigma_k = 1080 \text{ MPa}$.

$$S = \frac{\tau_D}{\tau_s} = \frac{\sigma_k}{\tau_s} = \frac{1080}{446} = 2,42$$

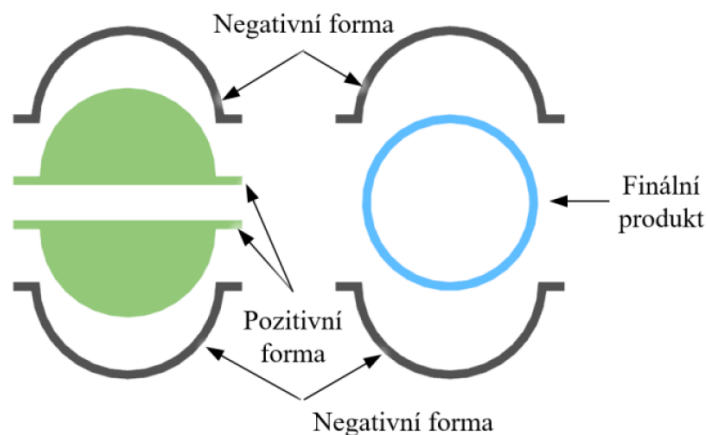
V tomto případě je bezpečnost spoje VYHOVUJÍCÍ.

8 Technologie výroby



Obr. 8.1 Vývojový diagram návrhu a výroby forem skořepinových rámu

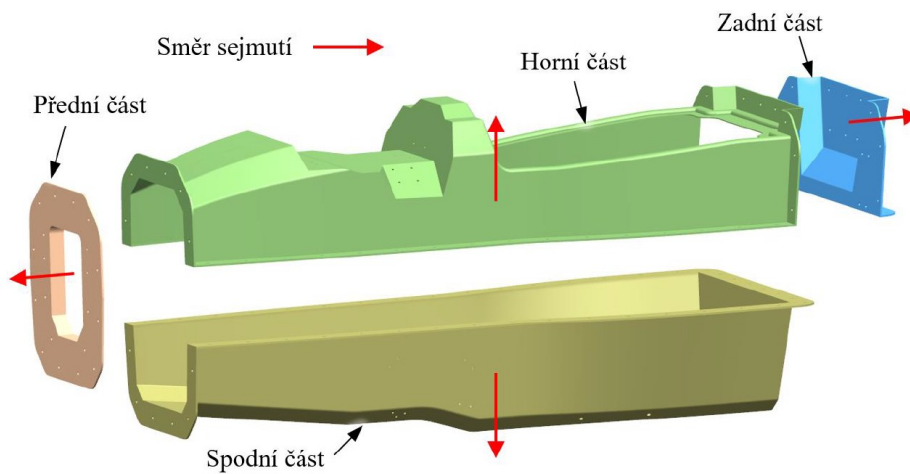
Pro výrobu kompozitních skořepinových rámu byla využita stejná technologie jako u předešlého vozu UWB06 z roku 2019. Bylo použito nekonvenční dvou-cyklového formování. Jedná se o technologii nejčastěji používanou při výrobě prostorových skořepinových dílů. Princip tkví ve zhotovení pozitivní formy, jenž má tvar shodný s výsledným dílem, z nich se laminací vytvoří negativní forma a ta slouží k zhotovení výsledného dílu. Ke správnému odformování obou částí skořepinového rámu je potřeba na CAD modelu určit pozici dělicích rovin a technologických úkosů. Dělicí rovina je kontaktní plocha mezi dvěma nebo více částmi formy. Umožňuje vyjmutí dílu z formy, aniž by byla nutnost ji rozbít. Technologické úkosy slouží k jednoduššímu vyjmutí dílu z formy. [4]



Obr. 8.2 Schéma dvou-cyklického formování [4]

8.1 Formy předního skořepinového rámu

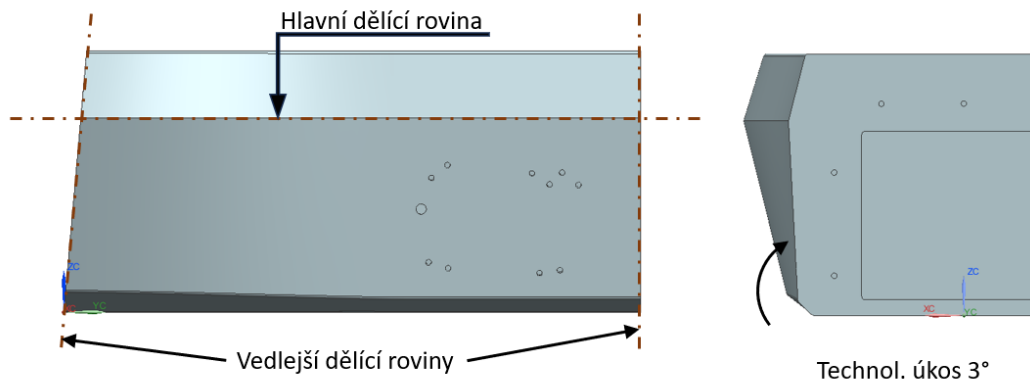
Přední monocoque má velkou část geometrie totožnou s vozem UWBO6. Proto se zde nabízí příležitost použít stejnou čtyř-dílnou formu. V tomto případě se použitím starých forem snižuje finanční a časová náročnost, kterou by obnášel návrh a výroba zcela nové formy. Nicméně protože byla potřeba přizpůsobit několik částí rámu novým požadavkům, byla potřeba přizpůsobit i formy. Jedná se o přepracovanou přední přepážku. Pro ni se musela vyrobit nová pozitivní i negativní forma. Dalšími změnami byli přemístěné otvory pro šroubové spoje uchycení předního zavěšení. A nakonec přepracované otvory v zadní stěně rámu. Pro tyto otvory se vyrobily přípravky, které obsahovaly jak nové, tak i staré díry, tím se zaručila potřebná přesnost polohy děr. Nové díry se do negativní formy vyvrtali před výrobou výsledného dílu. Jednoduché přípravky se zhotovili jako plechové díly vyřezané laserovým paprskem. Ty složitější se vyráběly pomocí 3D tisku. Staré otvory byly ve formách zaslepeny.



Obr. 8.3 Sestava čtyř dílné formy pro přední skořepinový rám [4]

8.2 Formy zadního skořepinového rámu

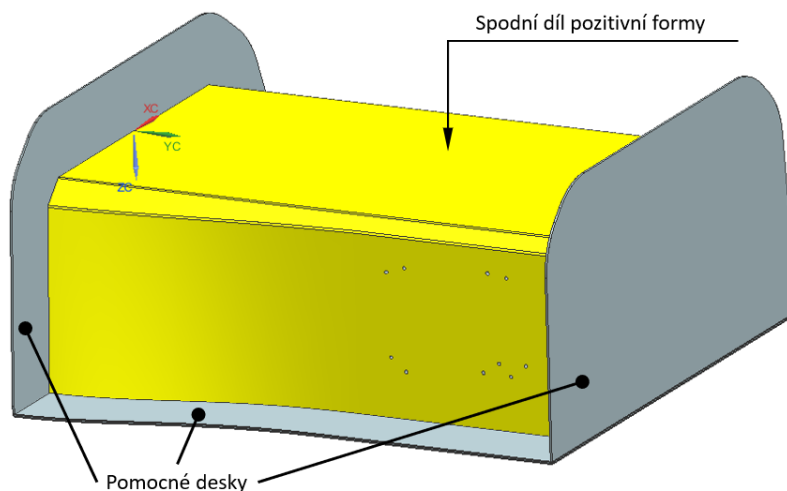
Zadní monocoque nahrazuje dosavadní trubkový rám, proto byla nyní potřeba navrhnout formu. Ta byla vyráběna stejnou metodou jako přední část. Stejně jako v případě předního monocoqueu se jedná o čtyř-dílnou formu. Hlavní dělicí rovina zadního rámu byla zvolena vodorovně v horní polovině. Navazuje na hlavní dělicí rovinu předního monocoqueu, jelikož čelní plocha zadního rámu je totožná se zadní plochou předního rámu. Problémem při následném odformování by bylo sklopení čela zadního rámu. To by znamenalo vyjmutí jedné poloviny formy. Proto byla potřeba přidat vedlejší dělicí roviny. Jedna byla umístěna na čele zadního monocoqueu, aby se zajistilo správné lícování předního se zadním monocoqueu a druhá na jeho zadní ploše. Důvodem k druhé pomocné dělicí rovině byla snaha rovinného styku víka se zadní plochou, aby došlo ke správnému dosednutí ploch a utěsnění. To má za následek aplikování technologických úkosů jen na bočních plochách monocoqueu. Ty jsou zpravidla v praxi min. $1,5^\circ$, pro tento případ byly zvoleny 3° . Nahoru od dělicí roviny bylo aplikováno na model zkosení, důvodem nebyla technologie, ale jednodušší připevnění systému zadního odpružení. Na spodní straně model nejprve přebíral úhel zkosení od předního monocoqueu, ten následně přecházel v plochu, na kterou byly směrem od dělicí roviny použity technologické úkosy. Na tuto plochu bylo přišroubováno zadní zavěšení. Na horní a spodní plochy modelu nebyly použity úkosy, jelikož se jedná o dna forem, které takto byly zvoleny z hlediska připojení dalších komponent. [4]



Obr. 8.4 Zvolené dělicí roviny a úkosy na modelu

8.2.1 Návrh pozitivní formy

Na základě umístění dělicích rovin byl model rozdělen a byly navrženy pozitivní formy, které mají stejný tvar a rozměry jako výsledný díl, pomocí nich byly vyrobeny formy negativní. Pozitivní formy vznikly tak, že byl hotový CAD model skořepinového rámu rozdělen dělicími rovinami na plná tělesa, která sdílí s výsledným dílem vnější geometrii a polohy otvorů. Všechny otvory mají hloubku 25 mm do nichž byly vloženy kolíky. Ty byly po vytvrzení kompozitu odstraněny a výsledkem byly otvory v negativní formě, které následně slouží jako referenční otvory pro výsledný díl. Větší otvory (např. otvor pro vyjmutí boxu baterky) mají taktéž hloubku 25 mm a k tomu ještě úkosy 2°. Tyto kapsy po laminaci tvoří lemy, které poté dělají oporu pokládané tkanině při formování výsledného dílu. Jednotlivé díly negativní formy je potřeba přišroubovat k sobě, proto je nutné přední a zadní pozitivní formu po vnějším obvodu zvětšit o cca 100 mm. Část tohoto rozměru zabírá lem, zbytek je přídavek na případné vytečení pryskyřice a oříznutí přebytečného kompozitu. K hornímu a spodnímu dílu pozitivní formy jsou připojeny pomocné desky, které vytvářejí oporu potřebnému lemu. Tyto desky jsou laserem vypalované plechy z konstrukční oceli, které mají tloušťku 3 mm.



Obr. 8.5 Sestava pozitivní formy pro spodní část zadního monocoqueu

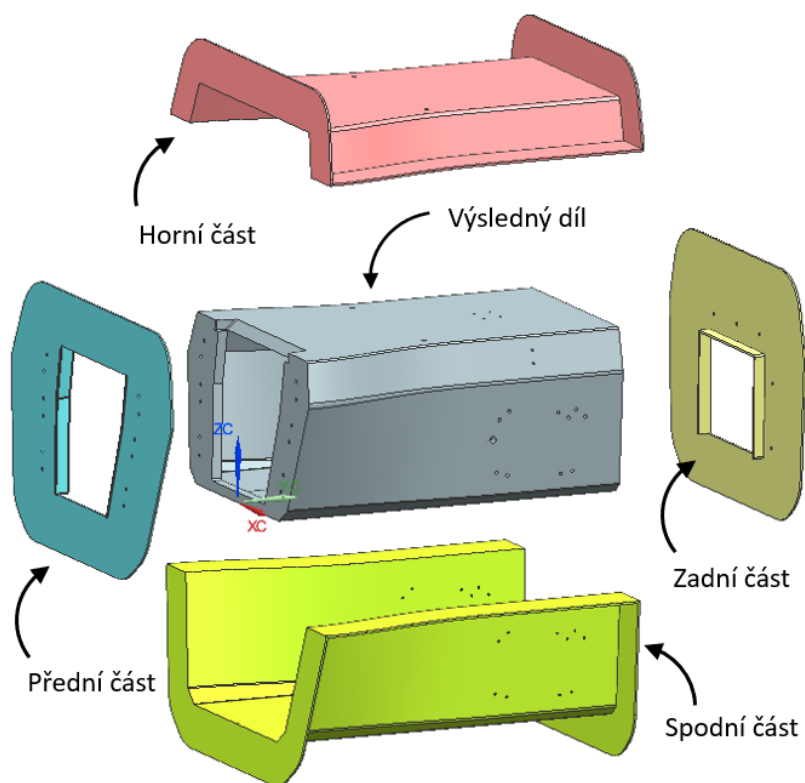
Materiál nejčastěji používaný pro výrobu formy tohoto typu je buď MDF (medium-density fiberboard), což je polotvrdá dřevovláknitá deska, nebo SikaBlock, což je polyuretanová pěna hustotou podobná MDF. Kvůli dříve zmíněnému Cost Reportu byla vybrána levnější varianta a to MDF. Jednotlivé desky jsou lepené dvou-složkovou epoxidovou pryskyřicí. MDF lze dobře obrábět konvenčními metodami (frézování, soustružení...), nevýhodou je vysoká prašnost. Na rozdíl od SikaBlocku je MDF potřeba po obrábění přebrousit a napustit několika vrstvami polyuretanového plniče. [4]

8.2.2 Návrh negativní formy

Negativní formy slouží k výrobě výsledného dílu, jsou vyráběny laminací pozitivních forem. Jelikož bude forma v jejích životním procesu vystavena vyšším tlakům a teplotám, bylo rozhodnuto pro použití tkaniny z uhlíkových vláken prosycených epoxidovou pryskyřicí. Na složenou, očištěnou a navoskovanou pozitivní formu se nejprve nanáší vrstva epoxidového gelcoatu, ten vytváří mezní vrstvu na kterou se přikládají vrstvy tkaniny. Následně spojovací vrstva, zaručující provázanost gelcoatu a uhlíkových vláken. Nakonec se kladou jednotlivé vrstvy tkaniny z uhlíkových vláken, a na které je nanášena dvou-složková pryskyřice. Těch bylo celkem zvoleno pro tento typ formy deset, ovšem počet se může měnit v závislosti na velikosti a tvaru formy. Navrhovaná tloušťka negativní formy je 6,25 mm. Formy se následně vytvrzují v peci čímž je zaručena teplotní odolnost a tvarová stálost. Hotové negativní formy jsou spojeny šroubovými spoji s využitím šroubů M8. [4]



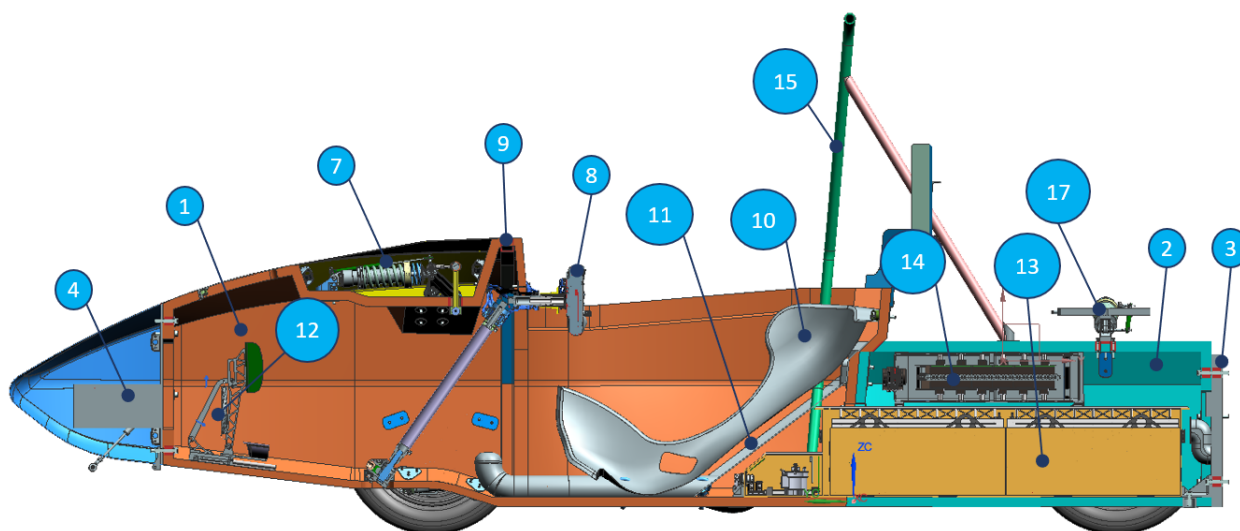
Obr. 8.6 Výroba negativní formy přední přepážky předního monocoqueu



Obr. 8.7 Sestava čtyř dílné formy pro zadní skořepinový rám

9 Implementace do sestavy vozu

Kompozitní skořepinový rám je nosným prvkem celého vozu, k němuž jsou připojeny všechny navazující prvky. Sestává se z přední části (1) spojené šroubovými spoji s průchozími inserty k zadní části (2) kompozitního monocoque. A zadního víka (3) ukrývající vstup k hlavním elektrickým zařízením. V nejřednější části vozu je k němu osmi šrouby připojen hlavní bezpečnostní prvek vozu. Nárazový prvek (4), který je skrytý pod kompozitním krytem, absorbuje kinetickou energii vozu při nárazu a chrání tak pilota. K přední přepážce jsou taktéž připojeny držáky předního křídla. Ty jsou navrženy tak aby se při čelním nárazu destruktivně oddělily od hlavní přepážky a spolu s křídlem (5) se zasunuli pod přední monocoque.



Obr. 9.1 Řez sestavou navazujících funkčních celků

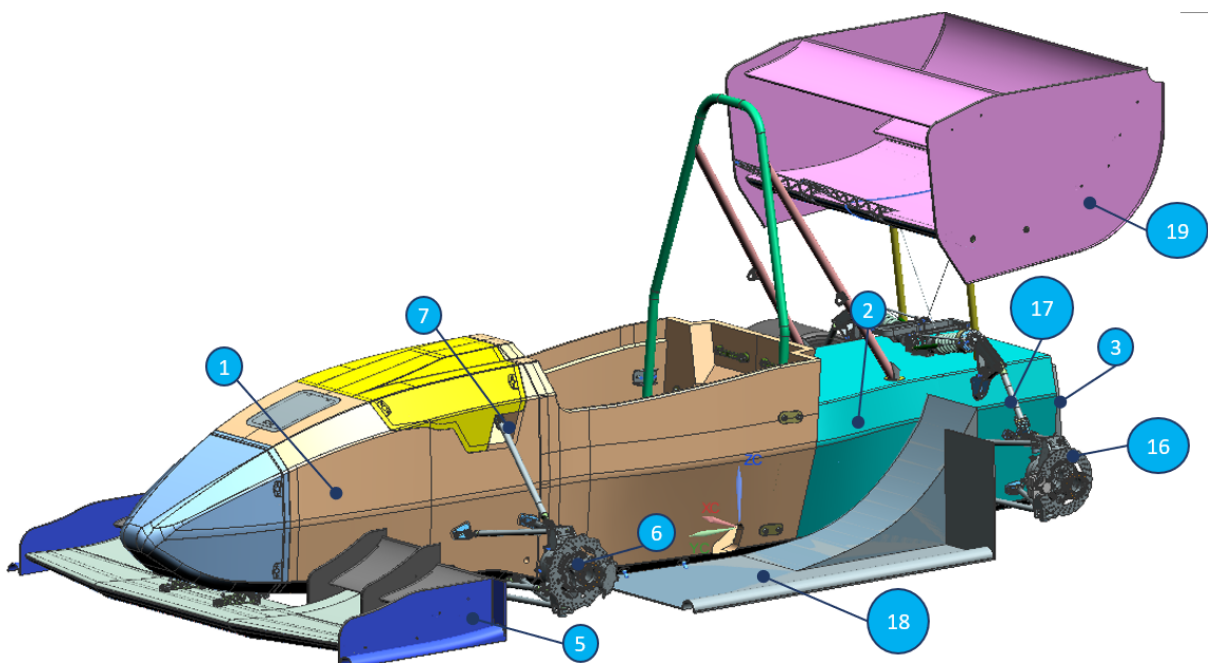
Následujícím navazujícím prvkem je zavěšení předních kol (6). Ty jsou k rámu připojeny ve čtyřech bodech. Každý přípojný bod je tvořen hliníkovou konzolí, dvojicí šroubů M6, oblým insertem a na vnitřní straně podložkami a pojistnými maticemi. Těhlice se volně svise kýve kolem přípojných bodů. Ze shora je k těhlici připojeno táhlo, které přenáší síly od kola k tlumiči (7). Ty jsou zakrytovány kompozitním krytem. Vpředu je k těhlici připojeno táhlo řízení. To je spojené volantovou tyčí k volantu (8), který dovoluje změnu směru jízdy. Celý systém řízení je připojen k rámu na dvou místech. Prvně v místě volantu čtyřmi šroubovými spoji ke kompozitní struktuře předního oblouku (9) a také k podlaze pomocí dalších čtyř šroubových spojů.

Dalšími prvky v kokpitu je sedačka (10), firewall (11) a pedálová soustava (12). Firewall je ohýbaný hliníkový plech oddělující kokpit od elektricky činných prvků. Chrání pilota i ostatní před úrazem elektrickým proudem nebo případným požárem. Na vnitřní straně je na plechu nalepen ještě izolující potah. Nad firewallem je k monocoqueu pomocí čtyř 3D tištěných držáků připevněna sedačka řidiče. Ta je, stejně jako velké množství ostatních dílů, vyráběna laminací, a to z uhlíkového kompozitu. Sedačka byla vymodelovaná podle naskenovaných otisků těl pilotů. Tím bylo docíleno maximální ergonomie při jízdě. Mezi další prvky aero paketu patří podlaha (18). Jedná se o kompozitní díl z uhlíkových vláken, který je pomocí vnitřních lemů přilepen k monocoqueu.

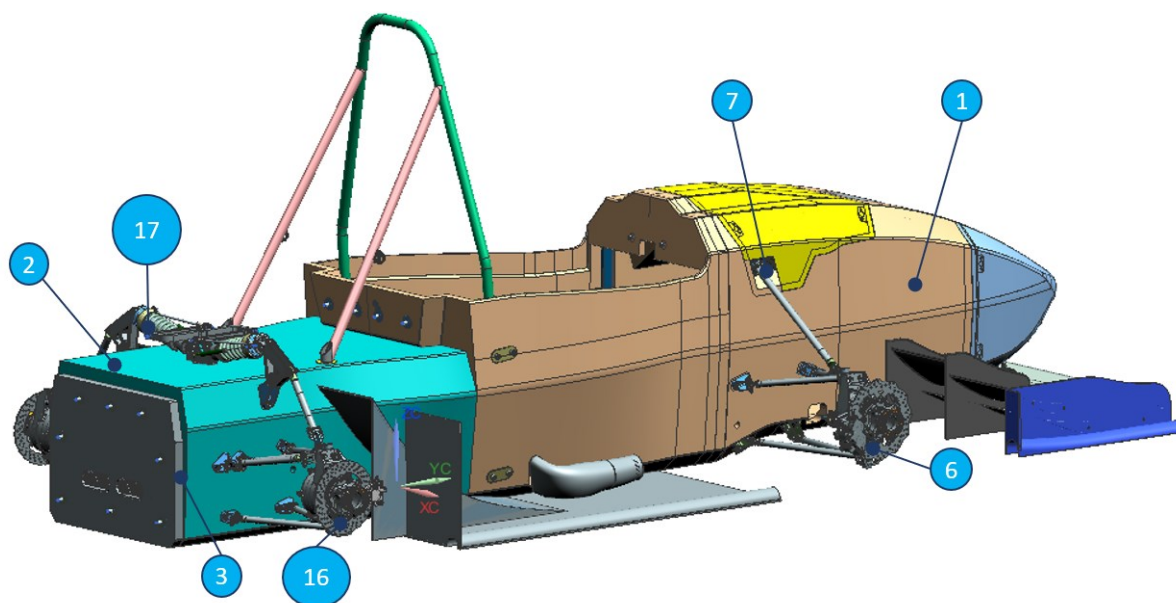
Za firewallem se nachází prostor pro hlavní elektronická zařízení, jmenovitě box baterky (13) a střídač (14). Ty jsou z velké části uloženy uvnitř zadního monocoqueu. Obě části rámu vozu jsou spojeny šesti přichytnými body, každý zahrnuje dvojici šroubových spojů s průchozím insertem. Spoj je navíc opatřen vysokopevnostním lepidlem. Ten mimo to, že pevnostně zabezpečí spoj, tak jej i utěsní. Box baterky je k rámu připevněn na čtyřech místech. Dvěma k přednímu monocoqueu a zbylými dvěma k tomu zadnímu. Takto připevněná skříňka zvyšuje torzní tuhost celého rámu. Stejnoseměrný střídač je pevně usazen do kompozitního postroje, jenž je připevněn ke stropu a bočním stěnám zadního monocoqueu. Díky tomu je zařízení bezpečně ustaveno uvnitř rámu.

Hlavní oblouk (15) je důležitým bezpečnostním prvkem. Chrání pilota při případném převrácení vozu. Jedná se o celistvou ohýbanou ocelovou trubku. Ta je tvaru obráceného písmene U. K přednímu monocoqueu je připevněn pomocí čtveřice konzolí, které jsou přivařené k hlavnímu oblouku na jedné straně a na druhé připojené pomocí dvojic šroubových spojů s průchozími inserty. K hlavnímu oblouku jsou zezadu přivařeny podpory, které ještě zvyšují ochranu. Podpory jsou připevněny k zadnímu monocoqueu stejným způsobem jako hlavní oblouk.

Důležitým funkčním celkem na zadním rámu je zavěšení zadních kol (16). To má stejnou stavební strukturu jako systém předního zavěšení. Taktéž bylo k rámu připojeno ve čtyřech bodech. Každý přípojný bod je taktéž tvořen hliníkovou konzolí, dvojicí šroubů, insertem, podložkami a pojistnými maticemi. Těhlice se volně svíslé kýve kolem přípojných bodů. Ze shora je k těhlici připojeno táhlo, které přenáší síly od kola k tlumiči (17). Ty nejsou rovnoběžně s podélnou osou vozu jako v případě předních tlumičů, ale kolmo na osu. Vzadu je k těhlici připojeno táhlo řízení. To ovšem není připojeno k žádnému systému řízení, ale k rámu a zabraňuje těhlici otáčet se kolem její svislé osy.



Obr. 9.2 Přední a zadní monocoque v sestavě s navazujícími prvky



Obr. 9.3 Přední a zadní monocoque v sestavě s navazujícími prvky

10 Závěr

Cílem této práce byl základní návrh konstrukce skořepinového kompozitního rámu vozu kategorie formule student. Ten nahradil dosavadní hybridní rám. V týmu UWB Racing Pilsen bylo rozhodnuto pro 7. generaci vozu jako čistě elektricky poháněnou, která se bude účastnit nadcházejících soutěží. Proto se přišlo s myšlenkou rozvinout dříve použitý koncept kompozitního skořepinového rámu. K tomu má kompozitní konstrukce daleko vyšší tuhost než trubkový rám při zachování stejných rozměrů a hmotnosti.

Po rešerši, co to jsou kompozitní rámy a jaké typy se používají při soutěži formule student, bylo náplní práce představení jednotlivých funkčních systémů stávajícího konceptu UWB06 z roku 2019. V páté kapitole jsou v práci popsány specifikace požadavků. Jak obecné, tj. technologie, navazující komponenty a integrované systémy, tak i z hlediska pravidel kladených pořadatelem soutěže. Následně přechází práce k praktické části, zde jsou popsány jednotlivé koncepční návrhy, hybridní rám přizpůsobený pro elektrický pohon, dělený kompozitní rám a jednodílný monocoque. Nejvhodnější variantou byl zvolen dělený kompozitní skořepinový rám. Ačkoliv jej převyšuje svými vlastnostmi jednodílný kompozitní rám, není pro jeho výrobu v laboratořích ZČU dostatečně velký autokláv. Na druhé straně hybridní rám nepředstavuje esteticky odpovídající typ konstrukce pro elektricky poháněný vůz.

Od sedmé kapitoly se práce věnuje samotnému návrhu. Počínaje přední částí monocoque, kde byla pro ušetření času a financí převzata základní geometrie z předchozí verze. Úpravy se dočkali ponejvíc přední přepážka zadní stěna. Návrh plynule přechází k zadní části rámu, který nahrazuje dosavadní trubkový rám. Důležitou částí byla i problematika návrhu šroubových spojů s inserty. Jelikož se jedná o slabá místa. Potom je v práci popsána technologie výroby. Bylo zvoleno dvou cyklové formování. To znamenalo návrh a výrobu pozitivních a následně i negativních forem. Práce je uzavírána implementací obou rámu do sestavy včetně připojení navazujících a integrovaných systémů.

Navržený technický systém je mezi krokem při přechodu od konvenčního spalovacího motoru k inovativnějšímu čistě elektrickému pohonu. Tato konstrukce skýtá mnoho oblastí pro vylepšení. Kupříkladu koncepce jednodílného skořepinového rámu, který by se vyráběl externě, důmyslnější uložení battery boxu, aerodynamičtější tvar nebo použití experimentálnějších metod a materiálů při výrobě.

Reference

- [1] „Studentský tým Formula Student; CTU CarTech,“ 15 5 2024. [Online]. Available: <https://cartech.cvut.cz/vuz/>.
- [2] „UWB Racing Západočeská univerzita v Plzni,“ 15 5 2024. [Online]. Available: <http://uwbracing.cz/vuz/uwb06/>.
- [3] „Formula Student Rules 2024, Version: 1.1; Formula Student Germany,“ 15 5 2024. [Online]. Available: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf.
- [4] M. Ing. Skovajsa, „Metodika návrhu a výroby skořepinových rámců závodních automobilů,“ Plzeň, 2021.
- [5] L. Bc. Pacoň, „Návrh monokoku pro vůz Formula Student,“ Praha, 2019.
- [6] Bain News Service, „Deperdussin TT Wikipedie,“ 15 5 2024. [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Deperdussin_TT.
- [7] Wayne State Formula SAE Team, „Preparing Geometry for Formula SAE Chassis in Ansys SpaceClaim — Lesson 1; Ansys innovation courses,“ 15 5 2024. [Online]. Available: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/formula-sae-chassis-analysis/lessons/preparing-geometry-for-formula-sae-chassis-in-ansys-spaceclaim-lesson-1/>.
- [8] M. Bc. Mende, „Konstrukční návrh kompozitního chassis formule student,“ Brno, 2021.
- [9] J. Bc. ZELENÝ, „Návrh skladby kompozitní struktury pro vůz Formula Student,“ Praha, 2022.
- [10] S. Mitchell, „Oxford Brookes Racing 2021 Chassis design; Racecar engineering,“ 15 5 2024. [Online]. Available: <https://www.racecar-engineering.com/articles/oxford-brookes-racing-2021-chassis-design/>.
- [11] T. Bc. Žídek, „NÁVRH MONOKOKU FORMULOVÉHO VOZIDLA,“ Brno, 2014.

Příloha A

Příloha B

Příloha C