



Konstrukce rámu autonomního vozidla

Diplomová práce

Studijní program:

N0716A270006 Automobilové inženýrství

Autor práce:

Bc. Jakub Svatý

Vedoucí práce:

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

Katedra vozidel a motorů

Oponent práce:

Ing. Roman Rybáček





Zadání diplomové práce

Konstrukce rámu autonomního vozidla

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Svatý**
Osobní číslo: S20000239
Studijní program: N0716A270006 Automobilové inženýrství
Zadávací katedra: Katedra vozidel a motorů
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor používaných koncepcí rámu vozidel, zejména užitkových.
2. Navrhněte vhodné upořádání rámu autonomního vozidla, jenž je připravováno na TUL.
3. Navrženou konstrukci pevnostně ověřte.
4. Zpracujte výkresovou dokumentaci pro navržené řešení.
5. Cílem diplomové práce je využití výsledků na Katedře vozidel a motorů (TUL).

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

Vybraná výkresová dokumentace
cca 50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] HRBEK, T.: Modulární systém užitkových nástaveb pro autonomní vozidlo. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. 2019.
- [2] CAD dokumentace projektu:
Modulární platforma pro autonomní podvozky specializovaných elektrovozidel pro dopravu nákladu a zařízení

Vedoucí práce: Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
Katedra vozidel a motorů

Oponent práce: Ing. Roman Rybáček

Datum zadání práce: 15. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2023

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

22. května 2022

Bc. Jakub Svatý

Poděkování

Nejprve bych chtěl poděkovat vedoucímu této diplomové práce Ing. Robertu Voženílkovi Ph.D za jeho rady, vstřícnost, ochotu a trpělivost. Poděkování patří samozřejmě také rodičům a přátelům, kteří mě za celou dobu studia motivovali a podporovali.

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem a pevnostním ověřením rámu pro autonomní vozidlo. Nejprve je provedena rešerše aktuálního stavu autonomních vozidel ve světové legislativě, dále jsou představeny přední světové značky, které se na jejich vývoj zaměřují. Následně je proveden rozbor vozidlových rámu s důrazem kladeným na využití v návrhu rámu pro autonomní vozidlo vyvíjené na TUL. V další části práce je popsán konstrukční návrh rámu a jeho analýza při kritických stavech dynamické jízdy. Poslední část práce je věnována výrobě rámu.

Klíčová slova

autonomní vozidlo, modulární platforma, rám, konstrukční návrh, elektromobilita, simulace

Annotation

The diploma thesis deals with the design and structural analysis of a frame for an autonomous vehicle. First, research of the current state of autonomous vehicles in world legislation is conducted, then the world's leading brands focusing on their development are introduced. Subsequently, an analysis of vehicle frames is performed with emphasis on the use in the design of a frame for the autonomous vehicle designed at TUL. The next part of the thesis describes the structural design of the frame and its analysis at critical states of dynamic driving. The last part of the thesis is devoted to the fabrication of the frame.

Keywords

autonomous vehicle, modular platform, frame, structural design, electromobility, simulation

Obsah

1	Úvod	10
2	Cíl diplomové práce	11
3	Charakteristika automaticky řízených vozidel	12
3.1	Úrovně automatického řízení	13
3.2	Současný stav automatického řízení	13
4	Autonomní vozidla různých světových značek	15
4.1	Yandex	15
4.2	John Deere.....	17
4.3	Volvo.....	18
4.4	Honda	19
4.5	Gaussin.....	20
5	Rámy vozidel.....	21
5.1	Rám žebřinový	22
5.2	Páteřový rám	24
5.3	Příhradový rám.....	26
6	Konstrukční návrh rámu	27
6.1	Požadavky na rám autonomního vozidla TUL.....	27
6.2	Volba typu rámu.....	28
6.3	Volba průřezu profilů a materiálu	29
6.4	Konstrukce jednotlivých částí rámu.....	30
6.4.1	Hlavní rám	32
6.4.2	Nárazník	34
6.4.3	Rám baterie.....	34
6.4.4	E-box	35
6.4.5	Podpěry plošiny	38

6.4.6	Pomocné rameno	39
6.5	Váhové zhodnocení rámu.....	40
7	Pevnostní analýza rámu	43
7.1	Zátěžové stavy.....	44
7.1.1	První zátěžový stav	45
7.1.2	Druhý zatěžovací stav.....	47
7.1.3	Třetí zatěžovací stav	49
7.1.4	Čtvrtý zatěžovací stav.....	51
7.2	Diskuse výsledků simulace	54
8	Výroba rámu	55
8.1	Konstrukce přípravku.....	55
8.2	Svařování rámu	57
9	Závěr.....	60

Seznam použitých zkratek a symbolů

zkratka / značka	popis
ADS	Automated Driving System
AWV	Autonomous Work Vehicle
BEV	Battery Electric Vehicle
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
DDT	Dynamic Driving Task
EU	Evropská unie
FCV	Fuel Cell Vehicle
ISO	Isometric
KVM	Katedra vozidel a motorů
OP	Okrajové podmínky
SAE	Society of Automotive Engineers
SW	Software
TIG	Tungsten Inert Gas
TUL	Technická univerzita v Liberci

značka veličiny	popis	jednotka
ρ	hustota	[kg/m ³]
J_y	kvadratický moment průřezu k ose Y	[mm ⁴]
R_e	mez kluzu	[MPa]
S_{max}	maximální ohybové napětí	[MPa]
L	rozvor vozidla	[m]
B	rozchod vozidla	[m]

1 Úvod

Vývoj technologií automatického řízení je v současné době na rychlém vzestupu. Většina dnešních moderních automobilů má řadu nejrůznějších systémů, které mají možnost aktivně zasahovat do jízdy vozidla. Ať už se jedná o adaptivní tempomat, asistent pro držení vozidla v jízdních pruzích nebo automatické krizové brzdění. To vše díky pokroku výpočetní techniky, která je schopná zpracovávat a vyhodnocovat velké množství dat v reálném čase.

S automaticky řízenými vozidly se můžeme setkat téměř ve všech odvětvích průmyslu. Snaha nahradit práci člověka není žádnou novinkou, a proto mají velký potenciál zejména vozidla zemědělská, těžební, nákladní nebo vojenská.

Pro nákladní vozidla jsou cíle jasné. Nahrazením řidiče se mnohonásobně zvýší rychlost přepravy, ale také její bezpečnost. Řidič nákladního vozidla je totiž stále nejdražší a nejrizikovější faktor přepravního průmyslu. Ve zbrojním průmyslu také vzniká mnoho bezpilotních autonomních strojů, ať už se jedná o pozemní vozidla nebo o různá letadla či drony. Jedním z průkopníků je německý strojírenský koncern Rheinmetall, který navrhl vojenské autonomní vozidlo pro podporu armády v nebezpečných misích, obtížném terénu a nepříznivých povětrnostních podmínkách. [1]

Dalším příznivým faktorem pro rozvoj autonomních vozidel, jsou nové přístupy v hnacích ústrojích. Není sice podmínkou, aby měla automaticky řízená vozidla energii uloženou v bateriových nebo vodíkových článcích, ale je pravdou, že autonomní vozidla se spalovacím motorem jsou spíše výjimkou. Je to pravděpodobně z důvodu snazší podpory autonomních systémů ve vozidle, nižšího akustického projevu vozidla nebo jeho bezemisního provozu. Elektrická vozidla pak mohou být bezkonkurenčně lepším pomocníkem v uzavřených halách nebo v místech s častějším výskytem smogu.

2 Cíl diplomové práce

Autonomní vozidlo, které je na Technické univerzitě v Liberci vyvíjeno, spadá pod projekt financovaný Evropskou unií s registračním číslem a názvem: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_025/0007293 – Modulární platforma pro autonomní podvozky specializovaných elektrovozidel pro dopravu nákladu a zařízení (Elektromobilita). Cílem projektu je vývoj elektricky poháněné autonomní plošiny s bateriovými články. Maximální provozní rychlost je limitována na 40 km/h. Hmotnost vozidla má být nejvýše 3500 kg, z čehož musí být minimálně 1000 kg hmotnost užitková. Dále by mělo být vozidlo uzpůsobeno k převozu různých druhů materiálů (tuhé, sypké, tekuté) po různých površích. Předpokládaný rozvor a rozchod vozidla jsou $L = 2,7$ m, respektive $B = 1,7$ m. Dalším prvkem, který by mělo vozidlo splňovat je jeho modulárnost – jednotlivé konstrukční části vozu by měly být uzpůsobeny k případnému nahrazení, vylepšení či rychlé výměně. [2]

Hlavním cílem této diplomové práce je navrhnout a pevnostně ověřit rám pro autonomní vozidlo vyvíjené na TUL.

- Zpracování rešerše autonomních vozidel a rámu
- Návrh konstrukce rámu
- Pevnostní kontrola
- Tvorba podkladů pro výrobu rámu
- Výroba rámu v rámci časových možností

3 Charakteristika automaticky řízených vozidel

Nejprve je nutné uvést rozdíl mezi pojmy „autonomní vozidlo“ a „automaticky řízené vozidlo“. Slovo „autonomní“ se ve vědecké komunitě již dlouhou dobu používá k označení systému umělé inteligence, který má schopnost a pravomoc se nezávisle a soběstačně rozhodovat. A proto vyvstává otázka, jestli vozidlo, které je závislé na komunikaci a kooperaci s externími subjekty okolního prostředí (např. získávání a sběr dat), je skutečně autonomní. Někteří si pod pojmem „autonomní vozidlo“ vybaví pouze vozidlo plně automaticky řízené (5. úroveň automatického řízení – viz kapitola 3.1), zatímco druzí tento slovní obrat aplikují na všechna vozidla, která jsou vybavena jakýmkoliv systémem ADS (Automated Driving System).

Jelikož ani dnes nejsou ty nejpokročilejší ADS samosprávné a fungují na základě algoritmů a příkazů uživatele, mělo by být v odborné praxi používáno pouze označení „automaticky řízené vozidlo“. V této diplomové práci budou využívány oba výrazy a pod pojmem „autonomní vozidlo“ bude vždy myšleno vozidlo s jakýmkoliv ADS. A to především díky tomu, že projekt, pod kterým tato práce vzniká, promlouvá právě o vozidle autonomním. [3]

Vysvětlení zkratk ADS a DDT

Pod pojmem ADS vnímáme hardware a software vozu, které jsou společně schopné provádět DDT (Dynamic Driving Task). Dynamickou jízdní úlohou (DDT) rozumíme řešení situací operačních (obsluha vozidla, pozorování provozu a okolí) a situací taktických (zpomalení před zatáčkou, použití výstražné signalizace, změna pruhu atd...). DDT nezahrnuje řešení strategických situací jako je například volba destinace nebo záchytných bodů. [4]

3.1 Úrovně automatického řízení

Automaticky řízená vozidla se dle organizace SAE (Společnost automobilových inženýrů) rozdělují do šesti úrovní. Od vozidel vybavených pouze varovnými systémy, které do řízení vůbec nezasahují, až po vozidla řízená plně automaticky.

Spodní tři úrovně řízení (0–2) se týkají případů, kdy je sledování dopravní situace a řízení vozidla vykonáváno výhradně řidičem za použití různých asistenčních systémů. Ve zbylých úrovních (3–5) je vozidlo a monitorování dopravní situace pod kontrolou ADS. Na obrázku 1 jsou zmiňované úrovně automatizace podrobněji rozepsány. [3, 5]

	Úroveň podle SAE	Název	Řízení vozidla	Sledování dopravní situace	Reakce na dynamickou dopravní situaci	Možnosti systému
Dopravní situace sledována řidičem	0	BEZ AUTOMATIZACE - vozidlo neřídí automatický systém, ale výlučně řidič - mohou ovšem být zařazeny varovné subsystemy				n/a
	1	ASISTENCE ŘIDIČE - řidič musí být schopen kdykoli řídit - automaticky mohou probíhat i složitější řídicí funkce (adaptivní tempomat, parkovací asistent ...)				některé režimy jízdy
	2	ČÁSTEČNÁ AUTOMATIZACE - řidič musí zasáhnout, když automatický systém selhává - automat řídí, zrychluje i brzdí - při zásahu řidiče se systém deaktivuje				některé režimy jízdy
Dopravní situace sledována vozidlem	3	PODMÍNĚNÁ AUTOMATIZACE - v definovaném prostředí (např. dálnice) se řidič nemusí věnovat řízení - musí ale být schopen převzít řízení, když je to nutné				některé režimy jízdy
	4	VYSOKÁ AUTOMATIZACE - automat řídí vždy s výjimkou nebezpečného prostředí (velmi špatné počasí). - řidič smí používat automat jen tehdy, když je prostředí bezpečné - v takovém případě se nevěnuje řízení				některé režimy jízdy
	5	PLNÁ AUTOMATIZACE - člověk zadá cíl a aktivuje systém - automat řídí do libovolného legálního cíle - řidič neexistuje				všechny režimy jízdy

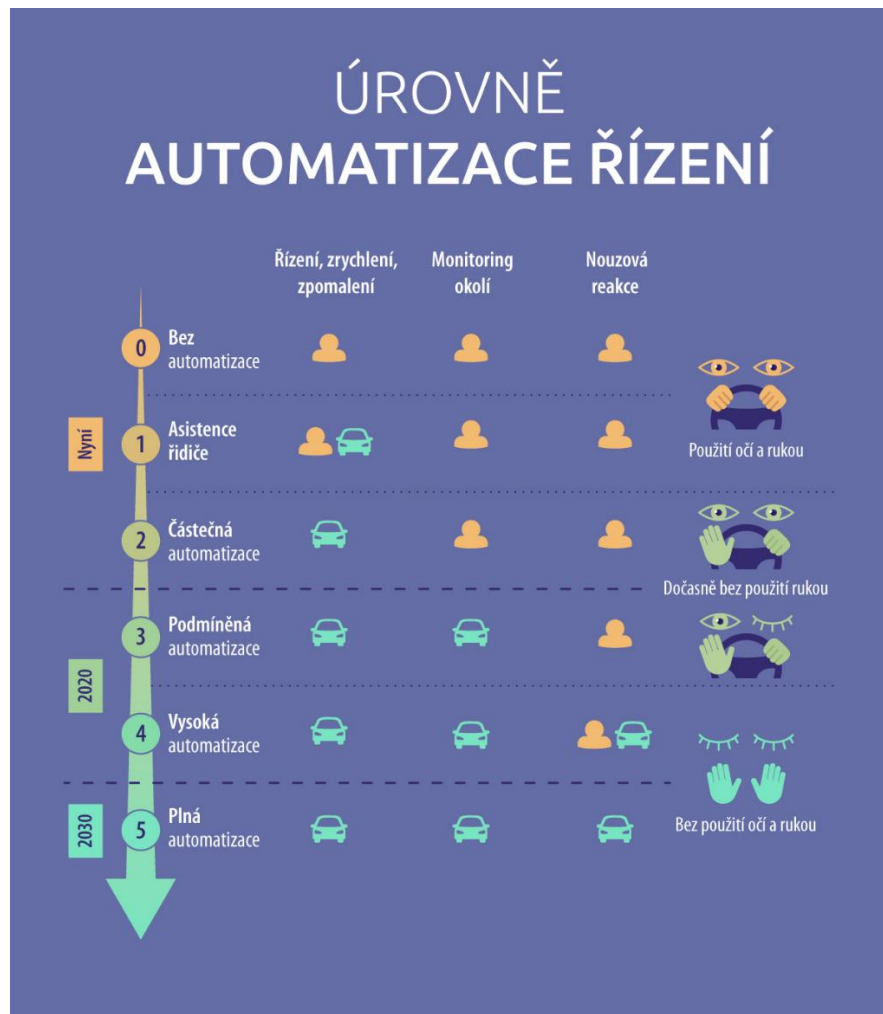
Obrázek 1: Shrnutí rozdělení automatického řízení vozidel dle SAE [6]

3.2 Současný stav automatického řízení

V současné době se vozidla běžně dostupná na trhu, pohybují na úrovni 2. Vyšší stupně automatického řízení zatím můžeme v provozu vidět jen výjimečně. Je to především z důvodu legislativy, která rychlý nástup automatizace značně omezuje. Zatím stále platí úmluva o silničním provozu, která stanovuje, že za řízení vozidla je za jakýchkoliv okolností zodpovědný řidič.

V roce 2019 začala Evropská unie pracovat na společných pravidlech pro automatizovanou mobilitu. Potýkáme se ale se značnou řadou výzev, které jsou nutné vyřešit před samotným nástupem vyšších stupňů automatického řízení. Jednou z nich je

například bezpečnost provozu, jelikož samořiditelná auta budou pravděpodobně sdílet stejné prostředí neautomatizovaných vozidel, cyklistů i chodců. Záleží také na tom, kdo ponese zodpovědnost za případné nehody a škody. Obecně se očekává, že plně automatizovaná vozidla se do běžného silničního provozu začnou dostávat už okolo roku 2030. Grafické zpracování postupného vývoje automatického řízení dle vizí EU je na obrázku 2. [7]



Obrázek 2: Vývoj automatického řízení dle výhledů EU [7]

4 Autonomní vozidla různých světových značek

Velká část světově uznávaných automobilových i nezávislých firem investuje nemalé finanční prostředky do rozvoje vozidel s automatickým řízením. Velmi diskutováním tématem je bezobslužná přeprava osob nebo různé rozvážkové služby balíků a jídla. Tyto nové způsoby přepravy se však uplatňují v mnohem širším spektru než zmíněný rozvoz osob a potravin. Například v zemědělství, záchranářství a v mnoha dalších odvětvích průmyslu.

4.1 Yandex

Jedna z největších ruských společností zaměřující se na internetové služby patří také mezi významné průkopníky automatického řízení vozidel. Na začátku roku 2022 bylo vládou schváleno testování speciálně upravených vozů typu Toyota Prius a Hyundai Sonata. Po úspěšném dokončení testování v roce 2025 se mohou bezpilotní vozidla stát nedílnou součástí dopravní infrastruktury. Upravená autonomní vozidla jsou na obrázku 3. [8]



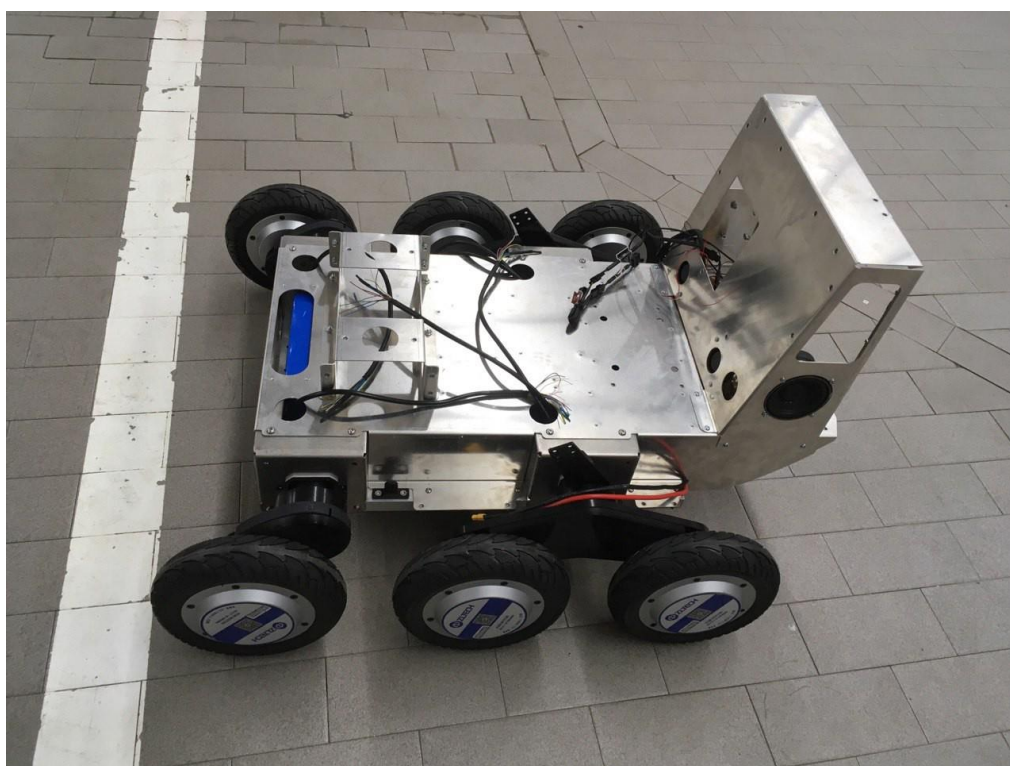
Obrázek 3: Autonomní vozidla společnosti Yandex [8]

Dalšími produkty této firmy jsou autonomní roboty na doručování jídla (obrázek 4). Prázdný robot váží 70 kg, je schopen jet rychlostí 8 km/h a má hnaných všech šest kol. Přední náprava je zavěšena nezávisle, zatímco zadní dvě jsou tuhé. Robot může přepravovat až 20 kg v 60 l prostoru a světlá výška při plném naložení musí být minimálně 100 mm.



Obrázek 4: Doručovací roboty Yandex Rover – 3. generace [9]

Konstrukční tým věnoval designu velkou pozornost. Na celém těle robota nechtěli žádné viditelné spoje, proto ho nechali vyrobit jako skořepinu ze sklolaminátu. Základem celého stroje je hliníkový rám, který nese a spojuje všechny jeho části – senzory, baterii, skořepinové tělo, motory a zavěšení kol. Rám je svařen z hliníkových plechů a profilů tak, aby byl v místě ukotvení senzorů dostatečně tuhý. Hliníkový rám lze vidět na obrázku 5. [9]



Obrázek 5: Hliníkový rám robota Yandex Rover [9]

4.2 John Deere

John Deere je bezpochyby světovou ikonou ve výrobě a vývoji zemědělských strojů. Proto také jako jeden z prvních uvedl na trh plně automaticky řízený traktor (obrázek 6). Vznikl na koncepci ze série traktorů 8R, které jsou poháněny vznětovými spalovacími motory. Stroj má šest párů stereo kamer, což mu umožňuje detekci překážek v celém svém okolí, ale také výpočet jejich vzdálenosti. Díky rychlému vyhodnocování snímků z kamer (do 100 ms) se traktor rozhodne, zda pokračovat v jízdě nebo zastavit a vyčkat na obsluhu. [10]



Obrázek 6: Autonomní traktor John Deere 8R [11]

Dle výrobce hraje elektrifikace a automatizace významnou roli v rozvoji zemědělské techniky. Koncept nejnovějšího elektrického autonomního traktoru, který byl veřejnosti představen, se od ostatních strojů velmi liší (obrázek 7). Je výrazně kompaktnější a má pouze jednu nápravu. Disponuje výkonem 500 kW s maximální tažnou silou 150 kN. Výrobce si od elektrifikace slibuje nulové provozní emise, nízkou hlučnost, ale také snížené náklady na údržbu. [12]



Obrázek 7: Kompaktní autonomní traktor John Deere [12]

4.3 Volvo

Jednou z dalších organizací, které jsou ve vývoji autonomních vozidel na vysoké úrovni je Volvo. Jejich pracovní stroje jsou již na trhu běžně dostupné a v těžebním průmyslu dobře fungují. S cílem snížit produkci CO₂ a nutnost operátora ve vozidle vyvinuly autonomní stroj jménem TA15. Jedná se o dvounápravový sklápěč s pohonem všech čtyř kol a řízením na obou nápravách. Maximální nosnost jednoho sklápěče je 15 tun, pohon je řešen elektrickými motory a energii má uloženou v bateriových člancích.

Toto vozidlo je nedílnou součástí systému TARA (kompletní řešení pro autonomní dopravu v definovaném prostoru), který Volvo dodává. Dále je k systému TARA nutná další infrastruktura – nabíjecí stanice, kontrolní stanoviště, servisní zázemí a přístup ke cloudovým serverům. Přístup k internetu je potřeba především kvůli vzájemné komunikaci vozidel, protože z pravidla pracují v menších skupinách po 3 až 4 kusech. [13, 14]



Obrázek 8: Autonomní sklápěč TA15 značky Volvo [15]

4.4 Honda

Ani japonská Honda nezůstává s vývojem automaticky řízených vozidel pozadu. Jako plně funkční prototyp představili vozidlo pod zkratkou AWV (Autonomous Work Vehicle). Je navržen k usnadnění práce na staveništích, při záchranných operacích nebo při obdělávání půdy. Základem tohoto vozidla je podvozek z terénní čtyřkolky Honda Pioneer a k orientaci v prostoru mu slouží několik senzorů, kamer a GPS sledovač. Vozidlo je valníkového typu – má tedy rovnou podlahu a tři sklopné bočnice. K nakládání je proto možné použít buď jeřáb, nebo vysokozdvizný vozík. V tabulce 1 jsou bližší technické specifikace vozidla. [16]

Tabulka 1: Technické specifikace AWV značky Honda [17]

Rozměry vozidla (D×V×Š)	2,9m × 1,5m × 1,4m
Váha samotného vozidla	721 kg
Maximální váha nákladu	400 kg
Maximální váha taženého přívěsu	750 kg (včetně přívěsu)
Minimální rádius zatočení	3,9 m
Maximální dojezd (plně naložené)	45 km
Čas dobíjení	6 hodin

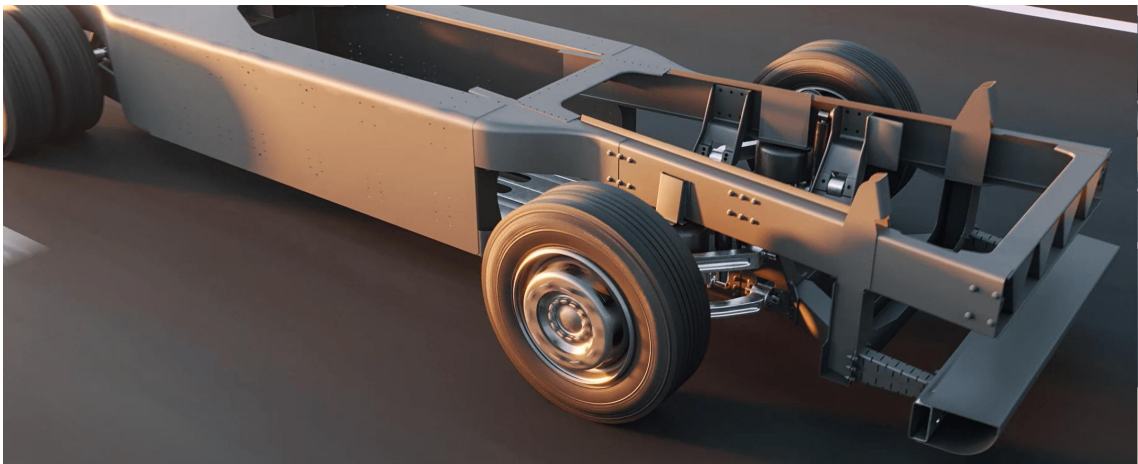


Obrázek 9: Prototyp AWV od značky Honda [18]

4.5 Gaussin

Méně známá francouzská firma Gaussin se zabývá vývojem autonomních modulárních plošin pro nákladní vozidla. Mají být poháněny elektrickými motory s energií uloženou buď v lithium-iontových akumulátorech, nebo ve vodíkových palivových článcích. Očekává se, že BEV (Battery Electric Vehicle) budou mít dojezd okolo 400 km, zatímco FCV (Fuel Cell Vehicle) až dvojnásobný.

Rám plošiny je možné konfigurovat podle přání zákazníka – různý počet náprav i typ nastavby. Dle výrobce je rám vyroben ze speciálních lehkých slitin kovů, a proto je o 400 kg lehčí než rámy tradičních nákladních vozidel na trhu. Nosnost plošin závisí na počtu zvolených náprav. Dvounápravová platforma má maximální povolenou hmotnost 18 t, zatímco třínápravová 26 t. [19, 20]



Obrázek 10: Podvozek modulární plošiny společnosti Gaussin [21]

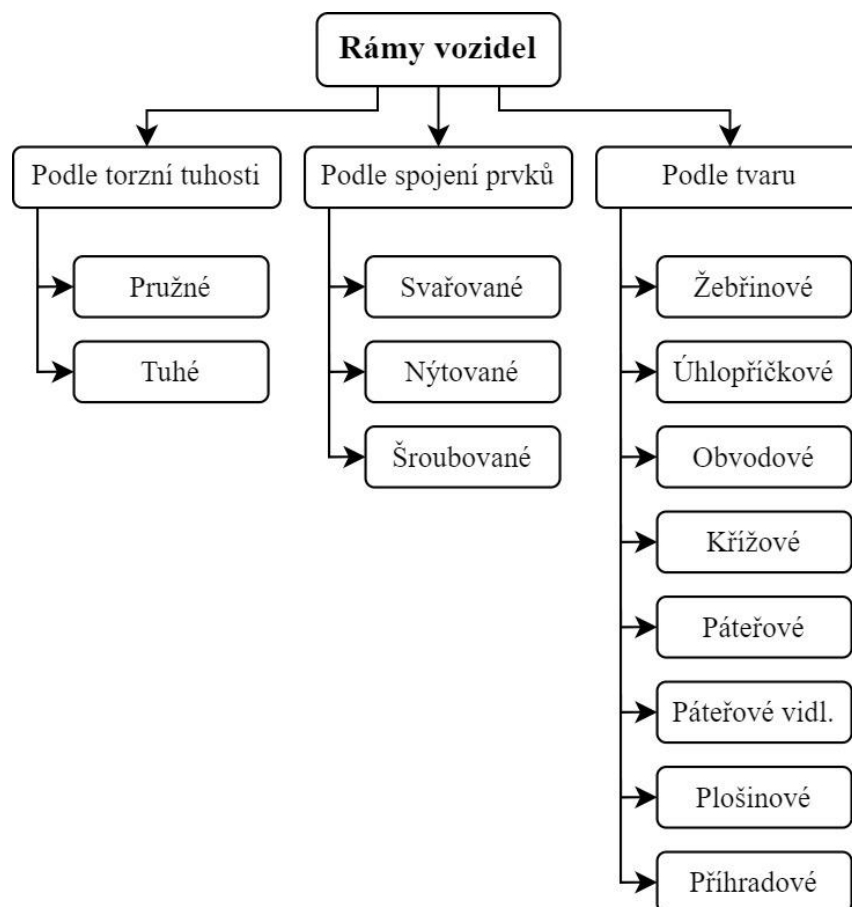


Obrázek 11: Ukázka možných konfigurací modulární plošiny [21]

5 Rámy vozidel

Rám vozidla představuje jeho nosnou část, která spojuje a udržuje jeho jednotlivé části vzájemně pohromadě. Hlavní úkoly rámu jsou: realizovat zavěšení náprav, nést hnací ústrojí, karoserii a náklad, přenášet hnací a brzdící síly. Jako důležité požadavky považujeme vysokou torzní tuhost a pevnost při minimální hmotnosti, která nedovolí rozkmitání a poškození rámu během jízdy. Dále je podstatná účelnost konstrukce, protože chceme dosáhnout co nejvhodnějšího uspořádání vozidla. Také musíme brát ohled na geometrický tvar rámu, který by měl umožnit nízkou polohu těžiště a dostatek místa pro zdvih i rejd kol. [22]

Norma ČSN 30 0025 – základy automobilového názvosloví, rozděluje tvary rámu vozidel do osmi kategorií. Rám žebřinový, úhlopříčkový, křížový, obvodový, páteřový, páteřový vidlicový, plošinový a příhradový. Mimo normu můžeme rámy dělit podle torzní tuhosti na tuhé a pružné nebo podle typu spojení prvků na svařované, nýtované a šroubované. Grafické schéma rozdělení je na obrázku 12. [23]



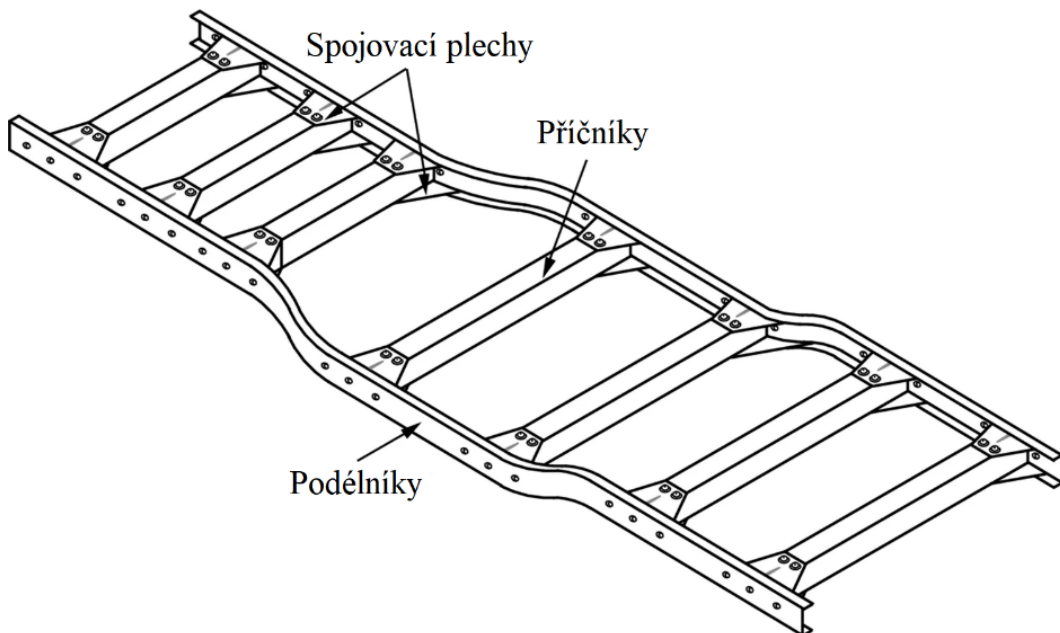
Obrázek 12: Grafické schéma rozdělení rámu vozidel [22]

V dnešní době se rámy používají především u vozidel nákladních, velkých osobních nebo speciálních. Dále také u novodobých autobusů a motocyklů. U menších až středních osobních automobilů funkci rámu nahrazuje samonosná karoserie, a to z důvodu nižší hmotnosti, ceny a také díky lepší možnosti automatizace výroby. [24–26]

5.1 Rám žebřinový

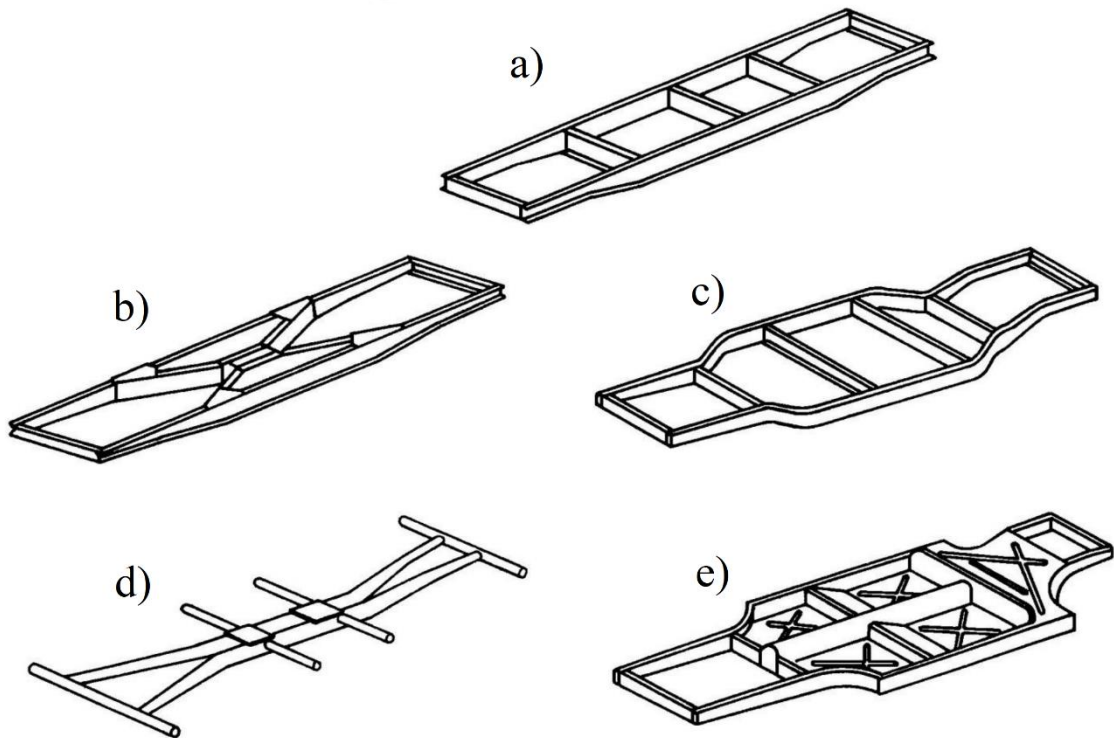
Žebřinový neboli také obdélníkový rám se skládá ze dvou podélných nosníků a několika příček. Tvar, počet a rozmístění příček jsou ovlivněny uspořádáním vozidla. Rám bývá opatřen předním i zadním nárazníkem a různými konstrukčními prvky řízené deformace při nárazu. Pokud má být vozidlo vybaveno tažným zařízením, bývá upevněno na poslední příčku, která se díky tomu vyrábí zesílená. Na rám se také upevňuje většina příslušenství – držáky, konzoly, tažný hák atd.

Podélné nosníky mají nejčastěji průřez ve tvaru U, výjimečně i ve tvaru I. Jak již bylo zmíněno v kapitole 5, spoje mohou být buď svařované, nýtované nebo šroubované. Podélníky mohou být tvarovány pro snadnější zavěšení náprav nebo mohou být v přední části rozšířeny při zástavbě většího motoru. Nejprůzračněji namáhány jsou pouze tehdy, pokud jsou přímé a žádné ohyby nemají.

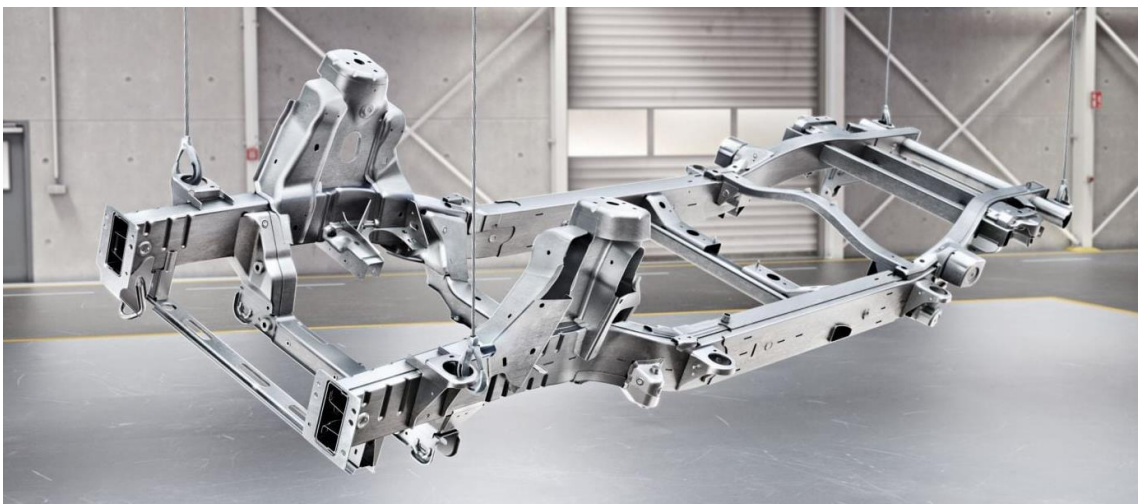


Obrázek 13: Schéma žebřinového rámu [27]

Rámy úhlopříčkové, obvodové, křížové a plošinové nebudou dále detailně rozebírány, jelikož to jsou v podstatě varianty žebřinového rámu a jejich podstata zůstává stejná. Tyto varianty lze vidět na obrázku 14 – a) žebřinový rám, b) úhlopříčkový rám, c) obvodový rám, d) křížový rám, e) plošinový rám. [21]



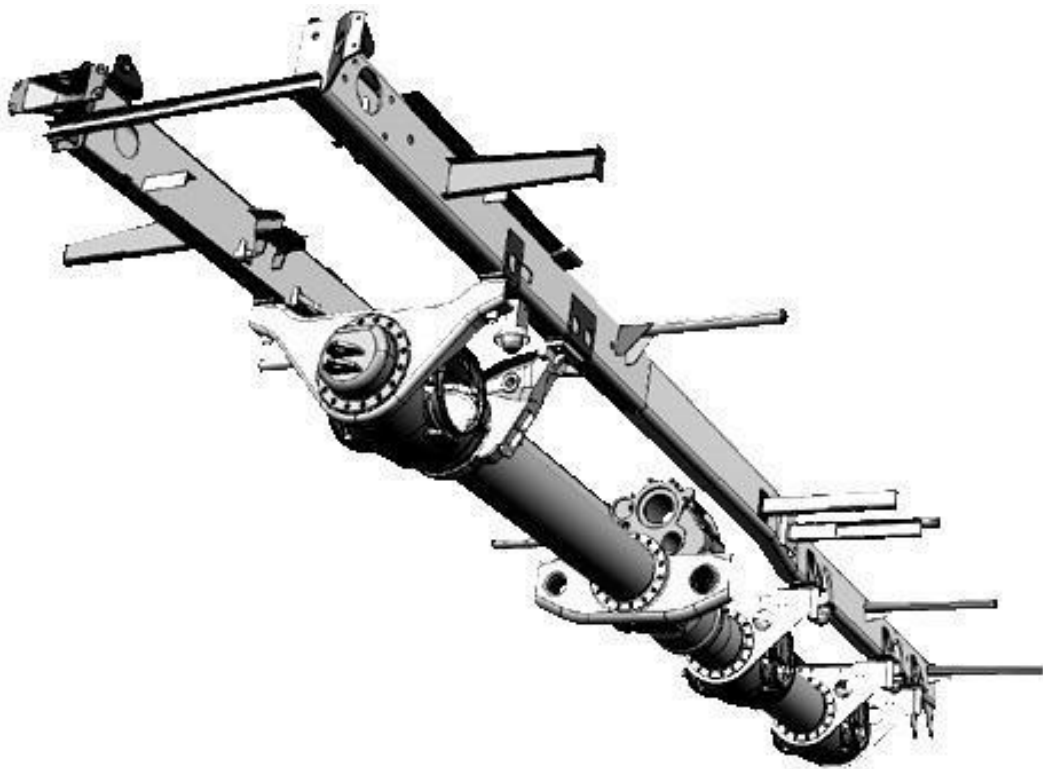
Obrázek 14: Schématické zobrazení typů žebřinových rámu



Obrázek 15: Žebřinový rám terénního vozu Mercedes-Benz třídy G [28]

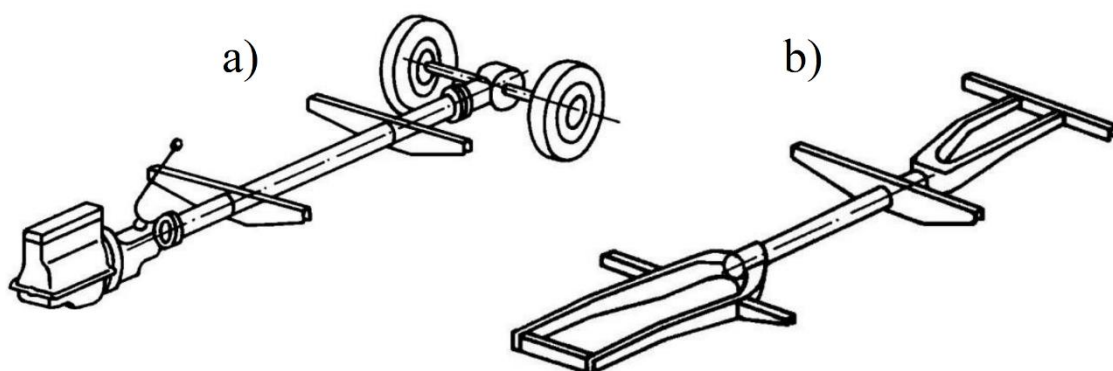
5.2 Páteřový rám

Jedná se o provedení rámu, který využívá modulovou konstrukci nosné roury a výkvných polonáprav. Nosná roura se skládá ze skříně přídavné převodovky, nosných trubek a spojovacích dílů. Spojení jednotlivých částí je realizováno přes příruby se šroubovými spoji. Kromě primárního páteřového rámu, mají vozidla i sekundární, nejčastěji žebřinový rám. Ten slouží k uchycení důležitých částí vozidla – kabiny, motoru, nádrží apod. Tato kombinace rámu se vyznačuje velmi dobrou torzní i ohybovou tuhostí, a proto je výhodná obzvláště pro vozidla zajíždějící do terénu. [26, 29]



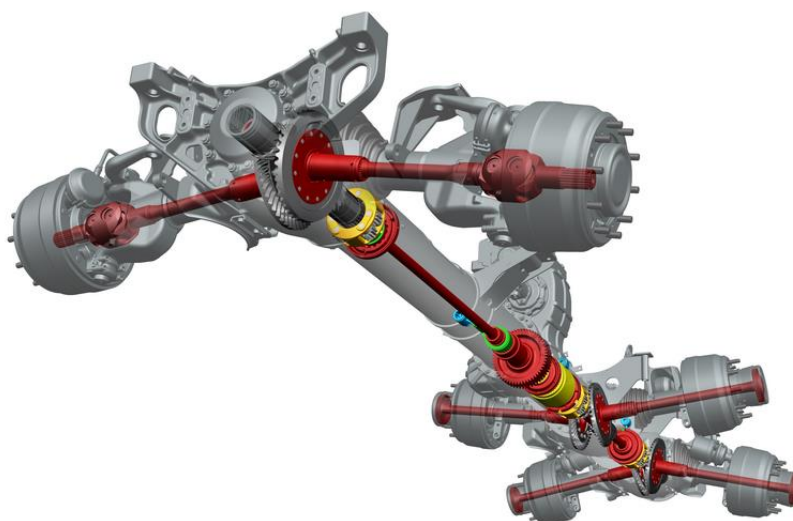
Obrázek 16: Spojený páteřový a žebřinový rám [22]

Norma ČSN 30 0025, zmíněná v kapitole 5, promlouvá o rámu páteřovém a rámu páteřovém vidlicovém. Tyto rámy jsou schematicky ukázány na obrázku 17. Toto provedení, kde je motor přímo připojen k nosné rouře, se dnes už nepoužívá. Tuhé spojení motoru a ostatních částí hnacího ústrojí zesilovalo hluk způsobený jejich vibracemi. Také byla tato místa hnacího ústrojí špatně přístupná pro údržbu, což vedlo k časově i finančně náročným zákrokům. Proto byla tato montáž motoru nahrazena pružným uložením na žebřinovém rámu a výkon je do roury přiveden přes přídavnou převodovku. [26, 29]



Obrázek 17: a) páteřový rám b) páteřový rám vidlicový

Předností páteřového rámu je jeho univerzálnost při zakázkové výrobě, kdy můžeme změnou počtu nosných rour dosáhnout různého uspořádání, ale také různých rozvorů. Vynálezcem a typickým představitelem této koncepce rámu je automobilka Tatra, která jej používá téměř pro všechny nákladní i vojenská vozidla. [29]



Obrázek 18: 3D model páteřového rámu vozidla od firmy Tatra [30]

5.3 Příhradový rám

Tento rám je tvořen příhradovou konstrukcí z různých uzavřených nebo otevřených profilů, ale také z plechových výlisků. Nejčastěji se tento rám používá u autobusů, obytných automobilů, motocyklů a speciálních závodních vozidel. Uzly konstrukce jsou obvykle svařované, výjimečně mohou být i nýtované. Výhodou je bezpochyby pevnost rámu, ale také výborná torzní a ohybová tuhost. Pokud věnujeme dostatečnou pozornost optimalizaci profilů, může být nespornou výhodou i nízká hmotnost rámu. V případě poškození je ale bohužel velmi složité, ne-li nemožné poškozené části rámu vyměnit. Na obrázku 19 lze vidět příhradovou konstrukci malosériového závodního automobilu. Jedná se o svařenec z kombinací jechlů a trubek různého průřezu. Dále jsou na rám přivařené různé plechové výlisky, kterými je realizováno spojení se zavěšením kol a dalšího příslušenství. [24, 26]



Obrázek 19: Ukázka 3D modelu příhradového rámu závodního auta [31]

6 Konstrukční návrh rámu

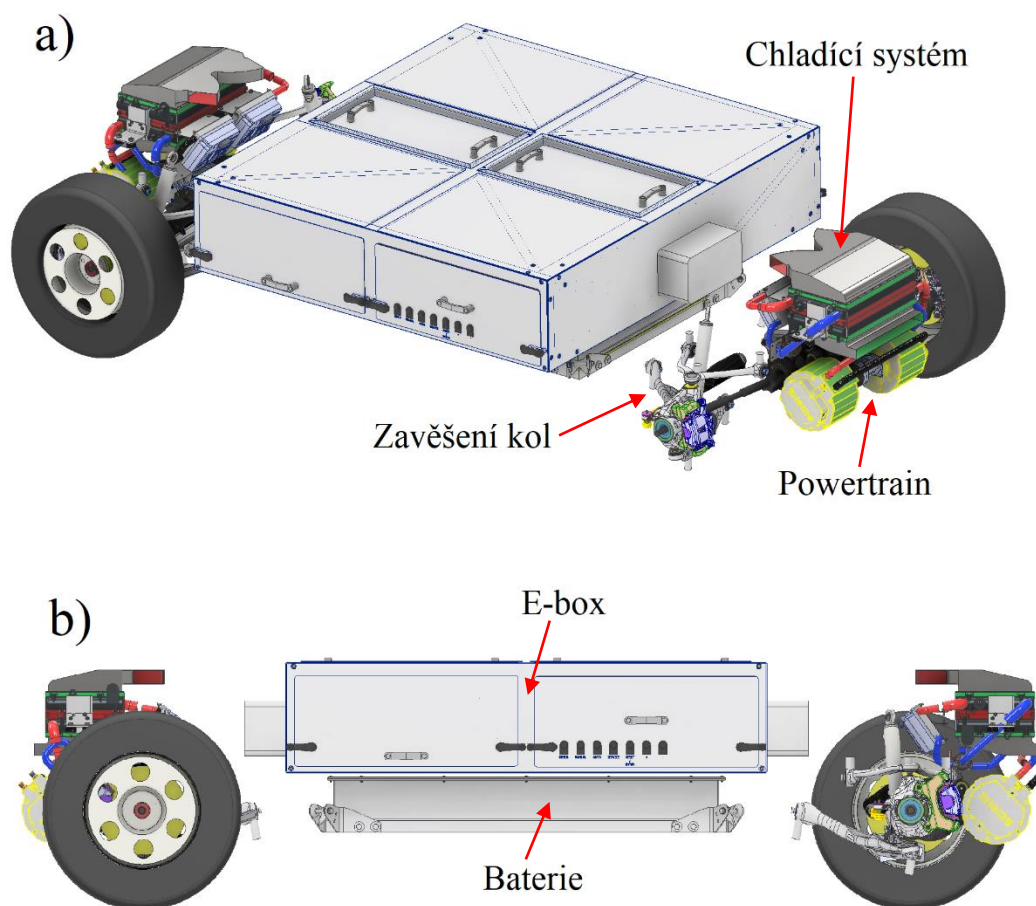
V této kapitole budou podrobně popsány detaily konstrukce a požadavky rámu, které byly potřeba řešit. Nejprve budou shrnuty zásadní požadavky, dále výběr vhodných materiálů a na závěr kapitoly rozbor finálního řešení konstrukce rámu.

6.1 Požadavky na rám autonomního vozidla TUL

Před zahájením konstrukce rámu, byla již projektovým týmem, který se na vývoji vozidla podílí, vybrána kompletní koncepce vozidla. Bylo rozhodnuto o typu a uspořádání hnacího ústrojí, o typu zavěšení kol nebo o mechanismu řízení vozidla. Také bylo rozhodnuto o obousměrném provozu vozidla, z čehož vyplynula i jeho příčná a podélná symetrie. Z těchto rozhodnutí plyne i nespočet požadavků, které je při návrhu rámu nutné zohlednit.

Nejprve jsou zde požadavky zmíněné požadavky v kapitole 2, které vycházejí ze zadání projektu. Maximální hmotnost vozidla 3500 kg a z toho minimálně 1000 kg užitečná hmotnost. Převoz různých druhů materiálů po různých površích. Modulárnost vozidla – vylepšení nebo výměna jednotlivých konstrukčních celků.

Dále požadavky, které jsou dány rozhodnutím konstruktérů, podílejících se na vývoji vozidla. Dodržení rozměrů rozvoru a rozchodu vozidla, které jsou $L = 2,7$ m, respektive $B = 1,7$ m. Dále umožnění bezproblémového zavěšení kol a dostatečný prostor při jejich pružení a zatáčení. Zajištění dostatečně pevného a prostorného uložení pro pohonnou jednotku. Bezpochyby také věnovat pozornost nekonfliktnosti rámu s ostatními, již hotovými prvky vozu jako je například chladicí systém, baterie nebo E-box. Posledním, ale velice důležitým požadavkem je navrhnout takovou konstrukci rámu, která zajistí, aby se baterie v ní uložená nedeformovala. Pokud by ale mělo k takovému případu dojít, tak zajistit deformaci baterie až jako poslední prvek celého vozidla. V opačném případě by mohlo dojít k rychlé destrukci baterie a v horším případě k jejímu vzplanutí.



Obrázek 20: Výchozí stav vozidla – a) ISO pohled, b) boční pohled

Na obrázku 20 je ukázka 3D modelu výchozího stavu vozidla. Při vypnuté viditelnosti jednoho z kol můžeme v přední části vozidla vidět hnací ústrojí (dále v textu také „powertrain“), zavěšení kol a chladicí systém. V prostřední části vozidla se nachází zakrytovaná baterie a nad ní E-box. Lze vidět tedy veškeré vytvořené části vozu, které již mají danou svoji polohu v prostoru a tyto celky je v rámci této diplomové práce nutné vzájemně propojit.

6.2 Volba typu rámu

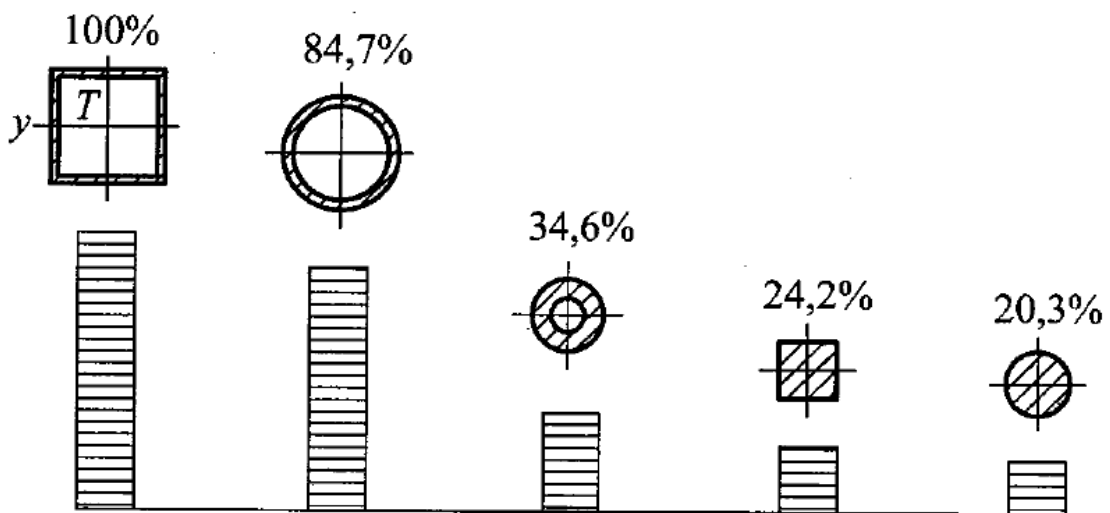
V první řadě bylo důležité promyslet, které druhy rámu by pro toto autonomní vozidlo připadaly v úvahu. Páteřový rám nebylo možné použít, z důvodu již vybrané koncepce hnacího ústrojí, pozice baterie a E-boxu. Jako příhodný se jevil rám žebřinový – obvodový, který by především umožnil nekonfliktní uložení a ochranu baterie, ale také příhodné spojení s E-boxem. Problém ovšem nastal při snaze vést podélníky až do přední, respektive zadní části vozidla a také při snaze vytvořit dostatečně tuhou konstrukci k uložení plošiny.

Byl zvolen rám příhradový a pro zajištění adekvátní ochrany baterie se čerpala inspirace právě v obvodovém rámu. Bylo tedy možné splnit prvky modulárnosti vozidla a zároveň zajistit dostatečnou tuhost i pevnost rámu za cenu minimálních ústupků na již navržených částech vozu.

6.3 Volba průřezu profilů a materiálu

Při volbě typů profilů, které budou v konstrukci rámu použity, bylo potřeba zvážit několik aspektů. Nejprve musíme zvolit vhodný tvar průřezu profilů, který bude dostatečný na to, aby rám snesl i extrémní případy namáhání, které mohou při dynamické jízdě nastat. Je třeba se řídit racionálními přístupy, které vycházejí z toho, že různé průřezy odolávají různým zatížením odlišně. Rozhodující je přitom některá veličina příslušející průřezu. Obvykle se jedná o velikost plochy průřezu, moment setrvačnosti a příslušný modul průřezu v krutu či ohybu. Spolu se zatížením tyto veličiny určují napětí v daném profilu. Hodnota napětí v profilu je při poškození rozhodující. Dobře vybraný průřez dává předpoklad k ekonomickému využití materiálu a snížení hmotnosti celého vozu. [32]

Na obrázku 21 je provedeno srovnání několika základních tvarů průřezu profilů, které mají stejnou délku a jsou zatíženy stejným ohybovým momentem. Všechny průřezy mají stejnou plochu, aby bylo možné srovnání provést. Z tohoto porovnání vyplývá, že průřezy s větším kvadratickým momentem J_y , jsou konstrukčně mnohem výhodnější.



Obrázek 21: Relativní únosnost daných průřezů profilů při ohybu [32]

I přes fakt, že čtvercový průřez vychází pevnostně lépe, bylo rozhodnuto o použití kruhových bezešvých trubek na většině celé rámové struktury. Mezi hlavní důvody patřila

především méně konfliktní zástavba a po diskusi se svářečem i snazší svařitelnost jednotlivých prvků. Za další výhody můžeme považovat větší sortiment na trhu, ať už se díváme na množství různých průměrů a tloušťek stěn nebo na dostupnost konstrukčně zajímavějších materiálů.

Jelikož bude rám z velké části svařován, musíme vybírat pouze dobře svařitelné materiály. Navíc se hlavní rám bude skládat ze dvou druhů materiálu, tudíž musíme brát ohled i na jejich vzájemnou svařitelnost.

Pro konstrukci příhradového rámu byla vybrána běžná konstrukční ocel 11 373 a pevnostní chrom-molybdenová ocel 15 130 či její obdoba. Požadavkem na pevnostní ocel je minimální mez kluzu $R_e = 700$ MPa a dobrá svařitelnost. V tabulce 2 je shrnutí všech použitých průřezů i materiálů, které budou ke konstrukci celého rámu potřeba. Tabulka je doplněna o plochu průřezu, modul průřezu k ose Y a o jednotkovou hmotnost, která byla spočítána z hustoty oceli $\rho = 7800$ kg/m³.

Tabulka 2: Seznam použitých profilů na konstrukci rámu

Rozměr	Materiál	Plocha průřezu [mm ²]	Hmotnost [kg/m]	Modul průřezu [mm ³]
TR 70×3	15 130	631	4,9	10144
TR 50×2	11 373	302	2,4	3480
TR 50×2	15 130	302	2,4	3480
TR 35×2	11 373	207	1,6	1619
TR 35×2	15 130	207	1,6	1619
TR OBD 80×40×3	11 373	924	7,2	13963


6.4 Konstrukce jednotlivých částí rámu

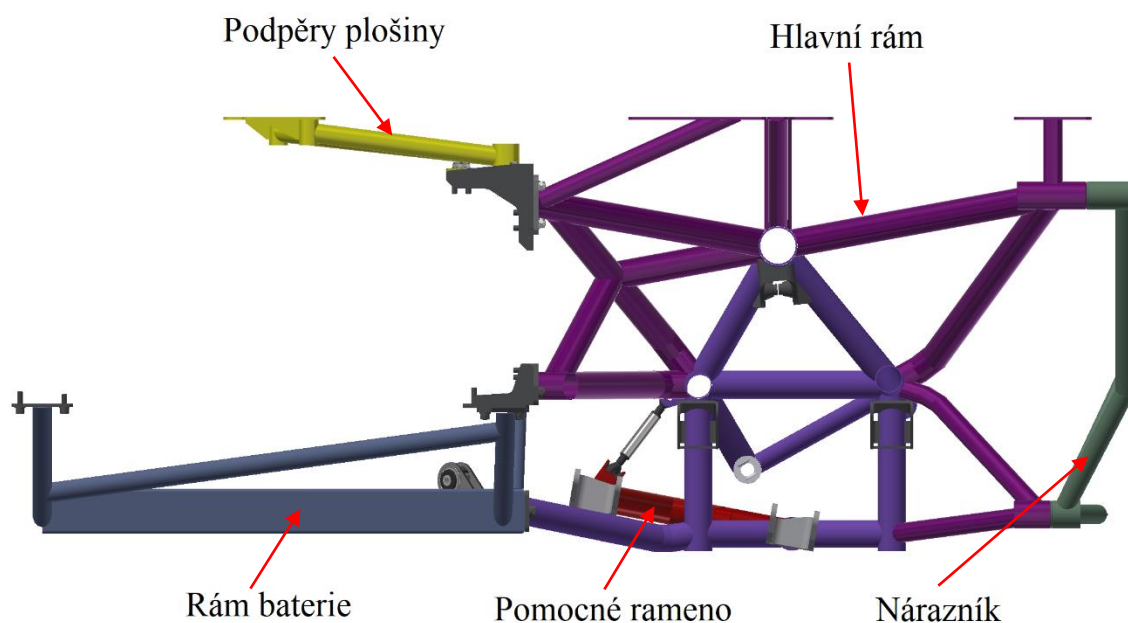
V této kapitole budou postupně rozepsány jednotlivé části rámu, zejména jejich funkce, pojmenování nebo konkrétní problémy, se kterými bylo nutné se vypořádat. Jelikož je rám symetrický ve dvou rovinách – podélné a příčné, byly jeho části konstruovány pouze jako čtvrtinový model. Zbytek modelu byl následně zrcadlen, podle zmíněných rovin. Toto značné zjednodušení se sebou neslo ale i několik nevýhod. Jednou z nich byla například nezbytnost vytvoření jiného samostatného modelu při tvorbě analýzy, jelikož

zrcadlená část rámu nenesla potřebné reference profilů, které byly nutné pro její úspěšné spuštění. Zrcadlená část také nebyla schopná reagovat na změny provedené na aktivní čtvrtině modelu, a proto musela být tato funkce použita až po úplném dokončení návrhu.

V tabulce 3 jsou vypsány všechny části rámové struktury a jejich barevné označení ve 3D modelu. Na obrázku 22 lze vidět boční pohled na finální čtvrtinový model celého rámu.

Tabulka 3: Seznam částí rámové struktury

Název části rámu	Barva v modelu
Hlavní rám	Fialová, purpurová 
Nárazník	Zelená 
Rám baterie	Modrošedá 
Podpěry plošiny	Žlutá 
Pomocné rameno	Červená 

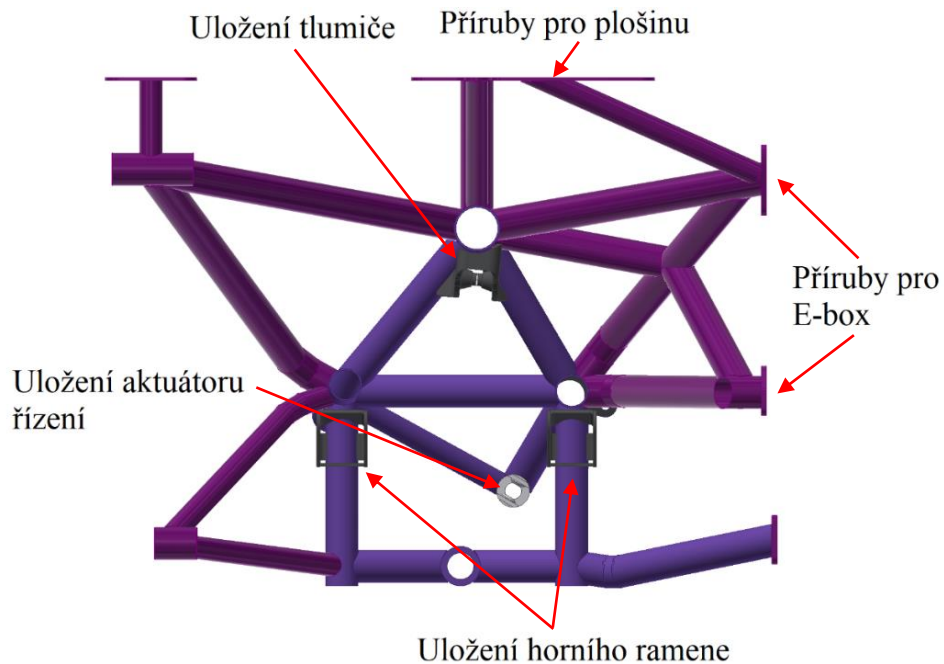


Obrázek 22: Boční pohled na čtvrtinový 3D model rámu

6.4.1 Hlavní rám

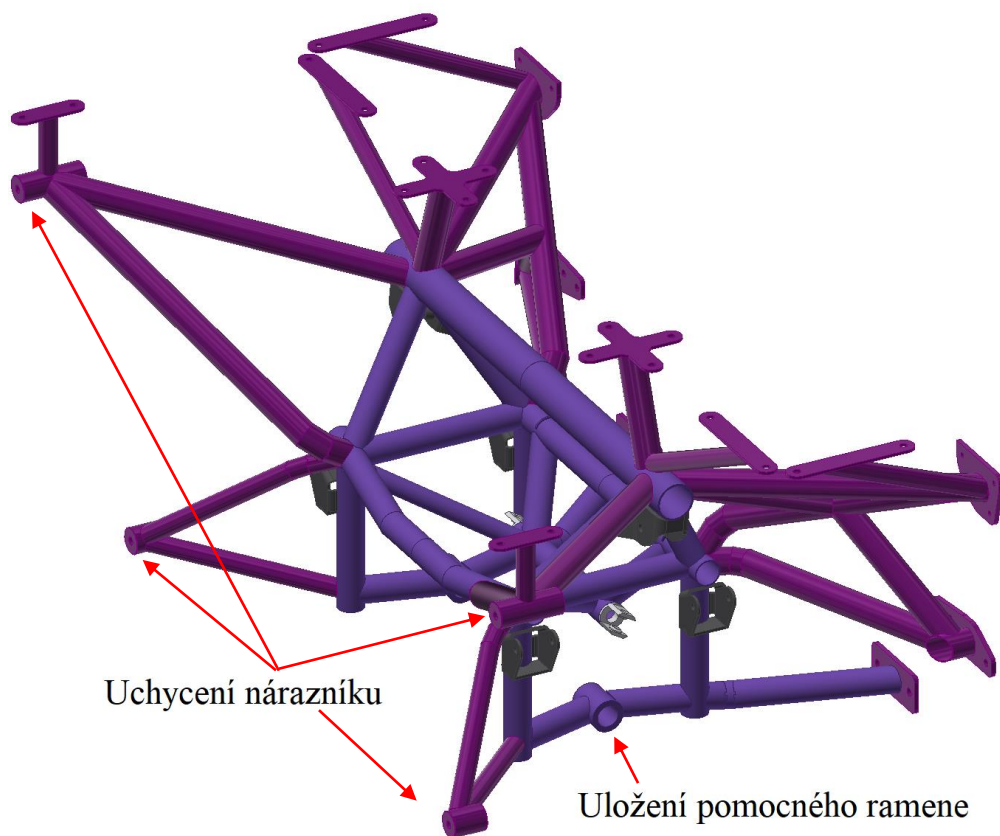
Úkolem hlavního rámu je přímo nést vrchní rameno lichoběžníkového zavěšení kol, umožnit dostatečně pevné uložení powertrainu jeho chlazení nebo realizovat spojení lineárního aktuátoru řízení s těhlicemi kol. Spodní rameno lichoběžníkového zavěšení je k tomuto rámu připojeno přes pomocné rameno, které bude podrobněji popsáno v další kapitole. Dále je hlavní rám velmi důležitým prvkem k uložení nástavby vozidla, protože přenáší většinu její tíhy a samozřejmě také většinu tíhy nákladu.

Rám je tvořen jako trubkový svařenec ze dvou druhů ocelí. K tomuto rozhodnutí se dospělo při postupné optimalizaci profilů a materiálů po pevnostní analýze celé struktury rámu. Byly zde použity trubky z běžné konstrukční oceli o průměru 50 mm a 35 mm, a také trubky z pevnostní oceli o průměru 70 mm a 50 mm. Dále jsou k rámu přivařeny vypálené příruby z běžné konstrukční oceli, díky kterým je realizováno spojení hlavního rámu a E-boxu nebo nástavby vozidla (obrázek 23).



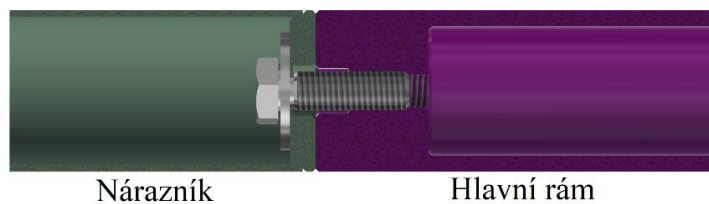
Obrázek 23: Boční pohled na 3D model hlavního rámu

Na obrázku 23 jsou ukázány také ohybky, které mají umožnit uložení horního ramene a tlumiče. Barevné rozdělení jednotlivých částí rámu je z důvodu snazší orientace v modelu. Tmavě fialová barva reprezentuje chrom-molybdenovou ocel s vyšší pevností a purpurová barva označuje běžnou konstrukční ocel. Z rozložení materiálů v návrhu konstrukce je patrné, že střed rámu bude mnohem více namáhán než jeho okolí.



Obrázek 24: ISO pohled na 3D model hlavního rámu

V přední části hlavního rámu (obrázek 24) se nachází čtyři montážní body, přes které je k němu uchycen nárazník. Tyto části jsou navrženy z plného materiálu, kde je z jedné strany závit M12 a z druhé strany je díl částečně odlehčen. Spodní a vrchní díly se liší pouze ve své délce, princip zůstává stejný. Spojení hlavního rámu s nárazníkem lze vidět na obrázku 25.

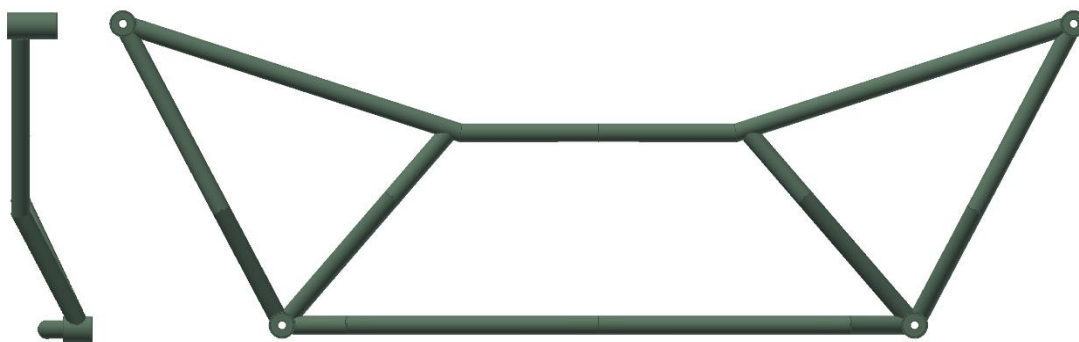


Obrázek 25: Spojení hlavního rámu a nárazníku

6.4.2 Nárazník

Funkce nárazníku je prostá. Má za úkol chránit powertrain, systém chlazení, kola a zavěšení kol. Důležitým požadavkem byla adekvátní tuhost a pevnost nárazníku. Tím je myšlen fakt, že prvotní deformace, které by měly při čelním nárazu nastat, bude absorbovat nejprve nárazník a až poté zbytek rámu. Důvod je zřejmý, poškozená hlavní část může znemožnit funkci celého vozu a bude vyžadována časově i finančně nákladná oprava.

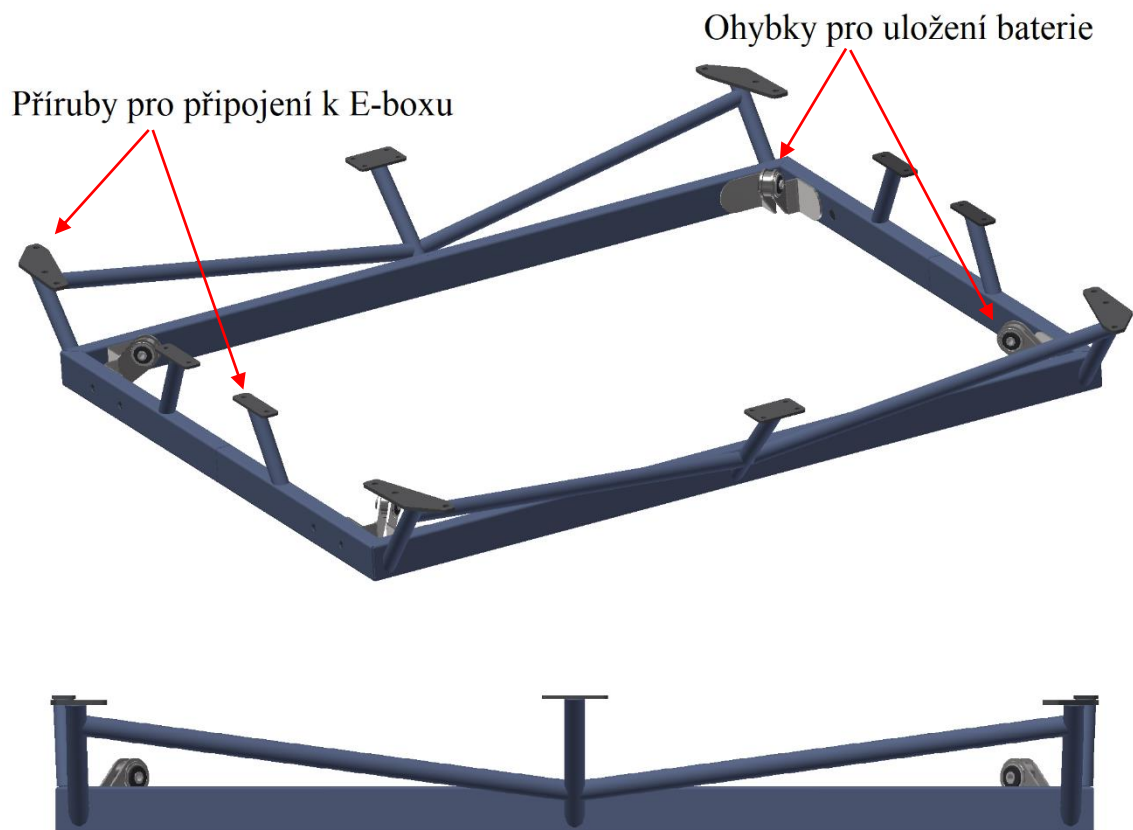
Nárazník je navržen z trubek o průměru 35 mm a 50 mm. Větší průměr trubek byl použit pouze na rohy nárazníku. Vzdálenost spodních rohů nárazníku od země, přímo ovlivňuje velikost předmětu či nerovnosti, kterou je vozidlo schopné bezproblémově překonat. Dále jsou na tyto větší trubky navržena víčka, která k ní budou navařena a tím bude umožněno spojení těchto částí rámu. Toto víčko lze vidět na obrázku 25 – zelený díl pod podložkou šroubu.



Obrázek 26: Boční a čelní pohled na 3D model nárazníku

6.4.3 Rám baterie

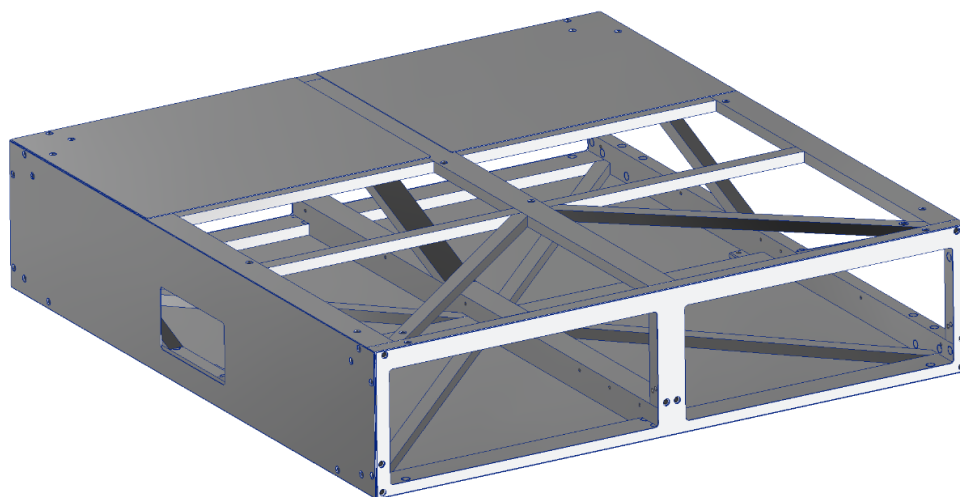
Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.2 inspirace rámu baterie byla čerpána z konstrukčního provedení obvodového rámu. Hlavní funkcí této části rámové struktury je nést a chránit baterii vozidla. Skládá se z profilů obdélníkového průřezu a trubek o průměru 35 mm. Tato část rámu byla navržena poměrně mohutně, proto bylo dostačující pracovat s běžnou konstrukční ocelí. K ostatním částem rámu je montován pomocí vypálených přírub, které jsou přivařeny ke konci trubek. Baterie je uložena v silentblocích, které jsou usazeny do plechových ohybků přivařených v rozích obdélníkových profilů.



Obrázek 27: ISO a boční pohled na 3D model rámu baterie

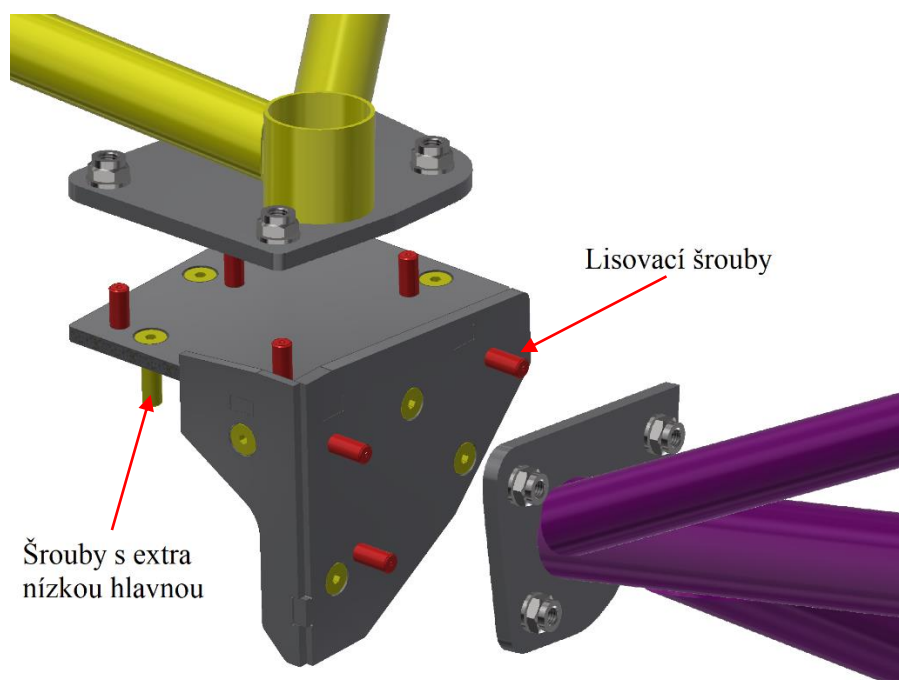
6.4.4 E-box

Specifický úložný prostor pro téměř veškerou elektroniku autonomního vozidla. E-box se skládá z hliníkového rámu, čtyř vysouvacích šuplíků (tři rozvaděče a jeden hydrogenerátor), kabeláže a jejích nosičů. Konstrukce rámu je navržena jako svařenec z obdélníkových profilů a prostor mezi nimi je zakrytován hliníkovým plechem. Tato konstrukce byla konzultována s kolegy z fakulty mechatroniky, kteří nesou zodpovědnost za elektrotechnickou část vozidla. Jejich požadavkem bylo, navrhnout E-box vodotěsný, kvůli ochraně vnitřních součástí. I přes to, že je E-box součástí nosné struktury vozidla, byla snaha o jeho nízké namáhání. A to především z důvodu zajištění funkčnosti vysouvacích šuplíků, ochrany elektroniky a zajištění vodotěsnosti.



Obrázek 28: ISO pohled na 3D model rámu E-boxu – částečně zakrytován

E-box je centrální částí vozidla, ke které jsou montovány ostatní části rámové struktury, jako je hlavní rám, rám baterie a podpěry plošiny. Ke spojení těchto dílčích částí rámu bylo navrženo několik svařovaných sestav z plechových výpalků. V obdélníkových profilech rámu E-boxu jsou připravené válcové výztuhy, do kterých se následně usadí samořezná nerezová závitová vložka. Pomocí těchto vložek a pevnostních šroubů s extra nízkou hlavou (na obrázku 29 jsou žluté) budou k E-boxu upevněny svařované plechové sestavy, které jsou osazeny lisovacími šrouby – výchozí prvek pro upevnění přírub na ostatních částech rámu (na obrázku 29 jsou červené).



Obrázek 29: Detailní pohled na funkci spojů E-boxu a ostatních prvků rámu

Sestava, která je přišroubována k E-boxu byla navržena z nerezové oceli z důvodu možné elektrolytické koroze, která je způsobena nevhodnou kombinací různých kovů. Ke vzniku galvanického článku, jehož důsledkem je právě elektrolytická koroze, je zásadní vlhkost. V absolutně suchém prostředí by k degradaci materiálu nedocházelo. Takový případ můžeme vyloučit, protože ke vzniku galvanického článku je dostačující i běžná vlhkost vzduchu. Vzájemná snášenlivost kovů je na obrázku 30.

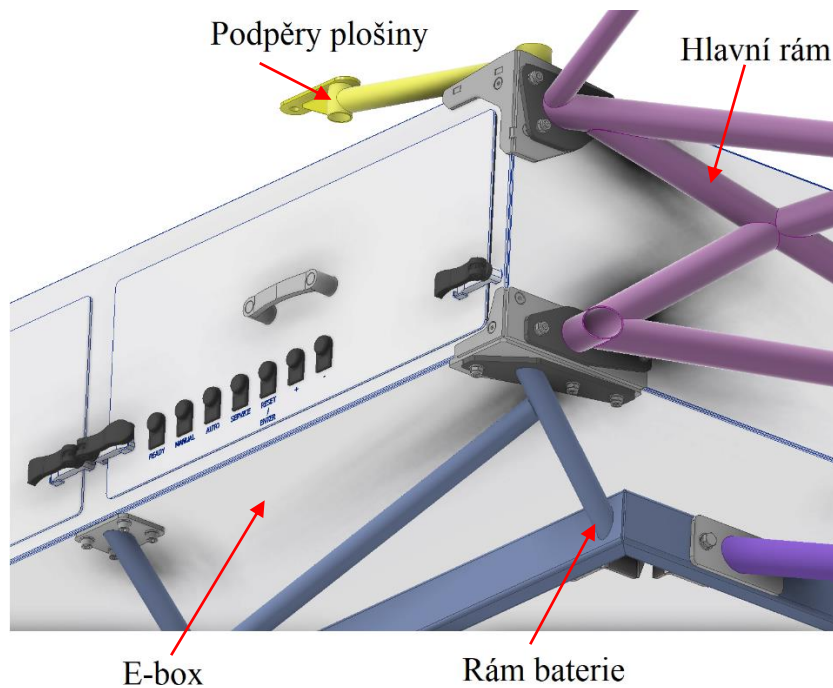
Materiál	Hliník (Al)	Olovo (Pb)	Měď (Cu)	Zinek legován titanem (TiZn)	Korozi-vzdorná ocel (nerez)	Zinkový žárový povlak oceli	Uhlíková ocel
Hliník (Al)	+	0	-	+	+	+	-
Olovo (Pb)	0	+	+	+	+	0	-
Měď (Cu)	-	+	+	-	+	-	-
Zinek legovaný titanem (TiZn)	+	+	-	+	+	+	-
Korozivzdorná ocel (nerez)	+	+	+	+	+	+	+
Zinkový žárový povlak oceli	+	0	-	+	+	+	-
Uhlíková ocel	-	-	-	-	+	-	+

Vysvětlivky:

- ⊕ Materiály můžete kombinovat.
- 0 Materiály raději nekombinujte.
- Materiály rozhodně nekombinujte, jejich kontakt za přítomnosti vody povede ke korozi.

Obrázek 30: Vzájemná snášenlivost kovů [33]

Na obrázku 31 je vidět spojení E-boxu s hlavním rámem, podpěrami plošiny a rámem baterie. Lze si také všimnout, že spoje jsou na modelu různě šedé. Tím je rozlišen materiál, ze kterého jsou dané díly vyrobeny. Světle šedá je nerezová ocel a tmavě šedá je běžná konstrukční ocel.



Obrázek 31: ISO pohled na spojení jednotlivých kusů rámové struktury

6.4.5 Podpěry plošiny

Funkcí této části rámu je snaha o výhodnější rozložení sil, které vznikají tíhou nástavby a nákladu. Z důvodu nemožnosti navrhnout podpory plošiny ve středu vozidla, respektive E-boxu, byla navržena koncepce uložení podpor do rohů E-boxu.



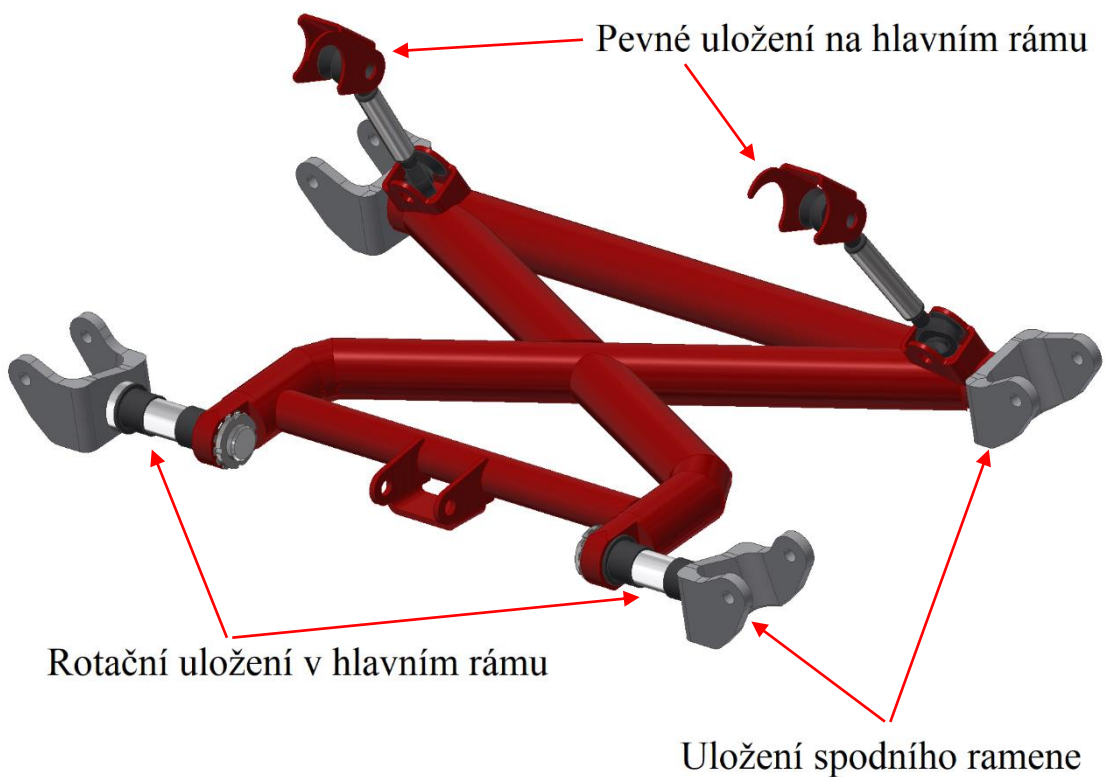
Obrázek 32: ISO a boční pohled na 3D model podpěry plošiny

6.4.6 Pomocné rameno

Jako poslední část rámu bude zmíněno pomocné rameno. Jeho návrh sice nebyl součástí této diplomové práce, protože spadá do návrhu zavěšení a geometrie kol. I přesto, nelze pomocné rameno vynechat, jelikož je nedílnou součástí rámové struktury a velmi výrazně se podílí na jeho celkové tuhosti.

V hlavním rámu je pomocné rameno uloženo částečně rotačně, aby bylo možné nastavit požadovanou geometrii spodního ramene. Možnost nastavení různé geometrie spodního ramene zavěšení, umožňuje nastavit teoreticky ideální střed klonění vozidla. Vhodným nastavením geometrie lze předejít vzniku momentu, který vzniká při brzdění, respektive akceleraci. Obecně se Anti-Dive / Anti-Squat geometrie využívá u závodních automobilů a formulí, nikoliv však nastavitelná, tak jako v případě tohoto autonomního vozidla.

Pomocné rameno bylo navrženo z trubek o průměru 35 mm a 50 mm. Z důvodu velkých zatížení, která na něj působí, je použita opět pevnostní ocel 15 130. Na obrázku 33 je kompletní sestava pomocného ramene.



Obrázek 33: ISO pohled na 3D model pomocného ramene

6.5 Váhové zhodnocení rámu

Hmotnost rámu nebyla nejdůležitějším faktorem při konstrukci rámové struktury, a proto nebyla nijak striktně omezována. Bezpochyby byla snaha o co nejlhčí provedení, ale hlavní preference byly kladeny na jeho tuhost, pevnost a nekonfliktnost s ostatními částmi autonomního vozidla. V tabulce 4 jsou rozepsány jednotlivé hmotnosti částí rámu a počet kusů, které jsou k realizaci kompletního rámu potřebné. Hmotnost byla počítána v CAD softwaru Inventor, který pro výpočet použil následující materiálové hustoty:

$$\rho_{ocel} = 7850 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{nerezová\ ocel} = 8000 \frac{kg}{m^3}$$

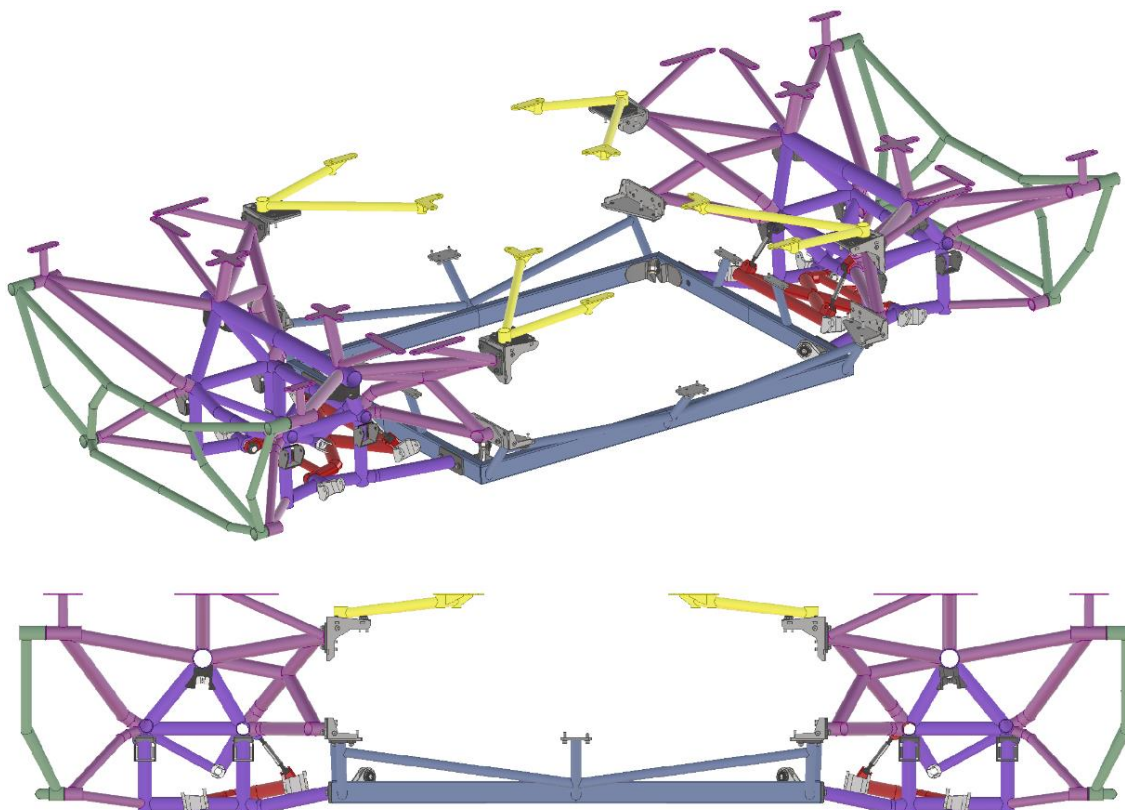
$$\rho_{hliník} = 2700 \frac{kg}{m^3}$$

Tabulka 4: Hmotnost rámové struktury

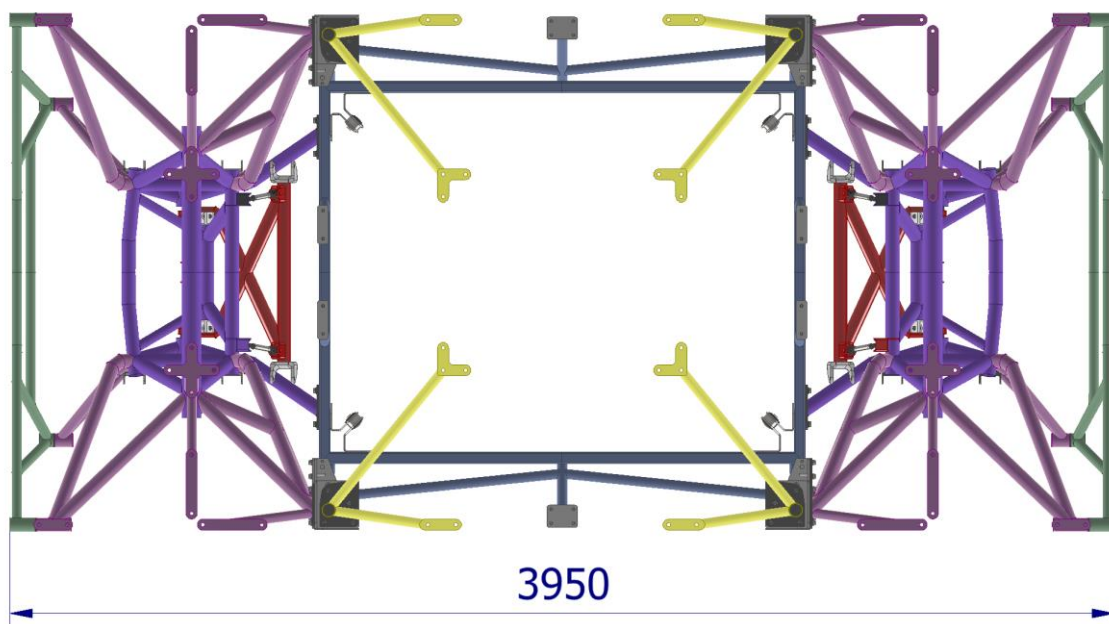
	Počet kusů [-]	Váha jednoho kusu [kg]	Celková váha [kg]
Hlavní rám	2	49,1	98,2
Nárazník	2	9,5	19
Rám baterie	1	41,8	41,8
Podpěry plošiny	4	1,8	7,2
Spojovací díly	-	-	52,1
Pomocné rameno	2	5,2	10,4
E-box	1	59,8	59,8
SUMA [kg]			288,4

Celková hmotnost rámu je tedy 288,4 kg. Není zde započtena hmotnost spojovacího materiálu (šrouby, matice, podložky, lisovací šrouby) ani hmotnost silentbloků k uchycení baterie. Maximální rozměry rámu jsou 3950 mm × 775 mm × 1840 mm (D×V×Š).

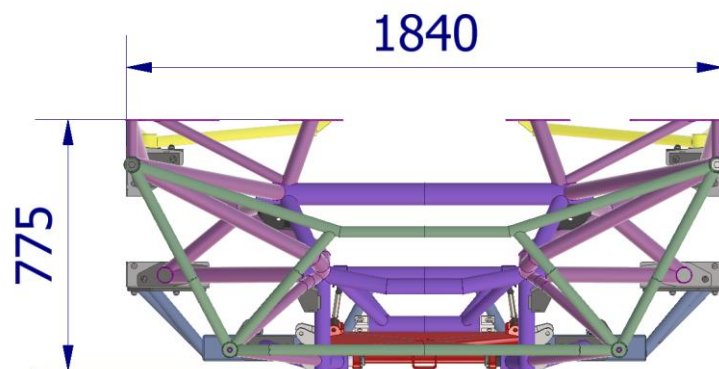
Na následujících dvou obrázcích lze vidět 3D model celkové sestavy rámu (obrázek 34–36) a sestavy celého vozidla – původní stav s vloženým rámem (obrázek 37).



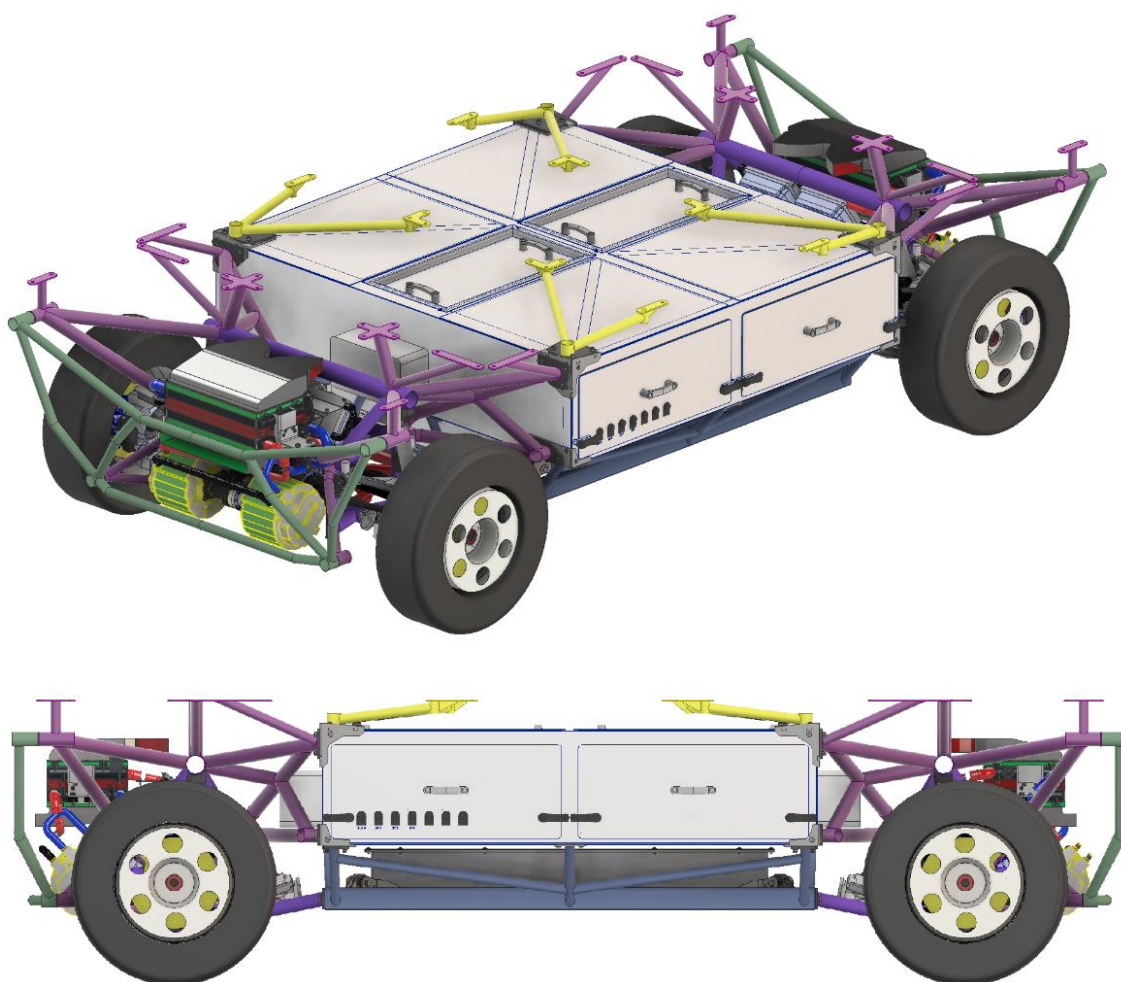
Obrázek 34: ISO a boční pohled na 3D model celkové sestavy rámu



Obrázek 35: Pohled shora na 3D model celkové sestavy rámu



Obrázek 36: Přední pohled na 3D model celkové sestavy rámu

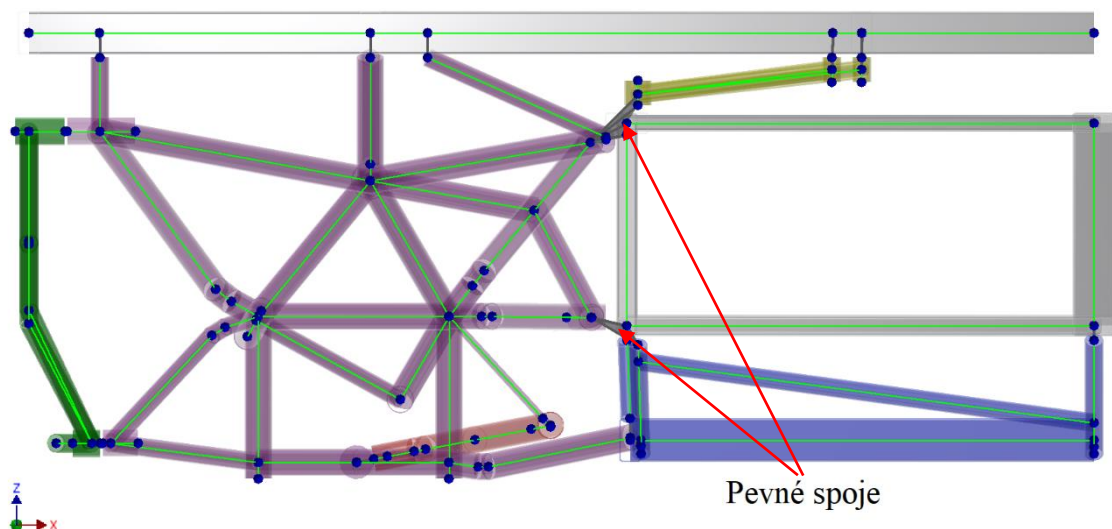


Obrázek 37: ISO a boční pohled na 3D model celkové sestavy vozidla s rámem

7 Pevnostní analýza rámu

Rám byl modelován v softwaru Inventor 2020 pomocí funkcí, které jsou určeny přímo k návrhu rámových konstrukcí. Proto byla možnost využít také nástavbu tohoto programu – analýza rámových konstrukcí. Nejprve však bylo nutné vytvořit model, se kterým tato nástavba dokáže pracovat tzn. zjednodušit díly, které nebyly modelovány přímo v generátoru rámových konstrukcí. Toto zjednodušení se týkalo všech rámových spojů, které musely být buď odstraněny nebo nahrazeny. Dále byla přidána ložná plocha vozidla, která se výrazně podílí na celkové tuhosti rámu. Následně byla navržená konstrukce automaticky převedena do lineárních nosníkových prvků a uzlů, ke kterým si software, ze zdrojového modelu, načte data o jejich průřezu a materiálu.

Z důvodu symetrie vozidla byla simulována pouze jeho polovina. Zjednodušení simulace s využitím příčné symetrie bylo konzultováno s odborníky Technické univerzity v Liberci, kteří mají dlouholeté zkušenosti s nejrůznějšími simulacemi. Převedený simulační model lze vidět na obrázku 38, ve kterém jsou ukázány také pevné spoje uzlů nahrazující spojovací díly. Pevně spojené uzly se pak v simulaci chovají jako jeden – ten který byl při výběru zvolen jako první. Dále lze na obrázku 38 vidět také souřadný systém, dle kterého jsou jednotlivá zatížení zadávána.



Obrázek 38: Připravený simulační model pro zadání okrajových podmínek

Dalším krokem byla volba simulovaných stavů vozidla vycházejících ze simulací vytvořených při konstrukčním návrhu náprav. K výpočtu sil, které zatěžují ramena, respektive rám vozidla při dynamické jízdě, byl použit SW Lotus Suspension. Provedená analýza rámu byla rozdělena do následujících čtyř zátěžových stavů, které budou podrobněji rozebrány v dalších kapitolách:

1. Plně naložené stojící vozidlo
2. Plně naložené brzdící vozidlo
3. Plně naložené vozidlo při akceleraci
4. Plně naložené vozidlo na nakloněné rovině před převrnutím

Všechny tyto zatěžující stavy jsou v prostoru zavazbeny identicky a dle podmínek symetrie. Do celé roviny symetrie a obou uložení tlumičů byly předepsány homogenní geometrické okrajové podmínky tzn. nulové posuvy v uzlech. V tabulce 5 jsou tyto vazby detailně ukázány. Kde „X“ je vyznačena pevná vazba, T značí posunutí a R rotaci.

Tabulka 5: Zavazbení simulačního modelu

	T _X	T _Y	T _Z	R _X	R _Y	R _Z
Rovina symetrie	X	–	–	X	X	X
Tlumič pravý	–	X	X	–	–	–
Tlumič levý	–	–	X	–	–	–

7.1 Zátěžové stavy

Pro výpočet sil, které na polovinu rámu působí, byly použity tyto vstupní hodnoty:

Váha nákladu $m_N = 500 \text{ kg}$

Váha baterie $m_B = 150 \text{ kg}$

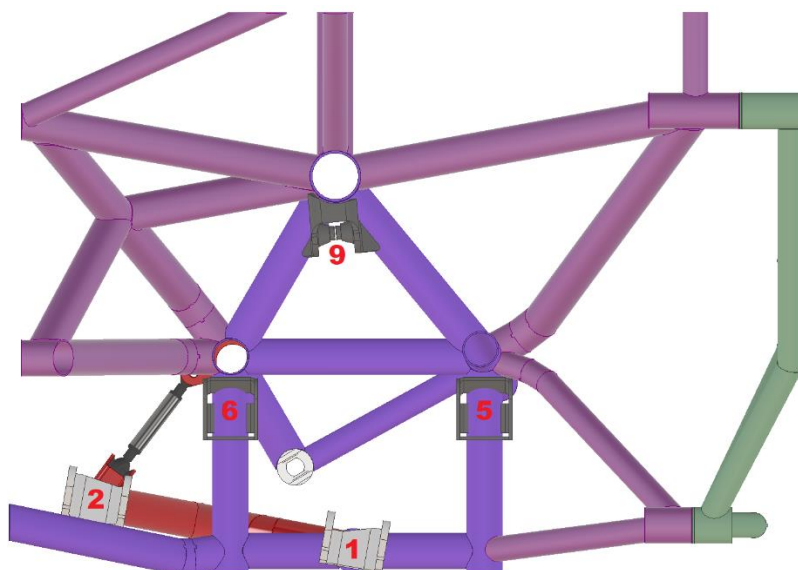
Váha šuplíku $m_\xi = 80 \text{ kg}$

Váha powertrainu $m_P = 82,4 \text{ kg}$

Maximální zrychlení $a_z = 3,1 \frac{m}{s^2}$

Maximální zpomalení $a_B = 7,5 \frac{m}{s^2}$

Dále bude pro popis v jednotlivých zátěžových stavech použit stejný systém číslování jednotlivých bodů uchycení ramen jako v SW Lotus Suspension (obrázek 39 a tabulka 6).



Obrázek 39: Popis bodů pro uložení ramen a tlumiče

Tabulka 6: Legenda k popisu bodů nápravy

Bod 1	Přední bod uchycení spodního ramene
Bod 2	Zadní bod uchycení spodního ramene
Bod 5	Přední bod uchycení horního ramene
Bod 6	Zadní bod uchycení horního ramene
Bod 9	Bod uchycení pružící jednotky na rám

7.1.1 První zátěžový stav

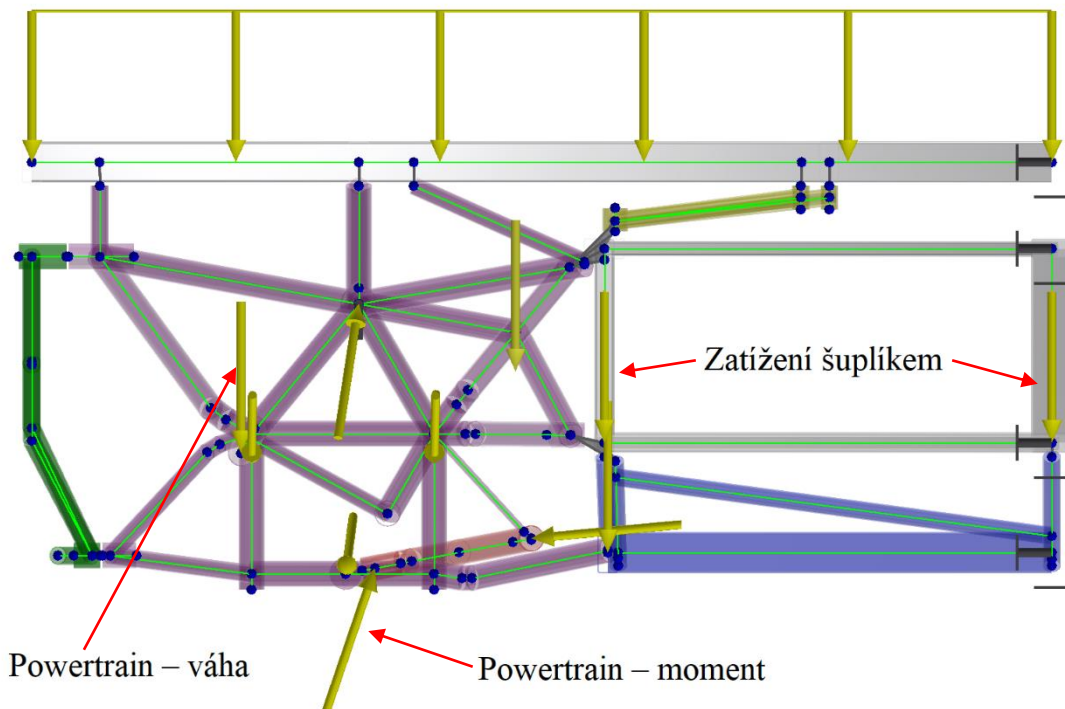
Plně naložené vozidlo s maximální kompresí pružících jednotek (maximální síla od pružin), což simuluje například doskok nebo přeložení. Na rám nepůsobí žádné dynamické účinky.

Tabulka 7: Tabulka OP – spojitá zatížení, stav 1

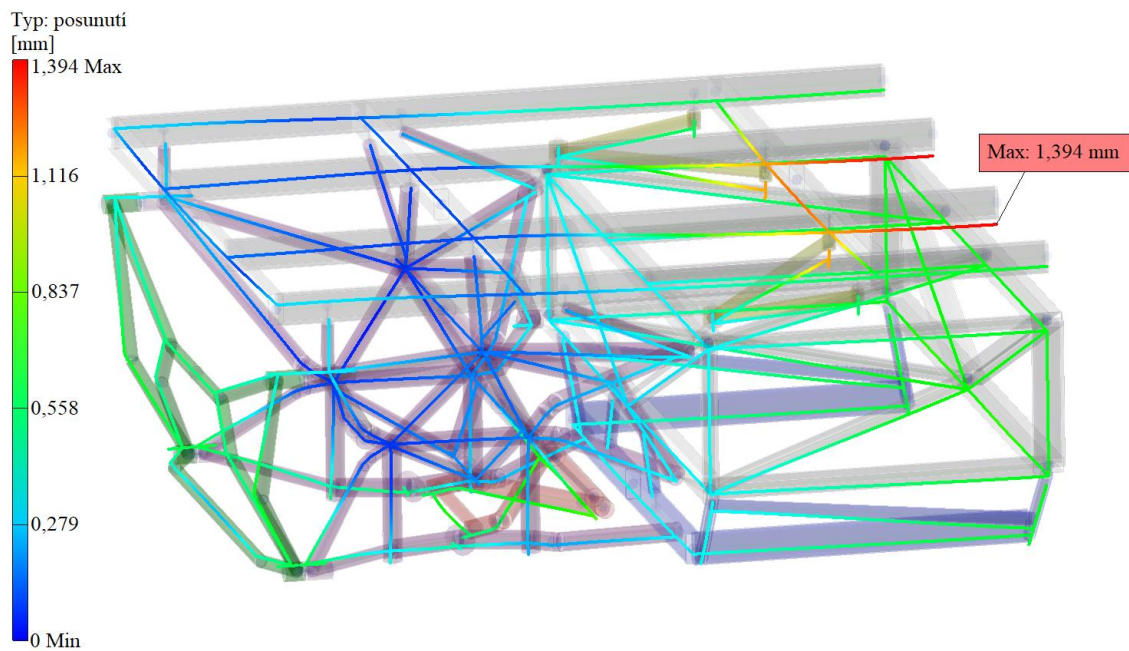
	Délka zatížení [mm]	Q_x [N/mm]	Q_y [N/mm]	Q_z [N/mm]
Zatížení nákladem	2×1950	0	0	-1,3
Zatížení šuplíkem	4×750	0	0	-0,53

Tabulka 8: Tabulka OP – silová zatížení, stav 1

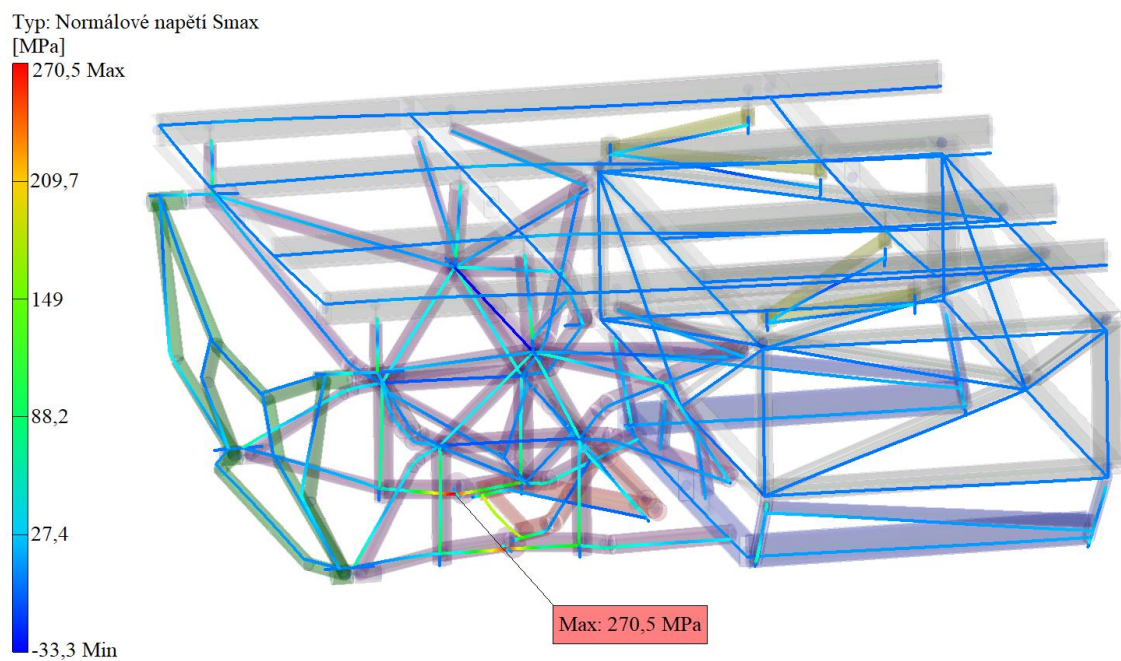
	Počet sil	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
Baterie	2	0	0	-750
Powertrain – váha	2	0	0	-404
Powertrain – moment	1	42	0	123
Bod 1	2	-1117	20602	-8448
Bod 2	2	-2563	-58	-236
Bod 5	2	-20	-2556	-1270
Bod 6	2	-20	-1499	-745
Bod 9	2	6513	-20927	42207



Obrázek 40: Zadané okrajové podmínky, boční pohled – stav 1



Obrázek 41: Výsledky simulace, posunutí – stav 1



Obrázek 42: Výsledky simulace, napětí S_{max} – stav 1

7.1.2 Druhý zatěžovací stav

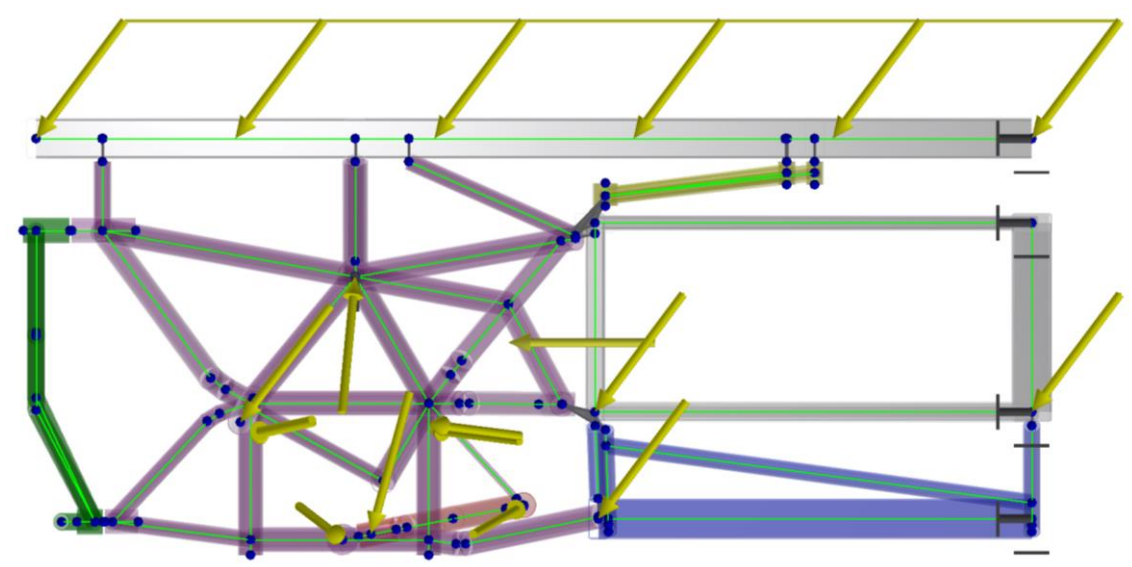
Plně naložené vozidlo, brzdící z přímé dopředné jízdy (uvažuje se maximální zpomalení vozidla). Na rám působí dynamické síly. Uvažuje se 100 % Anti-Dive geometrie, tudíž i minimální síly od pružících jednotek. Uvažován je také maximální brzdňý moment motorů.

Tabulka 9: Tabulka OP – spojitá zatížení, stav 2

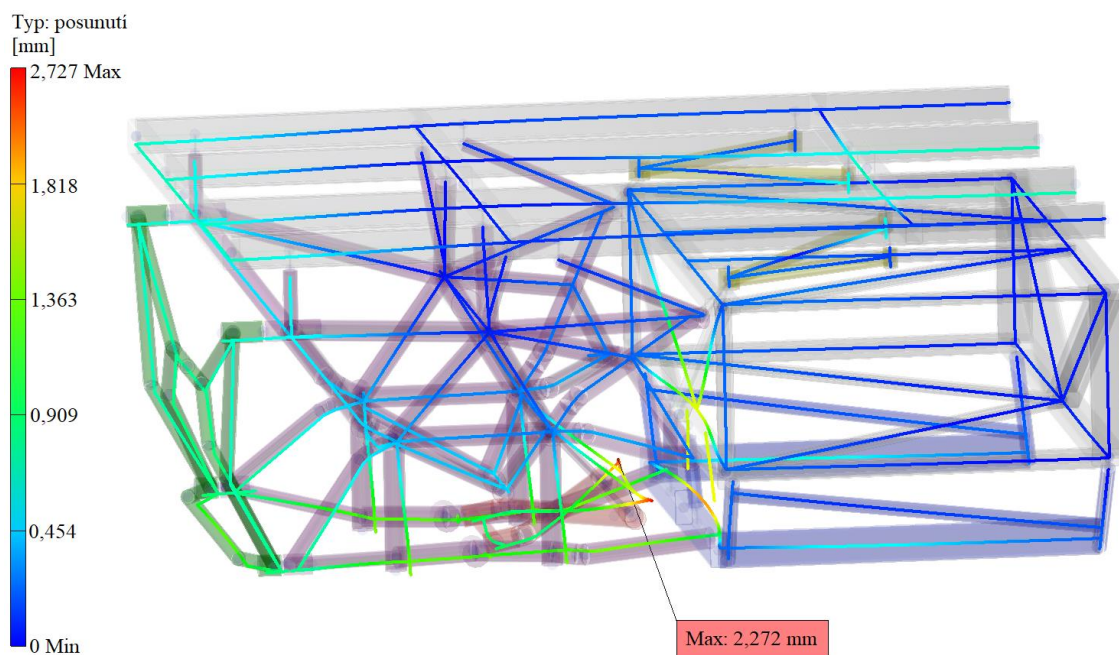
	Délka zatížení [mm]	Q_x [N/mm]	Q_y [N/mm]	Q_z [N/mm]
Zatížení nákladem	2×1950	-0,98	0	-1,3
Zatížení šuplíkem	4×750	-0,4	0	-0,53

Tabulka 10: Tabulka OP – silová zatížení, stav 2

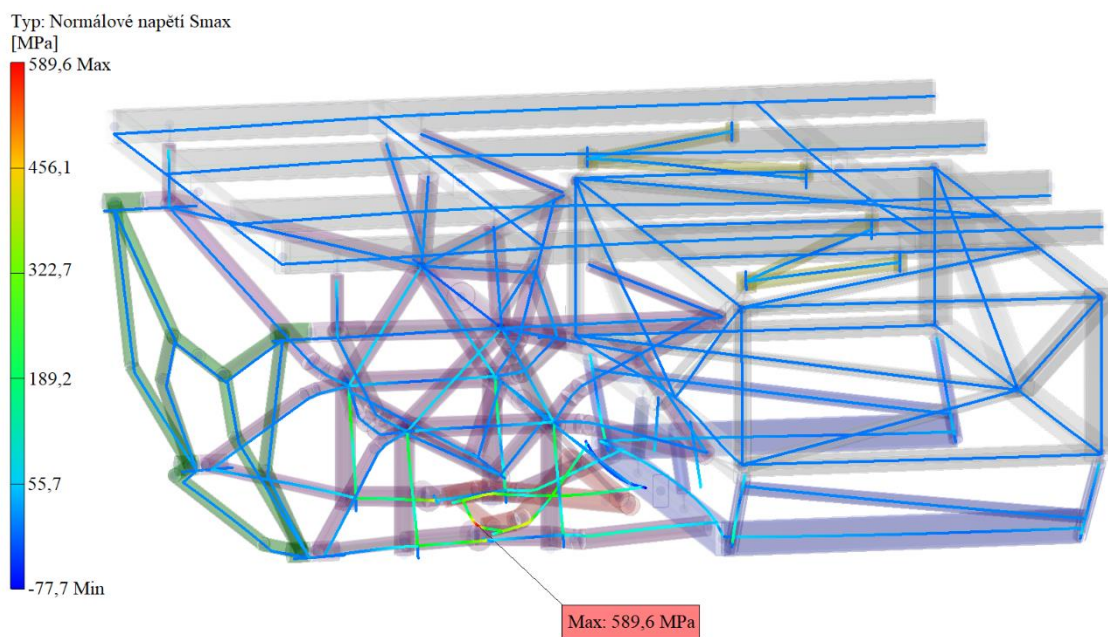
	Počet sil	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
Baterie	2	-563	0	-750
Powertrain – váha	2	-313	0	-404
Powertrain – moment	1	-2721	0	-7903
Bod 1	2	11157	34999	-8558
Bod 2	2	8759	-23436	5060
Bod 5	2	-5144	-11092	-1110
Bod 6	2	-5144	6497	649
Bod 9	2	2032	-8514	21143



Obrázek 43: Zadané okrajové podmínky, boční pohled – stav 2



Obrázek 44: Výsledky simulace, posunutí – stav 2



Obrázek 45: Výsledky simulace, napětí S_{max} – stav 2

7.1.3 Třetí zatěžovací stav

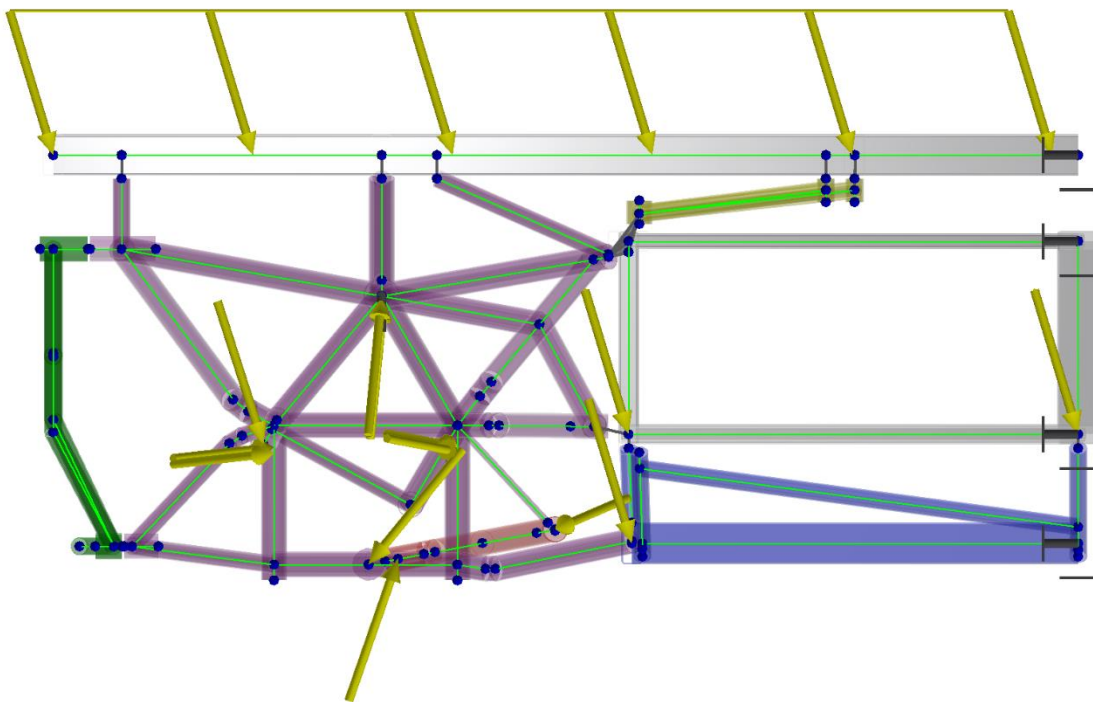
Plně naložené vozidlo, u kterého je uvažováno maximální dosažitelné zrychlení. Na rám působí dynamické síly. Je uvažován moment motoru, který zvládne vyvinout při krátkodobém přetížení.

Tabulka 11: Tabulka OP – spojitá zatížení, stav 3

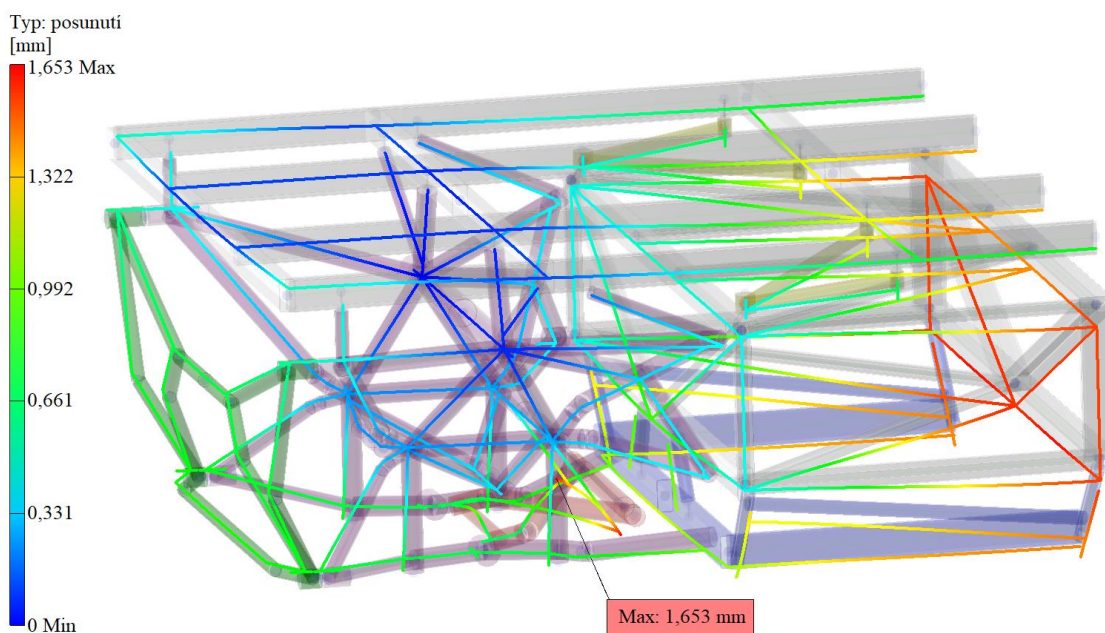
	Délka zatížení [mm]	Q_x [N/mm]	Q_y [N/mm]	Q_z [N/mm]
Zatížení nákladem	2×1950	0,4	0	-1,3
Zatížení šuplíkem	4×750	0,16	0	-0,53

Tabulka 12: Tabulka OP – silová zatížení, stav 3

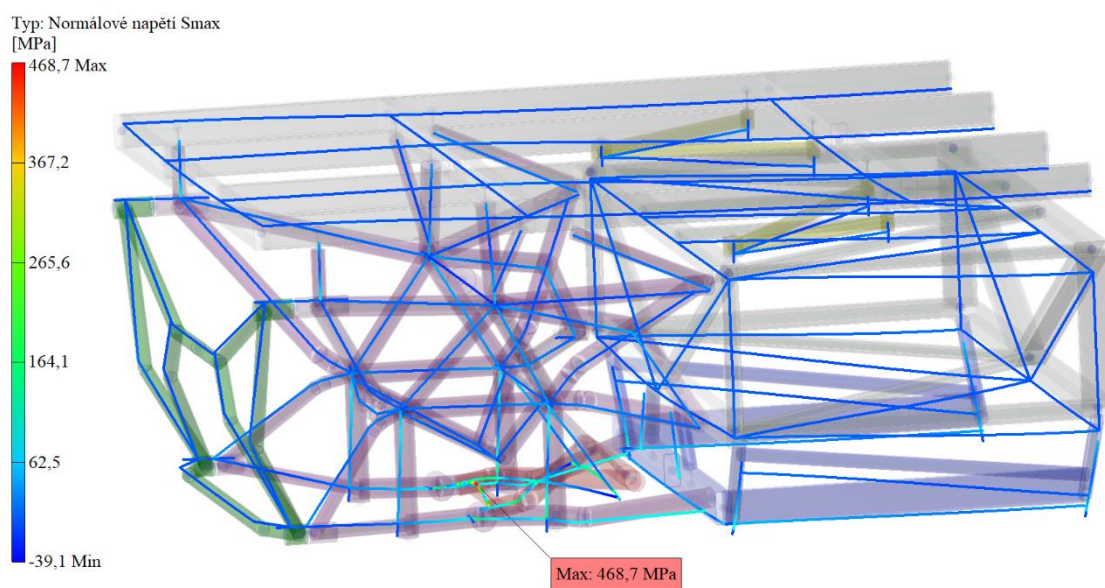
	Počet sil	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
Baterie	2	225	0	-750
Powertrain – váha	2	129	0	-404
Powertrain – moment	1	2773	0	8052
Bod 1	2	-5320	1591	-6534
Bod 2	2	-6010	10794	-2611
Bod 5	2	2394	2675	266
Bod 6	2	2394	-4529	-453
Bod 9	2	2032	-8514	21143



Obrázek 46: Zadané okrajové podmínky, boční pohled – stav 3



Obrázek 47: Výsledky simulace, posunutí – stav 3



Obrázek 48: Výsledky simulace, napětí S_{max} – stav 3

7.1.4 Čtvrtý zatěžovací stav

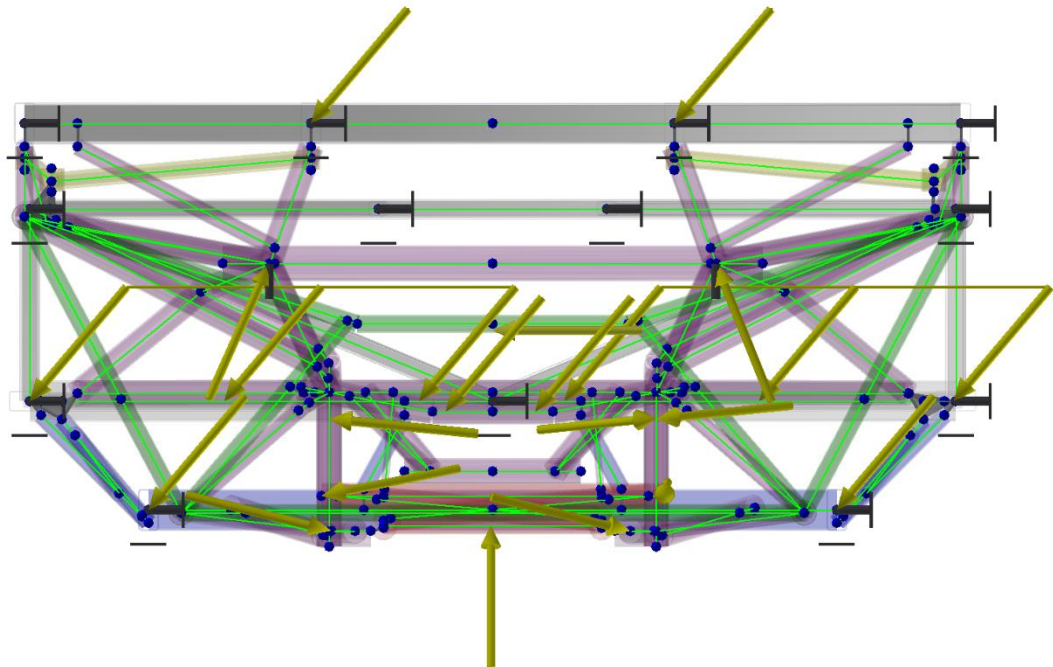
Plně naložené vozidlo jedoucí konstantní rychlostí po nakloněné rovině těsně před převržením. Maximální nakloněná rovina byla počítána z předpokládané výšky těžiště naloženého vozidla a jeho rozvoru.

Tabulka 13: Tabulka OP – spojitá zatížení, stav 4

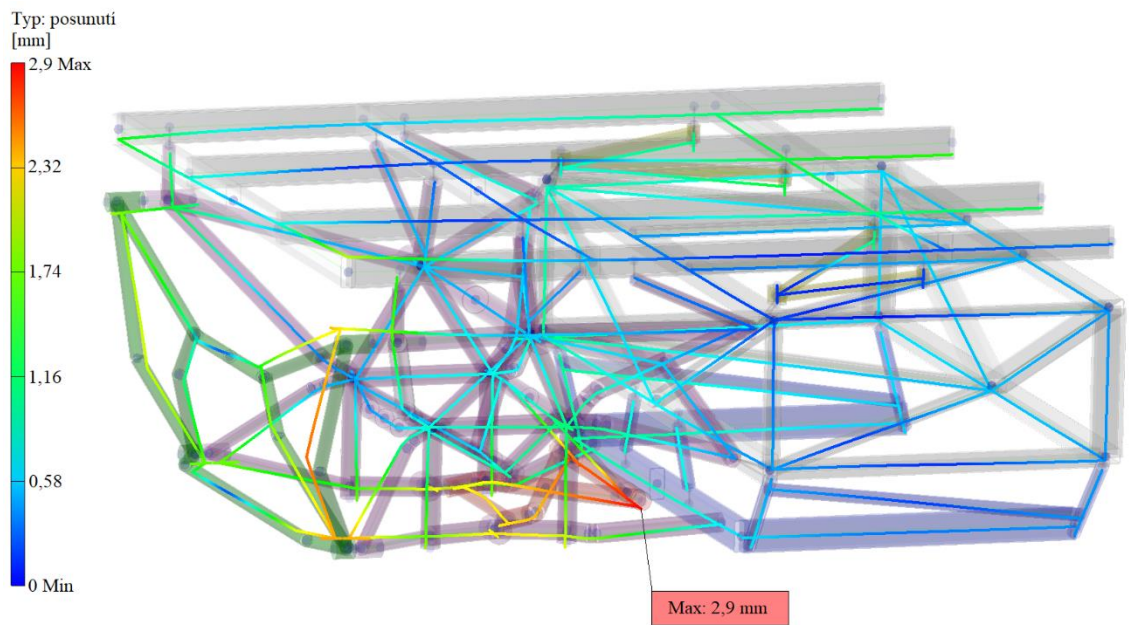
	Délka zatížení [mm]	Q_x [N/mm]	Q_y [N/mm]	Q_z [N/mm]
Zatížení nákladem	2×1950	0	1,1	-1,3
Zatížení šuplíkem	4×750	0	0,45	-0,53

Tabulka 14: Tabulka OP – silová zatížení, stav 4

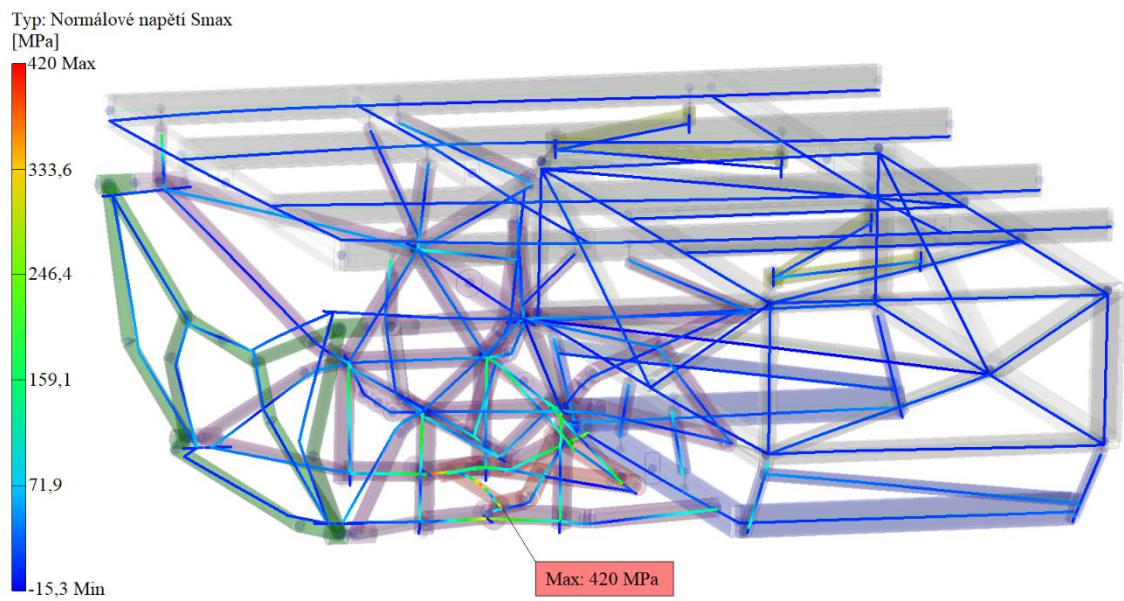
	Počet sil	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
Baterie	2	0	638	750
Powertrain – váha	2	0	343	-404
Powertrain – moment	1	2749	0	7984
Bod 1	2	-700	-16700	-4116
Bod 2	2	-1304	3461	-687
Bod 5	2	131	5953	595
Bod 6	2	131	3266	326
Bod 9	2	3900	-14000	31200



Obrázek 49: Zadané okrajové podmínky, přední pohled – stav 4



Obrázek 50: Výsledky simulace, posunutí – stav 4



Obrázek 51: Výsledky simulace, napětí S_{\max} – stav 4

7.2 Diskuse výsledků simulace

V tabulce 15 jsou shrnuty výsledky maximálního napětí a posunutí. Maximální napětí S_{\max} , které SW Inventor 2020 v analýze rámových konstrukcí vypočítá, je pouze napětí vzniklé ohybem. Tah a krut z důvodu složitosti rámových struktur a použití 1D prvků při diskretizaci modelu neuvažuje.

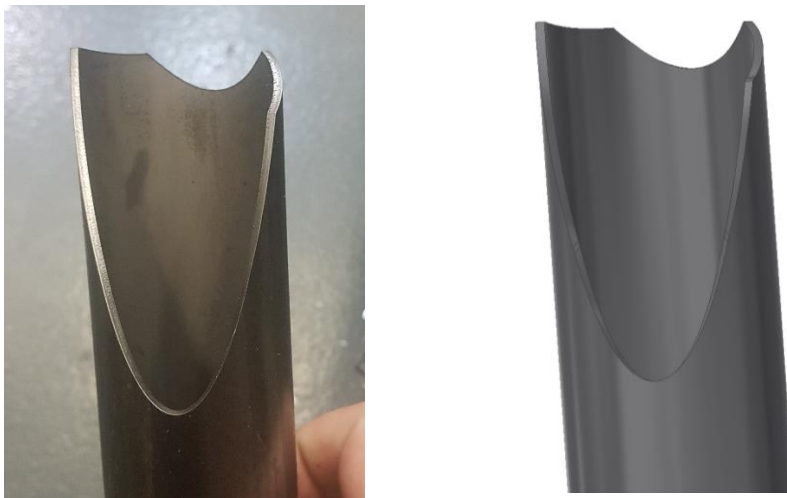
Tabulka 15: Výsledky simulací všech zatěžovacích stavů

	Stav 1	Stav 2	Stav 3	Stav 4
Maximální napětí S_{\max} [MPa]	271	590	469	420
Maximální posunutí [mm]	1,4	2,3	1,7	2,9
Koeficient bezpečnosti	2,58	1,19	1,49	1,67

Pro jednotlivé stavy byl spočítán koeficient bezpečnosti (tabulka 15), pro který byly uvažovány maximální hodnoty napětí S_{\max} a mez kluzu pevnostní oceli $R_e = 700$ MPa. Dále je nutné zmínit, že simulované stavy nastávají pouze v krajních a krizových situacích dynamické jízdy vozidla. Také se předpokládá výrazně nižší hmotnost reálného vozidla (přibližně o 500 kg), než se kterou byly dimenzovány nápravy. Z toho vyplývá, že síly působící na konstrukci rámu, budou reálně také menší než ty, které byly do simulace zadány.

8 Výroba rámu

Nejprve bylo nutné jednotlivé trubky ořezat tak, aby bylo umožněno jejich poměrně komplikované spojení. Po návrhu a vymodelování těchto trubkových spojů, byla kontaktována firma Kovospol a.s. z Liberce, která trubky vyrobila dle požadavků. K vypalování byl použit trubkový CNC laser, který zajistil vysokou rozměrovou přesnost, minimum ořepů, ale i bezproblémové provedení detailů, jako byly například technologické zámky u některých trubek. Na obrázku 52 vpravo lze vidět CAD model jedné z vypalovaných trubek, vlevo je fotografie výrobku.



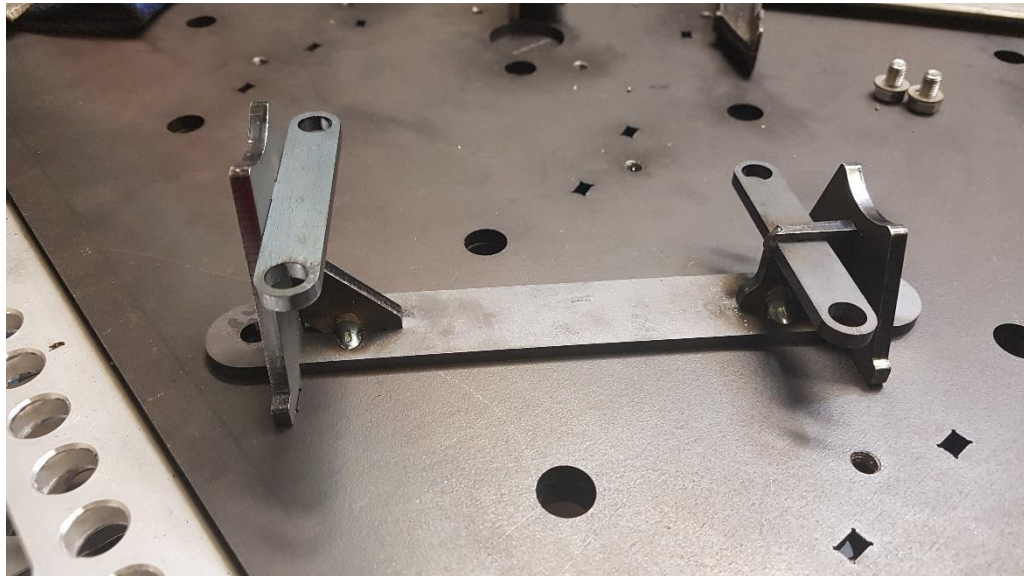
Obrázek 52: Vypálená trubka z CNC laseru a její CAD model

Dále bylo potřeba k výrobě trubkového svařence navrhnout také vhodný svařovací přípravek. Bylo rozhodnuto o konstrukci přípravku z plechových výpalků s využitím svařovacího stolu Siegmund, který se v laboratoři KVM TUL nachází. Rozměry stolu jsou 1×2 m, což je pro svaření dílčích částí rámu dostatečné.

8.1 Konstrukce přípravku

Důvodem volby plechových výpalků pro výrobu přípravků byla jejich relativně vysoká přesnost za nízké pořizovací náklady. Každá trubka, případně skupina trubek je pevně usazena v dílčím přípravku, ze kterých se celkový svařovací přípravek skládá. Přesnou a nezaměnitelnou pozici těchto přípravekových částí zajišťuje základní plech se shodnými rozměry jako má svařecí stůl. Do plechu jsou vypálené otvory zámečků, které určují pozici jednotlivých kusů přípravku. Jelikož hlavní rám není jediným dílem, na který se konstruovaly přípravky tímto způsobem, je tento plech použit i pro ustavení přípravekových dílů pro nárazník. Upnutí ořezané trubky do přípravku je realizováno upínacími třmeny ve

tvaru U. Na obrázku 53 je vidět část přípravku, ke kterému se následně upne konkrétní trubka. Také tam lze vidět základní plech s vypálenými polohovacími otvory nebo s kruhovými dírami pro uchycení plechu ke stolu. Součástí této diplomové práce je též kompletní výkresová dokumentace přípravku nárazníku.



Obrázek 53: Dílčí část přípravku hlavního rámu

Na obrázku 54 lze vidět již kompletně složený přípravek pro hlavní rám, který je připraven pro osazení trubkami. Další fotografie přípravku a jeho výroby jsou v příloze 2.



Obrázek 54: Připravený svařovací přípravek hlavního rámu

8.2 Svařování rámu

Po ustavení trubek v přípravku, byl rám svařován metodou TIG. Původní myšlenka byla svařit kompletně upnutý rám z důvodu následného zkroucení. Tímto způsobem by však některé spoje nemohly být důkladně svařeny, a proto se přistoupilo na kompromis – postupné svařování s kvalitně provařenými spoji za cenu pravděpodobně větších nepřesností. Tento způsob se ovšem netýkal svařence nárazníku, jelikož jeho konstrukce byla výrazně jednodušší než konstrukce hlavního rámu. Na obrázku 55 lze vidět fotografii nárazníku, který je téměř připraven pro svařování a na obrázku 56 již svařený nárazník. Další fotografie svařování nárazníku a hlavního rámu jsou v příloze 2.



Obrázek 55: Trubky nárazníku připravené ke svařování



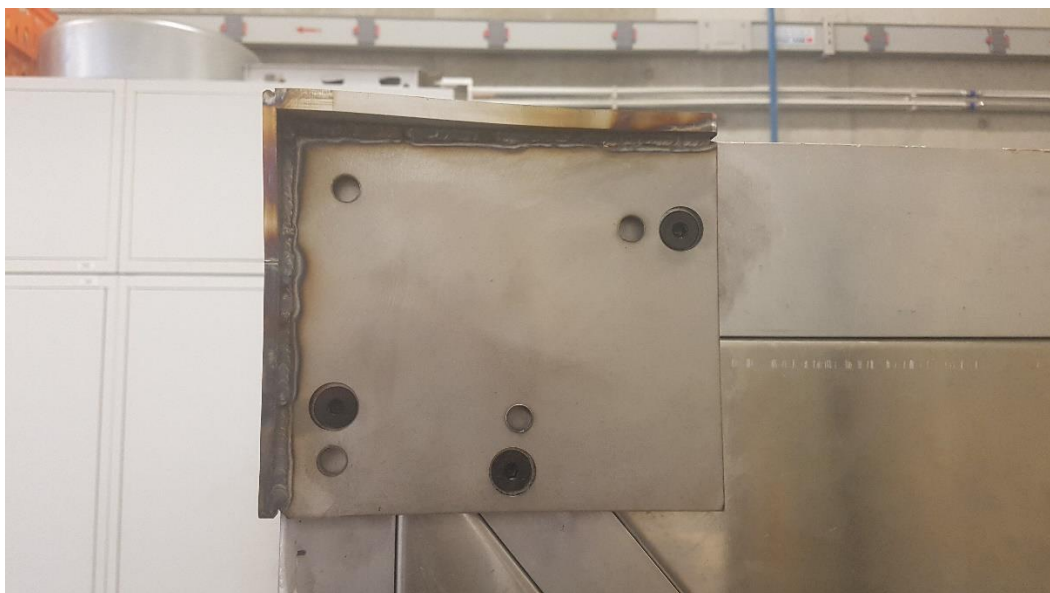
Obrázek 56: Kompletně svařený nárazník

Další velmi důležitou částí rámové struktury je E-box, který byl zadán do výroby firmě Tauchman SWS, s.r.o. v Jilemnici, které se na sváření hliníku zaměřuje. Na obrázku 57 je vidět rozpracovaný stav výroby profilové konstrukce. Dále byly k tomuto rámu připraveny krycí plechy a připraveny díry pro spojovací nerezové plechy.



Obrázek 57: Rozpracovaný hliníkový rám E-boxu

Spojovací díly byly následně smontovány a svařeny v laboratoři KVM TUL. Díly byly svařeny v již dané pozici na E-boxu, aby byla po jejich svaření zaručena bezproblémová montáž do jednotlivých míst. Na obrázku 58 lze vidět jeden ze svařených rohů. Do prázdných děr se následně namontují lisovací šrouby.

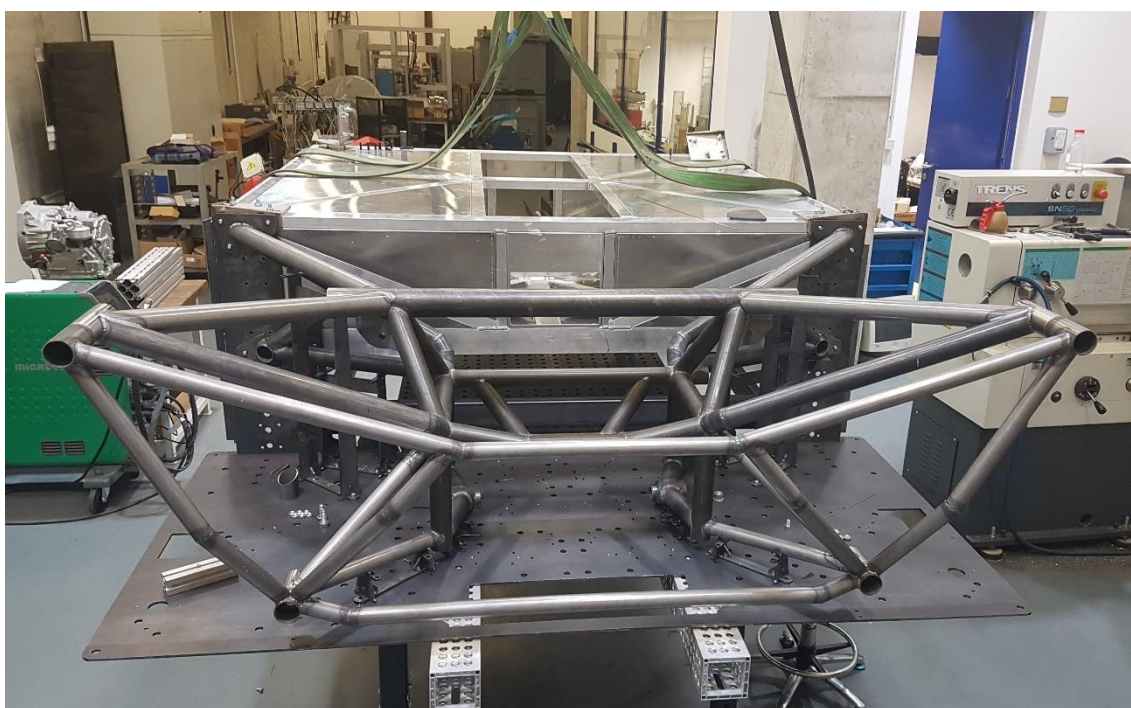


Obrázek 58: Horní pohled na spojovací roh E-boxu a hlavního rámu

Na obrázcích 59 a 60 lze vidět aktuální stav výroby rámu k 20.5.2022.



Obrázek 59: Aktuální stav výroby – fotografie 1



Obrázek 60: Aktuální stav výroby – fotografie 2

9 Závěr

V této diplomové práci byl vypracován návrh rámu pro pracovní autonomní vozidlo vyvíjené na Technické univerzitě v Liberci. Před samotným konstrukčním návrhem byla nejprve vypracována rešerše o stavu vývoje autonomních vozidel, robotů a pracovních strojů na světové úrovni. Následně byl vypracován přehled ráků dle normy ČSN 30 0025, se zaměřením na ty, které se v dnešní době používají.

Konstrukční návrh vyplýval z požadavků, které byly předem dány buď zadáním projektu nebo rozhodnutím projektového týmu. Byl vybrán příhradový rám a v konstrukčním návrhu se kombinovaly různé průřezy profilů, ale také různé materiály. Rám byl poté pevnostně ověřen metodou konečných prvků v softwaru Inventor 2020. Analýza sestávala ze čtyřech zatěžovacích stavů, které by mohly nastat v krajních krizových situacích.

V poslední části práce je popisována výroba rámu a svařovacího přípravku. V současné době stále probíhají svářecí práce na ocelových částech rámu, které jsou svařovány v prostorách laboratoře KVM TUL. Hliníkový rám E-boxu je již vyroben a dodán externí firmou. Po dokončení svářecích prací je plánováno změřit hlavní rám optickým 3D scannerem, k zjištění deformací vlivem svařování. Výsledné nepřesnosti budou muset být kompenzovány především v místech zavěšení kol, kvůli zajištění správné geometrie. Dále je plánována povrchová úprava celé rákové struktury práškovým lakováním.

Tato diplomová práce je jedním z důležitých základních kamenů pro vývoj autonomní modulární platformy na Technické univerzitě v Liberci. Jelikož je rám navrhnut jako snadno modifikovatelný, může vzniknout nespočet dalších vylepšení a změn. V současné době již vznikají plány a návrhy o novém uložišti energie v podobně vodíkových článků. Tento koncept vozidla má v dnešní době bezpochyby obrovský potenciál a zajisté se bude objevovat mnoho nových příležitostí pro jeho uplatnění.

Seznam použité literatury

- [1] *Rheinmetall Defence – Mission Master unmanned ground vehicle A-UGV* [online]. [vid. 2022-05-18]. Dostupné z: https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/systems_and_products/unbemannte_fahrzeuge/mission_master/index.php
- [2] *Projekty a granty* [online]. [vid. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.fm.tul.cz/ustavy/ustav-mechatroniky-a-technicke-informatiky/veda-a-vyzkum/projekty-a-granty>
- [3] ON-ROAD AUTOMATED DRIVING (ORAD) COMMITTEE. *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles* [online]. B.m.: SAE International. nedatováno [vid. 2022-04-05]. Dostupné z: doi:10.4271/J3016_202104
- [4] QUINN, Cheney. *PŘEHLED VÝVOJE AUTONOMNÍCH VOZIDEL* [online]. Brno, 2019 [vid. 2022-04-06]. Bakalářská práce. VUT. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=192627
- [5] BUREŠ, David. Úrovně autonomních aut. Jaký je mezi nimi rozdíl? A která fáze je opravdu auto bez řidiče? *auto.cz* [online]. [vid. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/urovne-autonomnich-aut-jaky-je-mezi-nimi-rozdil-a-ktera-faze-je-opravdu-auto-bez-ridice-120259>
- [6] MDČR. *Autonomní mobilita* [online]. [vid. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/Uzitecne-odkazy/Autonomni-mobilita>
- [7] *Samořiditelná auta v EU (infografika) | Zpravodajství | Evropský parlament* [online]. 14. leden 2019 [vid. 2022-04-07]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/economy/20190110STO23102/samoriditelna-auta-v-eu-infografika>
- [8] *www.autonomne.cz | informace o testování, bezpečnosti a provozu autonomních vozidel* [online]. [vid. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.autonomne.cz/aktualita/autonomni-vozidla-bez-bezpecnostniho-ridice-maji-v-rusku-zelenou>
- [9] YANDEX SELF-DRIVING TEAM. The story behind the creation of Yandex's delivery robot. *Yandex Self-Driving Group* [online]. 16. prosinec 2021 [vid. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://medium.com/yandex-self-driving-car/the-story-behind-the-creation-of-yandexs-delivery-robot-e07017940589>
- [10] *John Deere Reveals Fully Autonomous Tractor at CES 2022* [online]. 4. leden 2022 [vid. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.deere.com/en/news/all-news/autonomous-tractor-reveal/>
- [11] *John Deere CES® 2022* [online]. [vid. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://ces2022.deere.com/media/booth>
- [12] *The Future of Farming Technology | John Deere* [online]. [vid. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.deere.co.uk/en/agriculture/future-of-farming/>

- [13] *This is the Tara system* [online]. [vid. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.volvonautomoussolutions.com/en-en/our-solutions/our-pilots/tara.html>
- [14] *Volvo and Holcim jointly work in a project to use autonomous electric haulers* [online]. [vid. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.volvogroup.com/en/news-and-media/news/2021/nov/news-4105911.html>
- [15] Electric and Autonomous Heavy Equipment: The Future of Construction and Mining | Volvo CE. *The Scoop* [online]. 22. únor 2021 [vid. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://volvoceblog.com/electric-and-autonomous-heavy-equipment-the-future-of-construction-and-mining/>
- [16] FUGLEVIČ, Daniel. Honda ukazuje autonomní vozítko AWV v akci. Malý pracant pomáhal na stavbě. *AutoRevue.cz* [online]. [vid. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/honda-ukazuje-autonomni-vozik-awv-v-akci-maly-pracant-pomahal-na-stavbe>
- [17] Honda Tests Prototype Autonomous Work Vehicle at Solar Construction Site with Black & Veatch. *Honda Corporate Newsroom* [online]. 15. listopad 2021 [vid. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://hondanews.com/en-US/honda-corporate/releases/honda-tests-prototype-autonomous-work-vehicle-at-solar-construction-site-with-black-veatch>
- [18] SOOD, Gaurav. *Honda's all-electric autonomous off-road vehicle is a construction hauler that carries weight of up to 400kg - Yanko Design* [online]. 16. listopad 2021 [vid. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.yankodesign.com/2021/11/16/hondas-all-electric-autonomous-off-road-vehicle-is-a-construction-hauler-that-carries-weight-of-up-to-400kg/>
- [19] ČERMÁK, Ladislav. Gaussin chystá modulární „skateboard truck“. Na vodík i elektrinu. *fDrive.cz* [online]. 21. červen 2021 [vid. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/gaussin-chysta-modularni-skateboard-truck-na-vodik-i-elekrinu-7306>
- [20] KANE, Mark. Gaussin Develops Next-Gen Skateboard Truck Platform. *InsideEVs* [online]. [vid. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/515027/gaussin-skateboard-truck-platform/>
- [21] *Road Truck Skateboard | Gaussin* [online]. [vid. 2022-04-13]. Dostupné z: <https://www.gaussin.com/road-truck-skateboard>
- [22] VALA, Miroslav. Rámy, karoserie, podvěsy. In: [online]. UPCE. 2009 [vid. 2022-04-20]. Dostupné z: https://u3vdfjp.upce.cz/P%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ky%20Technick%C3%BD%20blok/Rok%202016/Letni_semestr/Hanus_R%C3%81MY-KA-ROSERIE-PODV%C4%99ASY.pdf
- [23] VLK, František. *Karosérie motorových vozidel*. 1. vyd. 2000. ISBN 80-238-5277-9.

- [24] *Elektronická učebnice - ELUC* [online]. [vid. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1481>
- [25] Nosné prvky podvozku_druhy rámu. In: [online]. B.m. [vid. 2022-04-15]. Dostupné z: https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2021/10/MOV-Nosne_prvky_podvozku-druhy_ramu.pdf
- [26] NĚMEČEK, Pavel. Rámy a karoserie vozidel. In: [online]. B.m. 15. listopad 2021 [vid. 2022-04-15]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/get-File/id:2998/1_VOZ2_R%C3%A1my%20a%20karoserie.pdf
- [27] SARKAR, P. P. Analysis of Failure of a Chassis Long Member Manufactured from E-46 Grade Hot-Rolled Steel Coil. *Journal of Failure Analysis and Prevention* [online]. 2020, **20**(3), 819–832. ISSN 1864-1245. Dostupné z: doi:10.1007/s11668-020-00881-2
- [28] *Mercedes-Benz Třída G: žebřinový rám* [online]. [vid. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.cz/passengercars/mercedes-benz-cars/models/g-class/suv-w463/specifications.pi.html/mercedes-benz-cars/models/g-class/suv-w463/specifications/offroad-performance-gallery/ladderframe>
- [29] ŠPICAR, Jaroslav. *Pohon zvedáku pro montáž náprav TATRA* [online]. B.m., 2020. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/160667/BP_Jaroslav_Spicar.pdf?sequence=1
- [30] *TATRA vehicle design :: Tatratrucks.com* [online]. [vid. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.tatratrucks.com/why-tatra/tatra-vehicle-design/tatra-vehicle-design-1/>
- [31] *Rám | K-1 Attack* [online]. [vid. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.k1-attack.cz/k-1-kit/ram/>
- [32] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů, 1. díl*. 2010.
- [33] ALFAX, Shockworks s r o, www.shockworks.cz, powered by. Galvanická koroze kovů II. – zvolte správnou kombinaci materiálů. *KUTIL.cz* [online]. 29. leden 2020 [vid. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.kutil.cz/dilna/galvanicka-koroze-kovu-ii-zvolte-spravnu-kombinaci-materialu/>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Shrnutí rozdělení automatického řízení vozidel dle SAE [6]	13
Obrázek 2: Vývoj automatického řízení dle výhledů EU [7]	14
Obrázek 3: Autonomní vozidla společnosti Yandex [8]	15
Obrázek 4: Doručovací roboty Yandex Rover – 3. generace [9]	16
Obrázek 5: Hliníkový rám robota Yandex Rover [9]	16
Obrázek 6: Autonomní traktor John Deere 8R [11]	17
Obrázek 7: Kompaktní autonomní traktor John Deere [12]	17
Obrázek 8: Autonomní sklápěč TA15 značky Volvo [15]	18
Obrázek 9: Prototyp AWW od značky Honda [18]	19
Obrázek 10: Podvozek modulární plošiny společnosti Gaussin [21]	20
Obrázek 11: Ukázka možných konfigurací modulární plošiny [21]	20
Obrázek 12: Grafické schéma rozdělení rámu vozidel [22]	21
Obrázek 13: Schéma žebřinového rámu [27]	22
Obrázek 14: Schématické zobrazení typů žebřinových rámu	23
Obrázek 15: Žebřinový rám terénního vozu Mercedes-Benz třídy G [28]	23
Obrázek 16: Spojený páteřový a žebřinový rám [22]	24
Obrázek 17: a) páteřový rám b) páteřový rám vidlicový	25
Obrázek 18: 3D model páteřového rámu vozidla od firmy Tatra [30]	25
Obrázek 19: Ukázka 3D modelu příhradového rámu závodního auta [31]	26
Obrázek 20: Výchozí stav vozidla – a) ISO pohled, b) boční pohled	28
Obrázek 21: Relativní únosnost daných průřezů profilů při ohybu [32]	29
Obrázek 22: Boční pohled na čtvrtinový 3D model rámu	31
Obrázek 23: Boční pohled na 3D model hlavního rámu	32
Obrázek 24: ISO pohled na 3D model hlavního rámu	33

Obrázek 25: Spojení hlavního rámu a nárazníku	33
Obrázek 26: Boční a čelní pohled na 3D model nárazníku	34
Obrázek 27: ISO a boční pohled na 3D model rámu baterie.....	35
Obrázek 28: ISO pohled na 3D model rámu E-boxu – částečně zakrytován	36
Obrázek 29: Detailní pohled na funkci spojů E-boxu a ostatních prvků rámu	36
Obrázek 30: Vzájemná snášlivost kovů [33].....	37
Obrázek 31: ISO pohled na spojení jednotlivých kusů rámové struktury.....	38
Obrázek 32: ISO a boční pohled na 3D model podpěry plošiny.....	38
Obrázek 33: ISO pohled na 3D model pomocného ramene	39
Obrázek 34: ISO a boční pohled na 3D model celkové sestavy rámu	41
Obrázek 35: Pohled shora na 3D model celkové sestavy rámu	41
Obrázek 36: Přední pohled na 3D model celkové sestavy rámu	42
Obrázek 37: ISO a boční pohled na 3D model celkové sestavy vozidla s rámem	42
Obrázek 38: Připravený simulační model pro zadání okrajových podmínek	43
Obrázek 39: Popis bodů pro uložení ramen a tlumiče.....	45
Obrázek 40: Zadané okrajové podmínky, boční pohled – stav 1	46
Obrázek 41: Výsledky simulace, posunutí – stav 1.....	47
Obrázek 42: Výsledky simulace, napětí S_{max} – stav 1.....	47
Obrázek 43: Zadané okrajové podmínky, boční pohled – stav 2	48
Obrázek 44: Výsledky simulace, posunutí – stav 2.....	49
Obrázek 45: Výsledky simulace, napětí S_{max} – stav 2	49
Obrázek 46: Zadané okrajové podmínky, boční pohled – stav 3	50
Obrázek 47: Výsledky simulace, posunutí – stav 3.....	51
Obrázek 48: Výsledky simulace, napětí S_{max} – stav 3	51
Obrázek 49: Zadané okrajové podmínky, přední pohled – stav 4.....	52
Obrázek 50: Výsledky simulace, posunutí – stav 4.....	53

Obrázek 51: Výsledky simulace, napětí S_{\max} – stav 4	53
Obrázek 52: Vypálená trubka z CNC laseru a její CAD model	55
Obrázek 53: Dílčí část přípravku hlavního rámu	56
Obrázek 54: Připravený svařovací přípravek hlavního rámu	56
Obrázek 55: Připravené trubky nárazníku ke svařování	57
Obrázek 56: Kompletně svařený nárazník	57
Obrázek 57: Rozpracovaný hliníkový rám E-boxu	58
Obrázek 58: Horní pohled na spojovací roh E-boxu a hlavního rámu	58
Obrázek 59: Aktuální stav výroby – fotografie 1	59
Obrázek 60: Aktuální stav výroby – fotografie 2	59

Seznam tabulek

Tabulka 1: Technické specifikace AWW značky Honda [17].....	19
Tabulka 2: Seznam použitých profilů na konstrukci rámu.....	30
Tabulka 3: Seznam částí rámové struktury	31
Tabulka 4: Hmotnost rámové struktury.....	40
Tabulka 5: Zavazbení simulačního modelu.....	44
Tabulka 6: Legenda k popisu bodů nápravy	45
Tabulka 7: Tabulka OP – spojitá zatížení, stav 1	46
Tabulka 8: Tabulka OP – silová zatížení, stav 1	46
Tabulka 9: Tabulka OP – spojitá zatížení, stav 2	48
Tabulka 10: Tabulka OP – silová zatížení, stav 2	48
Tabulka 11: Tabulka OP – spojitá zatížení, stav 3	50
Tabulka 12: Tabulka OP – silová zatížení, stav 3	50
Tabulka 13: Tabulka OP – spojitá zatížení, stav 4	52
Tabulka 14: Tabulka OP – silová zatížení, stav 4	52
Tabulka 15: Výsledky simulací všech zatěžovacích stavů.....	54

Seznam příloh

Příloha 1: seznam výkresové dokumentace

Příloha 2: fotodokumentace z výroby rámu

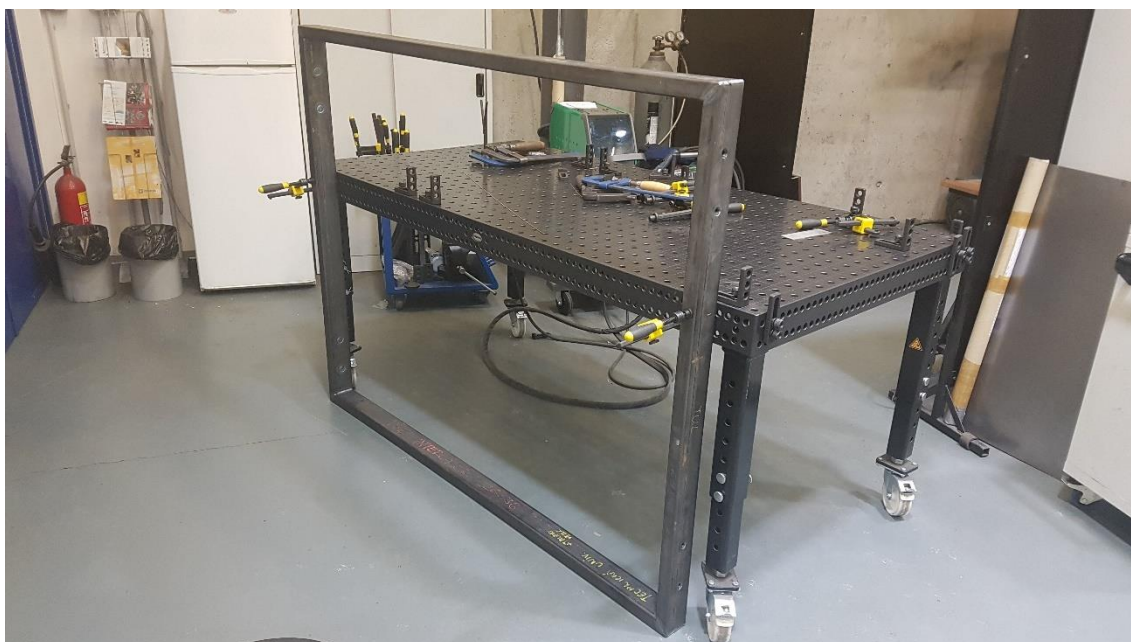
Příloha 1 – seznam výkresové dokumentace

Název výkresu	Číslo výkresu
NARAZNIK_WLDNG_JIG_2	DP_KVM_749_000
NARAZNIK_v2	DP_KVM_749_100
NARAZNIK_SPOJ_VIKO	DP_KVM_749_101
NARAZNIK_WLDNG_JIG_1	DP_KVM_749_200
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_3	DP_KVM_749_220
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_3_SVR	DP_KVM_749_221
WLDNG_JIG_TUBE_FXTR1_PL2	DP_KVM_749_222
WLDNG_JIG_TUBE_FXTR4_PL3	DP_KVM_749_223
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_3_PL1	DP_KVM_749_224
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_3_PL2	DP_KVM_749_225
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_1	DP_KVM_749_230
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_1_SVR	DP_KVM_749_231
WLDNG_JIG_TUBE_FXTR1_PL3	DP_KVM_749_232
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_1_PL1	DP_KVM_749_233
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_1_PL2	DP_KVM_749_234
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_4	DP_KVM_749_240
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_4_5_PL1	DP_KVM_749_241
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_4_T1	DP_KVM_749_242
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_5	DP_KVM_749_250
WLDNG_JIG_TUBE_NRZ_5_T1	DP_KVM_749_251

Příloha 2 – fotodokumentace z výroby rámu



Obrázek 1: Hlavní rám usazený v přípravku



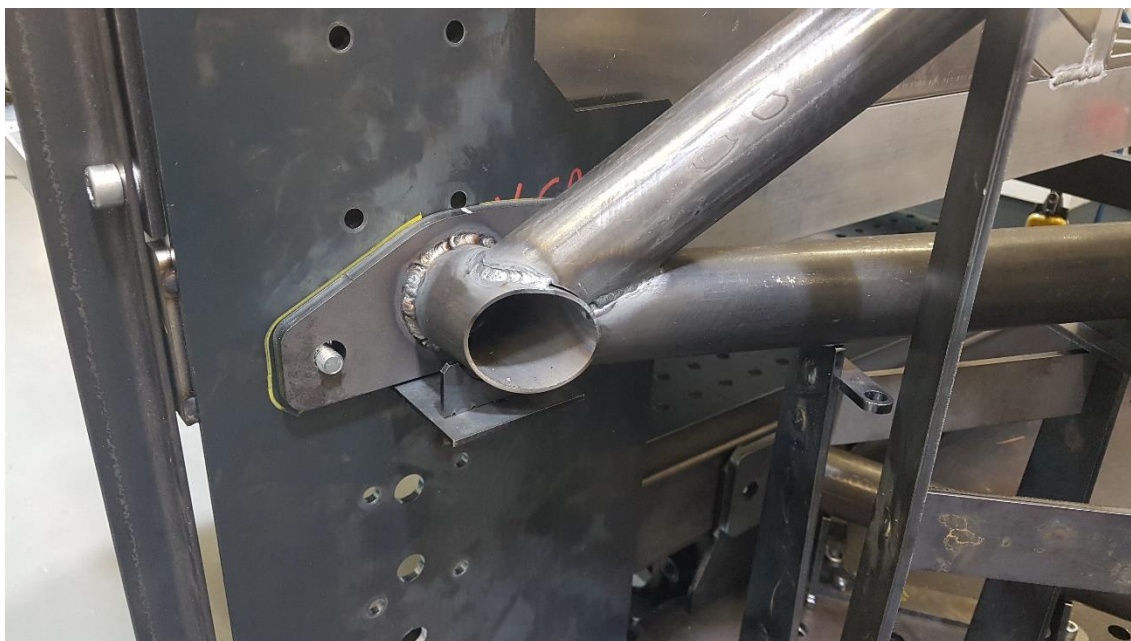
Obrázek 2: Svařený rám baterie



Obrázek 3: Detailní pohled na spoj trubek hlavního rámu



Obrázek 4: Svařená část hlavního rámu s přimontovaným nárazníkem



Obrázek 5: Detailní pohled na spoj hlavního rámu se spodním rohem E-boxu



Obrázek 6: Téměř dokončený hlavní rám v přípravku s namontovaným nárazníkem, E-boxem a rámem baterie