



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

KONSTRUKCE ELEKTRICKÉHO VELOMOBILU

DESIGN OF AN ELECTRIC VELOMOBILE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Starý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Ondřej Starý
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Petr Hejtmánek, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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

Konstrukce elektrického velomobilu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Velomobil je lidskou silou poháněné vozidlo s aerodynamickou karoserií, který lze podobně jako bicykl doplnit o pomocný elektrický motor. Elektrický velomobil tak může sloužit jako relativně ekologický a komfortní dopravní prostředek zejména do městského provozu. Díky elektrickému pomocnému motoru a aerodynamickému tvaru je vynaložená síla uživatele nižší než u běžného jízdního kola, čímž je jeho provoz vhodný i pro méně fyzicky zdatné uživatele. Vhodně navržený elektrický velomobil s příznivou cenou by mohl být žádanou alternativou za klasický automobil.

Cíle diplomové práce:

Rešerše elektrických velomobilů.
Stanovení základních požadavků.
Konceptní návrh velomobilu.
Konstrukční návrh přední nápravy.
Návrh aerodynamické karoserie.
Pevnostní analýza klíčových komponent.

Seznam doporučené literatury:

BUDYNAS, Richard G., NISBETT, J. Keith a SHIGLEY, Joseph Edward. Shigley's mechanical engineering design. 10th edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015. 1104 s. ISBN 0073398209.

MILLIKEN, William a MILLIKEN, Douglas. Race Car Vehicle Dynamics. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.

JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav a ČUPERA Jiří. Automobily (1): Podvozky. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. 245 s. ISBN 978-80-87143-11-7.

GILLESPIE, Thomas. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992. 519 s. ISBN 1-56091-199-9.

REIMPELL, Jornsens. The Automotive Chassis. 2nd edition. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0-7506-5054-0.

DIXON, John C. The Shock Absorber Handbook. 2nd Edition. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2007. 432 s. ISBN 0-7680-0050-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je návrh elektrického velomobilu, přesněji jeho přední nápravy a karoserie, jako jedné z možných alternativ k automobilům do měst. Nejprve je zde proveden rešeršní rozbor dostupných elektrických velomobilů. V dalším kroku, kterým je návrh vlastního elektrického velomobilu, jsou určeny parametry a vlastnosti vozidla. Z těch dále vychází samotný návrh přední nápravy. Je zde proveden návrh a optimalizace geometrie zavěšení, výpočet odpružení, návrh řízení a jejich konstrukční řešení. Na závěr je proveden návrh karoserie.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrický velomobil, přední náprava, zavěšení kol, řízení, karoserie, konstrukce, koncepce

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the design of an electric velomobile, more precisely its front axle and bodywork, as one of the possible alternatives to cars for cities. First, a research analysis of the available electric velomobiles is carried out. In the next step, which is the design of the electric velomobile itself, the parameters and characteristics of the vehicle are determined. The design of the front axle is based on these. The design and optimization of the suspension geometry, its calculation, steering, and their construction design solutions are carried out here. At the end, the design of the bodywork is made.

KEYWORDS

Electric velomobile, front axle, wheel suspension, steering, bodywork, design, concept

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Starý, O. *Konstrukce elektrického velomobilu*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí diplomové práce Petr Hejtmánek. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/148905>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Hejtmánka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Ondřej Starý

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Hejtmánkovi, Ph.D. za pomoc při zpracování práce. Dále bych rád poděkoval za podporu ze strany rodiny během celého studia.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Konstrukce el. velomobilu	12
1.1 Konfigurace kol	12
1.1.1 Dvoukolová varianta.....	12
1.1.2 Tříkolová varianta.....	13
1.1.3 Čtyřkolová varianta	14
1.2 Přední náprava	14
1.2.1 Řízení.....	15
1.2.2 Zavěšení.....	16
1.2.3 Brzdy	18
1.3 Karoserie.....	19
1.3.1 Typy karoserie ve vztahu k podvozku.....	19
1.3.2 Uzavřená a otevřená karoserie.....	21
1.3.3 Přídavné prvky na karoserii.....	22
1.3.4 Materiál.....	22
1.4 Přehled vybraných el. velomobilů	24
2 Důvod návrhu el. velomobilu.....	26
3 Základní požadavky na navrhovaný el. velomobil.....	28
4 Koncepce el. velomobilu.....	29
4.1 Typ vozidla	29
4.2 Základní parametry	31
4.2.1 Předběžné rozměry	31
4.2.2 Počet kol	31
4.3 Koncepce rámu	33
5 Koncepce přední nápravy	35
5.1 Výběr kol a brzd	35
5.2 Uložení kola.....	36
5.3 Volba tlumiče.....	40
5.4 Výpočet odpružení	41
5.4.1 Výpočet tuhosti z hlediska vlastní frekvence karoserie.....	41
5.4.2 Výpočet tuhosti z hlediska ovladatelnosti vozidla a namáhání vozovky	42
5.4.3 Rozměry pružiny	43
5.4.4 Předpětí pružiny.....	44
5.5 Geometrie zavěšení.....	45
5.5.1 Model zavěšení.....	47
5.5.2 Kinematické charakteristiky předního zavěšení a jejich optimalizace.....	48
5.6 Návrh řízení	53
6 Konstrukce přední nápravy.....	55
6.1 Použité materiály	55
6.2 Dolní rameno	55
6.3 Horní úchyt	56
6.4 Řídící tyč.....	57

6.5	Tlumič a pružina.....	57
6.6	Těhlice.....	58
6.7	Osa kola.....	59
6.8	Náboj a uložení kola.....	60
6.9	Sestava řízení.....	60
6.10	Rozměry vybraných sériově vyráběných dílů	62
6.11	Výsledná sestava přední nápravy.....	63
7	Pevnostní analýza.....	65
7.1	Příprava modelu	65
7.2	Výsledné hodnoty.....	67
7.2.1	Osa kola.....	67
7.2.2	Těhlice.....	68
7.3	Optimalizace těhlice	68
8	Cenový a hmotnostní odhad přední nápravy	70
9	Návrh karoserie.....	73
9.1	Karoserie	73
9.2	Materiál karoserie.....	75
9.3	Bezpečnostní a přídatné prvky na karoserii.....	75
10	Výsledný návrh.....	76
	Závěr	77
	Použité informační zdroje	78
	Seznam použitých zkratk a symbolů	85

ÚVOD

Jeden z akutních problémů současného světa je bezpochyby nastávající klimatická krize, způsobená nadměrnou produkcí CO₂. Vědci, inženýři, politici atd. proto hledají možná řešení, jak tuto krizi odvrátit. Jedná se například o využívání obnovitelných zdrojů energie, ochranu pralesů nebo změny v dopravě a průmyslu.

Značná pozornost je nyní věnována právě automobilovému průmyslu, který ke krizi svou měrou také přispívá. Emisní limity se zpřísňují až na samou hranici dosažitelnosti pro automobily se spalovacími motory a v budoucnu se počítá s kompletním zákazem jejich výroby. Vymýšlí se tak možné alternativy, kterými by se automobily se spalovacími vozidly daly nahradit. Jako hlavní možnost se v současnosti jeví elektrické automobily, existují však i jiné varianty.

Jednou z těchto variant je využívání elektrických velomobilů, které by se mohly osvědčit především jako náhrada do městském provozu. Tato vozidla totiž, kromě nulových provozních emisí, pomáhají řešit navíc problémy, jako jsou města přeplněná automobily nebo zákaz vjezdu automobilů do městských center, k čemuž přistupuje stále více evropských měst.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem právě takového elektrického velomobilu. Hlavní část práce se věnuje návrhu jeho přední nápravy. Je zde navrženo zavěšení a odpružení kol, jejich řízení a proveden cenový odhad. Ostatní části se zaměřují na koncepční návrh vozidla a návrh karoserie. Zbylé části velomobilu budou navrhovány kolegou v následujícím roce.

1 KONSTRUKCE EL. VELOMOBILU

Velomobil je lidskou silou poháněné vozidlo, jehož konstrukce je založena na designu lehokola.[1] Ta nejsou v současné době příliš rozšířeným typem dopravního prostředku, oproti normálním kolům však poskytují řadu výhod. Narozdíl od normálních kol nemají sedlo, nýbrž sedačku s opěrkou zad, popřípadě i hlavy, díky čemuž je jízda na lehokole pohodlnější. Další výhodou lehokola je pak lepší aerodynamika, což umožňuje dosažení vyšších rychlostí a ujetí delších vzdáleností. Lehokola mohou mít dvě, tři nebo čtyři kola, přičemž tři a čtyřkolové varianty mají oproti normálním bicyklům navíc lepší stabilitu.[2] Hlavní nevýhodou lehokol je pak především špatná viditelnost způsobená jejich malou výškou.[3] Typický příklad lehokola se třemi koly je vidět na Obr. 1.



Obr. 1 Lehokolo [4]

Narozdíl od lehokola má velomobil navíc karoserii, což dále zlepšuje jeho aerodynamiku, chrání řidiče před počasím a poskytuje dodatečnou ochranu při nehodách.[1] Elektrický velomobil pak kombinuje tyto výhody s elektrickým motorem, což dále přispívá ke zlepšení jízdního pohodlí a zvýšení dojezdu. [5]

Existuje velké množství různých elektrických velomobilů, které se od sebe odlišují svými atributy a charakteristikami závisujícími na jejich požadované funkci.[6] El. velomobily mohou sloužit pro sportovní využití,[7] jako dopravní prostředek ve městech i mimo ně [8] nebo pro přepravu zboží v městské zástavbě. [9]

1.1 KONFIGURACE KOL

Současné el. velomobily mají nejčastěji tři nebo čtyři kola, existují však i varianty dvoukolové. Tříkolové varianty se pak ještě rozlišují podle toho, zda se dvě kola nachází vpředu anebo vzadu. V naprosté většině případů jsou hnaná kola zadní, zatímco kola přední slouží k ovládání velomobilu. [10]

1.1.1 DVOUKOLOVÁ VARIANTA

Dvoukolové varianty nejsou v současné době příliš běžné. Normální bezkapotová kola jsou výrazně kompaktnější než bezkapotové tříkolky a díky absenci třetího kola, popřípadě odpružení a dalších prvků, i výrazně lehčí. U velomobilů už to ale tak rozdílné není. Díky

karoserii je vozidlo široké víceméně stejně, ať má kola dvě nebo tři, a vzhledem k navýšení celkové hmotnosti přidáním karoserie se relativní rozdíl hmotností výrazně sníží. Zásadní nevýhodou je pak především snížená stabilita oproti tří a čtyřkolové variantě.[10] Příkladem dvoukolové varianty je Kanadský Electrom, který je vidět na Obr. 2.



Obr. 2 Dvoukolový el. velomobil [11]

1.1.2 TŘÍKOLOVÁ VARIANTA

Jak již bylo zmíněno výše, hlavní výhodou velomobilů se třemi koly oproti variantě dvoukolové je jejich zvýšená stabilita, která přichází za cenu zvýšené hmotnosti a většího rozměru, což má za následek zhoršení aerodynamických vlastností. Podle uspořádání kol se pak tříkolové velomobily dále dělí na tzv. Tadpole a Delta velomobily.[10]



a) Tadpole velomobil



b) Delta velomobil

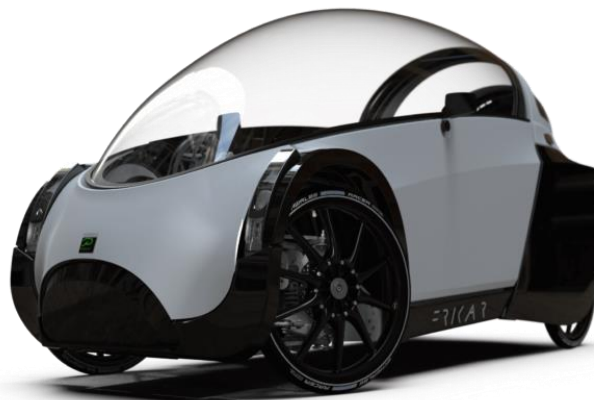
Obr. 3 Tříkolové el. velomobily [8][13]

Tadpole velomobil má jedno zadní a dvě přední kola, která mu zajišťují vyšší míru stability v zatáčkách oproti Delta konfiguraci. Vyšší hmotnost na přední nápravě má také za následek lepší kontrolu nad ovládáním velomobilu.[12] Další výhodou je pak aerodynamika, kde je zužující se profil lepší, protože za vozidlem nevzniká prázdný prostor.[10] Jejich hlavní nevýhodou je pak především složitější konstrukce přední nápravy oproti variantě Delta.[12] V současné době se jedná o nejrozšířenější konstrukci velomobilů.[14] Příklad el. velomobilu s Tadpole uspořádáním je na Obr. 3a.

Delta velomobil má dvě kola vzadu a jedno kolo vpředu. Hlavní výhodou tohoto typu uspořádání je jeho vyšší manévrovatelnost, kdy velomobil dokáže zatáčet téměř v 90° úhlu. Nevýhodami jsou pak již výše zmíněná nižší stabilita a nižší kontrola nad ovládním, dále pak přetáčivost a vyšší náchylnost k nadzvedávání se předního kola při jízdě do kopce.[12] Příklad el. velomobilu s Delta uspořádáním je na Obr. 3b.

1.1.3 ČTYŘKOLOVÁ VARIANTA

Čtyřkolový velomobil má dvě kola vpředu a dvě vzadu. Stejně jako u přechodu mezi dvou a tříkolovou variantou, i zde má přidání dalšího kola za následek zvýšení stability za cenu vyšší hmotnosti a větších rozměrů. Kromě zhoršení aerodynamických vlastností poskytují větší rozměry velomobilu více prostoru pro zavazadla, což je užitečné například při cestách na nákup.[10] Výzkum zabývající se optimálním množstvím kol u vozidel poháněných lidskou silou pak také ukazuje, že více kol má za následek snížení celkového valivého odporu, a to i přes navýšení hmotnosti.[63] Výhodou čtyřkolového velomobilu oproti Tadle variantě je pak také možnost mít hnána obě zadní kola, čímž dochází ke zlepšení trakce. K té přispívá navíc ještě vyšší zatížení zadní nápravy. Hlavní nevýhodou oproti dvou a tříkolovým velomobilům je pak již zmíněné navýšení hmotnosti a dále pak složitost zadní nápravy. Jsou-li hnána obě zadní kola, je nutné zajistit, aby nedocházelo k protáčení vnitřního kola v zatáčkách, například použitím diferenciálu. To má ovšem za následek další navýšení hmotnosti. Je-li však hnáno pouze jedno zadní kolo, je trakce nižší než u tříkolových velomobilů.[10] Příkladem čtyřkolových el. velomobilů je Norský Frikar, který je zobrazen na Obr. 4.



Obr. 4 Čtyřkolový el. velomobil [15]

1.2 PŘEDNÍ NÁPRAVA

Vzhledem k tomu, že výroba el. velomobilů je relativně mladé, neustále se vyvíjející a zdokonalující odvětví, neexistuje zde žádná jednotná konstrukce přední nápravy. Každá firma má svůj vlastní přístup, který závisí na požadovaných parametrech jednotlivých el. velomobilů. K hlavnímu rozdílu pak samozřejmě dochází mezi velomobily s jedním a dvěma předními koly. Kvůli vyšší hmotnosti a dosahování vyšších rychlostí se přední náprava el. velomobilu ve většině případů nepodobá nápravě klasických bicyklů ani lehokol.

1.2.1 Řízení

Velomobily využívají jeden ze dvou systémů řízení. Jedná se buďto o tzv. **podsedadlové řízení** (underseat steering [USS]) nebo **nadsedadlové řízení** (overseat steering [OSS]).[22] USS je většinou realizováno v podobě řídicích pák po obou stranách sedadla. Při pohybu pravou pákou vpřed a levou vzad zatačí velomobil doleva a při obráceném pohybu doprava, jak je vyobrazeno na Obr. 5a.[23] Tento pohyb je pak uskutečněn buďto rotací pák kolem vodorovné osy vedoucí zleva doprava, jak je vidět na Obr. 5b, nebo rotací pák kolem osy svislé. Díky podobnosti s řízením tanku se tento způsob řízení neoficiálně nazývá tankové řízení (tank steering).[10] Existuje také varianta, kdy se páky neposouvají dopředu a dozadu, ale nahoru a dolů jakýmsi rotujícím pohybem kolem řidičova těla. Pohybem pravé páky nahoru a levé dolů dojde k zatočení vlevo a opačným pohybem k zatočení vpravo.[24] Tento způsob řízení je zobrazen na Obr. 5d. Další variantou USS je konfigurace, která má pouze jednu řídicí páku, nacházející se na pravé straně od řidiče. Pohybem páky doprava dochází k zatočení velomobilu doprava, opačný pohyb pak způsobí zatočení doleva. Tento způsob využívá například el. velomobil Twike 3 a je vidět na Obr. 5c.[17]



a) Řízení pomocí pák po obou stranách sedadla



b) Páky po obou stranách sedadla



c) Páka na pravé straně sedadla



d) Páky po obou stranách sedadla

Obr. 5 Příklady USS [23][25][26][27]

Při využití systému OSS používají jak klasické, tak elektrické velomobily řízení pomocí řídek. Rozdíl pak nastává ve způsobu propojení řídek a přední nápravy. Většina klasických velomobilů, a tím pádem i el. velomobilů vznikajících jejich elektrifikací, propojuje říditka s řídicí tyčí pomocí kardanového kloubu. V tomto provedení zůstávají říditka volná a jsou schopna pohybu jak do stran, tak dopředu a dozadu, a to bez zatočení velomobilu. K zatažení pak dochází klasickou rotací řídek kolem osy řídicí tyče.

Díky podobnosti s lodními kormidly se tento způsob označuje jako tzv. kormidlové řízení (tiller steering).[10] Tento typ řízení je zobrazen na Obr. 6a. Další možností je pak například propojení řídítek s řídicí tyčí bez využití kardanového kloubu. Tento způsob funguje na principu ramene připevněného kolmo na řídítku, ke kterému jsou řídicí tyče ukotveny pomocí kulových kloubů.[8] Jiný způsob provedení, který je vidět na Obr. 6b, pak využívá el. velomobil Elf solo. Obě řídicí tyče se rozcházejí hned za řídítky a téměř ve stejné výšce. K jednotlivým kolům jsou poté vedeny shora.[29]



a) Tiller steering



b) Řízení vedené shora

Obr. 6 Příklady OSS [28][29]

1.2.2 ZAVĚŠENÍ

Vzhledem k dosahování vyšších rychlostí u velomobilů oproti klasickým bicyklům jsou síly působící na řidiče při překonávání nerovností vyšší a působí při větším zrychlení. To má za následek, že téměř všechny klasické i el. velomobily jsou celoodpružené. Odpružení přední nápravy velomobilu se dvěma koly vpředu pak také pomáhá eliminovat naklánění vozidla kolem podélné osy, ke kterému dochází při překonávání nerovností, které nejsou pod oběma koly rovnoměrné. Odpružení pak tedy neredukuje jen pohyby řidiče nahoru a dolů, ale i do stran. [10]



a) Kyvné rameno



b) Vidlice

Obr. 7 Typy zavěšení přední jednokolové nápravy [34][31]

El. velomobily nevyužívají žádný jednotný typ zavěšení, spíše naopak. Každý výrobce si ho navrhuje sám a žádná varianta zatím výrazně nepřevládá nad ostatními. Hlavní rozdíl je pak samozřejmě mezi velomobily s jedním a dvěma předními koly. Jedna z možných variant zavěšení přední nápravy u el. velomobilů s jedním předním kolem je využití upraveného kyvného ramena.[17] To se v jeho běžném provedení nejčastěji používá jako zadní zavěšení motorek a stejně ho využívá i velké množství klasických velomobilů.[10][30] Na Obr. 7a je pak tento systém vyobrazen u velomobilu Twike 5. Další možností zavěšení u velomobilů s jedním předním kolem je pak použití vidlice klasického bicyklu, jako to má například již dříve zmíněný Electrom.[31] Tento způsob provedení je vidět na Obr. 7b.

El. velomobily s dvěma předními koly často využívají konstrukci zavěšení podobnou té u automobilů. Velká většina klasických velomobilů a velomobilů z nich odvozených využívá zavěšení typu MacPherson, které je vidět na Obr. 8a. Hlavními výhodami tohoto systému jsou především jeho malá hmotnost a šířka. Jednotlivé komponenty tohoto typu zavěšení se nacházejí poměrně nízko nad zemí a po stranách velomobilu, takže zůstává dostatek místa pro jezdce. Nevýhodou je pak poměrně velké množství na míru vyráběných součástí.[32] Další možností je použití systému Multi-link.[15] Výhodami tohoto zavěšení jsou lepší jízdní vlastnosti v porovnání s ostatními typy zavěšení a možnost změny jednotlivých parametrů bez ovlivňování ostatních. Nevýhodou je pak jeho vyšší cena a složitost konstrukce. [33]



a) MacPherson



b) Listové pružiny



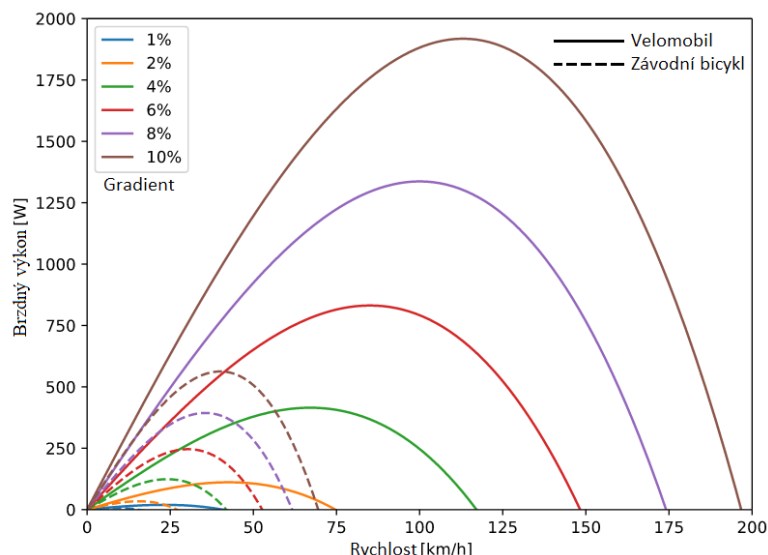
c) Dynamický tlumič

Obr. 8 Typy zavěšení přední dvoukolové nápravy [21][35][36]

Některé el. velomobily používají konstrukci zavěšení, která se nepadobá té u klasických automobilů. Na Obr. 8b je vidět typ zavěšení přední nápravy, který využívá listové pružiny procházející skrz šasi velomobilu. Problémem tohoto typu zavěšení je absence tlumení a anti rollu.[35] Jednoduché řešení, které je zobrazeno na Obr. 8c, pak nabízí již dříve zmíněný el. velomobil Elf solo. Jedná se o stoh neoprenových elastomerů s uzavřenými buňkami, který zajišťuje hladkou jízdu vozidla a zároveň si zachovává dostatečnou pevnost, aby řízení zůstalo dostatečně svižné.[36]

1.2.3 BRZDY

Vzhledem k lepší aerodynamice a vyšší hmotnosti el. velomobilů jsou nároky na jejich brzdy vyšší, než je tomu u klasických bicyklů. Tyto faktory mají význam především při dlouhodobé jízdě z kopce, kdy je potřeba výrazně vyšší brzdící síly, jak je vidět na Obr. 9. Dochází také k většímu zahřívání brzd, což může mít za následek zhoršení jejich brzdícího efektu. Polehčující okolností je pak fakt, že velomobily mají většinou tři nebo čtyři, oproti bicyklu menší kola, mezi která je celková brzdící síla rozložena.[10]



Obr. 9 Porovnání brzdících sil potřebných k udržení konstantní rychlosti při jízdě z kopců o rozdílných gradientech [10]

El. velomobily používají bubnové a kotoučové brzdy.[8][16] Bubnové brzdy se ve velkém používají u klasických neelektrických velomobilů, kde kvůli jejich zaměření na kvalitní aerodynamické vlastnosti často není na kotoučové brzdy dostatek místa.[10] Díky tomu jsou el. velomobily vycházející z těchto modelů osazeny těmito brzdami také.[16] Modernější velomobily, jako je například výše zmíněný Frikar, určené spíše k jízdě po městě jsou pak povětšinou osazeny brzdami kotoučovými.[15] El. velomobil Twike 3 pak kombinuje oba typy těchto brzd podobně jako některé automobily, kdy na přední nápravě má brzdy kotoučové a na zadní nápravě brzdy bubnové.[17]

Bubnové brzdy se používají především díky možnosti umístění přímo v kole velomobilu, jak je vidět na Obr. 10a, čímž se zmenšuje celková šířka velomobilu.[10] Další jejich výhodou je pak nižší pořizovací cena. V porovnání s kotoučovými brzdami u nich však dochází k rychlejšímu přehřívání. To je způsobeno jejich uložením v bubnu, a tím pádem horším odvodem tepla.



a) Bubnová brzda



b) Hydraulická kotoučová brzda

Obr. 10 Typy brzd [21] [8]

Hlavní a zásadní výhodou **kotoučových brzd** je schopnost produkovat větší brzdné síly. Nevýhodou je pak již výše zmíněná vyšší cena, vyšší opotřebování brzdnic a jejich horší efektivita při použití jako ruční brzda.[18] Kotoučová brzda může být ovládána buďto hydraulicky, nebo mechanicky. Hydraulické kotoučové brzdy jsou efektivnější, výkonnější a není je potřeba tak často seřizovat. Mechanické kotoučové brzdy jsou pak levnější a lehčí na opravu.[19] Vzhledem k tomu, že u nich nemůže dojít k úniku kapaliny, jsou také spolehlivější jako ruční brzda.[20] Velomobil s kotoučovými brzdami je vidět na Obr. 10b.

1.3 KAROSERIE

Jak již bylo zmíněno na začátku, karoserie představuje hlavní rozdíl mezi velomobilem a lehokolem, klasickým bicyklem nebo tříkolkou. Jedná se o prvek, který výrazně zlepšuje aerodynamické vlastnosti vozidla. Díky tomu je velomobil schopen dosahovat vyšších rychlostí, kterých lehokola ani bicykly dosáhnout nedokážou. Dalším benefitem karoserie je pak ochrana před počasím, díky čemuž jsou velomobily pohodlně použitelné i za deště. Karoserie také poskytuje částečnou ochranu při kolizích, což je užitečné především při jízdě v městském provozu.[14] Nevýhodou karoserie je pak především přidaná hmotnost, která se nejvíce projevuje při nižších rychlostech.[1] Tento problém ale z velké části řeší právě přidání elektromotoru, který s akcelerací velomobilu pomáhá.[5]

1.3.1 TYPY KAROSERIE VE VZTAHU K PODVOZKU

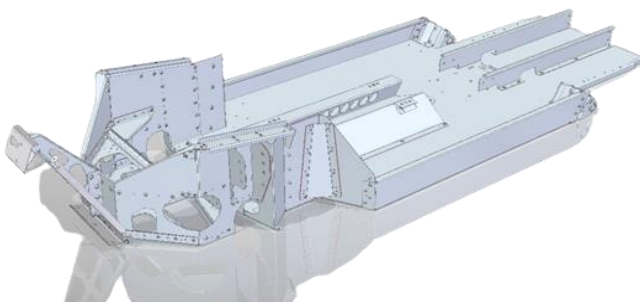
Klasické velomobily pomoc elektromotoru nemají, a je u nich tedy snaha o dosažení co nejnížší hmotnosti. Z tohoto důvodu často využívají typ samonosné karoserie, tzv. **monocoque**. Hlavní napětí zde přenáší vnější plášť vozidla, který je vyroben ze sklolaminátu, karbonu, kevlaru nebo jejich kombinací.[10] K dosažení vyšší tuhosti a pevnosti pak může být karoserie v potřebných místech vyztužena vzpěrami.[10][16] Karoserie zde slouží jako nosná konstrukce, ke které jsou připevněny součástky jako elektromotor, převodovka, zavěšení a sedadlo. Díky tomu, že zde odpadá potřeba rámu, je tato konstrukce lehčí a kompaktnější než ostatní typy karoserií. Je-li tento druh karoserie vyráběn ve velkém množství, je jeho výhodou také nízká cena. Protože se však velomobily prodávají maximálně v řádu desítek kusů ročně, je tento typ karoserie v závislosti na použitém materiálu, spíše dražší.[37][38] Stejný typ pak využívají i el. velomobily, které z těchto velomobilů vychází

jako např. el. velomobil E-WAW firmy Katanga, vyráběný v České republice.[16] Samonosnou karoserii využívají také el. velomobily vyrobené z překližky.[44] Příklady obou těchto velomobilů jsou vidět na Obr. 11.



Obr. 11 Monocoque karoserie [45][44]

Většina v současné době konstruovaných el. velomobilů používá **rámovou (podvozkovou) konstrukci**. Vnější síly zde přenáší rám podvozku, ke kterému je přidělena karoserie. Ta v tomto případě není nosná, a její vliv na tuhost vozidla je tak malý, téměř nulový. K podvozku jsou také přiděleny všechny hlavní součástky jako elektromotor, převodovka, zavěšení a sedlo.[39] U moderních el. velomobilů se objevují různé typy rámové konstrukce. Může se jednat například o plošinový rám, který je vidět na Obr. 12a nebo rám příhradový, ten je pak zobrazen na Obr. 12b. Na tyto rámy je poté připevněna karoserie, a to buďto jako celek, nebo jako několik vzájemně oddělených panelů.[15][24] Díky tomu, že karoserie neslouží jako nosný prvek, může být vyrobena z různých materiálů. Nejčastějším materiálem jsou termoplasty, dále to pak může být překližka, karbon nebo sklolaminát. Výhodou tohoto typu konstrukce je kromě většího výběru materiálů také možnost namontovat rozdílné karoserie na jeden rám, případně použít rám zcela bez karoserie nebo bez některých jejích částí.[14] Další výhodou příhradového rámu je pak také jednoduchost jeho konstrukce. Ta je tvořena svařovanými kovovými trubkami, díky čemuž může být rám celkem jednoduše vyroben i doma.[41] Nevýhodou rámové karoserie je pak především již dříve zmíněná vyšší hmotnost vozidla.[37]



a) Plošinový rám



b) Příhradový rám

Obr. 12 Typy rámové karoserie [40][24]

1.3.2 UZAVŘENÁ A OTEVŘENÁ KAROSERIE

Klasické a el. velomobily se vyrábí ve dvou základních variantách, co se karoserie týče. Tyto varianty jsou buď plně uzavřená, nebo otevřená karoserie. Zásadním benefitem **plně uzavřené karoserie** oproti ostatním typům je bezpochyby nejlepší ochrana proti počasí. Tato varianta má však i řadu nevýhod, z nichž hlavní je potřeba dostatečně kvalitní ventilace.[2] Vzhledem k tomu, že řidič vykonává při jízdě fyzickou práci, dochází u něj k tepelnému sálení o velikosti 290 - 700 wattů, a při maximálním výkonu se pak tato hodnota může vyšplhat až k 1100 wattům.[42] To má za následek značné zamlžování čelního skla a zvedání teploty ve vozidle, čímž se zhoršuje viditelnost a jízdní komfort.[2] Tento problém řeší velomobily přívodem vzduchu nasávaným v přední části vozidla a vedeným na přední sklo. U el. velomobilů je pak efekt navíc umocněn přidaným el. větrákem, který pomáhá, když vozidlo stojí nebo jede pomalu. Možností je také vyhřívání vzduchu, což dále pomáhá s odmlžováním a při velmi nízkých teplotách také odmrazováním a vyhříváním kabiny.[15][17] Plně uzavřená karoserie pak také negativně ovlivňuje sluch a rozhled z vozidla. Při dešti a sněžení ještě navíc dochází k zanášení čelního skla, což opět negativně zhoršuje viditelnost.[2] Tento problém řeší většina el. velomobilů pomocí stěračů. Nastupování a vystupování do tohoto typu velomobilu se provádí odklopením části karoserie, jak je vidět na Obr. 13.



Obr. 13 Možnosti odklopení karoserie [43] [17]

Otevřené velomobily zaujímají širokou škálu různých designových variant. Velká část klasických velomobilů a některé el. velomobily, nejčastěji typu monocoque, používají karoserii, kde vykukuje řidiči z vozidla pouze hlava.[2] Jezdec se tedy nachází z velké části uvnitř velomobilu, a i zde tak dochází k zapařování. Většina těchto velomobilů sice nemá čelní sklo, zvýšená teplota a vlhkost uvnitř však výrazně snižují jízdní komfort. Je zde také možnost použít přídatný kryt kolem hlavy řidiče, který chrání před deštěm a zlepšuje aerodynamiku. Opět je zde tedy zapotřebí ventilace. Ta je nejčastěji řešena přívodem vzduchu nasávaným v přední části vozidla stejně jako tomu je u plně uzavřených velomobilů.[10] Jednou z nevýhod tohoto typu karoserie je složité nastupování a vystupování, které je zde realizováno skrz otvor pro hlavu.[2] Otevřený el. velomobil s otvorem pro hlavu řidiče je zobrazen na Obr. 14a.

Velká část modernějších el. velomobilů však využívá rozdílný design otevřené karoserie. Ta je zde tvořena pouze přední částí, střechou a většinou i zadní částí, přičemž boky vozidla zůstávají nekryté, jak je zobrazeno na Obr. 14b. Tato konfigurace poskytuje řidiči základní ochranu proti dešti a větru a představuje kompromis mezi ochranou proti

počasí a přívodem čerstvého vzduchu. Protože do vozidla proudí dostatek vzduchu, není zde zapotřebí ventilace. Velkou výhodou otevřených boků je také snadné nastupování a vystupování. [8][24]



a) Otevřený el. velomobil s otvorem pro hlavu



b) Otevřený velomobil

Obr. 14 Typy otevřených el. velomobilů [35][24]

1.3.3 PŘÍDAVNÉ PRVKY NA KAROSERII

Většina el. velomobilů je navrhována jako ekologická alternativa k osobním automobilům. Protože jim jsou svým vzhledem podobné a jsou určeny z velké části k jízdě po silnici, mají jejich karoserie množství různých bezpečnostních a jiných prvků, stejně jako je tomu u automobilů. Všechny současné el. velomobily mají přední a zadní světla, některé jsou osazeny i světly bočními, směrovými nebo brzdovými. Ve většině případů se jedná o LED světla, občas jsou na výběr i světla halogenová. Naprostá většina el. velomobilů má všechna světla zakomponovaná do karoserie, výjimku tvoří např. el. velomobily značky Northern Light Motors, které mají některá svá světla na ramenech předních kol.[7][17]

Téměř každý el. velomobil je také osazen zpětnými zrcátky po stranách vozidla. Výjimku jsou opět velomobily značky Northern Light Motors, které zpětná zrcátka kvůli negativnímu vlivu na aerodynamiku nemají. Poskytují však možnost přikoupit si zadní kameru, která zrcátka nahrazuje a zachovává dobrou aerodynamiku velomobilu.[7]

Možnou výbavou el. velomobilů jsou také stěrače. Ty nejsou přítomné vždy, ale pokud je jimi velomobil osazen, jedná se zpravidla jen o stěrače přední. Mohou být buďto elektrické, nebo manuální, které se ovládají rukou zevnitř vozidla. Modely, které nejsou opatřeny stěrači, pak mají čelní sklo ošetřeno tak, aby po něm stékala voda co nejefektivněji. [8][15][36]

1.3.4 MATERIÁL

Na výrobu karoserie se používá velké množství rozdílných materiálů. Patří mezi ně především sklolaminát, karbon, kevlar, různé druhy termoplastů nebo překližka. Základním požadavkem u těchto materiálů je, aby byly lehké a zároveň dostatečně pevné. Svou roli hraje také cena a v poslední době se rozjíždí také trend recyklovaných a recyklovatelných materiálů. [10][17][45][46]

Je-li požadována co nejvyšší pevnost v tahu a zároveň co nejnižší hmotnost materiálu, jako je tomu např. u konstrukce monocoque, volí se jako materiál karbon, kevlar, sklolaminát nebo jejich kombinace.[10][45] Všechny tyto materiály mají výrazně lepší poměr pevnosti k hmotnosti než ocel. Nejlepší poměr z těchto materiálů má karbon. Jeho modul pevnosti v tahu je srovnatelný s tím, který má ocel, na rozdíl od ní je však přibližně 5x lehčí, což ho dělá zhruba 5x pevnějším. Jeho nevýhodou je velmi vysoká cena.[47] Kevlar pak má o něco nižší modul pevnosti v tahu než karbon, ale zároveň je i o něco lehčí.[48] Posledním materiálem je sklolaminát. Ten nedosahuje takové pevnosti ani nízké hmotnosti jako karbon či kevlar, oproti nim je však více nákladově efektivní a v porovnání s ocelí je stále výrazně lehčí.[49] Porovnání těchto materiálů, oceli a překližky je v Tab. 1.

Tab. 1 Porovnání vybraných materiálů [50][51][52][53][57]
*(hodnoty u překližky závisí na použitém dřevu)

Materiál	Ocel S235JR	Karbon ZOLTEK PX35	Kevlar 49	Sklolaminát (E-glass fiber)	Překližka
Modul pružnosti v tahu [GPa]	210	242	112,4	72,3	7-8,6*
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	7,85	1,81	1,44	2,58	0,4-0,6*

Dalším materiálem, který se využívá při stavbě el. velomobilů, je překližka. Ta je několikanásobně lehčí než ostatní materiály a v porovnání s materiály s velkým modulem pružnosti v tahu je až 300x levnější. Překližka je také šetrná k životnímu prostředí, vyrábí se ze dřeva, a jedná se tak o biologicky rozložitelný materiál. Výhodou je také její jednoduchost použití, kdy téměř jakýkoliv tvar může být vyříznut pomocí laseru v rámci sekund. Nevýhodou je pak především její vysoká hmotnost při zachování dostatečné pevnosti.[46] Překližka se také musí různě upravovat, aby lépe odolávala vlivům prostředí. Používá se například ochrana proti UV záření, vlhkosti a rzi a laminování překližky z obou stran.[44]

Posledním materiálem používaným při stavbě karoserie el. velomobilů je termoplast.[17] Ten nedosahuje ani zdaleka takové pevnosti jako dříve zmíněné materiály, v porovnání s nimi je však, s výjimkou překližky, lehčí a levnější.[55] U velomobilů s rámovou konstrukcí ale přenáší výraznou většinu vnějších sil rám, a tak karoserie příliš vysokou pevnost nepotřebuje.[39] Termoplast je tak pro tyto velomobily optimální volbou. Jednotlivé značky velomobilů používají rozdílné druhy termoplastů, jako jsou LuranS©, Trylon (ABS termoplast), PET a další.[17][36][24] Vybrané vlastnosti těchto termoplastů jsou v Tab. 2.

Tab. 2 Porovnání vybraných termoplastů [54][55][56]
*(hodnoty u Trylonu jsou pro celou škálu ABS termoplastů)

Materiál	LuranS©	Trylon (ABS termoplast)	PET
Modul pružnosti v tahu [GPa]	2,3	1 - 2,65*	2,95
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,15	1,01 - 1,2*	1,375

1.4 PŘEHLED VYBRANÝCH EL. VELOMOBILŮ

Tab. 3 Přehled vybraných el. velomobilů [8][15] [20][17] [36][7] [35][24][16]

*(hodnoty hmotností a dojezdů se mohou lišit v závislosti na výbavě a venkovních podmínkách)

Název velomobilu	 <i>Veemo</i>	 <i>Frikar</i>	 <i>Twike 3</i>	 <i>Twike 5</i>
Rozměry (délka x šířka x výška) [cm]	200x89x150	236x84x119	265x128x125	333x152x124
Váha (bez řidiče)* [kg]	62	90	240-350	600
Konfigurace kol	Tadpole	Čtyřkolová	Delta	Delta
Řízení	Řidítka	Páky po stranách sedadla	Páka na pravé straně sedadla	Páky po stranách sedadla
Brzdy	3x Hydraulické kotoučové	2x Hydraulické kotoučové 2x Mechanické kotoučové	1x Hydraulická kotoučová 2x Bubnové	3x Hydraulické kotoučové
Druh karoserie	Otevřená	Plně uzavřená	Plně uzavřená	Plně uzavřená
Dojezd na jedno dobití* [km]	73	50-80	80-400	250-500
Název velomobilu	 <i>Elf solo</i>	 <i>Northern Light 557</i>	 <i>Pedilio 25</i>	 <i>E-WAW</i>
Rozměry (délka x šířka x výška) [cm]	270x123x155	340x120x100	185x89x136	280x75x90
Váha (bez řidiče)* [kg]	72-82	55	68	34
Konfigurace kol	Tadpole	Tadpole	Čtyřkolová	Tadpole
Řízení	Řidítka	Tiller	Páky po stranách sedadla	Páky po stranách sedadla
Brzdy	3x Mechanické koutoučové	2x Hydraulické kotoučové	4x Hydraulické kotoučové	2x Bubnové
Druh karoserie	Otevřená	Otevřená	Otevřená	Plně uzavřená
Dojezd na jedno dobití* [km]	32-72	80	70-100	60-130

Nových el. velomobilů vzniká v současné době velké množství a jednotlivé modely se odlišují svou konstrukcí, charakteristikami, tím, k čemu jsou určeny atd. V některých případech jsou rozdíly zanedbatelné, jindy by člověk téměř nepoznal, že se jedná o stejný typ dopravního prostředku. Tab. 3 pak porovnává některé charakteristiky vybraných modelů těchto vozidel pohybujících se od malých jednomístných el. velomobilů určených především pro sportovní potřeby, až po několikasetkilové el. velomobily, které s lehokoly nemají již téměř nic společného a jsou mnohem podobnější současným automobilům.

Z Tab. 3 vyplývá, že el. velomobily jsou samozřejmě rozměrově větší než běžná jízdní kola. Jejich jediným srovnatelným rozměrem zůstává v několika případech šířka, která umožňuje využívání výhod, které kategorie jízdních kol poskytuje.

Hmotnost většiny el. velomobilů se pohybuje okolo 60 – 80 kg, což je několikrát více, než kolik váží elektrokolo. Tento rozdíl je způsoben větším množstvím kol, rozměrnějším rámem a přítomností karoserie. Nejlehčí vyráběný el. velomobil je pak E-WAW s hmotností 34 kg, která se blíží té u elektrokol. Tento velomobil je však určen výhradně pro sportovní účely, a na nízkou hmotnost je tak kladen značný důraz. Na druhé straně spektra jsou velomobily značky Twike. Zde se však díky dojezdu až 500 km na jedno nabití jedná spíše o automobily.

Z této tabulky je také patrné, že současné el. velomobily skutečně využívají různá řešení své koncepce, ať už se jedná o konfiguraci kol, typ řízení nebo druh karoserie.

2 DŮVOD NÁVRHU EL. VELOMOBILU

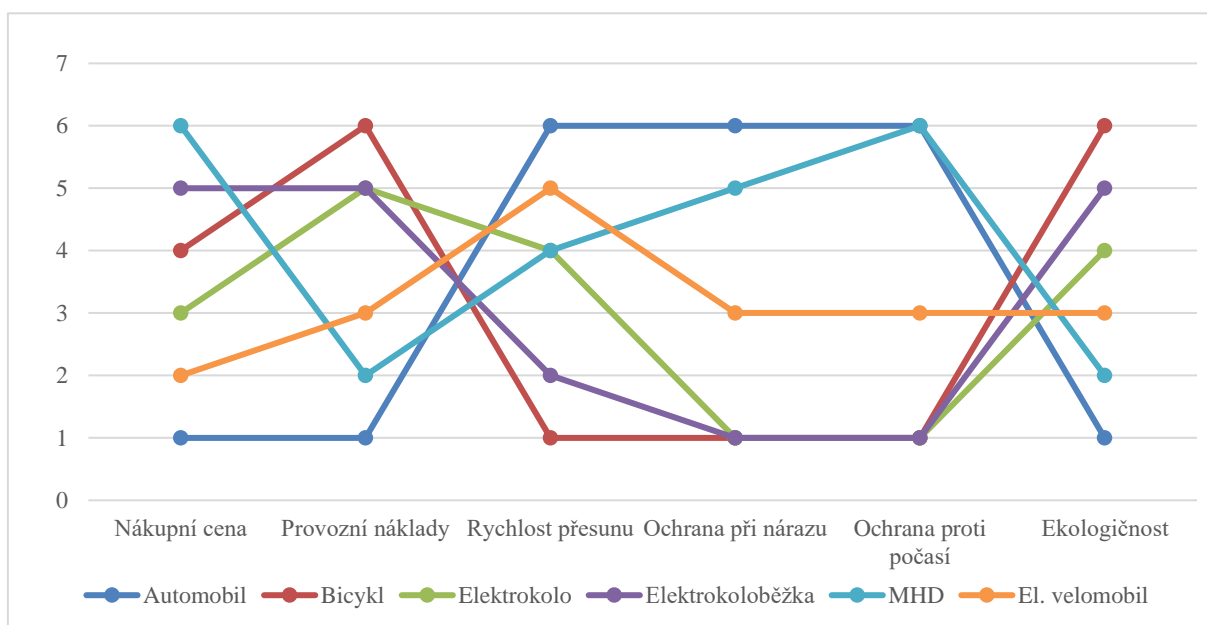
Boj o záchranu životního prostředí je v současné době v Evropě na denním pořádku a jednou z hojně prosazovaných variant, jak toho dosáhnout, je omezování automobilů se spalovacími motory. Zakazuje sem jim vjezd do center některých měst, stále více se zpřísnují emisní limity, pomalu končí jejich vývoj a od roku 2035 bude v Evropě nové automobily se spalovacími motory zakázáno prodávat úplně.[58] Hledají se tedy jejich ekologické alternativy. Hlavní náhradou se již téměř jistě stanou elektromobily. Ty jsou však značně drahé, těžké a stejně jako klasické automobily zabírají spoustu místa, i když v nich často sedí jen jeden člověk. V současné době jsou ale pro individuální jízdu mimo města, stejně jako jejich předchůdci, tím nejlepším řešením (společně s dalšími alternativními pohony LPG, CNG, vodík atd., které však nemají ani zdaleka takové zastoupení na trhu). Při jízdě mimo město také nepředstavuje vyšší hmotnost takový problém jako při jízdě ve městě, protože zde nedochází k tak častým změnám rychlosti. Jak pro automobily se spalovacími motory, tak i pro elektromobily se tak hledají alternativy, které by je dokázaly dostatečně účinně nahradit v městském provozu.

Nejčastější městskou alternativou k automobilům se spalovacími motory představují především klasická a elektrická kola, různé druhy motorek a skútrů a v poslední době stále více populární elektrické koloběžky. Všechna tato vozidla jsou v porovnání s automobily lehčí a levnější a zabírají také méně prostoru. Chybí jim však dostatečná ochrana proti počasí, ochrana řidiče při dopravních nehodách a dostatečný úložný prostor. Očividným problémem klasických kol je navíc absence pomocného pohonu. Spousta lidí je proto nechce využívat k účelům, jako je jízda do práce, na nákup nebo třeba na návštěvu, kam by přijeli v nereprezentativním stavu. Jako dostatečná náhrada za automobil se tedy považovat nedají. Jejich výhodou jsou pak především nízká nákupní cena a nulové náklady na provoz. Motorčky a skútry jsou v porovnání s klasickým bicyklem bezesporu pohodlnější a rychlejší, na druhou stranu jsou však dražší, těžší a chybí jim možnost šlapání. Další z těchto alternativ jsou elektrokola, která jsou v podstatě kombinací klasického bicyklu a elektromotorčky, a sdílí tak některé výhody, ale i nevýhody obou dříve zmíněných druhů vozidel. Tato kombinace je pak jejich zásadním benefitem, protože výrazně snižuje náklady na jejich použití oproti vozidlům bez možnosti šlapání a zároveň zpřijemňuje jejich použití. Poslední možností jsou pak elektrokoloběžky, jejichž hlavním principem je prioritizace malé velikosti před pohodlím. Jsou tedy lehké, velmi skladné a levné, protože se na nich však jezdí vestoje, poskytují minimální jízdní komfort a nejsou vhodné pro lidi s tělesnými problémy, které jim tento způsob jízdy neumožňují. Neposkytují také naprosto žádný zavazadlový prostor a žádnou ochranu před prostředím.

Poslední v současné době rozšířenou alternativou k automobilům ve městě je městská hromadná doprava (MHD). Její největší výhodou je, že člověk nemusí vlastnit auto, a odpadají mu tak náklady s tím spojené. Při porovnání s vozidly se spalovacími motory se také jedná o ekologický způsob dopravy, protože cestuje velké množství lidí jedním vozidlem. MHD má však velkou řadu nevýhod, jako jsou absence soukromí, nemožnost zvolit si přesná místa a čas nástupu a výstupu, častá zpoždění, přeplněné spoje v rušných hodinách a spousta dalších. Tyto problémy jsou pro značnou část populace nepřekonatelné a lidé, kteří jezdí auty místo MHD, tak pravděpodobně budou činit i nadále. Pro lidi, kteří již auto vlastní, také přestává být využívání hromadné dopravy výrazněji finančně výhodné.

Jednou z možných alternativ by se však mohly stát i el. velomobily. Co se týče jejich vlastností, jde vlastně o hybrid mezi elektromobilem a elektrokolem. Zjednodušeně řečeno se

jedná o elektrokola, která mají kapotu a většinou 3 nebo 4 kola, což je dělá stabilnějšími. Díky tomu je možné je používat i za nepříznivého počasí, jako je déšť, vítr, zima či ledovka, stejně jako automobily. Na rozdíl od nich jsou však ve většině případů výrazně lehčí, menší a levnější. Nákupní cena je sice vysoká, náklady na provoz jsou však v porovnání s automobily, a to i s těmi elektrickými, díky nízké hmotnosti a možnosti šlapání, téměř nulové. Vysoká nákupní cena je bohužel způsobena nízkou poptávkou, a tím pádem kusovou výrobou. Při dosažení sériové výroby by jejich cena značně klesla. Stejně jako elektromobily mají i el. velomobily nulové provozní emise. Všechny tyto vlastnosti společně s některými dalšími, jako je např. zavazadlový prostor, pak dělají z el. velomobilu optimální dopravní prostředek do města. Samozřejmě se však nepředpokládá, že by el. velomobily mohly nahradit ostatní typy dopravních prostředků, protože nezanedbatelná část lidí o vozidlo, ve kterém by museli vynaložit alespoň nějaké úsilí, aby mohli jet, nestojí. I tak by se však mohly stát dostatečně rozšířeným dopravním prostředkem s kladným vlivem na životní prostředí. Na Obr. 15 je pak vidět přibližné srovnání vybraných parametrů el. velomobilů s některými typy městských dopravních prostředků.



Obr. 15 Porovnání klíčových vlastností vybraných druhů dopravních prostředků do města (jednotlivá čísla 1–6 nemají žádnou reálnou hodnotu a slouží pouze k porovnání vozidel mezi sebou, porovnání je pouze orientační, 1 = nejhorší možné, 6 = nejlepší možné)

3 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA NAVRHOVANÝ EL. VELOMOBIL

Na trhu s el. velomobily se vyskytuje množství vozidel různých značek a žádné dvě z nich nejsou stejné. Odlišují se tím, k čemu jsou určeny a co je od nich očekáváno, od čehož se poté odvíjí jejich vzhled a všechny jejich rozdílné charakteristiky a specifikace. Jedno však mají všechny el. velomobily společné. Vysokou pořizovací cenu, která se pohybuje v rozmezí od 150 tisíc Kč až téměř k hranici jednoho milionu Kč.[15][17] Tato cena představuje jeden z hlavních problémů a důvodů, proč nejsou tato vozidla rozšířenější.

Tato práce se zabývá koncepčním návrhem el. velomobilu a dále pak konstrukčním návrhem jeho přední nápravy a návrhem karoserie. Návrhem pohonu, zadní nápravy a rámu se zabývá práce Bc. Jakuba Palčíka. Výstupem těchto prací pak není plnohodnotný el. velomobil určený přímo do výroby, ale spíše teoretický návrh, jak by takový el. velomobil mohl vypadat a fungovat. Na této práci pak bude možné dále stavět a využívat dosažené poznatky k návrhu funkčního a kompletního el. velomobilu.

Při návrhu tohoto el. velomobilu je snaha o dosažení kompromisu mezi jednotlivými požadavky tak, aby bylo vozidlo co nejvíce přitažlivé pro co nejširší škálu lidí. Zároveň by neměl žádný požadavek výrazně převyšovat ostatní, a ztelně tak zhoršovat jejich charakteristiky. Základními požadavky navrhovaného el. velomobilu jsou pak především:

- **Nízká cena** – snaha o dosažení co nejnižší ceny, např. výběrem materiálu, konstrukcí atd. Dosažení tohoto požadavku by však nemělo výrazným negativním způsobem ovlivnit vlastnosti vozidla, hlavně pak bezpečnost a jízdní pohodlí.
- **Nízká hmotnost** – snaha o dosažení co nejnižší hmotnosti, především vhodným výběrem materiálu a konstrukce velomobilu. Tato snaha by stejně jako v předchozím případě neměla výrazným negativním způsobem ovlivnit ostatní vlastnosti vozidla.
- **Pohodlné použití pro všechny** – snaha o přiblížení el. velomobilu co největšímu počtu obyvatel. Vlastnosti jako snadné nastupování, možnost řízení bez řidičského oprávnění atd.
- **Zvýšená bezpečnost** – snaha o rozšíření jedné z hlavních předností el. velomobilu oproti el. kolu. Využití karoserie jako bezpečnostního prvku proti kolizím. Použití světel a zpětných zrcátek. Zvýšená bezpečnost by měla být řešena společně s otázkou ceny a hmotnosti.
- **Udržitelnost** – snaha o využití materiálů, které jsou recyklovatelné nebo znovupoužitelné. Vyvarování se kompozitním materiálům.

4 KONCEPCE EL. VELOMOBILU

Základním úkolem, který bude definovat klíčové vlastnosti el. velomobilu, je určení, k čemu bude daný velomobil primárně sloužit. El. velomobily bývají navrženy převážně jako alternativa k automobilům nebo k elektrokolům. V obou těchto případech je pak ještě značné množství dalších možností. Může se jednat např. o náhradu automobilů pro jízdu po městě nebo i mimo něj, o sportovní vozidlo, vozidlo určené k rekreaci, jako alternativa k malým rozvážkovým dodávkám a mnoho dalšího.

Zde navrhovaný velomobil by pak měl sloužit především jako náhrada automobilů do měst. Hlavním důvodem je již výše zmíněná snaha o poskytnutí alternativy k ostatním městským dopravním prostředkům, k čemuž mají el. velomobily dobré předpoklady. Vzhledem k tomu, že se ve městech nachází většina populace, je zde také největší potenciální poptávka, a tím pádem největší šance na úspěšný produkt.

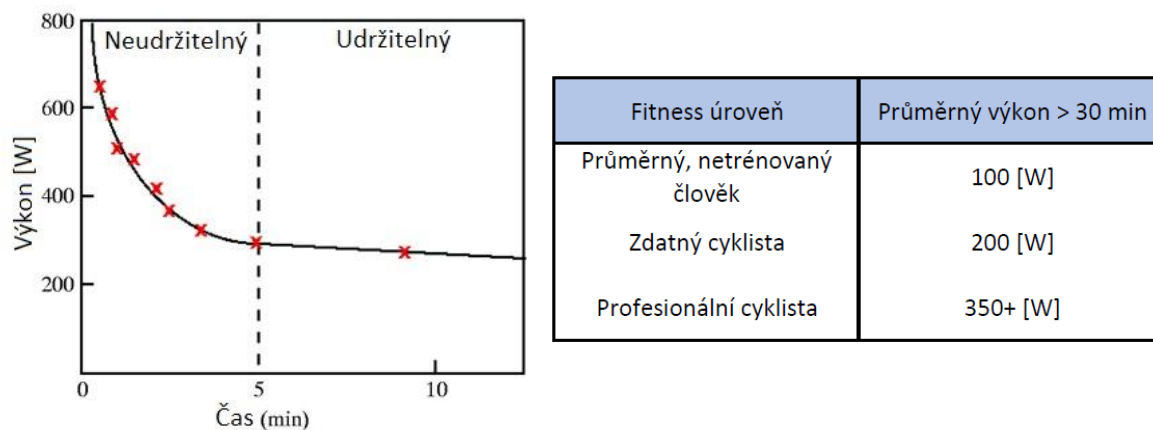
4.1 TYP VOZIDLA

Ve světě neexistuje žádná směrnice, zákon ani žádný jiný právní dokument, který by specifikoval, co to velomobil vlastně je. Klasické velomobily bez elektrického pohonu se proto řídí právními předpisy určenými pro jízdní kola. El. velomobily poté spadají do různých kategorií, určených především podle výkonu jejich elektromotoru, maximální konstrukční rychlosti, počtu a uspořádání kol a hmotnosti. V Tab. 4 jsou ukázány rozhodující parametry vozidla u kategorií, do kterých by mohl el. velomobil spadat.

Tab. 4 Specifikace vybraných druhů vozidel [59]

Kategorie	Podkategorie	Počet kol	Maximální rychlost	Maximální trvalý výkon	Maximální hmotnost
Elektrické kolo		Minimálně 2	25 km/h	250 W	Nedefinováno
		Motor vyřazen z činnosti, přestane-li cyklista šlapat			
		Výkon motoru postupně omezován až do max. rychlosti, kdy je motor vyřazen z činnosti úplně			
		Není potřeba řidičské oprávnění, registrační značka ani technický průkaz			
L1e	L1e-A	2,3,4	25 km/h	1000 W	Nedefinováno
		Není potřeba registrační značka			
	L1e-B	2	45 km/h	4000 W	Nedefinováno
L2e	L2e-P	3	45 km/h	4000 W	270 kg
		Maximálně dvě místa na sezení včetně řidiče			
L6e	L6e-A	4	45 km/h	4000 W	425 kg
		Maximálně dvě místa na sezení včetně řidiče			
	L6e-BP	4	45 km/h	6000 W	425 kg
		Maximálně dvě místa na sezení včetně řidiče			
		Určeno zejména pro přepravu osob			
Uzavřená kabina, přístupná max. ze tří stran					

Při výběru vhodné kategorie je nutné zvážit řadu faktorů a porovnat výhody a nevýhody jednotlivých možností. S přihlédnutím i k dalším faktorům bylo rozhodnuto, že navrhovaný el. velomobil bude čtyřkolový. Bližší důvody tohoto rozhodnutí jsou popsány v Kap 4.2. To nechává jako možnosti kategorie elektrických kol, L1e-A a L6e. Z těch byla nakonec vybrána kategorie elektrických kol. Ta má sice nejnižší výkon i maximální rychlost, disponuje však všemi výhodami jízdních kol, což je zejména při jízdě ve městě značnou výhodou. El velomobil tak může využívat pruhy pro cyklisty a cyklostezky a parkovat na jejich místech. Navíc k jeho provozu není potřeba řidičské oprávnění, doklad o technické způsobilosti ani registrační značka a alespoň v České republice není jeho používání věkově omezeno. Z Obr. 16 pak vyplývá, že výkon 250 W je více, než kolik dokáže udržet člověk v dobré kondici po delší dobu, a měl by tak být ve většině případů k pohonu el. velomobilu dostatečný. Maximální rychlost elektromotoru 25 km/h sice není optimální, díky dobré aerodynamice velomobilu by však při jízdě po rovině a z kopce neměl být problém ji dosáhnout nebo překonat. Při jízdě v městském provozu je důležitá také akcelerace. S tou u elektrokol pomáhá jejich elektrický motor, který až do rychlosti 6 km/h funguje i bez pomoci řidiče.



Obr. 16 Průměrný výkon generovaný cyklistou [60][61]

Kategorie L1e-A sice poskytuje oproti el. kolu vyšší výkon až do hodnoty 1000 W, který je navíc plně využitelný až do maximální rychlosti, na druhou stranu je tato rychlost stále jen 25 km/h, a tento přidaný výkon se tak projeví v podstatě jen při jízdě do kopce. Společně s el. koly se pak jedná o jedinou kategorii vozidel, u kterých není povinná registrační značka, všechny ostatní doklady však již povinné jsou. Výhoda vyššího maximálního výkonu u kategorie L1e-A ale byla vyhodnocena jako nedostatečná v porovnání se všemi výhodami, které přináší kategorie el. kol.

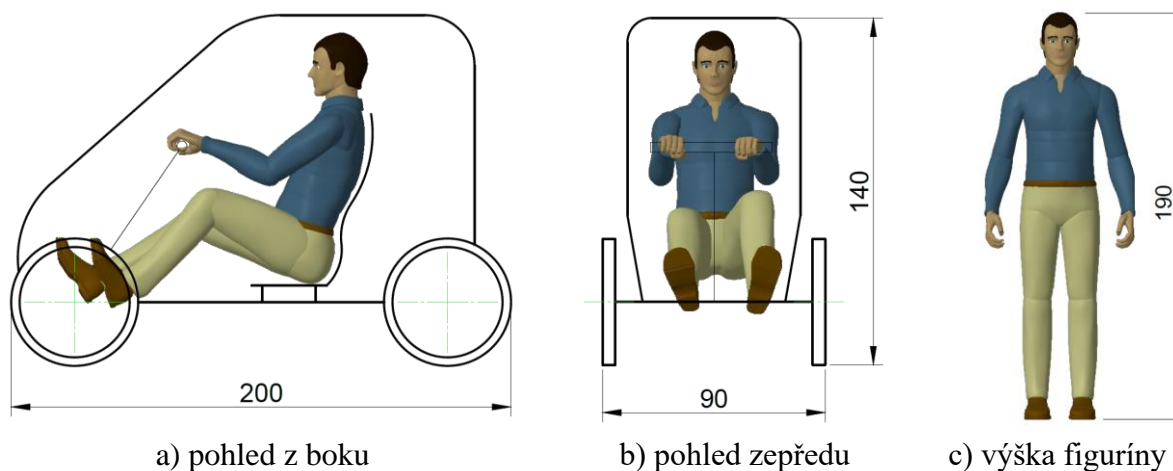
Složitější pak bylo porovnání el. kol s kategorií L6e. Ta oproti kategorii L1e-A poskytuje další navýšení maximálního výkonu, a to až na hodnotu 4000, respektive 6000 W. Zároveň však umožňuje dosažení rychlosti až 45 km/h, což poskytuje značnou výhodu nad ostatními uvažovanými kategoriemi. Nakonec tak bylo rozhodnuto, že navrhovaný el. velomobil sice bude spadat do kategorie el. kol, bude však navržen tak, aby mohl být v případě zájmu bez větších komplikací přestaven do kategorie L6e-A. Přidaný výkon kategorie L6e-BP byl vyhodnocen jako zbytečný.

4.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY

Jako první byly při návrhu el. velomobilu určeny základní charakteristiky, jako jsou předběžné celkové rozměry a počet kol. Od toho se poté budou odvíjet bližší specifikace, např. druh karoserie a rámu, typ zavěšení kol, rozmístění jednotlivých komponent a poté i vše ostatní.

4.2.1 PŘEDBĚŽNÉ ROZMĚRY

Hlavním prvkem, na který byl brán největší zřetel při návrhu předběžné velikosti velomobilu, byl řidič. Byla zde snaha, aby byl velomobil co nejmenší a zároveň dostatečně stabilní a prostorný i pro většího člověka. Jako reference tak byla zvolena figurína o výšce 190 cm, která je vidět na Obr. 17c. To by mělo zajistit, že bude v kabině dostatek místa pro naprostou většinu populace. Výška vozidla byla stanovena tak, aby byl velomobil dostatečně viditelný v městském provozu a zároveň stále rozumně aerodynamický. Šířka vozidla byla zvolena o něco menší, než je maximální povolená šířka řídítek klasického jízdního kola. To by mělo mít pozitivní vliv na používání velomobilu na cestách určených pro jízdní kola a zároveň stále poskytovat dostatečnou stabilitu při průjezdu zatáčkami. Délka pak byla zvolena tak, aby bylo ve velomobilu dostatek místa jak pro řidiče, tak pro zavazadlový prostor, ale aby velomobil zůstal dostatečně malý a svižný. Předběžné rozměry a tvar jsou zobrazeny na Obr. 17a a Obr. 17b. Pro inspiraci byly použity rozměry ostatních velomobilů z Tab. 3.



Obr. 17 Předběžné rozměry a tvar velomobilu [cm]

4.2.2 POČET KOL

El. velomobily mají nejčastěji tři nebo čtyři kola. Dvoukolové varianty se vyskytují minimálně a jsou výrazně blíže elektrokolům než automobilům. Vzhledem k tomu, že zde navrhovaný velomobil by měl sloužit především jako náhrada klasických automobilů do měst, byla tato konfigurace vyloučena. Hlavní výhodou, kterou poskytuje čtyřkolová konfigurace oproti tříkolové, je pak zvýšená stabilita. K určení rozsahu této výhody byl proveden jednoduchý výpočet maximální rychlosti při průjezdu zatáčkou, při které ještě nedojde k překlopení vozidla. Základní parametry velomobilu byly odhadnuty z předběžných rozměrů navrhovaného vozidla, jsou pro všechny konfigurace kol stejné a jsou zobrazeny v Tab. 5.

Poloměr zatáčky pak byl stanoven na hodnotu 10 metrů, protože velomobil by měl být dostatečně svižný.

Tab. 5 Parametry vozidla pro výpočet maximální rychlosti v zatáčce

Parametry	Značka	Hodnota	Jednotka
Gravitační konstanta	g	9,81	m*s ⁻²
Poloměr zatáčky	R	10	m
Rozchod kol	b	0,85	m
Výška těžiště	h	0,6	m
Rozvor kol	L	1,5	m

Rovnice pro výpočet této rychlosti pro čtyřkolové vozidlo má tvar[62]:

$$v_{4_max} = \sqrt{\frac{gRb}{2h}}, \quad (1)$$

Dosazením do této rovnice se získá vztah:

$$v_{4_max} = \sqrt{\frac{9,81 * 10 * 0,85}{2 * 0,6}},$$

$$v_{4_max} = 30,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Rovnice pro výpočet maximální rychlosti konfigurace Delta pak má tvar[62]:

$$v_{del_max} = \sqrt{\frac{gRbl_1}{2hL}}, \quad (2)$$

kde l_1 je vzdálenost mezi předním kolem a těžištěm. U tříkolových variant je u těchto výpočtů uvažováno těžiště přesně ve středu rozvoru a l_1 a l_2 se tak rovná $L/2$. Dosazením do této rovnice vznikne vztah:

$$v_{del_max} = \sqrt{\frac{9,81 * 10 * 0,85 * 0,75}{2 * 0,6 * 1,5}},$$

$$v_{del_max} = 21,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Rovnice pro Tadpole variantu je pak téměř totožná jako pro Delta variantu a má tvar[62]:

$$v_{tad_max} = \sqrt{\frac{gRbl_2}{2hL}}, \quad (3)$$

kde l_2 je vzdálenost mezi zadním kolem a těžištěm. Dosazením do této rovnice pro $l_2=L/2$ se získá vztah:

$$v_{tad_max} = \sqrt{\frac{9,81 * 10 * 0,85 * 0,75}{2 * 0,6 * 1,5}},$$

$$v_{tad_max} = 21,2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}.$$

Porovnání výsledných rychlostí je pak společně s dalšími vybranými hodnotami pro l_1 a l_2 v Tab. 6. Rozdíl těchto rychlostí je pro většinu hodnot celkem značný. U těžiště v jedné třetině velomobilu u konfigurace Tadpole, respektive dvou třetinách u konfigurace Delta už je rozdíl menší, avšak dosáhnout této hodnoty je téměř nereálné a velomobil by trpěl celou řadou jiných problémů.

Tab. 6 Maximální rychlosti v zatáčce

Poloha těžiště	4 kolový [km/h]	Delta [km/h]	Tadpole [km/h]
$l_1=L/3, l_2=2L/3$	30,0	17,3	24,5
$l_1=L/2, l_2=L/2$	30,0	21,2	21,2
$l_1=2L/3, l_2=L/3$	30,0	24,5	17,3

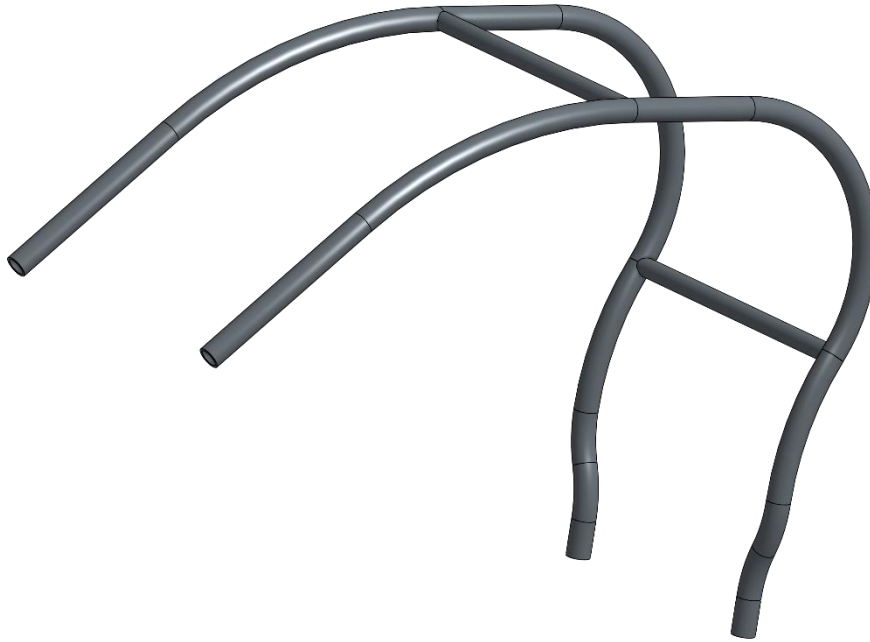
Po posouzení všech pro a proti u tří a čtyřkolových variant pak bylo rozhodnuto, že velomobil bude čtyřkolový. Rozdíl ve stabilitě je značný, a protože zde těžiště nehraje takovou roli, poskytuje tato konfigurace také větší volnost při rozložení jednotlivých komponent. Výhodou je také větší prostor v kabině. Nevýhodou je pak o něco větší hmotnost a s tím i související vyšší cena. Maximální šířka velomobilu se kvůli této volbě nezvětší, naopak by se mohla díky lepší stabilitě ještě zmenšit. Aerodynamika velomobilu u této varianty bude lehce horší, především při porovnání s konfigurací Tadpole. Tento rozdíl by však neměl při rychlostech, kterých bude zde navrhovaný velomobil běžně dosahovat, hrát výraznou roli. Vhodným návrhem karoserie se pak tento problém bude dát dále minimalizovat.

Lepší stability u tříkolového velomobilu by se dalo docílit například větším rozchodem kol. Maximální šířka velomobilu je však důležitý aspekt a je snaha udržet ji co nejnižší, aby mohl velomobil co nejvíce využívat výhody, které mu poskytuje kategorie elektrických kol. Zároveň by se tím zvedla i celková hmotnost, čímž by tříkolový velomobil přišel o svou hlavní výhodu oproti čtyřkolové verzi.

4.3 KONCEPCE RÁMU

Z pohledu vztahu rámu ke karoserii se bude jednat o rámovou (podvozkovou) konstrukci. Rám tak bude přenášet téměř všechny síly působící na velomobil. Jako typ rámu pak bude použit rám příhradový. Hlavním důvodem tohoto rozhodnutí je jednoduchost jeho výroby, kdy se rám skládá ze svařených trubek. Předběžný návrh rámu pak počítá s jednou hlavní trubkou spojující obě nápravy, dvěma trubkami umístěnými ve směru jízdy kolem kabiny řidiče, které budou sloužit jako případná ochrana při nárazu nebo převrácení a dalšími

trubkami umístěnými podle potřeby tak, aby zlepšily tuhost rámu a umožnily uchycení součástí jako tlumiče, říditka, šlapky atd. K rámu vozidla bude také uchycena karoserie. Na Obr. 18 je vidět předběžný návrh horní části rámu vytvořený pro přesnější modelování karoserie. Bližším návrhem rámu se pak zabývá diplomová práce Bc. Palčíka.



Obr. 18 Předběžný návrh části rámu

5 KONCEPCE PŘEDNÍ NÁPRAVY

Prvním krokem, od kterého se budou odvíjet všechny ostatní kroky, je vybrat vhodné zavěšení, protože jak bylo řečeno výše, el. velomobily jich využívají celou škálu. Kvůli pohodlí byla vyloučena možnost pevné nápravy, a na výběr tak je jedno z nezávislých zavěšení. Nakonec bylo jako nejvhodnější zvoleno zavěšení typu MacPherson. Hlavním důvodem této volby byla jeho malá prostorová náročnost v horizontální rovině při porovnání s lichoběžníkovým a Multi-link typem. Díky absenci horního ramena zde je dostatek místa pro pedály a nohy řidiče. Geometrie zavěšení je zde sice o něco horší, jedná se však o pomalé vozidlo určené do města, a tak by to neměl představovat větší problém.

Dalším krokem je určení geometrie zavěšení. Než se s ní však začne, musí se určit základní parametry pneumatiky, ráfku, brzdy a všech okolních komponent, aby se zjistilo, kde bude místo na připojení vzpěry a ramena zavěšení.

5.1 VÝBĚR KOL A BRZD

Jak již bylo zmíněno výše, bude mít velomobil čtyři kola. Jeho maximální hmotnost společně s řidičem a nákladem by pak měla být relativně nízká a neměla by přesáhnout 200 kg. Z těchto důvodů by měla být naprosto dostatečná kola, která se používají u bicyklů. Při výběru je třeba vzít v potaz několik faktorů. Menší kola jsou lehčí a mohou být posazena blíže rámu a karoserii, protože nepotřebují tolik prostoru při zatáčení. Na druhou stranu mají větší kola menší valivý odpor, a jsou tak o trochu rychlejší. Jsou také pohodlnější při překonávání nerovností. Zvolená velikost kol je pak největší možný běžně prodávaný rozměr, který je zároveň dostatečně kompaktní.

Značení kol u bicyklů je nejednotné a lehce matoucí. Jako velikost byly vybrány ráfky o průměru 406 mm podle ISO značení. Této velikosti ráfku pak odpovídají 20" pláště (508 mm). Poloměr kola je tak 254 mm. Šířka pláště je volitelná, závisí na tvaru ráfku a pohybuje se v rozmezí mezi 0,9" a 2,35" (2,286 mm – 5,969 mm). V této práci se pak počítá se šířkou pláště 2" (50,8 mm). Jedná se o klasickou velikost kol používanou na dětských a BMX kolech a měla by tak být běžně dostupná.

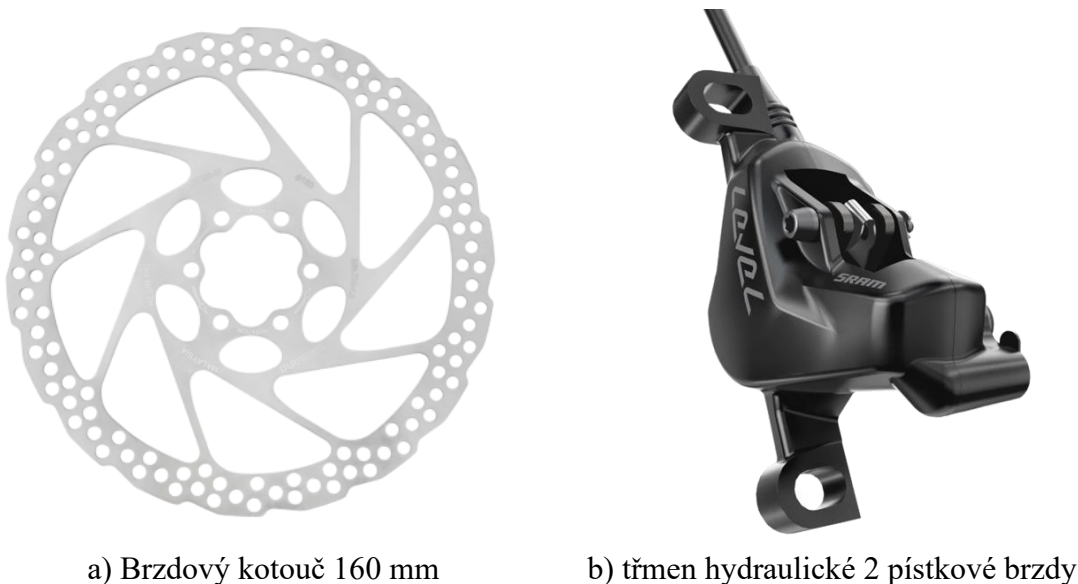
Kvůli použití kol určených pro bicykly se přímo vybízí použít i pro ně určené brzdy. Očekávaná hmotnost zde navrhovaného el. velomobilu s dospělým řidičem by neměla překročit dvojnásobek hmotnosti běžného jízdního kola se stejně těžkým jezdce, jak je vidět v Tab. 7. Velomobil je však osazen čtyřmi brzdami oproti dvěma brzdám u jízdního kola. Touto jednoduchou úvahou se dojde k závěru, že při dobře rozložené hmotnosti velomobilu by brzdy používané u klasických jízdních kol měly být naprosto dostatečné.

Tab. 7 Porovnání přibližných hmotností velomobilu a jízdního kola s řidičem

Vozidlo	Hmotnost vozidla	Hmotnost řidiče	Celková hmotnost
Jízdní kolo	10 kg	80 kg	90 kg
El. velomobil	70 kg	80 kg	150 kg

Velomobil bude osazen hydraulickými brzdami. Ty totiž poskytují lepší brzdné parametry oproti mechanickým brzdám, ale za cenu vyšší ceny. Rozdíl v ceně by ale v celkových nákladech velomobilu neměl hrát značnou roli. Použity mohou být jak 2 pístkové, tak 4 pístkové třmeny. Hlavní faktor zde ale bude šířka třmenu, protože ten se musí vejít do prostoru mezi kotouč a výplet kola, který je kvůli úspoře místa dost úzký. Brzdy budou rozděleny na přední a zadní okruh, z nichž se každý bude ovládat samostatně pomocí páček na říditkách.

Čím větší kotouč, tím větší brzdný účinek díky většímu rameni, na kterém brzdná síla působí. Na velké kotouče zde však není kvůli uchycení dolního ramena dostatek místa a jsou tak použity alespoň kotouče o průměru 160 mm. Ty by měly zajistit dostatečný brzdný účinek a zároveň poskytují dostatek místa v prostoru kola. Kotoučová brzda je pak připevněna k náboji kola pomocí 6 šroubů M5x10. Možnou variantu brzdných komponent je vidět na Obr. 19.



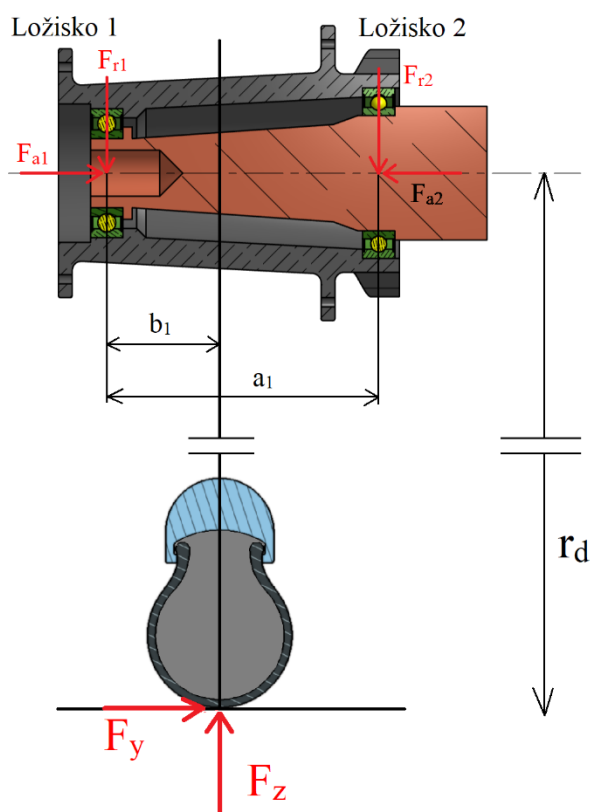
Obr. 19 Brzdové komponenty [64][65]

5.2 ULOŽENÍ KOLA

Protože zde není kolo uloženo ve dvounohé symetrické vidlici, jako je tomu u většiny klasických bicyklů, ale všechna síla je přenášena jen jedním ramenem, není zde vhodné použít náboj vyskytující se u těchto kol. Vnitřní strana náboje bude přenášet větší zatížení a tomu by měla odpovídat i jeho konstrukce. K uložení zde budou ale stejně jako u klasické vidlice sloužit dvě ložiska uložená v náboji, ve kterých bude uložen čep kola, jak je vidět na Obr. 20.

Tyto ložiska je nutné vhodně zvolit na základě zátěžového výpočtu. Ten je zjednodušený, protože jsou ložiska zatěžována náhodně, a přesný výpočet je tak nemožný. Počítá se zde s průjezdem vozidla zatáčkou po rozbité komunikaci, což jsou nejnepríznivější podmínky, které mohou za normální situace nastat.[66] Protože celková hmotnost velomobilu, řidiče a případných zavazadel stejně tak jako její rozložení zatím není známo a ve skutečnosti budou tyto hodnoty silně záviset na rozměrech řidiče, je zde uvažováno

rovnoměrné rozložení síly na všechna kola a hmotnost řidiče na větší straně váhového spektra.



Obr. 20 Uložení kola na náboji

Nejprve se určí statické síly působící na 1 kolo velomobilu při jízdě přímo pomocí rovnice[66]:

$$F_{z1} = k \frac{m_c g}{4}, \quad (4)$$

kde k je rázový součinitel, jehož hodnoty jsou v Tab. 8. Pro tento výpočet byla zvolena střední hodnota 1,5. m_c je předpokládaná maximální hmotnost vozidla (70 kg), řidiče (100 kg) a zavazadel (30 kg) a byla stanovena na 200 kg.

Tab. 8 Hodnoty rázového součinitele [66]

Druh vozidla	Osobní automobil	Dodávka	Terénní vozidlo
Rázový součinitel (k)	1,3	1,5	až 1,7

Dosazením do této rovnice se získá vztah:

$$F_{z1} = 1,5 \frac{200 * 9,81}{4},$$

$$F_{z1} = 735,75 \text{ N.}$$

Jako další se vypočítá vliv odstředivé síly na kolo při průjezdu zatáčkou. Ta působí především na vnější kola, a proto je při výpočtu uvažováno jen s nimi. Rovnice pro jedno kolo má pak tvar:

$$F_{y1} = \frac{m_c v_{4max}^2}{2 R}, \quad (5)$$

Je zde uvažován stejný poloměr $R=10$ m jako při výpočtu počtu kol a k tomu pak odpovídající maximální rychlost průjezdu tímto poloměrem zatáčky $v_{4max}=30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} = 8,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dosazením do této rovnice se dostane vztah:

$$F_{y1} = \frac{200 \cdot 8,3^2}{2 \cdot 10},$$

$$F_{y1} = 694,88 \text{ N}.$$

Dalším krokem je výpočet sil zatěžujících jednotlivá ložiska. Působení těchto sil a základní rozměry pro tento výpočet jsou zobrazeny na Obr. 20.

LOŽISKO 1

Radiální síla působící na ložisko 1 se vypočítá jako[66]:

$$F_{r1} = \frac{a_1 - b_1}{a_1} F_{z1} - \frac{r_d}{a_1} F_{y1}, \quad (6)$$

kde a_1 a b_1 jsou volené hodnoty. a_1 je vzdálenost mezi jednotlivými ložisky s hodnotou 59 mm. b_1 je vzdálenost mezi vertikální osou kola a ložiskem 1 a její hodnota je 24,5 mm. r_d je poloměr kola, který má hodnotu 254 mm. Dosazením do tohoto vzorce se získá vztah:

$$F_{r1} = \frac{5,9 - 2,45}{5,9} * 735,75 - \frac{25,4}{5,9} * 694,88,$$

$$F_{r1} = -2561,27 \text{ N}.$$

Výsledná hodnota vyšla záporná. Z toho vyplývá, že síla má oproti obrázku opačný směr. Hodnota axiální síly působící na ložisko 1 je pak nulová, protože všechnu axiální sílu zachycuje ložisko 2.

$$F_{a1} = 0 \text{ N}. \quad (7)$$

Jako vhodné bylo vybráno ložisko 61902 – 2RZ se základní dynamickou únosností 4360 N. Jedná se o jednořadá kuličková ložiska.

LOŽISKO 2

Radiální síla působící na ložisko 2 se vypočítá pomocí vzorce[66]:

$$F_{r2} = \frac{b_1}{a_1} F_{z1} + \frac{r_d}{a_1} F_{y1}, \quad (8)$$

dosazením do tohoto vzorce se získá vztah:

$$F_{r2} = \frac{2,45}{5,9} * 735,75 + \frac{25,4}{5,9} * 694,88,$$

$$F_{r2} = 3297,02 \text{ N}.$$

Ložisko 2 zachycuje veškerou axiální sílu, která na kolo působí, a ta se tak rovná[66]:

$$F_{a2} = F_{y1} = 694,88 \text{ N}. \quad (9)$$

Protože je ložisko zatíženo jak radiálně, tak axiálně, je pro něj potřeba určit dynamické ekvivalentní zatížení P_e . Pro to platí, že je-li F_{a2}/F_{r2} menší než e , pak se $P_e = F_{r2}$. e se určí z tabulky pomocí vzorce[67]:

$$\frac{f_0 F_{a2}}{C_{0r}}, \quad (10)$$

kde f_0 je součinitel pro výpočet základní statické únosnosti a C_{0r} je základní radiální statická únosnost. Obě tyto veličiny jsou individuální pro jednotlivá ložiska, a je proto nutné již nyní vybrat ložisko. Jako potenciálně vhodné bylo vybráno ložisko 61805 – 2RZ s hodnotami $f_0 = 14$ a $C_{0r} = 2600 \text{ N}$. Rovnice má pak tvar:

$$\frac{14 * 694,88}{2600} = 3,74.$$

Z Tab. 9 se následně musí interpolovat hodnota e a porovnat s hodnotou F_{a2}/F_{r2} :

$$\frac{F_{a2}}{F_{r2}} = 0,21. \quad (11)$$

Tab. 9 Hodnota e [67]

$f_0 F_{a2} / C_{0r}$	e
3,45	0,38
5,17	0,42

Hodnota e je 0,39, což je více než poměr F_{a2}/F_{r2} a výsledné zatížení je tak[67]:

$$P_e = F_{r2} = 3297,02 \text{ N} \quad (12)$$

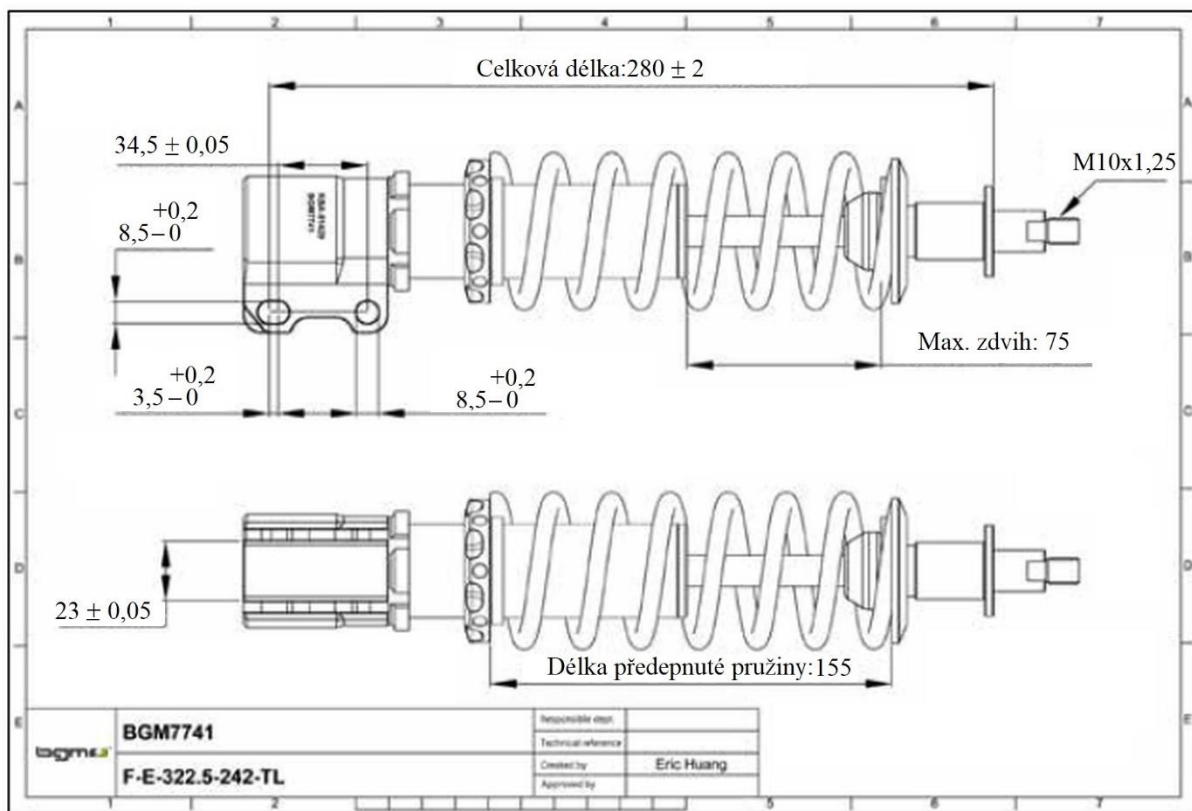
Ložisko 61805 – 2RS má základní dynamickou únosnost 4360 N, a je tedy dostačující. Opět se jedná o jednořadé kuličkové ložisko.

5.3 VOLBA TLUMIČE

Nejmenší rozměry, ve kterých se MacPherson vzpěry v současnosti vyrábí, jsou určeny pro osobní automobily. To však naprosto neodpovídá požadavkům na zavěšení zde navrhovaného el. velomobilu, který bude několikanásobně lehčí. Jako možné řešení se tak nabízí především dvě varianty:

- Navrhnout vlastní vzpěru
- Použít běžně dostupné tlumiče určené pro čtyřkolky a motorky, případně zadní odpružení bicyklů

Vlastní vzpěry by se daly navrhnout tak, aby přesně seděly do optimální konstrukce zavěšení. Jejich návrh by však minimálně ze začátku velmi výrazně zvedl cenu velomobilu. Jako lepší řešení se tak jeví použití běžně dostupných tlumičů. To sice přinese některé konstrukční problémy, jako např. způsob upevnění tlumiče k závěsu kola a ke karoserii, snížení ceny by však mělo být značné a pro tento návrh je rozhodující. Pístnice těchto tlumičů by také měla být dostatečně pevná, aby udržela váhu vozidla a za normálních podmínek nedošlo k jejímu ohnutí.



Obr. 21 Rozměry tlumiče BGM 7741 [69]

Jako nejvhodnější se nakonec ukázaly tlumiče určené pro skútry Vespa. Jejich hlavní výhodou oproti tlumičům určeným pro motorky je způsob připevnění k závěsu kola. To je zde provedeno pomocí dvou šroubů, což značně usnadňuje návrh nepohyblivého spoje v tomto místě. Z tohoto typu tlumičů byl poté vybrán tlumič německé značky BGM, BGM PRO SC/F1, 240 mm, 7741B, který je vidět na Obr. 22. Jedná se o velmi lehký, plynokapalinový tlumič vyšší třídy, s upravitelnou celkovou délkou a nastavitelným předpětím pružiny. Jedním

z důvodů použití tohoto tlumiče byla také dostupnost alespoň některých jeho rozměrů, díky čemuž bude moc být celkový návrh přesnější. Tyto rozměry jsou zobrazeny na Obr. 21.



Obr. 22 Tlumič BGM 7741B [69]

5.4 VÝPOČET ODPRUŽENÍ

Protože jsou použity tlumiče s pružinami určenými pro skútry, které mají naprosto jiné charakteristiky než zde navrhovaný el. velomobil, je potřeba určit optimální tuhost pružin odpovídající zde navrhovanému vozidlu. K tomu budou použity dva možné přístupy výpočtu, jejichž výsledky pak budou porovnány.

5.4.1 VÝPOČET TUHOSTI Z HLEDISKA VLASTNÍ FREKVENCE KAROSERIE

První výpočet určuje tvrdost pružin pomocí vlastní frekvence karoserie. Ta se u osobních aut pohybuje v rozmezí od 0,8 do 1,5 Hz, u vozidel formulového typu bez aerodynamických prvků je okolo 2 Hz a u vozidel s extrémní aerodynamikou se může vyšplhat až k 5 – 7 Hz. Vlastní frekvence přední nápravy pak ještě bývá o něco nižší, než je tomu u nápravy zadní.[68] Zde byla po konzultaci s vedoucím zvolena vlastní frekvence 1 Hz. Protože je tento výpočet prováděn v době, kdy ještě není známa jak celková hmotnost velomobilu, tak ani neodpružená hmotnost zavěšení jednotlivých kol, musely být tyto hodnoty odhadnuty. Tuhost pružiny není dimenzována na maximální možné zatížení, a tak je zde celková hmotnost o něco nižší než u výpočtu ložisek. Neodpružená hmotnost soustavy 1 kola je pak odhadnuta na 4 kg. Jako první se určí odpružená hmotnost velomobilu pomocí vzorce (je zde opět uvažováno s rovnoměrným rozložením hmotnosti na všechna čtyři kola):

$$m_o = m_1 - 4m_{nk}, \quad (13)$$

kde m_1 je zde uvažovaná celková hmotnost a m_{nk} je neodpružená hmotnost jednotlivých soustav kol. Dosazením do rovnice se získá vztah:

$$m_o = 170 - 4 * 4,$$

$$m_o = 154 \text{ kg}.$$

Jako další krok se určí tuhost na jednom kole (Ride rate) podle vzorce[68]:

$$c_k = \frac{m_o}{4} (2\pi f_n)^2, \quad (14)$$

kde f_n je vlastní frekvence přední nápravy. Dosazením se získá vztah:

$$c_k = \frac{154}{4} (2 * \pi * 1)^2,$$

$$c_k = 1,52 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}.$$

Následně je potřeba převést tuto tuhost na tuhost pružiny v rovině kola. Toho se docílí pomocí vzorce[68]:

$$\frac{1}{c_{pk}} = \frac{1}{c_k} - \frac{1}{c_t}, \quad (15)$$

kde c_{p1} je tuhost pružiny v rovině kola a c_t je laterální tuhost kola. Ta se u jízdních kol pohybuje okolo $40 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$. Dosazením se získá tvar:

$$\frac{1}{c_{pk}} = \frac{1}{1,52} - \frac{1}{40},$$

$$c_{pk} = 1,58 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}.$$

Posledním krokem je převést tuto tuhost pomocí převodu odpružení i_p na skutečnou tuhost pružiny. Ten je u zavěšení MacPherson blízky jedné a výsledná tuhost pružiny je tak nezměněná[68]:

$$c_{p1} = c_{pk} i_p^2, \quad (16)$$

$$c_{p1} = 1,58 * 1^2,$$

$$c_{p1} = 1,58 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}.$$

Optimální tuhost pružiny v závislosti na vlastní frekvenci přední nápravy by tak byla $1,58 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$.

5.4.2 VÝPOČET TUHOSTI Z HLEDISKA OVLADATELNOSTI VOZIDLA A NAMÁHÁNÍ VOZOVKY

V tomto výpočtu se s vlastní frekvencí neuvažuje a je možné ji určit až zpětně z výsledné tuhosti. Optimální tuhost pružiny z hlediska ovladatelnosti vozidla a namáhání vozovky se určí pomocí rovnice[66]:

$$c_{p2} = \frac{c_t m_{nk} \frac{m_o}{4}}{(m_{nk} + \frac{m_o}{4})^2}, \quad (17)$$

dosazením do této rovnice se získá vztah:

$$c_{p2} = \frac{40 * 4 * \frac{154}{4}}{(4 + \frac{154}{4})^2},$$

$$c_{p2} = 3,41 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}.$$

Optimální tuhost pružiny z hlediska ovladatelnosti vozidla a namáhání vozovky by tak byla $3,41 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$.

5.4.3 ROZMĚRY PRUŽINY

Výsledná tuhost pružiny, vypočítaná pomocí obou výše zmíněných přístupů je velmi malá a pro skutečnost ne příliš vhodná. Zaprvé by se výrazně projevila každá změna celkové hmotnosti způsobená např. rozdílnou váhou řidičů. Dalším problémem malé tuhosti pružin, který se vyskytuje u šlapacích vozidel, je pak značné pružení při každém použití pedálů, čímž se ztrácí velké množství energie a zároveň snižuje jízdní komfort. Výsledná tuhost pružiny (c_p) tak byla stanovena na hodnotu o něco vyšší, než které bylo dosaženo pomocí druhého výpočtu, a to $5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$. Při výrobě prototypu by pak byla tato tuhost prakticky testována a upravena tak, aby odpovídala skutečným vlastnostem.

Dosazením této tuhosti do vzorců (14) a (15) se pak může zpětně zjistit vlastní frekvence přední nápravy, která zde činí $1,71 \text{ Hz}$. Tato hodnota je sice vyšší než u běžných automobilů, zároveň však stále není tak vysoká, aby byla jízda značně nekomfortní.

Dalším krokem je návrh rozměrů pružiny. Tuhost pružiny je tedy $5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ a z rozměrů tlumiče je stanoven vnitřní průměr pružiny (D_{in}) na 42 mm a maximální možný vnější průměr (D_{outMax}) na 60 mm . Jako materiál je použita ocel 54SiCr6 (ČSN 14260) s modulem pružnosti ve smyku (G_s) $78,5 \text{ GPa}$, která se běžně využívá pro pružiny automobilů.[70] Hodnoty průměru drátu (d) a počtu činných závitů (n_c) se poté určí ze vzorce[66]:

$$n_c = \frac{d^4 G_s}{8c_p D^3}, \quad (18)$$

kde D je střední průměr pružiny, který se určí jako $D_{in} + d$. Vhodnou volbou průměru drátu se pak získá k němu příslušící počet činných závitů. V Tab. 10 jsou vidět některé z možných kombinací.

Tab. 10 Kombinace průměru drátu a činných závitů

Varianta	1	2	3
Průměr drátu [mm]	4	4,5	5
Počet činných závitů	5,162	8,004	11,814

Z těchto možností byla vybrána varianta 2 s průměrem drátu $4,5 \text{ mm}$ a zaokrouhleným počtem činných závitů na 8. Poslední rozměr, kterým je délka nezátížené pružiny, bude určen až po výpočtu předpětí pružiny v následující kapitole 5.4.4.

5.4.4 PŘEDPĚTÍ PRUŽINY

Nejprve je třeba určit sílu působící na pružinu při statickém zatížení pomocí vzorce (jako vždy je zde uvažováno rovnoměrné rozložení hmotnosti na všechna kola):

$$F_{pr} = \frac{m_o}{4} g, \quad (19)$$

$$F_{pr} = \frac{154}{4} g,$$

$$F_{pr} = 377,685 \text{ N}.$$

Dále se určí stlačení pružiny vzniklé působením této síly pomocí vzorce[67]:

$$y_s = \frac{F_{pr}}{c_p}, \quad (20)$$

$$y_s = \frac{377,685}{5},$$

$$y_s = 75,537 \text{ mm}$$

Jako vhodná velikost předpětí byla zvolena hodnota, při které je staticky zatížený tlumič stlačen z 50 % svého celkového zdvihu, který činí 75 mm. Tato poloha pak bude použita i při návrhu geometrie předního zavěšení v dalších kapitolách. Stlačení pružiny pro optimální předpětí se určí podle vzorce:

$$y_p = y_s - \frac{zd}{2}, \quad (21)$$

kde zd je celkový zdvih tlumiče. Dosazením do vzorce se získá vztah:

$$y_p = 75,537 - \frac{75}{2},$$

$$y_p = 38,037 \text{ mm}.$$

Tomu odpovídající potřebná síla se určí pomocí vzorce[67]:

$$F_p = c_p y_p, \quad (22)$$

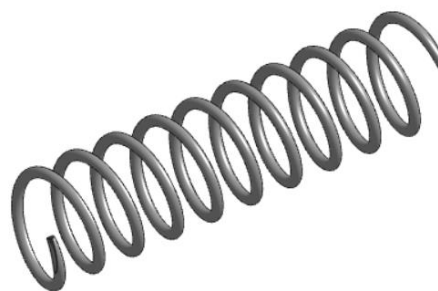
$$F_p = 5 * 38,037,$$

$$F_p = 190,185 \text{ N}.$$

Předpětí pružiny tedy činí 190,185 N a pružina bude při tomto zatížení stlačena o 38,037 mm. Pomocí této hodnoty a znalosti délky originální předepnuté pružiny, která je 155 mm, byla stanovena délka nezatížené pružiny na 195 mm. Souhrn základních rozměrů pružiny je pak v Tab. 11 a model pružiny v nezatíženém stavu se nachází na Obr. 23.

Tab. 11 Základní rozměry pružiny

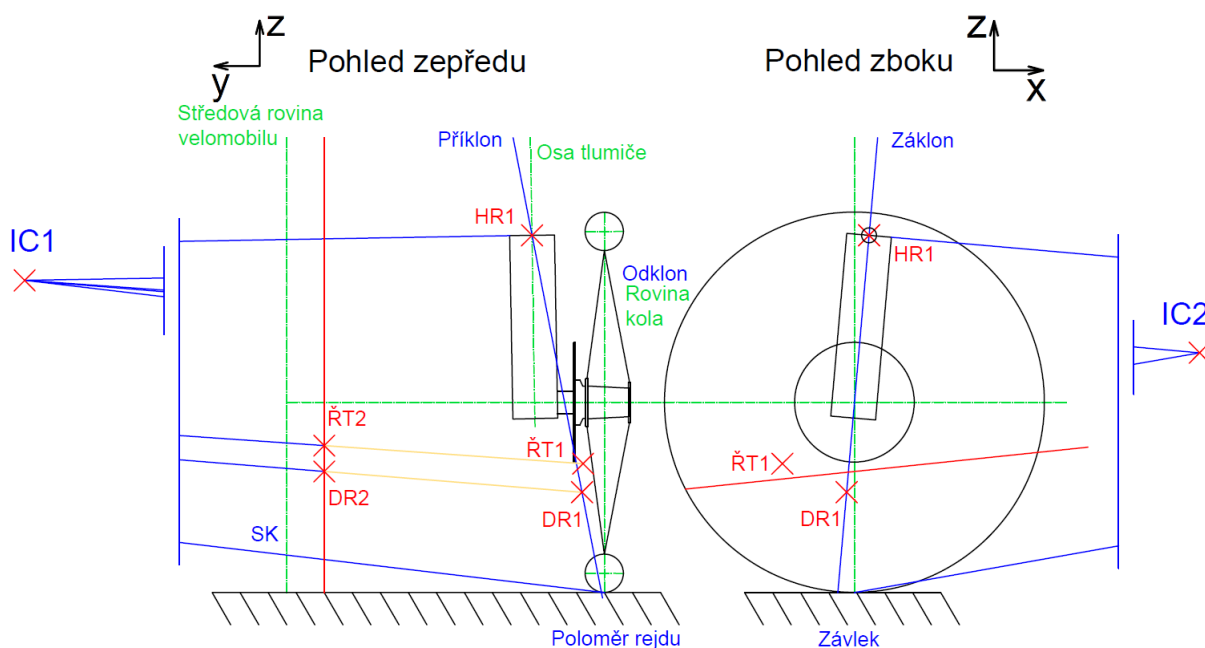
Tuhost pružiny	5 N/mm
Vnitřní průměr pružiny	42 mm
Střední průměr pružiny	46,5 mm
Vnější průměr pružiny	51 mm
Průměr drátu	4,5 mm
Počet činných závitů	8
Délka nezatížené pružiny	195 mm
Modul pružnosti ve smyku	78,5 GPa



Obr. 23 Model pružiny

5.5 GEOMETRIE ZAVĚŠENÍ

Návrhem dílů v kapitole 5 se určily možné polohy jednotlivých kloubů a prvků zavěšení, především v okolí kola. Dalším krokem je návrh samotné geometrie zavěšení. Byla použita grafická konstrukce, jejíž postup je popsán v knize Race Car Vehicle Dynamics.[71] Výsledný návrh geometrie je zobrazen na Obr. 24.



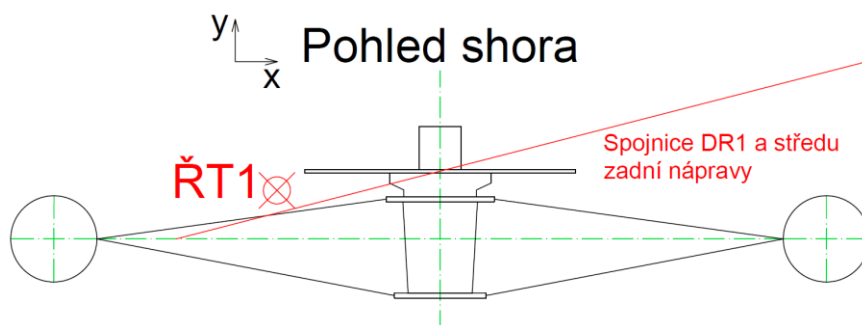
Obr. 24 Výsledný návrh geometrie

Protože se jedná o zavěšení typu MacPherson a zároveň je zde nedostatek místa, způsobený především šířkou náboje kola, výpletem kola a použitím kotoučové brzdy, nebude geometrie zavěšení optimální. Vzhledem k předpokládané funkci vozidla by to však neměl být problém. Jako první prvek byl určen dolní kulový kloub (DR1), spojující těhlici a dolní rameno zavěšení, do nejvzdálenější možné polohy od středové roviny velomobilu. Tento bod zásadním způsobem ovlivňuje většinu návrhu a není možné s ním již příliš hýbat.

Hlavní snaha z hlediska charakteristik se soustředila na dosažení co nejmenšího, optimálně až záporného, poloměru rejdu. Jeho konečná hodnota je pak kladných 3,95 mm.

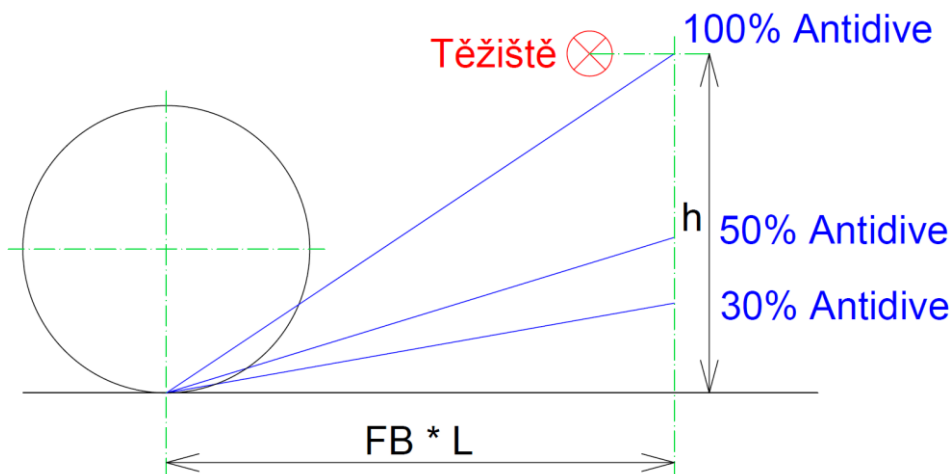
Nižší hodnota již vzhledem k poloze DR1 nebyla možná, protože by ještě zvýšila již tak velký příklon rejdové osy, který činí 11° . Záklon rejdové osy byl stanoven na hodnotu 5° a jeho hlavním cílem je zajištění optimálního závleku, který je 22,22 mm. Odklon kola je pak nulový, protože jeho záporná hodnota by měla za následek buďto zvýšení poloměru rejdu nebo příklonu rejdového čepu. Kladná hodnota pak má negativní vliv na změnu odklonu při zdvihu kola. Poloha horního uchycení tlumiče (HR1) vzešla z jeho rozměrů, příklonu a záklonu.

Protože se vozidlo bude pohybovat nízkými rychlostmi, byla by optimální poloha bodu připojení řídicí tyče k těhlici (ŘT1) taková, která by zajišťovala natočení kol podle Ackermannovy geometrie. Jak je však vidět z Obr. 25, to není vzhledem k nedostatku místa možné. Byla tak zvolena poloha nejvíce se Ackermannově geometrii blíží. Varianta řídicí tyče za osou kola byla zavrhnuta z důvodu nedostatku místa kvůli šlapkám.



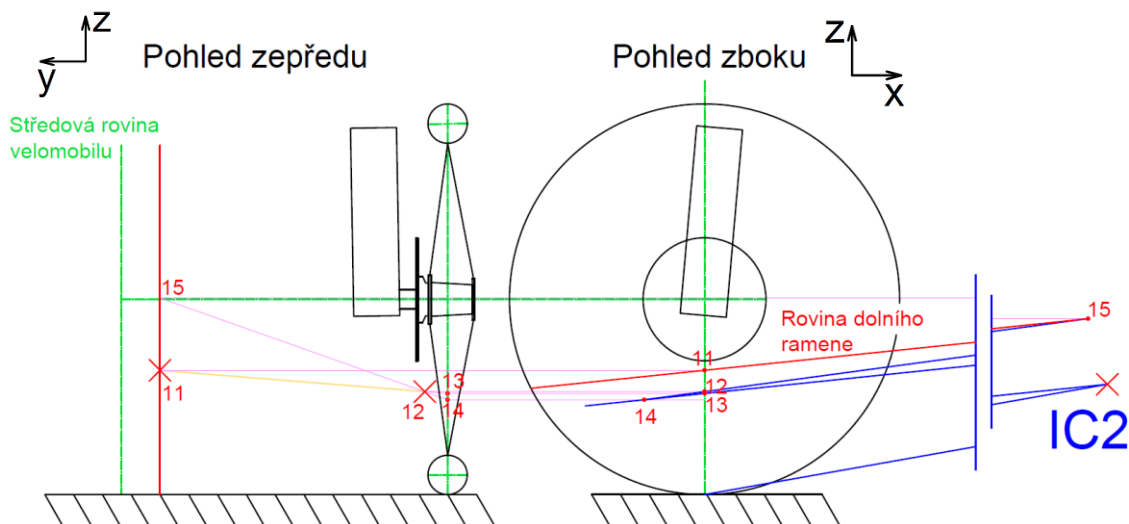
Obr. 25 Umístění bodu ŘT1

Návrh pólu otáčení kola při pohledu zepředu (IC1) byl určen středem klopení (SK), který byl zvolen ve výšce 50 mm, rozumným úhlem stoupání dolních ramen a úhlem osy tlumiče. Pól otáčení kola při pohledu z boku (IC2) pak určuje antidive a opět osa úhlu tlumiče. Hodnota antidivu byla zvolena na 30 % a její grafické znázornění je vidět na Obr. 26. FB je poměr brzdných sil připadajících na přední nápravu v procentech. Zde navrhovaný el. velomobil sice bude mít přední a zadní brzdný okruh oddělen, a tato hodnota tedy závisí na dané situaci a řidiči, zde se však uvažuje hodnota 60 %. L je pak rozvor (1,5 m) a h výška těžiště (0,6 m).



Obr. 26 Antidive [71]

Dolní rameno (DR2) je uchyceno ke karoserii ve vzdálenosti 50 mm od středové roviny velomobilu. K určení polohy uchycení při pohledu z boku je pak opět použit postup popsáný v knize Race Car Vehicle Dynamics,[71] který využívá deskriptivní geometrii. Tento postup je ukázán na Obr. 27. Červené přímky představují všechna možná místa, kde se mohou body uchycení dolního ramene nacházet, mají-li sobě odpovídající z-ovou a x-ovou souřadnici, a to bez změny hlavních kinematických charakteristik. Vzhledem k tomu, že v době návrhu zavěšení není známa přesná konstrukce rámu a jí odpovídající optimální body uchycení dolního ramene ke karoserii ani poloha šlapek, je tato skutečnost přínosná, protože umožňuje flexibilitu při pozdějších návrzích.



Obr. 27 Poloha bodů dolního ramene

V Tab. 12 se nachází přibližné shrnutí základních statických charakteristik získaných grafickým návrhem zavěšení.

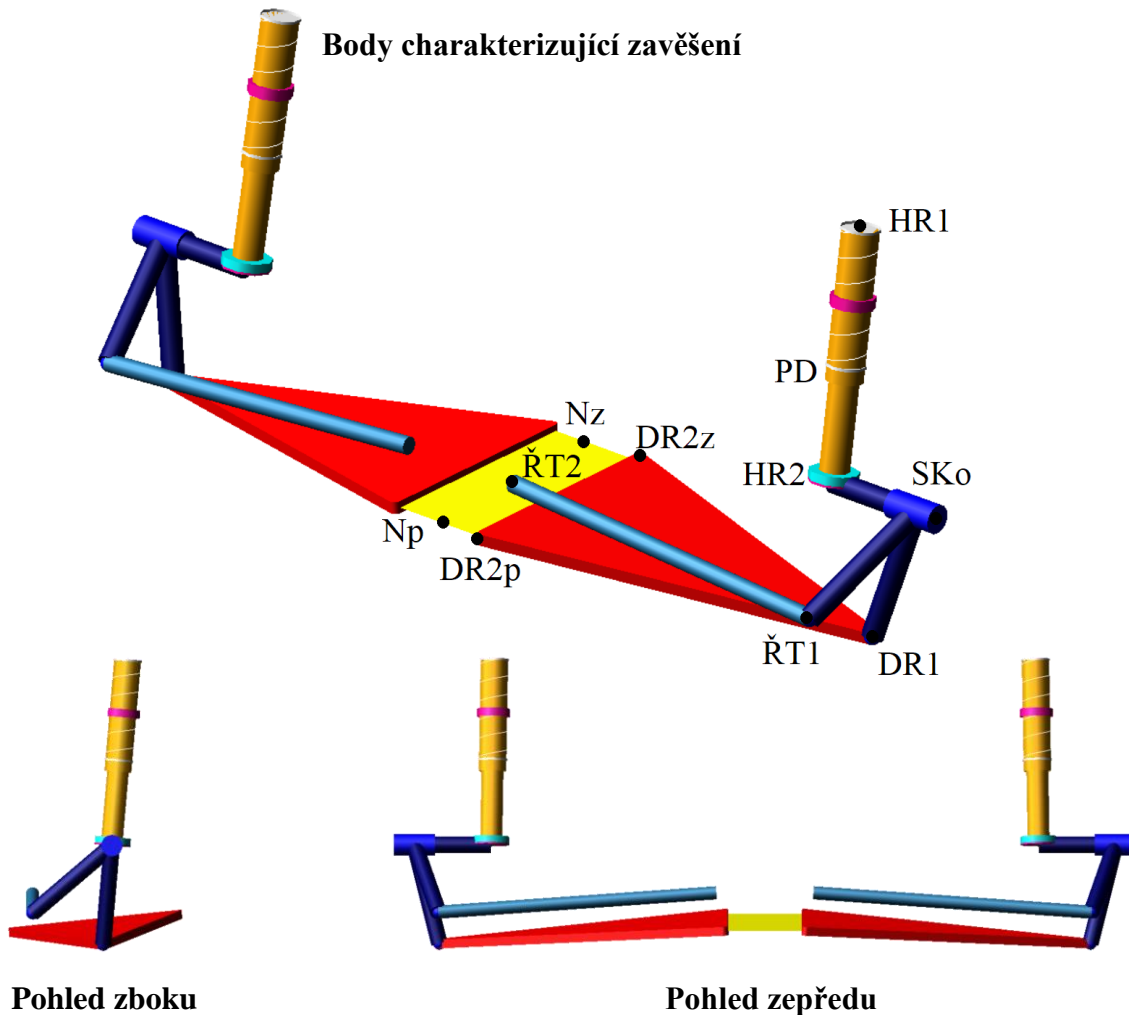
Tab. 12 Předběžné statické charakteristiky

Charakteristika	Hodnota
Odklon	0°
Příklon	11°
Záklon	5°
Závlek	22,22 mm
Poloměr rejdů	3,95 mm

5.5.1 MODEL ZAVĚŠENÍ

K určení průběhů kinematických charakteristik a k jejich případné optimalizaci byl vytvořen kinematický model v programu Adams Car. Jako šablona zavěšení byl použit template `_macpherson.tpl` a jako šablona řízení template `MDI_FRONT_STEERING.sub`, které jsou v programu volně přístupné. Šablona řízení sice přesně neodpovídá řízení zde navrhovaného velomobilu, protože se však budou zkoumat kinematické charakteristiky jen při propružení kola, nemělo by to na ně mít žádný vliv. Oběma těmito šablonám byly následně upraveny jednotlivé body podle grafického návrhu z kapitoly 5.5 a byly jim vypnuty všechny pružné spoje. Model zavěšení s označením jednotlivých bodů je zobrazen na Obr. 28.

Body DR2p DR2z byly prozatím zvoleny tak, aby nepřekážely řídicím tyčím a snad ani šlapkám. Pokud se při návrhu rámu vyskytne problém, bude možné, jak bylo zmíněno výše, polohu těchto bodů upravit bez větších dopadů na kinematiku zavěšení.



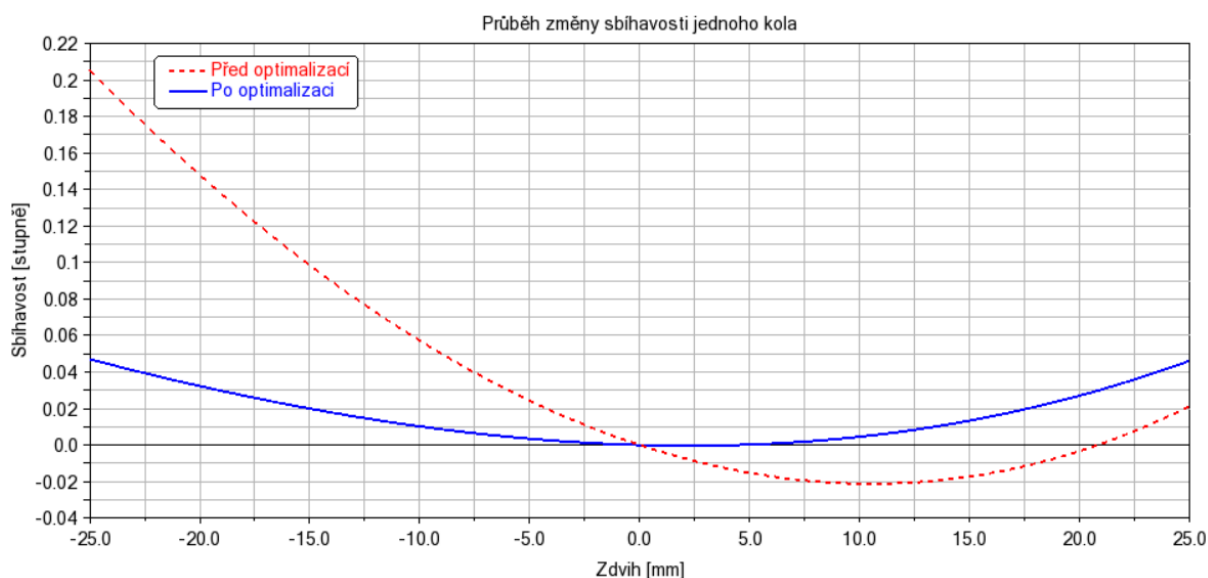
Obr. 28 Model zavěšení přední nápravy v programu Adams Car

5.5.2 KINEMATICKÉ CHARAKTERISTIKY PŘEDNÍHO ZAVĚŠENÍ A JEJICH OPTIMALIZACE

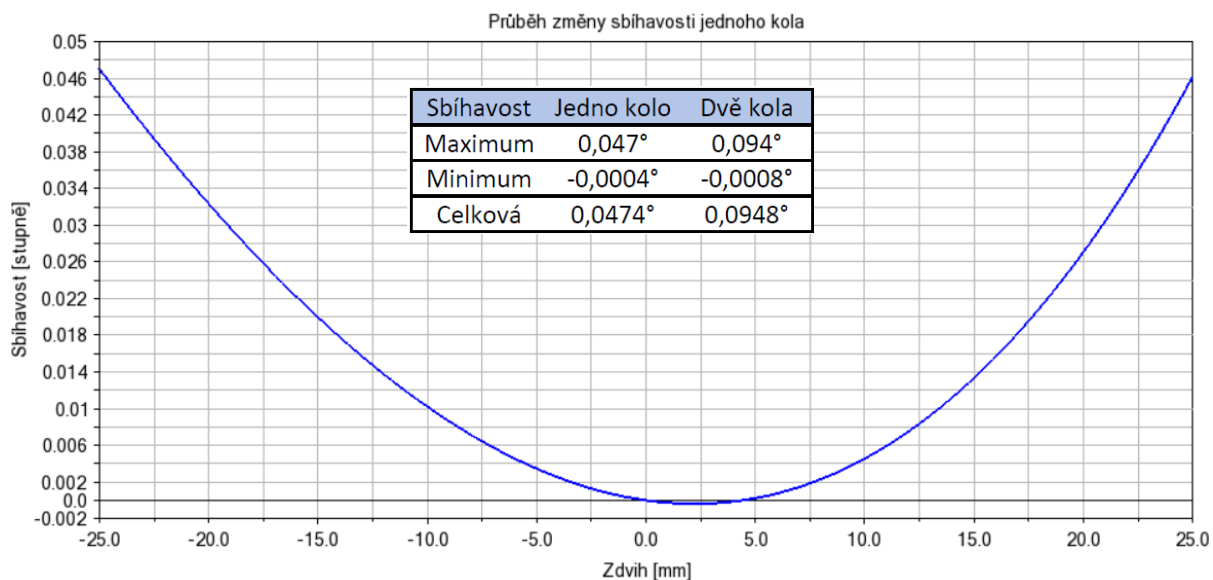
Dalším krokem je vykreslení jednotlivých kinematických charakteristik v závislosti na zdvihu kola. Maximální zdvih tlumiče je 75 mm a při statickém zatížení je tlumič stlačen o 37,5 mm. Jak kladný, tak záporný maximální zdvih je tak 37,5 mm. Při běžné jízdě se však těchto extrémů nedosahuje, a jako maximální a minimální hodnoty zdvihu při určování kinematických charakteristik tak byly zvoleny hodnoty 25 mm, respektive -25 mm, které představují 2/3 celkového zdvihu. Hlavní zjišťovanou charakteristikou byla sbíhavost kol, dále se pak zjišťoval odklon, příklon, záklon, závlek a poloměr rejdu. Většina charakteristik je ze značné míry přesněji určena již z geometrického návrhu, a neměla by tak optimalizaci vyžadovat. Vzhledem k nedostatku místa by byla případná další optimalizace navíc obtížná.

Charakteristikou, která optimalizaci bezpochyby vyžaduje, je sbíhavost kol. Ta by měla dosahovat co nejmenší hodnoty, v optimálním případě až nulové. Dosáhnout této

hodnoty je však v podstatě nemožné, a jako cíl tak byla stanovena sbíhavost menší než $0,1^\circ$ pro obě kola společně. Výsledné hodnoty sbíhavosti jednoho kola před a po optimalizaci jsou vidět na Obr. 29. Samostatné hodnoty sbíhavosti po optimalizaci jsou pak pro lepší detail, společně s tabulkou jejich maximálních hodnot, ještě na Obr. 30. Optimalizace sbíhavosti byla provedena pomocí změny uchycení řídicí tyče ke karoserii (ŘT2) ve směrech y a z.



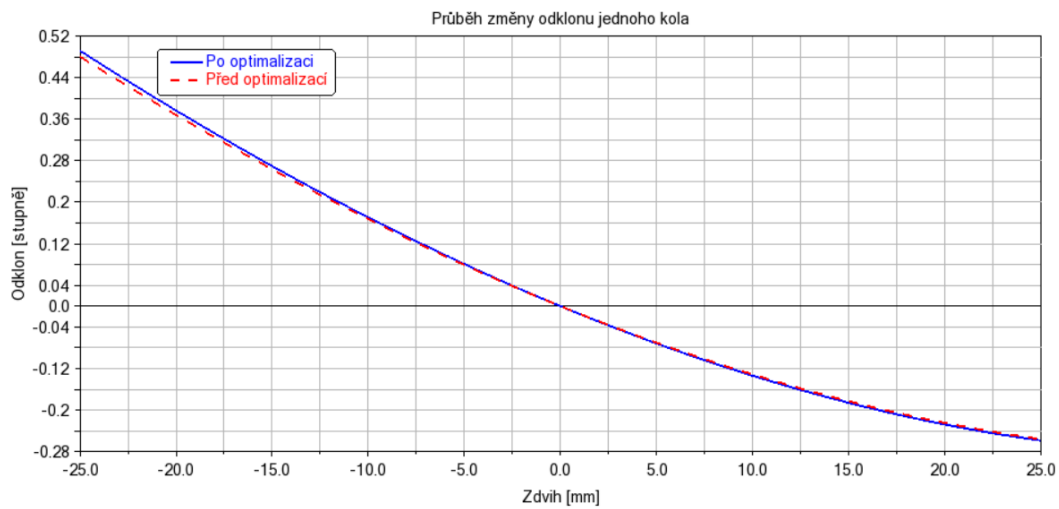
Obr. 29 Porovnání sbíhavosti před a po optimalizaci



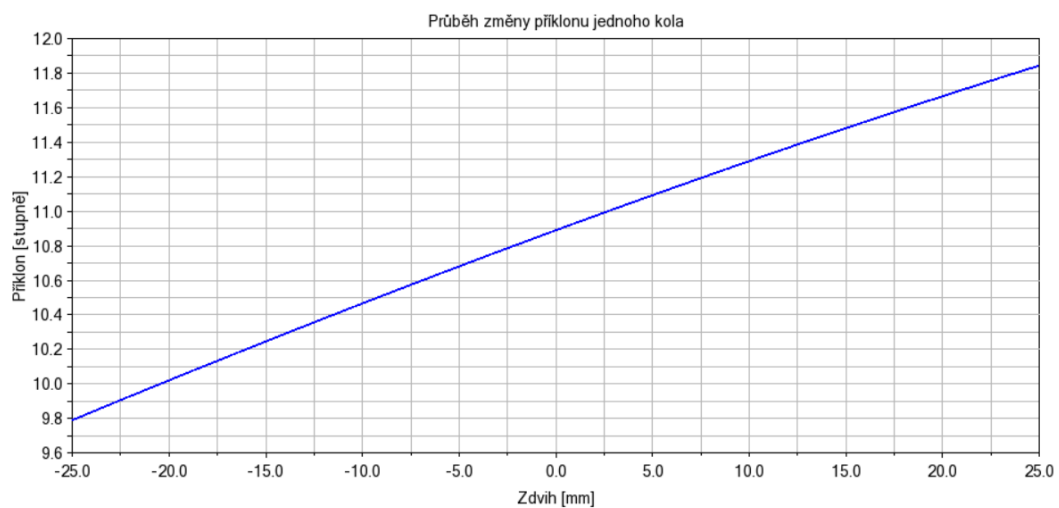
Obr. 30 Průběh změny sbíhavosti po optimalizaci, společně s jejími maximy

Další charakteristikou, která je vidět na Obr. 31, je odklon. U toho došlo k drobné změně při optimalizaci sbíhavosti. Jeho průběh se však jeví jako vhodný (změna není příliš velká a při kladném zdvihu je odklon záporný), a tak jeho optimalizace nebyla potřeba. Na dalších obrázcích (Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35) jsou pak vidět průběhy příklonu, záklonu, závleku a poloměru rejdu. Tyto průběhy vychází uspokojivě, a tak jejich

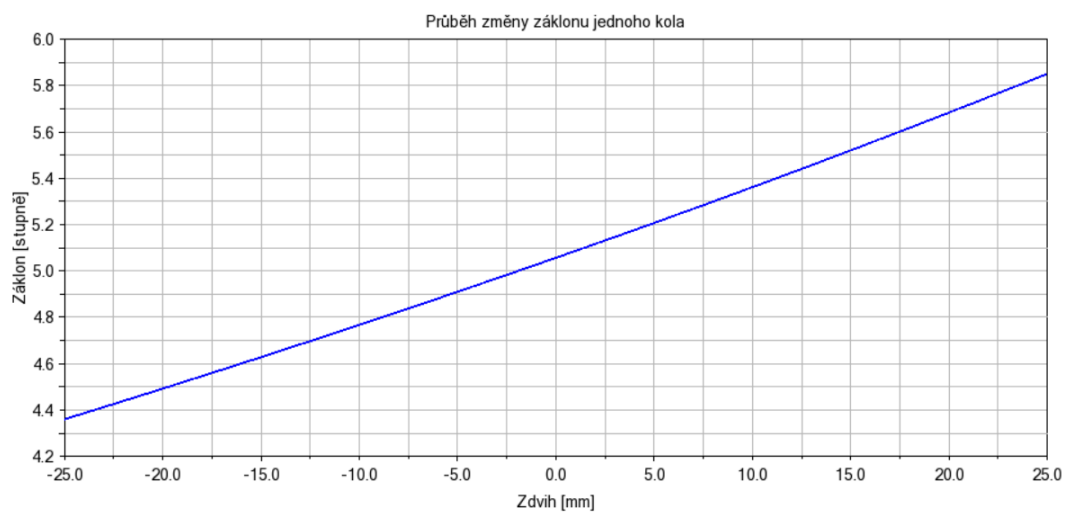
optimalizace nebyla nutná. Optimalizace sbíhavosti na ně kromě průběhu závleku žádný vliv neměla, a jsou tak stejné před ní i po ní. Změna průběhu závleku je způsobena změnou odklonu a je minimální. Všechny průběhy jsou vykresleny pro jedno kolo.



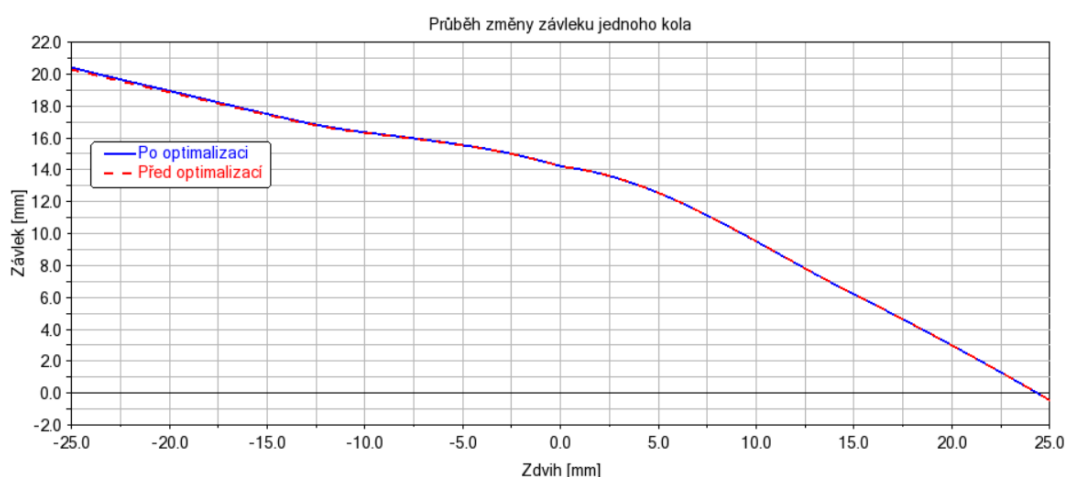
Obr. 31 Porovnání průběhu změny odklonu před a po optimalizaci



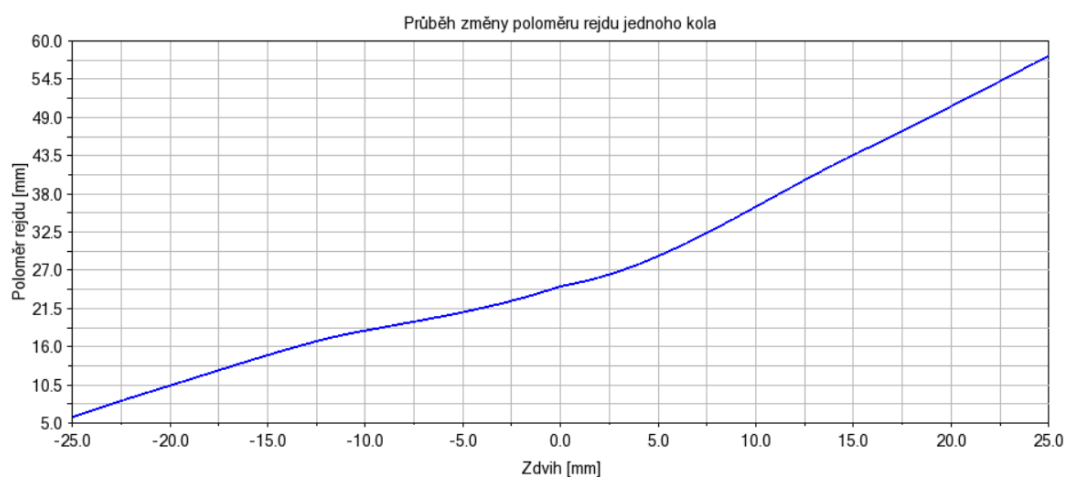
Obr. 32 Průběh změny příklonu



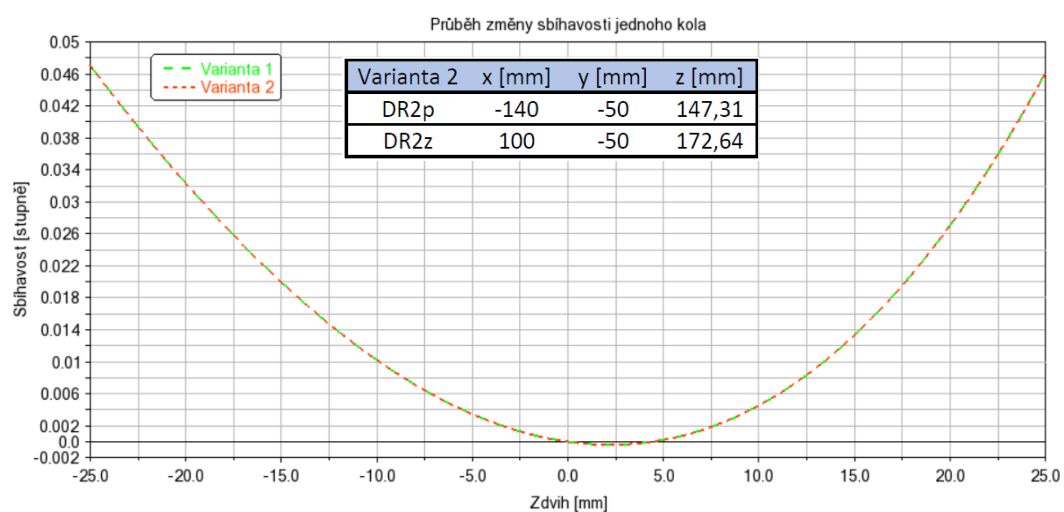
Obr. 33 Průběh změny záklonu



Obr. 34 Porovnání průběhu změny závleku před a po optimalizaci



Obr. 35 Průběh změny poloměru rejdů



Obr. 36 Porovnání průběhu sbíhavosti u dvou variant s rozdílnými body DR2p a DR2z

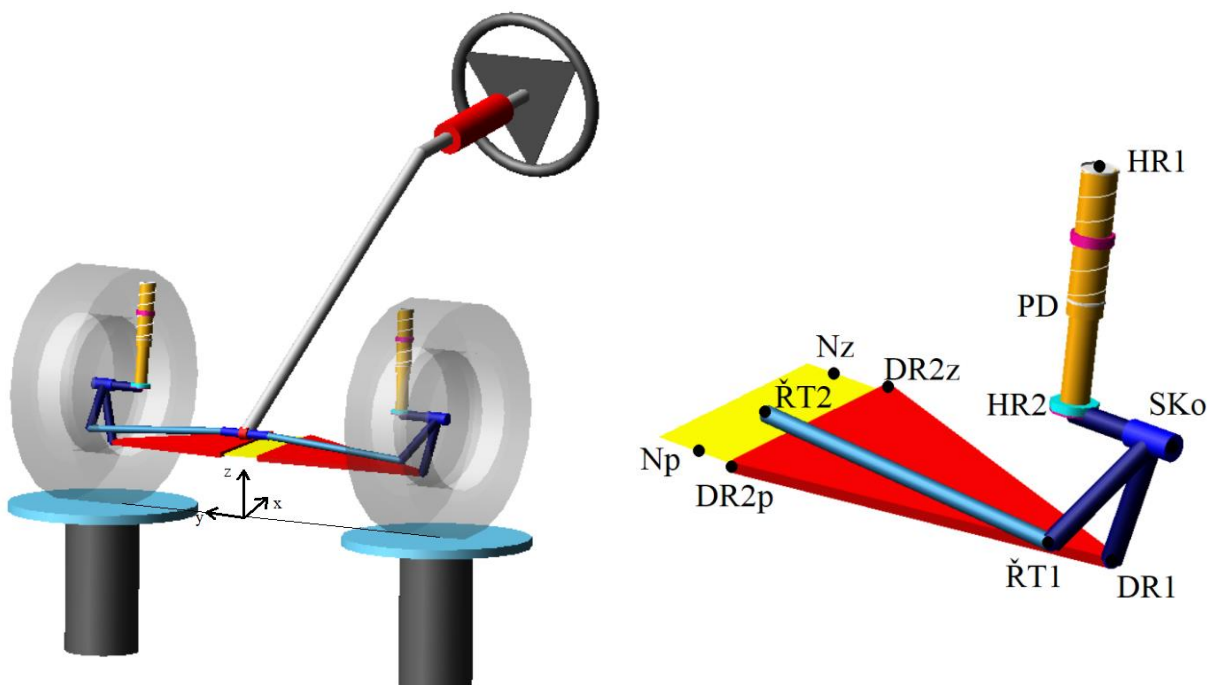
Byla také provedena kontrola toho, že jsou-li body DR2p a DR2z umístěny kdekoli na červené přímce, zde měřené kinematické charakteristiky se téměř nezmění. V programu

Adams Car byly posouzeny všechny charakteristiky, zde je pak na Obr. 36 předveden alespoň průběh změny sbíhavosti pro 2 různé varianty. Varianta 1 je výsledná varianta zavěšení po optimalizaci s hodnotami v Tab. 13, hodnoty varianty 2 jsou vidět na stejném obrázku jako graf.

V Tab. 13 jsou pak zapsány přesné souřadnice jednotlivých bodů zavěšení po optimalizaci. Uvedené body jsou pro levé kolo, pravé kolo bylo vytvořeno automaticky pomocí symetrie. Počátek souřadného systému, společně s celým modelem a body zavěšení, je vidět na Obr. 37.

Tab. 13 Výsledné souřadnice bodů zavěšení

Body zavěšení	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Rameno vnější [DR1]	-10,5	-395	134
Rameno vnitřní přední [DR2p]	-120	-50	149,42
Rameno vnitřní zadní [DR2z]	80	-50	170,53
Řídící tyč vnější [ŘT1]	-96,51	-396,34	172,15
Řídící tyč vnitřní [ŘT2]	-96,51	-22	196,65
Horní uložení vzpěry [HR1]	20,53	-326,06	488,67
Dolní uložení vzpěry [HR2]	0	-330,16	254
Střed kola [Sko]	0	-425	254
Dolní uložení pružiny [PD]	10,03	-328,15	368,69
Nápravnice přední [Np]	-120	0	149,42
Nápravnice zadní [Nz]	80	0	170,53

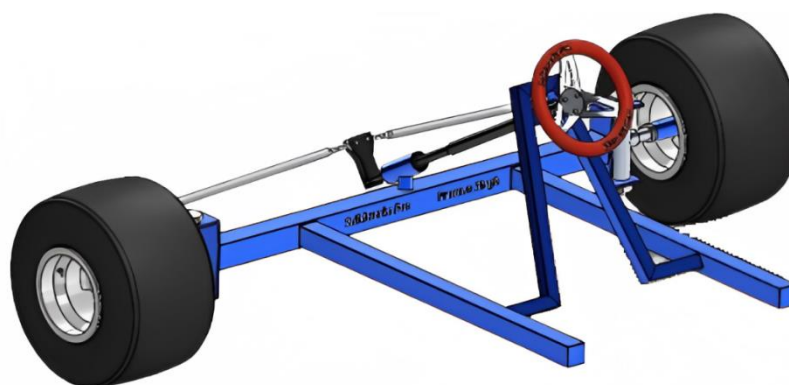


Obr. 37 Celkový model zavěšení v programu Adams Car

5.6 NÁVRH ŘÍZENÍ

Pro zde navrhovaný el. velomobil bylo zvoleno nadsedadlové řízení (OSS). Důvodem pro tuto volbu je skutečnost, že OSS je v současné době výrazně rozšířenější než USS a téměř všichni lidé ho umí používat nebo ho alespoň znají. Protože el. velomobil je sám o sobě nový a neobvyklý produkt, jeví se u něj využití systému, na který jsou lidé již zvyklí, jako ta správná volba.

K samotnému ovládní vozidla pak budou sloužit, stejně jako u klasických kol, říditka, která budou připevněna k řídicí hřídeli pomocí představce. Na řídicí hřídeli pak bude kolmo připojeno rameno, které bude propojeno s řídicími tyčemi pomocí dvou uniballů. Jedná se o konstrukčně jednodušší, lehčí a levnější variantu, nežli je použití hřebenového řízení. To se navíc v kombinaci s říditky použít v podstatě nedá. Nevýhodou této varianty je horší geometrie řízení, kdy vlivem pohybu bodu $\dot{R}T2$ po kružnici dochází při natočení kol ke změně relativní délky řídicích tyčí a natáčení kol vzhledem k říditkům tak není lineární. Tento způsob propojení řídicí hřídele s řídicími tyčemi je vidět na Obr. 38.



Obr. 38 Propojení řídicího sloupku s tyčemi[72]

Jak již bylo zmíněno při grafickém návrhu geometrie, není zde z důvodu zástavby možné docílit 100% hodnoty Ackermanna, ani se k této hodnotě výrazně přiblížit. Jak je vidět z Obr. 39, maximální hodnoty, kterých se docílit povedlo, se pohybují přibližně mezi 7,5 – 9 %. Při nulovém natočení kol je pak samozřejmě Ackermann 100 %. Tato část grafu však byla pro lepší přehlednost jeho zájmové části vynechána. Kvůli zjednodušení byla simulace provedena s hřebenovým řízením a skutečné hodnoty se tak mohou lehce lišit.



Obr. 39 Procenta Ackermanna

Na Obr. 40 je následně znázorněna závislost natočení vnějšího kola vůči vnitřnímu. Z tohoto grafu je vidět, že rozdíly natočení jednotlivých kol doopravdy nejsou příliš velké, zároveň však nejsou nulové.



Obr. 40 Závislost natočení vnitřního a vnějšího kola

Hlavním faktorem, omezujícím v tomto případě maximální úhel natočení kol, je šířka vozidla v místě dotyku karoserie a kol, a to při jejich maximálním natočení. Jelikož tato hodnota zatím není známa, byl prozatím maximální úhel natočení vnějšího kola stanoven na $34,5^\circ$. Přibližný minimální poloměr otáčení vnějšího předního kola se určí pomocí vzorce:

$$R_{PVne} = \frac{L}{\sin(\varphi_{max})}, \quad (23)$$

kde φ_{max} je maximální úhel natočení vnějšího kola. Dosazením do vztahu se získá:

$$R_{PVne} = \frac{1500}{\sin(34,5^\circ)},$$

$$R_{PVne} = 2648,3 \text{ mm}.$$

Minimální poloměr otáčení je tedy přibližně 2,65 metru. U většiny automobilů se tato hodnota pohybuje okolo 4 – 6 metrů.[73] Jak se dalo očekávat, je zde navrhovaný el. velomobil výrazně obratnější, a to i než ty nejmenší sériově vyráběné automobily.

6 KONSTRUKCE PŘEDNÍ NÁPRAVY

Tvorba modelů a sestav přední nápravy byla provedena v programu Onshape. Byly modelovány všechny díly kromě kuličkových a kloubových ložisek, jejichž modely byly staženy ze stránek výrobce.[74] Základní rozměry všech dílů vychází z geometrie zavěšení.

6.1 POUŽITÉ MATERIÁLY

Návrh konstrukce počítá s využitím čtyř různých materiálů. Jedná se o dvě slitiny hliníku a dvě oceli, z nichž jedna je legovaná. Každý materiál má určité vlastnosti, podle kterých je využit. Jejich vybrané mechanické vlastnosti jsou v Tab. 14.

- **Slitina hliníku 6061-T6:** Dobrý poměr hmotnosti a pevnosti, dobrá obrobitelnost a svařitelnost.[76]
- **Slitina hliníku 7075-T6:** Výborný poměr hmotnosti a pevnosti, horší obrobitelnost, není svařitelná, dražší než 6061-T6.[76]
- **Ocel S235JR (11 375):** Levnější než slitiny hliníku, vyšší mez pevnosti než 6061-T6, dobrá svařitelnost.[80]
- **Legovaná ocel 51CrV4 (15 260):** Velmi vysoká pevnost, dražší než S235JR, levnější než slitiny hliníku, obtížně svařitelná.[80]

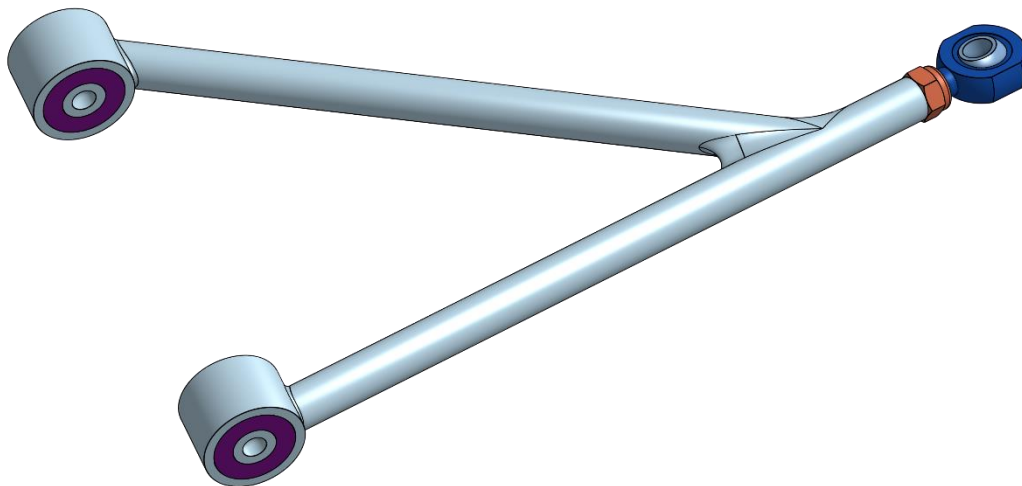
Tab. 14 Mechanické vlastnosti materiálu[76][77] [78]

Materiál	Hustota [kg/m ³]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
6061-T6	2700	270	310
7075-T6	3000	480	560
S235JR	7850	235	510
51CrV4	7800	900	1100

6.2 DOLNÍ RAMENO

Dolní rameno je tvořeno dvěma k sobě svařenými tyčemi o průměru 18 mm. Jako materiál tyčí je použita ocel S235JR díky její dobré svařitelnosti a vyšší mezi pevnosti. Při překročení meze kluzu, např. při nárazu, tak narozdíl od 6061-T6 nedojde téměř ihned i k překročení meze pevnosti a dolní rameno se tedy ohne, ale nezlomí.

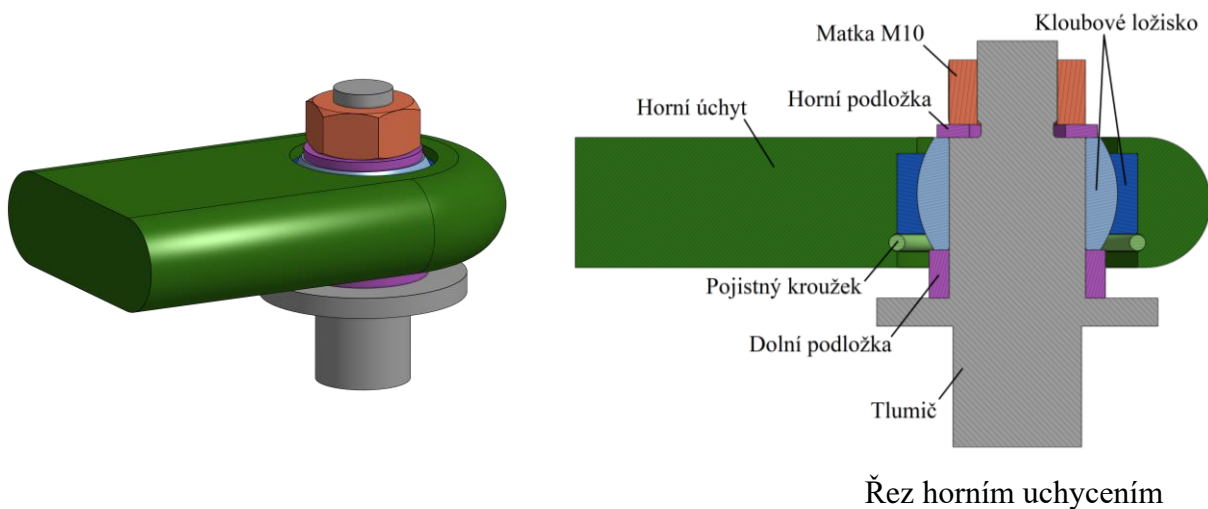
Konec jedné tyče je opatřen vnitřním závitem, do kterého je pomocí samojistné matice uložen uniball. Ten slouží k uchycení dolního ramene k těhlici. Ke druhému konci obou trubek jsou pak navařena oka pro silentbloky, pomocí kterých je dolní rameno uchyceno k rámu velomobilu. Jako uniball je zde použit SAKB 12 F od firmy SKF, jehož rozměry jsou v kap. 6.10. Model dolního ramene je zobrazen na Obr. 41.



Obr. 41 Dolní rameno

6.3 HORNÍ ÚCHYT

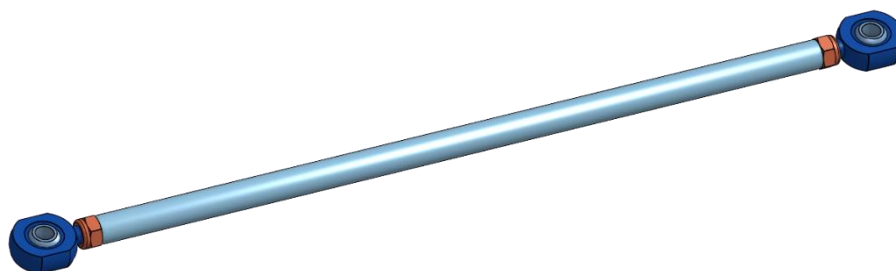
Horní uchycení je provedeno pomocí kloubového ložiska GE 17 C od firmy SKF, které je nasazeno na horním dílu tlumiče. Ložisko je připevněno k tlumiči pomocí šroubu M10. Zajištění ložiska v horním úchytu je pak řešeno pomocí pojistného kroužku pro 30 mm otvor. Rozměry ložiska jsou v kap. 6.10. Materiálem horního úchytu je slitina hliníku 6061-T6, kvůli její nízké hmotnosti a dobré svařitelnosti. Horní úchyt je vyroben obráběním. Řešení horního uchycení tlumiče je zobrazeno na Obr. 42, kde jsou také popsány jednotlivé části. Přesné uchycení k rámu velomobilu není vzhledem k tomu, že rám není v době návrhu zkonstruován, možné, a bude tak vyřešeno až společně s konstrukčním návrhem rámu.



Obr. 42 Horní uchycení tlumiče

6.4 ŘÍDÍCÍ TYČ

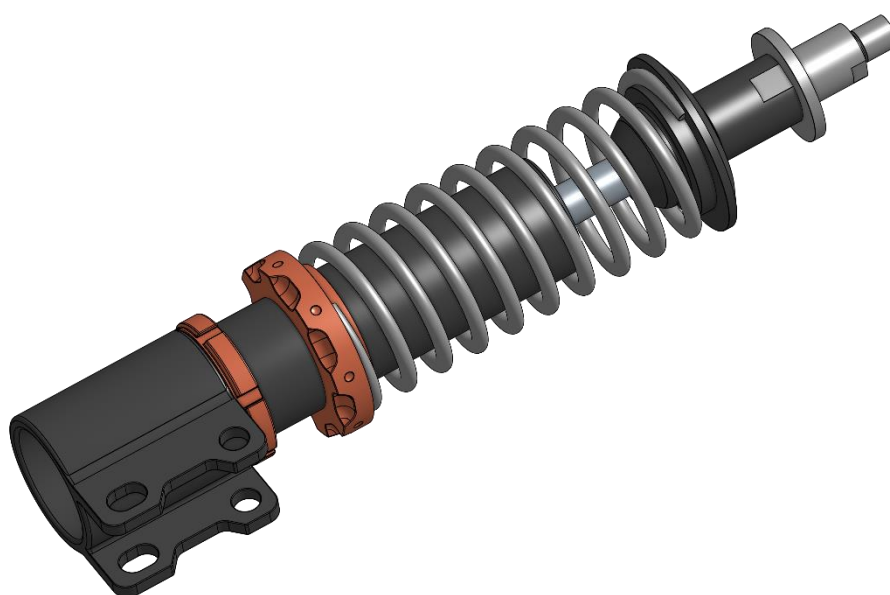
Řídící tyč je tvořena tyčí o průměru 12 mm, na jejichž koncích se nachází vnitřní závity, ve kterých jsou pomocí samojistných matic uloženy unibally SAKB 8 F od firmy SKF. Jejich rozměry jsou v kap. 6.10. Pomocí těchto uniballů je tyč uchycena k těhlici, respektive k sestavě řízení. Uniball na jedné straně je opatřen pravým závitem a uniball na straně druhé levým závitem. Toto uspořádání umožňuje snadnou korekci sbíhavosti. Materiálem řídicí tyče je stejně jako v případě dolního ramene ocel S235JR. Model řídicí tyče je na Obr. 43.



Obr. 43 Řídící tyč

6.5 TLUMIČ A PRUŽINA

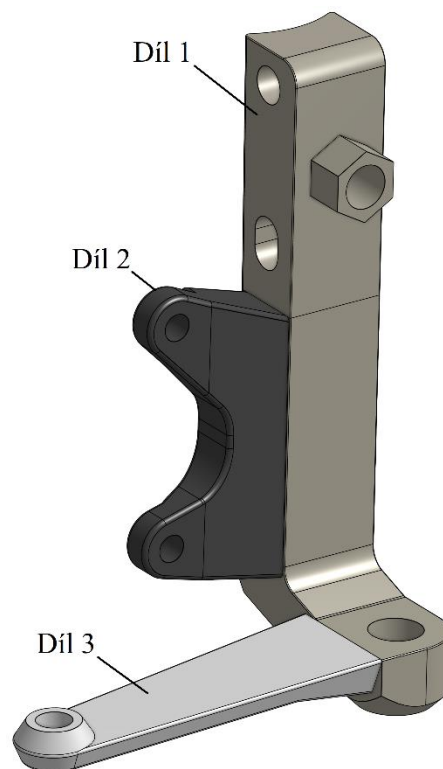
Jak již bylo zmíněno v kap. 5.3, jako tlumič byl vybrán BGM PRO SC/F1, 240 mm, 7741B. Podle jeho dostupných rozměrů pak byl co nejpřesněji vymodelován model tohoto tlumiče. Rozměry, které zakótovány nejsou, byly odměřeny z výkresu a dopočítány pomocí známých rozměrů. Model pružiny byl vytvořen z výpočtů v kap. 5.4.3 Model již zatíženého tlumiče s předepnutou pružinou je na Obr. 44. K připojení tlumiče k těhlici jsou použity dva šrouby M8x50.



Obr. 44 Model tlumiče s pružinou

6.6 TĚHLICE

Těhlice je nejdůležitějším dílem celého zavěšení. Upíná se k ní dolní rameno, řídicí tyč, tlumič, osa kola, třmen brzdy a zde je k ní uchycen ještě také blatník. Těhlice je tvořena třemi díly, které jsou k sobě svařeny. Toto rozdělení je vidět na Obr. 45. Jednotlivé díly jsou stejně jako horní úchyt vyrobeny obráběním ze slitiny hliníku 6061-T6. K prvnímu dílu je uchycen tlumič, osa a dolní rameno, k druhému třmen brzdy a ke třetímu řídicí tyč. V případě nedostatečné pevnosti materiálu 6061-T6 bude použita slitina hliníku 7075-T6. Ta je však nesvařitelná, a celá těhlice by tak musela být obrobena najednou z jednoho kusu materiálu, což by bylo vzhledem k tvaru výrazně složitější a vzniklo by více odpadního materiálu.

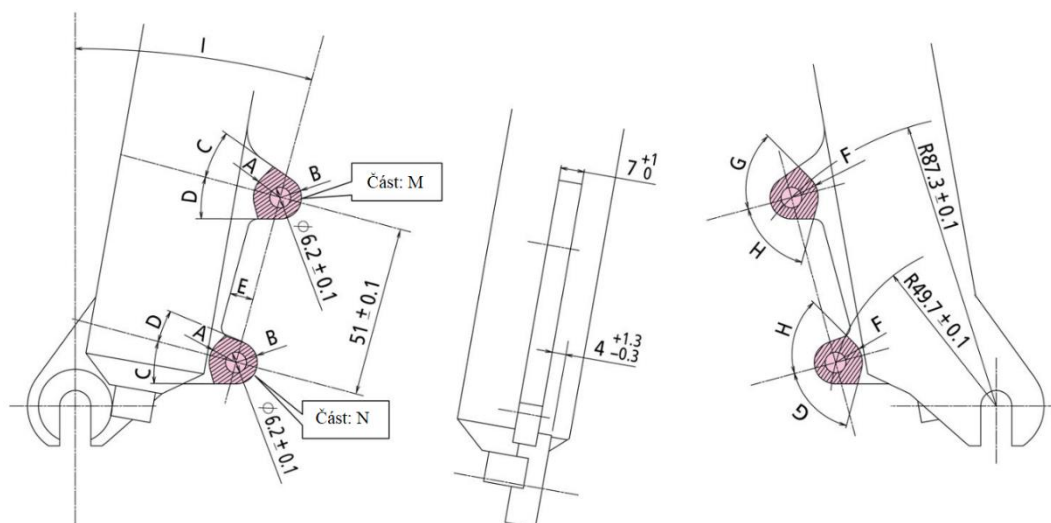


Obr. 45 Jednotlivé díly těhlice

Uchycení třmenu brzdy je navrhnut ve standardu IS 2000 podle rozměrů v Tab. 15 a na Obr. 46. V případě zájmu o standard Postmount 74 je možné využít volně dostupné adaptéry.

Tab. 15 Rozměry uchycení brzdového třmene podle standardu IS 2000[75]

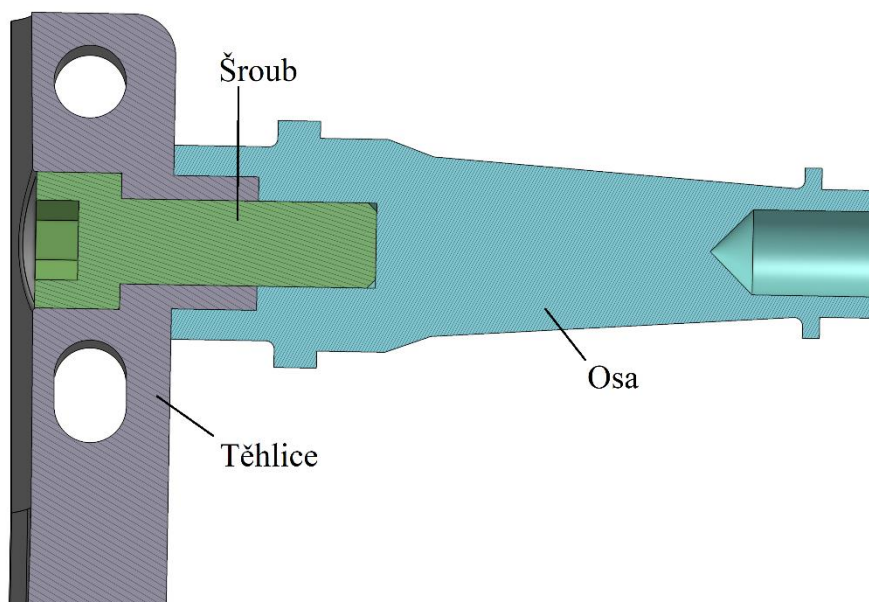
Min. A	Max. B [mm]	Max. C	Max. D	Min. E	Min. F	Min. G	Min. H	Max. I
8 mm	Část M: 6,5 Část N: 8,0	45°	45°	2 mm	6 mm	90°	95°	24°



Obr. 46 Rozměry uchycení brzdového třmene podle standardu IS 2000 (části M a N musí být rovné plochy)[75]

6.7 OSA KOLA

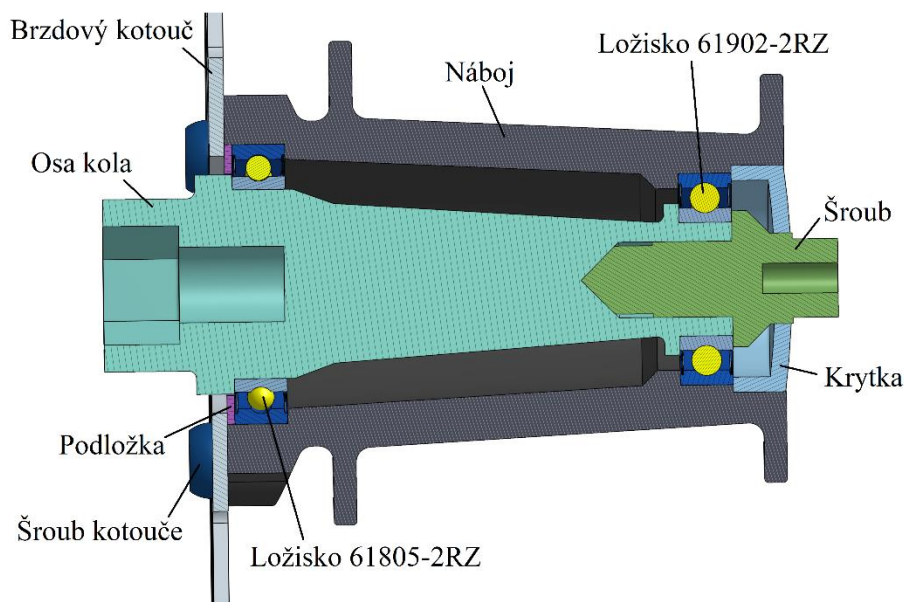
Osa kola je připevněna k těhlici pomocí šroubu M10x30 a šestibokého hranolu. Předpokládá se, že se bude jednat o nejvíce namáhanou část zavěšení, a tak je vyrobena obráběním z legované oceli 51CrV4. Osa a její spojení s těhlicí je vidět na Obr. 47.



Obr. 47 Řez spojením osy a těhlice

6.8 NÁBOJ A ULOŽENÍ KOLA

Náboj je uložen na ose pomocí dvou kuličkových ložisek, která byla určena v kap. 5.2. Jedná se o ložiska 61805-2RZ a 61902-2RZ a jejich rozměry jsou v kap. 6.10. Náboj je pak k ose uchycen pomocí šroubu M10, který je zajištěn krytkou s levým závitem, aby nedocházelo k samovolnému povolování. K tomuto šroubu je pak ještě uchycen blatník. K náboji je také pomocí šesti šroubů M5x10 připevněn brzdový kotouč a samozřejmě ráfek pomocí drátků. Náboj kola bude vyroben ze slitiny hliníku 7075-T6. Řez celou sestavou uložení kola na ose je vyobrazen na Obr. 48.



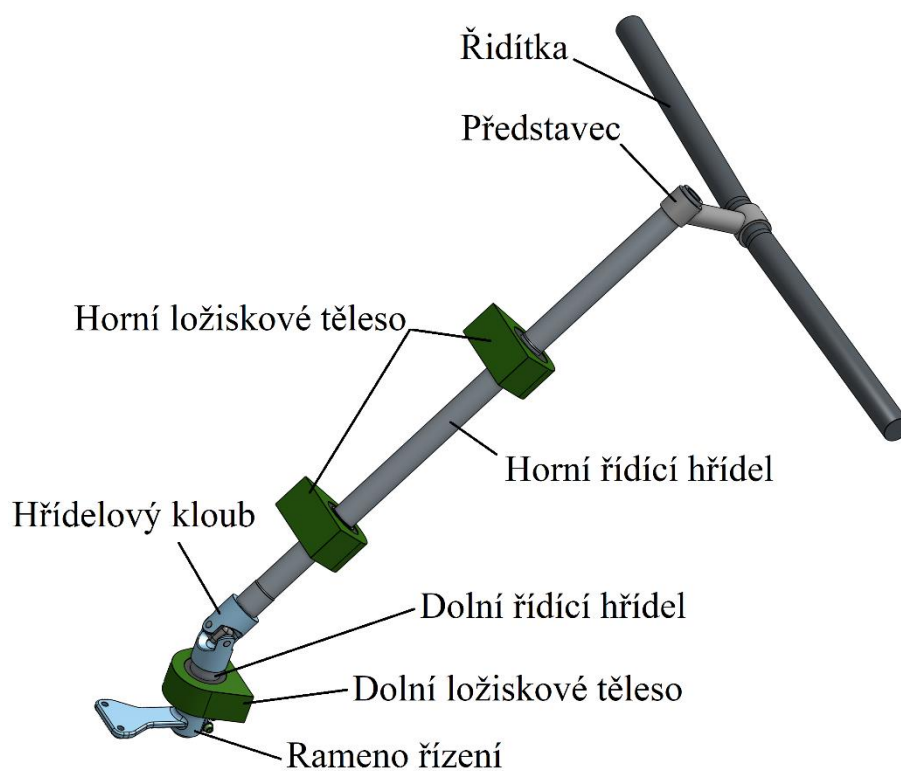
Obr. 48 Řez uložením kola

6.9 SESTAVA ŘÍZENÍ

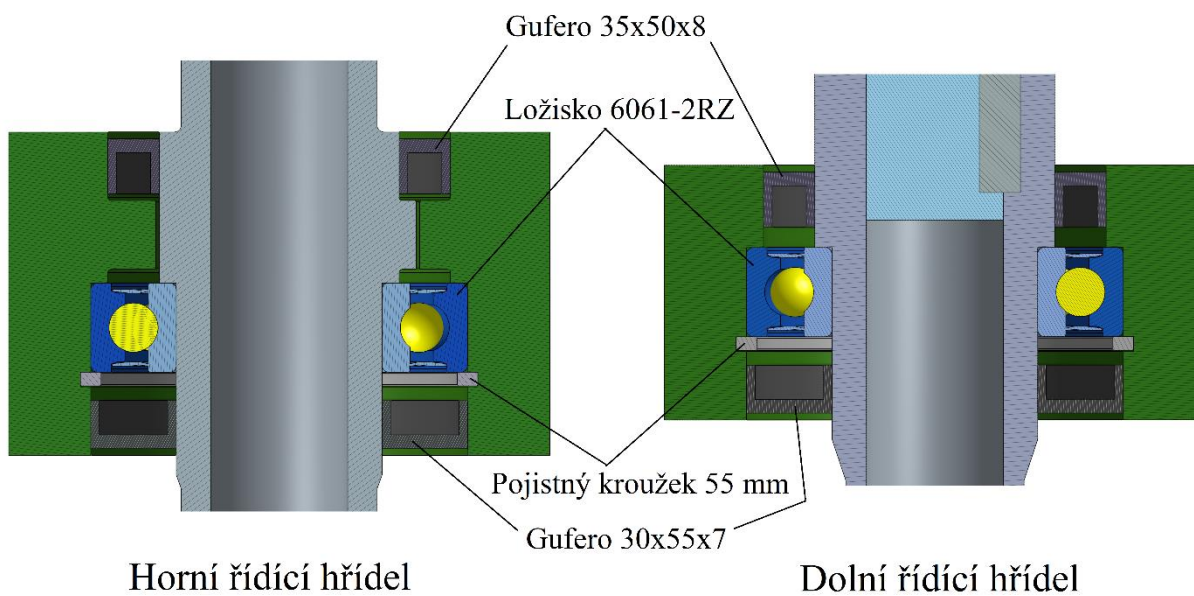
Sestava řízení se skládá ze dvou řídicích hřídelí spojených hřídelovým kloubem, rameno řízení, představce, říditka a tří ložiskových těles. Hřídelový kloub je použit proto, aby se rameno řízení dostalo do horizontální polohy a nepletlo se rámu, ke kterému budou v tomto místě přichycena dolní ramena. Použit bude hřídelový kloub firmy Norelem, jehož rozměry jsou v kap. 6.10. Propojení kloubu a řídicích hřídelí je provedeno pomocí vložených tyčí a per. Jako řídicí hřídele jsou použity trubky ze slitiny hliníku 6061-T6 o průměru 30 mm. Rameno řízení je spojeno s dolní řídicí hřídelí pomocí dvou šroubů M6x25 stejným způsobem, jakým se upevňuje představec k vidlici na jízdním kole. Jako materiál je opět použita slitina hliníku 6061-T6. Jako představec a říditka budou použity běžně dostupné díly pro jízdní kola a zde byly tyto díly vymodelovány jen pro lepší představu o vizuální stránce. Model sestavy řízení je vidět na Obr. 49.

Uložení řídicích hřídelí v ložiskových tělesech je provedeno pomocí tří ložisek 6006-2RZ, jejichž rozměry jsou opět v kap. 6.10. Spojení ložisek a ložiskových těles je vyřešeno pojistnými kroužky pro 55 mm otvor. Ložisková tělesa jsou uzavřena z jedné strany guferem

35x50x8 a z druhé strany guferem 30x55x7. Materiálem ložiskových těles je zde opět slitina hliníku 6061-T6. Řez ložiskovým tělesem je na Obr. 50.

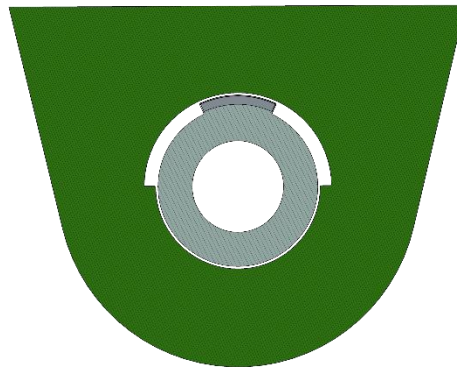


Obr. 49 Sestava řízení



Obr. 50 Řez ložiskovým tělesem

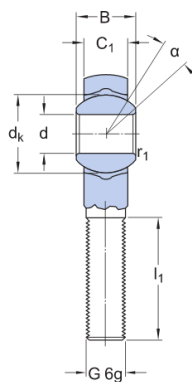
Maximální úhel natočení kol je vyřešen pomocí dvou zubů na horní řídicí hřídeli a odpovídajícím vykrojením v horních ložiskových tělesech, jak je zobrazeno na Obr. 51.



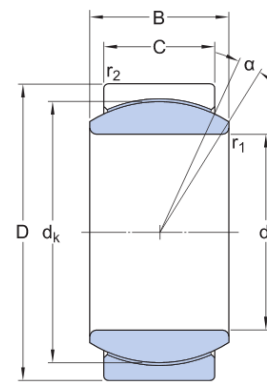
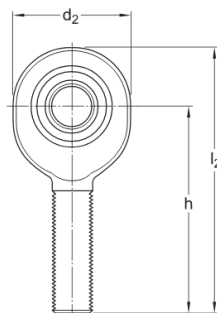
Obr. 51 Omezení úhlu natočení řízení

6.10 ROZMĚRY VYBRANÝCH SÉRIOVĚ VYRÁBĚNÝCH DÍLŮ

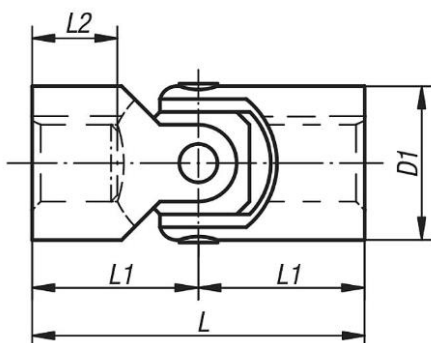
V následující tabulce Tab. 16 a na Obr. 52 jsou rozměry použitých sériově vyráběných dílů. Rozměry jsou převzaty ze stránek výrobce.[74][79]



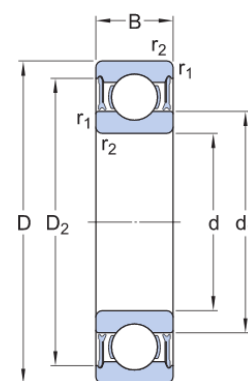
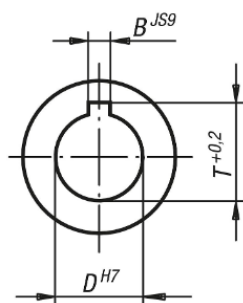
Uniball



Kloubové ložisko



Hřídelový kloub



Kuličkové ložisko

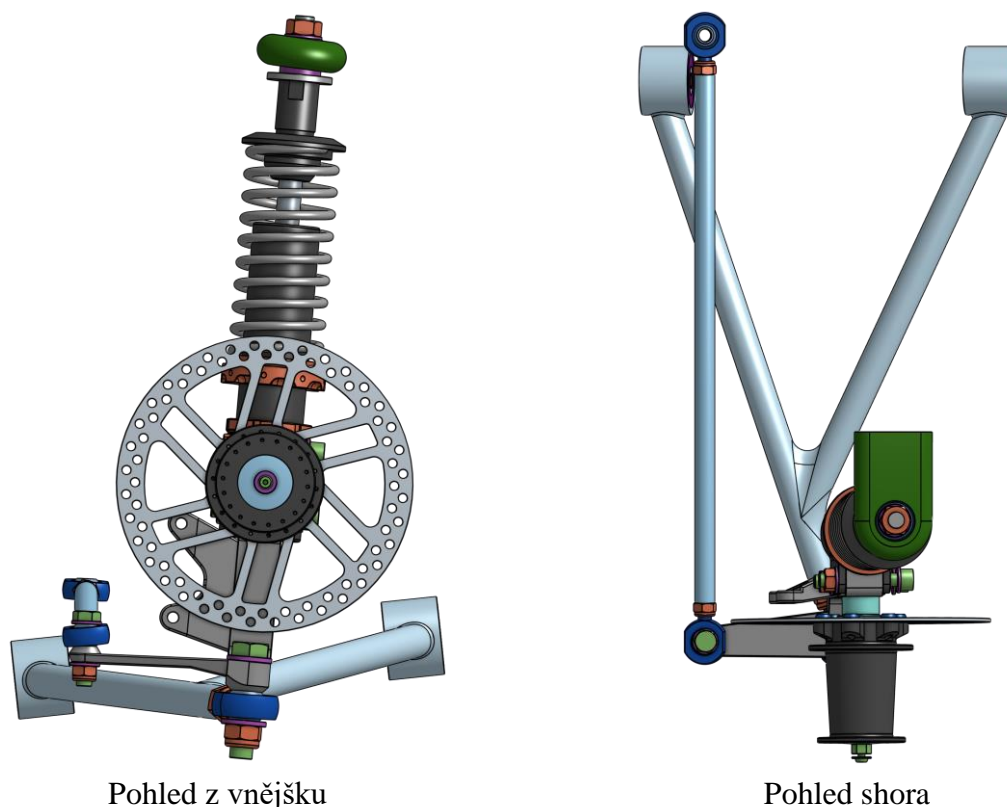
Obr. 52 Rozměry sériově vyráběných dílů[74][79]

Tab. 16 Rozměry sériově vyráběných dílů[74][79]

Uniball											
	d [mm]	d ₂ [mm]	B [mm]	G	C ₁ [mm]	h [mm]	α [°]	d _k [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	r ₁ [mm]
SAKB 8F	8	max. 25	12	M8	max. 9,5	42	14	15,875	min. 25	max. 56	min 0,3
SAKB 12F	12	max. 33	16	M12	max. 12,5	54	13	22,225	min.32	max. 72	min 0,3
Kuličkové ložisko											
	d [mm]	D [mm]	B [mm]	d ₁ [mm]	D ₂ [mm]	r _{1,2} [mm]					
61805-2RZ	25	37	7	28,5	34,2	min. 0,3					
61902-2RZ	15	28	7	18,8	25,3	min. 0,3					
6006-2RZ	30	55	13	38,2	49	min. 1					
Kloubové ložisko											
	d [mm]	D [mm]	B [mm]	C [mm]	α [°]	d _k [mm]	r ₁ [mm]	r ₂ [mm]			
GE 17C	17	30	14	10	10	25	min. 0,3	min. 0,3			
Hřídelový klob											
	D [mm]	D1 [mm]	L [mm]	L1 [mm]	L2 [mm]	B [mm]	T [mm]				
23403-120082	20	42	82	41	20	6	22,8				

6.11 VÝSLEDNÁ SESTAVA PŘEDNÍ NÁPRAVY

Na Obr. 53 je vyobrazena sestava zavěšení levého předního kola. Pro lepší představu je zobrazena bez ráfku a kola. Ty jsou zde stejně jako představec a říditka vymodelovány především z důvodu lepší vizuální představy a bude se jednat o běžně dostupné díly jízdních kol.



Obr. 53 Zavěšení levého předního kola

Obr. 54 pak ukazuje celou sestavu předního zavěšení i se sestavou řízení a blatníky.



Obr. 54 Sestava přední nápravy

7 PEVNOSTNÍ ANALÝZA

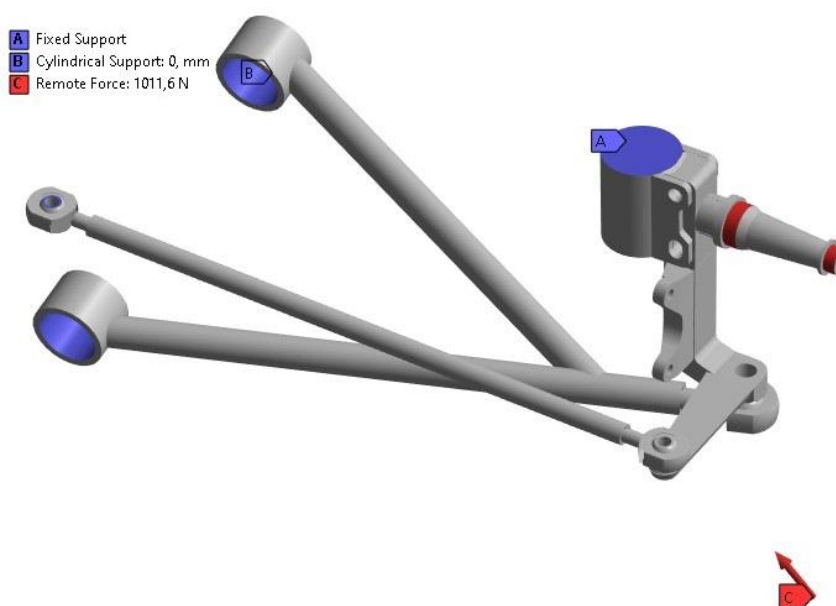
Aby se určilo, zdali je model předního zavěšení dostatečně pevný, je potřeba určit maximální napětí a tomu odpovídající bezpečnosti. Jako nejkritičtější místo bylo vyhodnoceno spojení těhlice a osy kola a na něj je tedy zaměřena největší pozornost. Protože šestiboký hranol, pomocí kterého je spojení provedeno, nesplňuje prutové předpoklady, není zde možné použít analytické řešení. Kontrola pevnosti je tak provedena pouze pomocí analýzy metodou konečných prvků (MKP) v programu Ansys Mechanical.

7.1 PŘÍPRAVA MODELU

Prvním krokem bylo zjednodušení sestavy, vlivem kterého dojde pouze k minimálním rozdílům v napětí a deformaci oproti nezjednodušené verzi. Protože není znám přesný tvar ani materiál tlumiče, byla jeho velká část a všechny prvky nad ním vynechány. Ponechána byla pouze spodní část těla tlumiče, ke které je připevněna těhlice a na jejíž horní straně je použit prvek Fixed Support, jak je vidět na Obr. 55.

Vynechána byla také celá sestava řízení, protože má na celkovou pevnost sestavy minimální vliv. Na horní straně uniballu spojujícího řídicí tyč s ramenem řízení pak byl opět použit prvek Fixed Support, jak je zobrazeno na Obr. 55. Poslední vazby se nachází na dolním rameni v místě jeho spoje s rámem vozidla a jsou uskutečněny pomocí prvků Cylindrical Support s volným pohybem v tangenciálním směru, aby byla umožněna rotace. Tento prvek je opět zobrazen na Obr. 55.

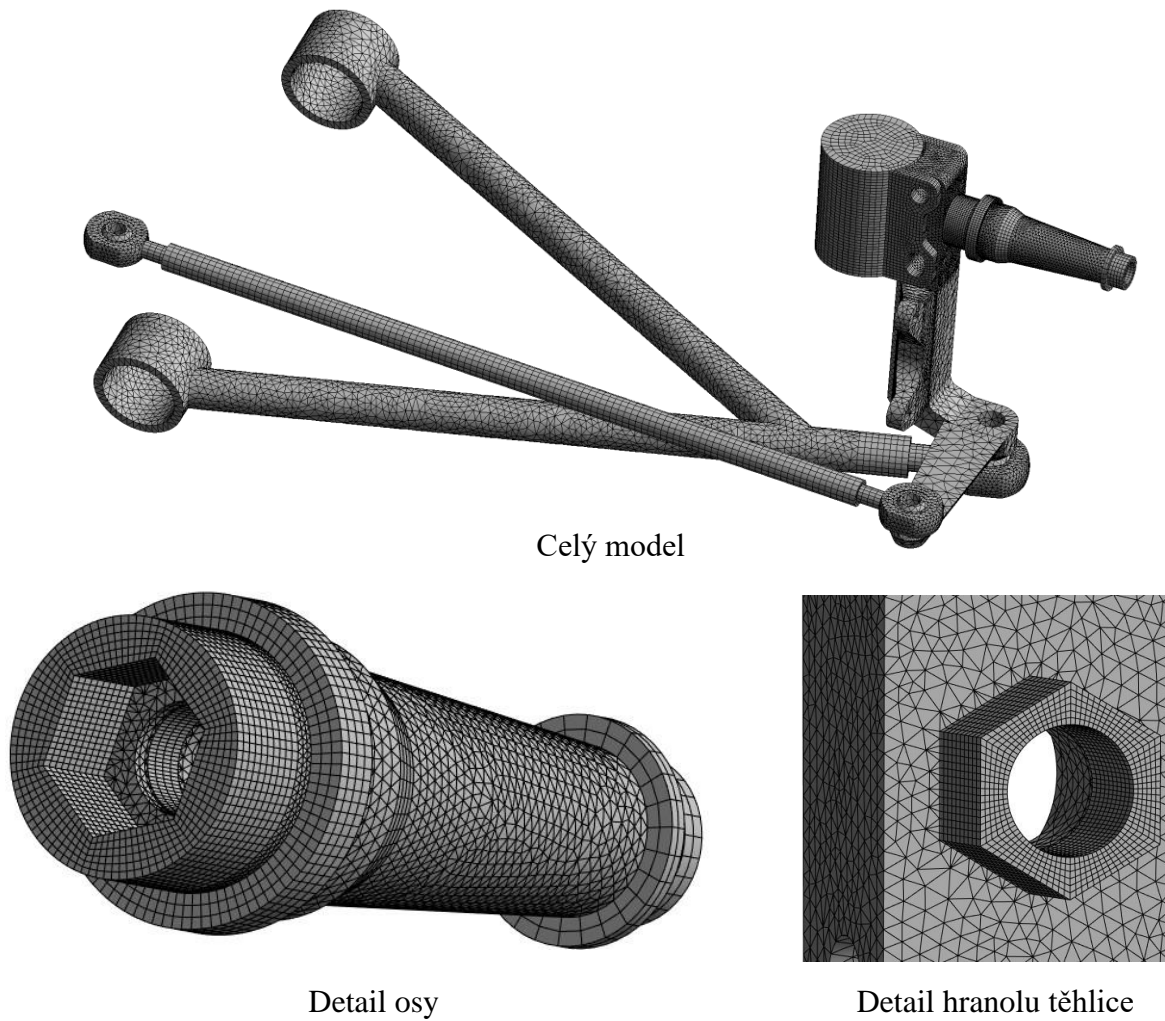
Vynecháno bylo také celé kolo včetně náboje a ložisek. Zatěžující síla tak působí přímo na osu kola v místě uložení ložisek pomocí prvku Remote Force, jak je opět zobrazeno na Obr. 55. Síla působí v místě kontaktu pneumatiky s vozovkou. Počítá se zde, stejně jako při návrhu ložisek v kap 5.2, s průjezdem vozidla zatáčkou po rozbité komunikaci a pro výpočet jsou tak použity síly, které byly v této kapitole vypočítány ($F_z = 735 \text{ N}$, $F_y = 695 \text{ N}$). Do programu je pak zanesen jejich součet, a to $1011,6 \text{ N}$.



Obr. 55 Zjednodušení, zavazbení a zatížení modelu

Kvůli jednoduchosti a lepší kvalitě sítě byla také odebrána všechna zaoblení. Ložiska v uniballech byla řešena pomocí prvku Spherical Joint.

Dále byla vytvořena síť modelu. Jak je vidět na Obr. 56, hlavní důraz zde byl kladen na okolí spoje těhlice a osy kola. K optimalizaci sítě byly použity Body Sizing, Edge Sizing a metoda Multizone. Výsledný počet uzlů, prvků a vybrané kvalitativní hodnoty sítě jsou v Tab. 17.



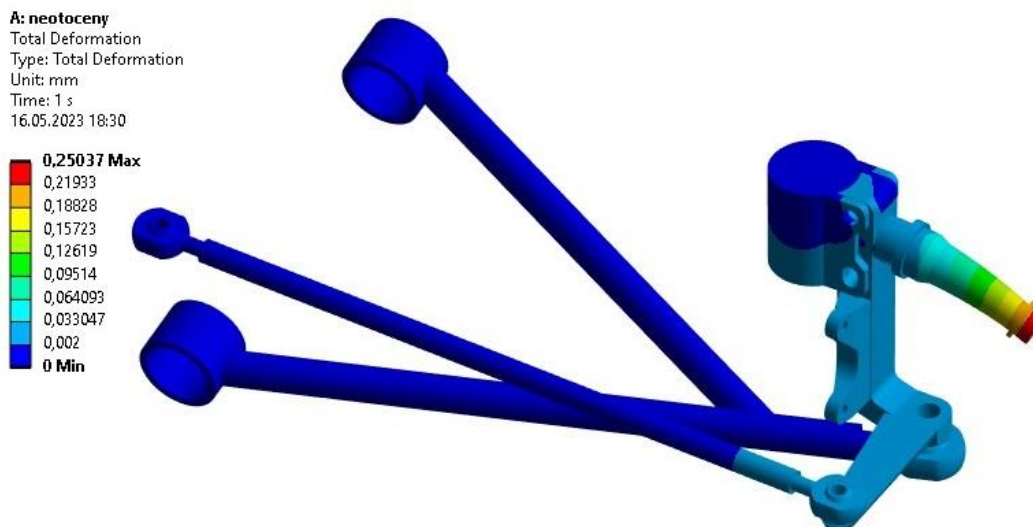
Obr. 56 Síť modelu

Tab. 17 Hodnoty sítě

Počet uzlů	Počet prvků	Aspect Ratio (průměr)	Skewness (průměr)
431961	199497	2,0418	0,26785

7.2 VÝSLEDNÉ HODNOTY

Obr. 57 ukazuje výslednou deformaci modelu. K deformaci dochází téměř jen na ose kola, přičemž maximální deformace 0,25 mm na jejím konci je dostatečně malá a neměla by představovat problém. Protože je navíc ve skutečnosti osa uložena v náboji kola, což bude zvedat celkovou tuhost, měla by tato deformace být ještě o něco menší.



Obr. 57 Deformace modelu

7.2.1 OSA KOLA

Jak je vidět na Obr. 58, největší napětí je soustředěno na ose kola a hranolu těhlice. Maximální napětí o velikosti 282,44 MPa se pak nachází na ose kola v místě přechodu z menšího na větší průměr. Na tomto místě se však ve skutečnosti nachází zaoblení, a napětí zde bude tedy o něco nižší. Místo s následujícím nejvyšším napětím na ose je dolní kontakt osy s těhlicí, kde napětí dosahuje hodnoty 253,95 MPa. Tato hodnota je tedy brána jako maximální dosažené napětí na ose.

Jak bylo zmíněno v kap. 6.1, materiálem osy je legovaná ocel 51CrV4 s mezí kluzu 900 MPa. Bezpečnost na ose se pak vypočítá pomocí vzorce:

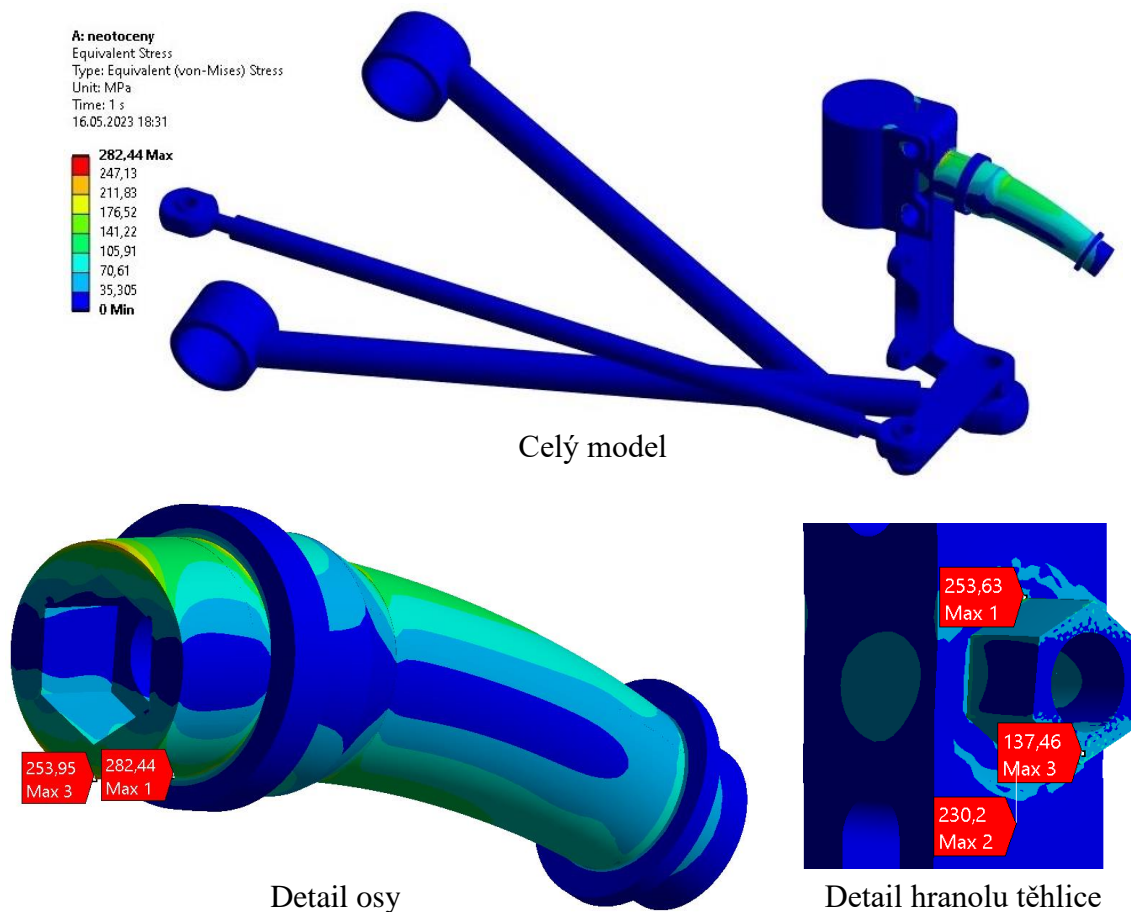
$$k_o = \frac{R_{e_ocel}}{\sigma_{osa}}, \quad (24)$$

kde R_{e_ocel} je mez kluzu oceli 51CrV4 a σ_{osa} je maximální napětí na ose. Dosazením se pak získá výsledek:

$$k_o = \frac{900}{253,95}$$

$$k_o = 3,54.$$

Dosažený koeficient bezpečnosti na ose je tedy 3,54, což je dostatečná hodnota a osa kola je tedy v pořádku.



Obr. 58 Napětí na modelu

7.2.2 TĚHLICE

Maximální napětí na těhlici se nachází na přechodu horní hrany hranolu a vlastního těla těhlice a dosahuje hodnoty 253,63 MPa. Z Obr. 58 je patrné, že v tomto bodu a bodu k němu symetrickém na druhé straně hranolu dochází ke značné koncentraci napětí. Toto napětí je pro uvažovaný materiál příliš vysoké, a je tak potřeba najít způsob, jak ho snížit.

7.3 OPTIMALIZACE TĚHLICE

Jako možné řešení koncentrátorů napětí na těhlici bylo zvoleno pootočení hranolu o 90° tak, jak je zobrazeno na Obr. 59. Na něm je také vidět, že koncentrátoři napětí se podařilo eliminovat a maximální napětí na těhlici je 121,65 MPa. Napětí na ose se změnilo pouze minimálně na hodnotu 248,55 MPa a bezpečnost zde tak zůstává víceméně stejná.

Jak bylo zmíněno v kap. 6.1, je jako materiál těhlice použita slitina hliníku 6061-T6 s mezí kluzu 270 MPa. Bezpečnost těhlice pak je:

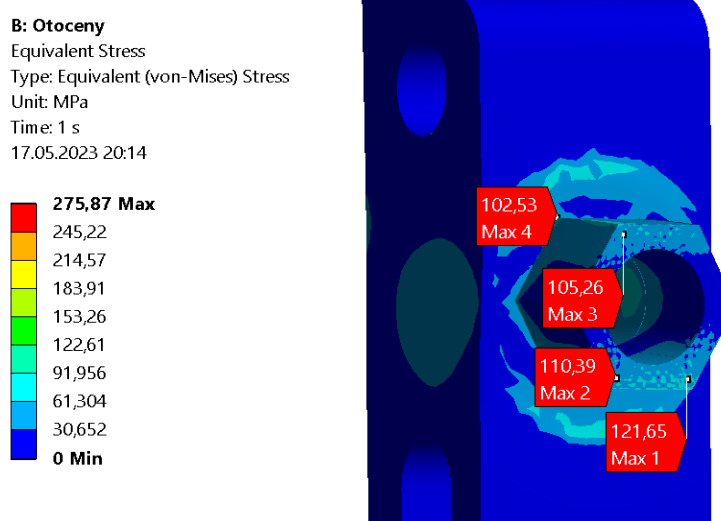
$$k_t = \frac{R_{e_hlin}}{\sigma_{t\acute{e}h}}, \quad (25)$$

kde R_{e-hlin} je mez kluzu slitiny 6061-T6 a $\sigma_{t\acute{e}h}$ maximální napětí na těhlici. Dosazením do vzorce se získá:

$$k_o = \frac{270}{121,65}$$

$$k_o = 2,22.$$

Koeficient bezpečnosti těhlice je tedy 2,22, což je sice hraniční, ale dostačující hodnota. Navíc se předpokládá, že pokud by byl do výpočtového modelu zahrnut i tlumič a horní rameno, došlo by u nich k deformaci, a tím pádem k přenesení části napětí. Výsledné napětí na těhlici by tak mělo být o něco nižší a bezpečnost naopak o něco vyšší. Zde vypočítaná bezpečnost je tedy brána jako dostatečná.



Obr. 59 Napětí na těhlici

8 CENOVÝ A HMOTNOSTNÍ ODHAD PŘEDNÍ NÁPRAVY

V Tab. 18 je proveden odhad ceny všech komponent a materiálů přední nápravy. Jednotlivé ceny byly určeny přibližně podle informací dostupných na internetu v době, kdy byla diplomová práce (DP) sepisována. U obecných dílů, jako jsou brzdový kotouč, řídítka atd. byly vybírány díly ze střední cenové kategorie.

Tab. 18 Cenový odhad přední nápravy

Díl	Cena za kus [Kč]	Počet kusů	Celková cena [Kč]
Sestava zavěšení			
BGM PRO SC/F1, 240 mm	5600	2	11200
SAKB 8F	640	4	2560
Pružina 5N/mm	1000	2	2000
SAKB 12F	820	2	1640
61805-2RZ	440	2	880
GE17C	430	2	860
61902-2RZ	300	2	600
Brzdový systém			
Brzdový kotouč	300	2	600
Třmen	300	2	600
Brzdová páka	250	1	250
Kolo			
Ráfek 20"	400	2	800
Drát výpletu	10	72	720
Plášť 20"	200	2	400
Duše 20"	150	2	300
Sestava řízení			
Hřídelový kloub Norelem	1700	1	1700
6006-2RZ	250	3	750
Řídítka	500	1	500
Představec	500	1	500
Gufero 30x55x7	40	3	120
Gufero 35x50x8	40	3	120
Materiál	Cena za metr [Kč]	Délka [m]	Celková cena [Kč]
Blok 65x65 6061-T6	3400	1	3400
Tyč \varnothing 70 7075-T6	3800	0,2	760
Trubka \varnothing 30 6061-T6	500	1	500
Tyč \varnothing 18 S235JR	70	1,2	84
Tyč \varnothing 30 51CrV4	320	0,2	64
Tyč \varnothing 20 6061-T6	300	0,1	30
Tyč \varnothing 12 S235JR	30	0,7	21
Trubka \varnothing 42 S235JR	80	0,2	16
Celková cena			31975

Z tabulky je vidět, že více než třetinu celkových nákladů tvoří tlumiče. Jak bylo zmíněno v kap. 5.3, byly tyto tlumiče vybrány i z důvodu dostupnosti jejich rozměrů. Pokud by se tedy

podářilo sehnat rozměry levnějšího tlumiče, mohla by celková cena přední nápravy, a tím pádem i celého velomobilu, značně klesnout.

Žádná z dalších položek pak nad ostatními již výrazně nepřevažuje. Jedinou další možností jak snížit náklady, by bylo použití levnějšího materiálu, jako např. oceli, místo slitiny hliníku. Tím by však výrazně narostla hmotnost zavěšení. Z tohoto důvodu byla tato varianta zamítnuta už při návrhu.

Tab. 19 Hmotností odhad přední nápravy [69][74]

Díl	Hmotnost kusu [kg]	Počet kusů	Celková hmotnost [kg]
Sestava zavěšení + kola + brzdy			
BGM PRO SC/F1, 240 mm	1,5	2	3
Dolní rameno*	1,37	2	2,74
Plášť 20"	0,4	2	0,8
Třmen	0,35	2	0,7
Ráfek 20"	0,35	2	0,7
Blatník*	0,34	2	0,68
Řídící tyč*	0,275	2	0,55
Těhlice*	0,23	2	0,46
Pružina 5N/mm*	0,18	2	0,36
Drát výpletu	0,005	72	0,36
Osa*	0,18	2	0,36
Náboj*	0,17	2	0,34
Duše 20"	0,15	2	0,3
Brzdový kotouč	0,12	2	0,24
SAKB 12F	0,1	2	0,2
Matice	0,01	18	0,18
SAKB 8F	0,035	4	0,14
Šrouby	0,02	6	0,12
GE17C	0,05	2	0,1
61805-2RZ	0,022	2	0,044
61902-2RZ	0,016	2	0,032
Hmotnost zavěšení			12,406
Sestava řízení			
Horní řídící hřídel*	0,68	1	0,68
Hřídelový kloub Norelem*	0,57	1	0,57
6006-2RZ	0,12	3	0,36
Řídítka	0,35	1	0,35
Představec	0,3	1	0,3
Rameno řízení*	0,13	1	0,13
Dolní řídící hřídel*	0,1	1	0,1
Vložená hřídel*	0,04	2	0,08
Gufero 30x55x7	0,018	3	0,054
Gufero 35x50x8	0,015	3	0,045
Hmotnost sestavy řízení			2,669

Odhad hmotnosti je vidět v Tab. 19. Nejsou zde započítány horní úchyty tlumiče a ložisková tělesa, která jsou pevně spojena s rámem, a spadají tak spíše pod něj. Hodnoty s hvězdičkou byly převzaty z CAD modelů, hodnoty bez hvězdičky ze stránek výrobců nebo porovnáním hmotnosti na internetu u obecných dílů.

Důležitá je zde především hmotnost sestavy zavěšení + kol + brzd, protože její hodnota udává přibližnou hmotnost neodpružené hmoty a měla by být co nejnižší. Zde je hmotnost neodpružené hmoty 12,406 kg, a na jedno kolo tak připadá zhruba 6,2 kg. Tato hmotnost je vyšší, než se kterou se počítalo při výpočtu pružiny, vliv na tuhost pružiny by však měl být zanedbatelný.

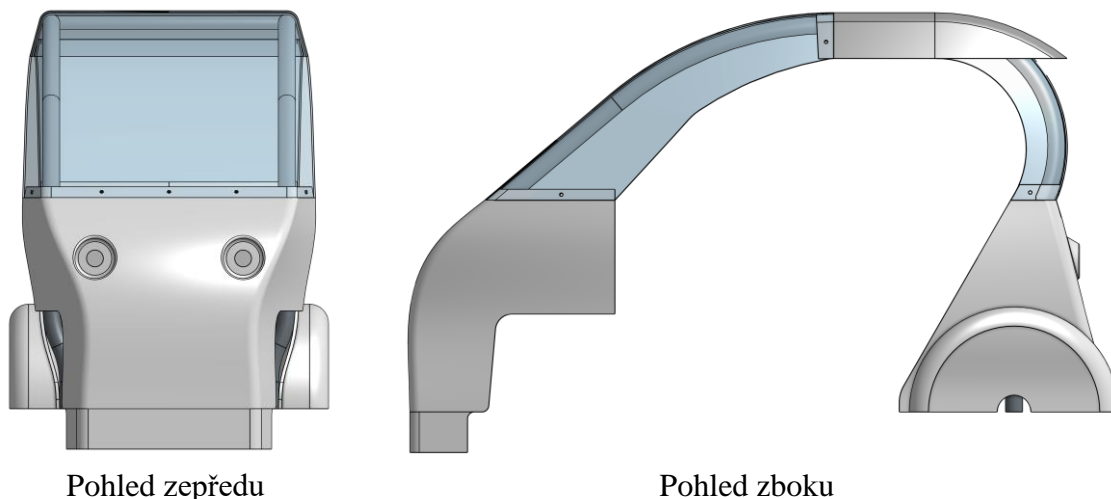
Hlavní položkou jsou zde, stejně jako u ceny, tlumiče. Zde použité tlumiče jsou však velmi kvalitní a nějaké výrazné ušetření hmotnosti tak není příliš reálné. Položkou, u které se dá teoreticky ušetřit nejvíce hmotnosti, je dolní rameno. U něj se nabízí možnost použití lehčího materiálu, jako například slitiny hliníku 6061 – T6, a to za cenu vyšší ceny a nižší meze pevnosti. K určení, zda je použití slitiny hliníku možné, by však byla potřeba komplexnější pevnostní analýza než ta, která je provedena v této DP a vhodné by bylo i provedení testů v praxi, především na odolnost dílu proti nárazu. Pokud by se však ukázalo, že použití slitiny hliníku je možné, hmotnost dolního ramene by klesla téměř na třetinu původní hmotnosti, a to na hodnotu 0,48 kg. Ušetřen by tak byl skoro jeden kilogram na každém kole, což je výrazná hmotnostní úleva. Stejně tak by se dala odlehčit i řídicí tyč, i když zde by celková hmotnostní úleva nebyla ani zdaleka tak výrazná.

Poslední položkou, která má větší vliv na celkovou hmotnost zavěšení a dá se do jisté míry ovlivnit, je ráfek. V tomto případě se jedná téměř výhradně o kompromis mezi cenou a hmotností. Nárůst ceny u ultralehkých ráfků je však značný a střední cenová kategorie by měla být naprosto dostačující.

Hmotnost sestavy řízení hraje v porovnání s hmotností zavěšení mnohem menší roli a má vliv v podstatě jen na celkovou hmotnost velomobilu. Snížení hmotnosti je možné použitím ultralehkých řídítek a představce. Ty jsou však výrazně dražší a zde se jeví jako zbytečné.

9 NÁVRH KAROSERIE

Jak již bylo zmíněno v kap. 4.3, bude se jednat o rámovou (podvozkovou) konstrukci, a funkce karoserie tak bude čistě ochranná, ať už proti počasí nebo kolizím. Dále se bude jednat o karoserii otevřenou. Za tímto rozhodnutím stojí především umožnění snadnějšího nastupování a vystupování, což zpřístupní el. velomobil i lidem s omezeným pohybem. Druhým důvodem je samovolné proudění vzduchu skrz velomobil, díky čemuž nebude potřeba ventilace a sníží se tak hmotnost, energetická spotřeba a celkové náklady el. velomobilu.



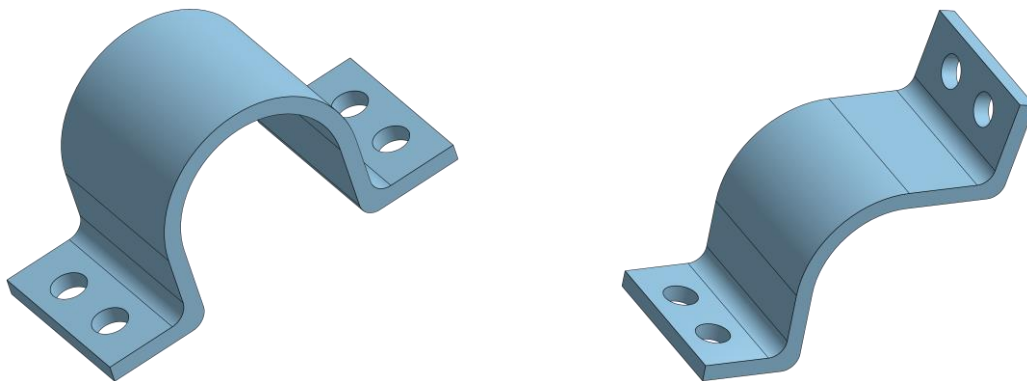
Obr. 60 Návrh karoserie

9.1 KAROSERIE

Samotná karoserie se bude skládat z pěti dílů, které k sobě budou připevněny pomocí nýtů. Tyto díly jsou zobrazeny na Obr. 60 a jedná se o:

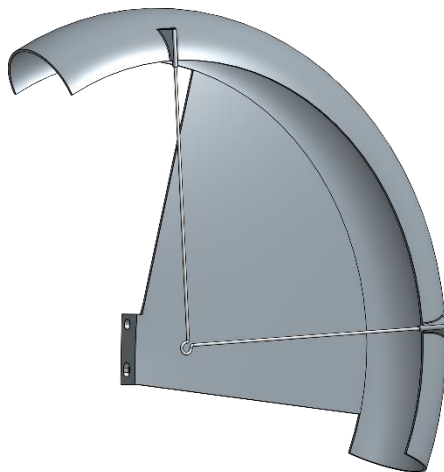
- **Přední díl** – směrem dopředu se zužuje, aby bylo umožněno dostatečné natočení kol. Vyřiznuty otvory pro přední světla.
- **Čelní sklo** – rozměrné, aby byl zajištěn dobrý výhled z kabiny. Po stranách lehce převislé přes rám kvůli lepší ochraně řidiče před počasím.
- **Střecha** – ochrana řidiče před sluncem. Opět lehce převislá po stranách, ne však moc, aby se řidič nemusel příliš sklánět při nastupování a vystupování. Vzadu přesah nad zadní plexisklo pro ještě lepší ochranu před sluncem.
- **Zadní sklo** – je k němu připevněno brzdové světlo.
- **Zadní díl** – protažený až ke konci zadních kol kvůli zvětšení zavazadlového prostoru bez nárůstu celkové délky. Jsou k němu přichyceny zadní blatníky a odrazky.

Uchycení karoserie k rámu je provedeno pomocí úchytů, které mají různé tvary v závislosti na tvaru karoserie. Tyto úchyty jsou z termoplastu. Ukázka úchytů je na Obr. 61.



Obr. 61 Úchyty karoserie k rámu

Velomobil bude také osazen blatníky. Jak bylo zmíněno výše, zadní blatníky jsou pevně přichyceny k zadnímu dílu karoserie. Aby se docílilo co nejužšího profilu velomobilu, jsou přední blatníky uchyceny k těhlici na jedné straně kola a ke šroubu, sloužícímu k uchycení osy, na straně druhé. Tím pádem se natáčí společně s kolem. Model předního blatníku je na Obr. 62.



Obr. 62 Levý přední blatník

Část v současné době produkovaných el. velomobilů využívá jako střechu solární panely. Protože je však jedním z cílů zde navrhovaného el. velomobilu nízká nákupní cena, která by podpořila trh s těmito vozidly a zároveň se jedná o velomobil určený především do města, kde je velké množství stínu způsobeného budovami, nebudou zde solární panely použity.

9.2 MATERIÁL KAROSERIE

Jako materiál karoserie je zde použit termoplast. Ten je levný, lehký a ve značné míře může být jak recyklovaný, tak recyklovatelný. Oproti překližce je také odolnější, jednodušší na údržbu, může být použit v tenčí vrstvě a dá se snadněji ohýbat. Výběr přesného druhu termoplastu by záležel na individuálních nabídkách výrobců.

Materiálem čelního a zadního skla je plexisklo. To je čiré, tvárné a dostatečně pevné, aby poskytovalo alespoň částečnou ochranu při nehodě.

9.3 BEZPEČNOSTNÍ A PŘÍDAVNÉ PRVKY NA KAROSERII

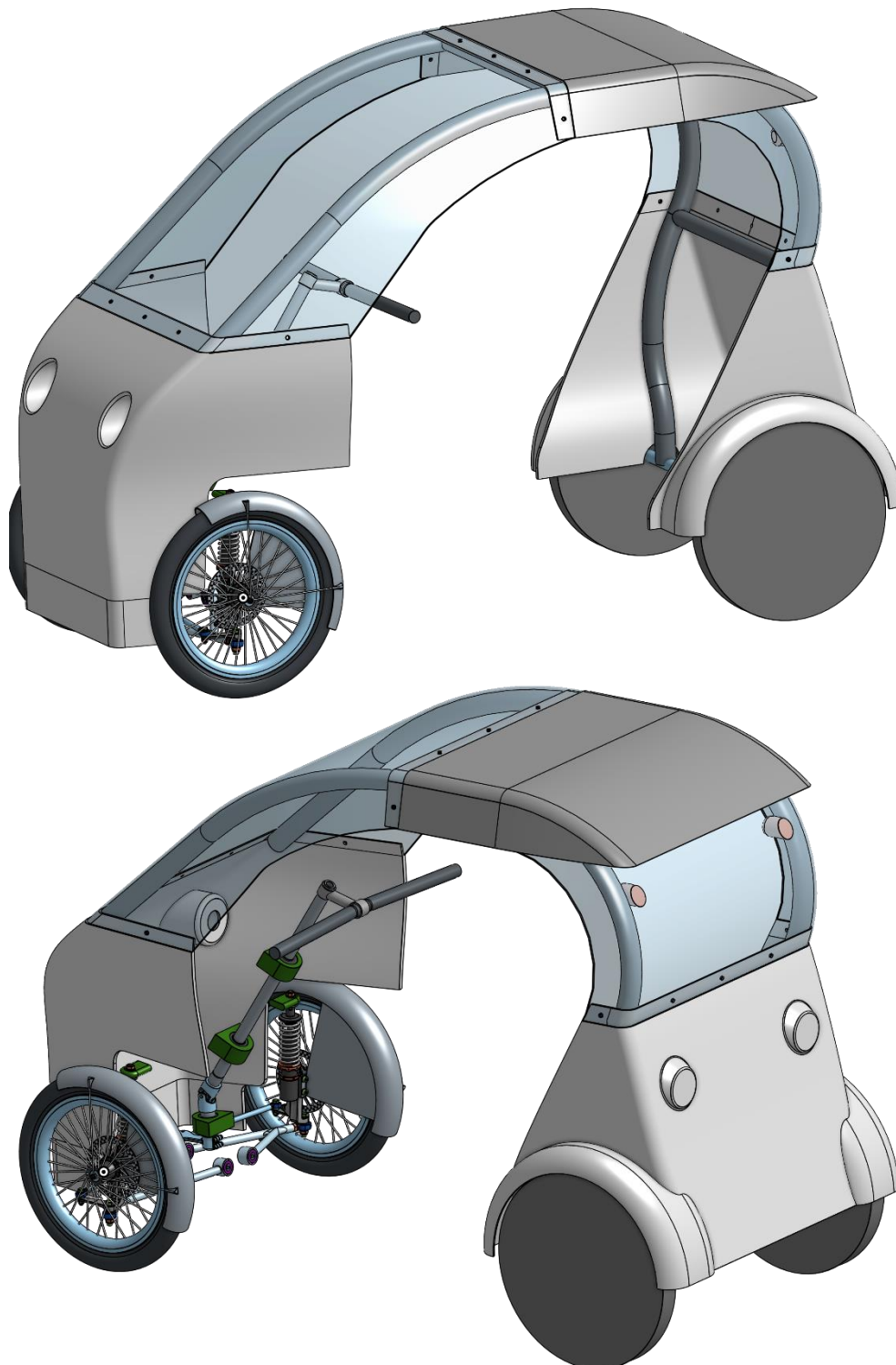
Protože je velomobil určen do městského provozu, bude osazen množstvím světel, aby byl lépe viditelný, a zlepšila se tak jeho bezpečnost. Přední světla budou umístěna v otvorech v předním dílu karoserie a stejně tak zadní světla budou na zadním dílu karoserie. V obou případech se bude jednat o LED světla. Na zadním skle pak bude ještě připevněno brzdové světlo. Směrová světla budou připevněna po stranách zadního dílu karoserie.

Velomobil bude také osazen třemi zpětnými zrcátky. Jedním vnitřním, připevněným k čelnímu sklu a dvěma postranními, uchycenými k rámu. Ty bude možno odmontovat a zmenšit tak čelní profil velomobilu.

K přednímu dílu karoserie bude uchycen jeden elektrický stěrač. Energetická ztráta a nárůst hmotnosti jsou v celkovém měřítku marginální. Zadní stěrač byl vyhodnocen jako zbytečný.

10 VÝSLEDNÝ NÁVRH

Na Obr. 63 je zobrazen výsledný návrh předního zavěšení a karoserie. Modely přední nápravy a karoserie jsou součástí digitální přílohy.



Obr. 63 Výsledný model předního zavěšení a karoserie

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout elektrický velomobil vhodný především pro jízdu ve městě. Přesněji se jedná o koncepční návrh celého velomobilu, konstrukční návrh přední nápravy a návrh karoserie. Hlavními požadavky na velomobil byly cenová dostupnost, nízká hmotnost, pohodlí, bezpečnost, ekologičnost a uzpůsobení velomobilu pro co nejširší škálu lidí.

Jako nejvhodnější design byl vybrán čtyřkolový velomobil spadající do kategorie elektrických kol. Rozhodujícím faktorem byly výhody této kategorie, jako jsou možnost využití cyklostezek a pruhů pro cyklisty, možnost téměř neomezeného parkování a absence požadavku na minimální věk řidiče. Aby velomobil mohl tyto výhody co nejvíce využít, byla zde snaha o dosažení co nejmenších celkových rozměrů. Čtyřkolová konstrukce poté zajišťuje zvýšenou stabilitu vozidla a navyšuje kapacitu zavazadlového prostoru, aniž by tyto rozměry dále navyšovala.

Přední zavěšení je realizováno pomocí vzpěry MacPherson, která díky své nízké prostorové náročnosti nechává dostatek volného prostoru pro šlapky. Jako samotná vzpěra pak byl vybrán tlumič určený pro skútry Vespa. Geometrie zavěšení byla řešena graficky a její následná optimalizace byla provedena v programu Adams Car. Touto optimalizací se povedlo dosáhnout velmi nízké hodnoty sbíhavosti, což bude mít pozitivní vliv na jízdní vlastnosti vozidla.

Podle polohy bodů, získaných z geometrie zavěšení, byly vyhotoveny modely všech dílů předního zavěšení včetně sestavy řízení. Hlavní pozornost byla věnována především tvaru těhlice a problému jejího připojení k ose kola a k tlumiči v tom samém místě. Finální návrh pak počítá se spojením těhlice a osy pomocí šestibokého hranolu. Na tento spoj se také zaměřila pevnostní analýza, která poukázala na značné koncentrátoři napětí, nacházející se na pomezí hranolu a těla těhlice. Spoj tak byl lehce poupraven a koncentrátoři se povedlo odstranit. Koncept šestibokého hranolu však zůstal zachován.

Při návrhu karoserie bylo přistoupeno k variantě otevřené rámové konstrukce především z důvodu její jednoduchosti. Karoserie je zde i vymodelována, jedná se však spíše o ukázkou rozložení jejích jednotlivých částí než o přesný model.

Výsledný návrh splňuje ve značné míře všechny předem stanovené požadavky. Jako možná zlepšení se pak nabízejí především návrh vlastního kola a tlumiče. Vlastní kolo by umožnilo posunout body zavěšení více do roviny kola, a tím pádem zlepšit jízdní vlastnosti velomobilu. Návrh vlastního tlumiče by pak především snížil náklady na výrobu a umožnil přesné uchycení tlumiče k těhlici a rámu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] MCMAHON, Mary. What is a Velomobile?. In: *Wikimotors.com* [online]. Last Modified Date: February 25, 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.wikimotors.org/what-is-a-velomobile.htm>
- [2] DE DECKER, Kris. The velomobile: high-tech bike or low-tech car?. In: *LOW-TECH MAGAZINE* [online]. September 30, 2010 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.lowtechmagazine.com/2010/09/the-velomobile-high-tech-bike-or-low-tech-car.html>
- [3] MORTKOWITZ, Siegfried. Recumbent Versus Standard Bikes. In: *WeLoveCycling* [online]. October 17, 2019 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.welovecycling.com/wide/2019/10/17/recumbent-bikes-versus-standard-bikes/>
- [4] Trikes. In: *Azub* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://azub.eu/recumbent-bikes-and-trikes/trikes/>
- [5] DE DECKER, Kris. Electric Velomobiles: as Fast and Comfortable as Automobiles, but 80 times more Efficient. In: *LOW-TECH MAGAZINE* [online]. October 24, 2012 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.lowtechmagazine.com/2012/10/electric-velomobiles.html>
- [6] ROSE, Geoffrey a Alex LIANG. Velomobiles and Urban Mobility: Opportunities and Challenges. In: EWERT, Amelie, Stephan SCHMID, Mascha BROST, Huw DAVIES a Luc VINCKX. *Small Electric Vehicles* [online]. Springer, Cham, 22 April 2021n. 1., s. 29–39 [cit. 2023-03-06]. ISBN 978-3-030-65843-4. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65843-4_3
- [7] Affordable and efficient electric vehicles. In: *NorthernLightMotors* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.northernlightmotors.com/>
- [8] Veemo SE Key Features. In: *Veemo* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://veemo.ca/>
- [9] CityQ cargo ebike for corporates. In: *CityQ* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.cityq.com/>
- [10] MODER, Christoph a Tony GRANT. Velomobile Knowledge Base. In: *Velomobile Knowledge Base* [online]. 2022-12-17 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://anotherkiwi.gitlab.io/velomobil-grundwissen/velomobile_knowledge.html
- [11] GALLA, Honza. Electrom: Is this the ultimate urban recumbent?. In: *RECUMBENT.NEWS* [online]. Oct 5, 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/2020/10/05/electrom-is-this-the-ultimate-urban-recumbent/>
- [12] Tadpole and Delta Trikes with Falco eBike System. In: *Falco eMotors* [online]. 29th Jul 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.electricbicycleworld.com/blog/tadpole-and-delta-trikes-with-falco-ebike-system/>

- [13] STROHBACH, Felix J. Halb Auto, halb Fahrrad: Acht Velomobile mit Elektromotor. In: *Strohbonaut* [online]. 5. Mai, 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.strohbonaut.de/funf-velomobile-mit-elektromotor/>
- [14] ROSSI, Katrina. Everything you need to know about Velomobiles. In: *Velosurance* [online]. © 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://velosurance.com/blog/everything-know-about-velomobiles/>
- [15] Frikar®- A four wheeled e-bike with full weather protection. In: *PODBIKE* [online]. © 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.podbike.com/>
- [16] WAW Velomobile General description. In: *Velomobil.no* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: http://www.velomobil.no/dok/waw_specs.pdf
- [17] THE BASICS. In: *TWIKE* [online]. © 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://twike.com/en/twike3/>
- [18] PALLA, Sahaj. Drum Brakes vs Disc Brakes. In: *Spinny* [online]. Dec 23, 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.spinny.com/blog/index.php/drum-brakes-vs-disc-brakes/>
- [19] NEHR, Zach. Mechanical vs hydraulic disc brakes – which type is best for you?. In: *BIKEPERFECT* [online]. June 15, 2022 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.bikeperfect.com/features/mechanical-vs-hydraulic-disc-brakes-which-one-is-best-for-you>
- [20] GALLA, Honza. Answered questions you may have about the Podbike. In: *RECUMBENT.NEWS* [online]. Feb 25, 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/2021/02/25/answered-questions-you-may-have-about-the-podbike/>
- [21] Options 2019. In: *KATANGA* [online]. © 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.katanga.eu/waw-options/#prettyPhoto>
- [22] GALLA, Honza. OSS (ASS) vs. USS vs. OC on an SWB recumbent. In: *RECUMBENT.NEWS* [online]. Jul 2, 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/2020/07/02/oss-ass-vs-uss-vs-oc-on-an-swb-recumbent/>
- [23] Steering via side-stick steering. In: *TWIKE* [online]. Dec 1, 2018 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://twike.com/en/side-stick-steering/>
- [24] Solar Velomobile. In: *Pedilio* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.pedilio.de/news-english/about-pedilio/>
- [25] BLAIN, Loz. 120-mph Twike 5 adds exercise to even the fastest commute. In: *NEW ATLAS* [online]. March 18, 2019 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://newatlas.com/twike-5-pedal-assist-car/58899/>
- [26] TWIKE Velomobile: a Look Inside the Best. In: *TWIKE BLOG* [online]. [2018] [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://blog.twike.com/twike-velomobile-a-look-inside-the-best/>

- [27] STROHBACH, Felix J. Sonntagsfahrt mit dem Solar Velomobil. In: *Strohbonaut* [online]. 25. Juli, 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.strohbonaut.de/sonntagsfahrt-mit-dem-solar-velomobil/>
- [28] Alpha 7 Technical | Front suspension. In: *Velomobileworld* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.velomobileworld.com/technical-support/alpha-7-technical/alpha-7-front-suspension/>
- [29] 2013 Organic Transit ELF Review. In: *Electricbikereview* [online]. November 04, 2019 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://electricbikereview.com/organic-transit/2013-elf/>
- [30] CARBIKETECH TEAM. Swingarm Suspension In Motorcycles & Scooters. In: *CarBikeTech* [online]. June 26, 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://carbiketech.com/swingarm/>
- [31] Be a part of the solution. In: *Electrom LEV* [online]. © 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.electrom.ca/>
- [32] BAKKER, Robbert. Flevobike - Four wheeled velomobile. In: *Robbert Bakker* [online]. June 2016 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://robertbakker.com/>
- [33] RAICIU, Tudor. How Multi-Link Suspension Works. In: *Autoevolution* [online]. 17 Jun 2009 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.autoevolution.com/news/how-multi-link-suspension-works-7804.html>
- [34] TWIKE 5 (...6) update. In: *TWIKE 560 Adventures* [online]. May 4, 2019 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://emissionless.ch/2019/05/twike-5-6-update/>
- [35] GALLA, Honza. Everything you want to know about the Northern Light Motors 428 velomobile. In: *RECUMBENT.NEWS* [online]. Jun 1, 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/2020/06/01/everything-you-want-to-know-about-the-northern-light-motors-428-velomobile/>
- [36] Exercise Your Power!. In: *ORGANICTRANSIT* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://organictransit.com/>
- [37] Types Of Chassis Frames- Monocoque, Ladder Frame, Backbone, Tabular. In: *CarBlogIndia* [online]. July 2, 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.carblogindia.com/types-of-chassis-frames-monocoque-vs-ladder/>
- [38] Velomobiel.nl. In: *Velomobiel.nl* [online]. © 2000-2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://en.velomobiel.nl/>
- [39] Space frame explained. In: *Motor Car* [online]. © 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://motor-car.net/innovation/car-body/item/14795-space-frame>
- [40] COLEMAN, Susan. Cool, Compact and Comfortable: Podbike FRIKAR Redefines the Velomobile. In: *Ansys* [online]. June 18, 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/blog/podbike-frikar-redefines-velomobile>

- [41] MARKUS, Frank. Body-on-Frame vs. Unibody vs. Monocoque: What's the Difference?. In: *MOTORTREND* [online]. Apr 30, 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/features/body-on-frame-vs-unibody-vs-monocoque-what-is-the-difference/>
- [42] KOENIGSBERGER, O.H., T.G. INGERSOLL, Alan MAYHEW a S.V. SZOKOLAY. *MANUAL OF TROPICAL HOUSING AND BUILDING: The body's heat production* [online]. Universities Press (India) Private Limited, 2013 [cit. 2023-03-06]. ISBN 978 81 7371 845 8. Dostupné z: https://www.academia.edu/30105808/Manualoftropicalhousing_koenigsberger_150824122547_lva1_app
- [43] Testfahrt Podbike Frikar. In: *Frankys.blog* [online]. 22. Oktober 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://frankys.blog/2021/10/22/testfahrt-frikar-podbike/>
- [44] Evovelo design solar bio-hybrid vehicles for the everyday commute. In: *Evovelo* [online]. © 2014 - 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.evovelo.com/en/>
- [45] LOBERG, Anders. WAW_specs2016. In: *Velomobilemedia* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: http://velomobilemedia.com/docs/WAW_specs2016.pdf
- [46] GALLA, Honza. Plywood velomobile from Slovakia – The Carcle Bike. In: *RECUMBENT.NEWS* [online]. Jul 26, 2020 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.recumbent.news/2020/07/26/plywood-velomobile-from-slovakia-the-carcle-bike/>
- [47] Carbon Fiber vs Steel: Who Does It Better?. In: *ZOLTEK* [online]. November 23, 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://zoltek.com/carbon-fiber-vs-steel/>
- [48] What is the Difference Between Carbon Fiber and Kevlar?. In: *DragonPlate* [online]. August 5, 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://dragonplate.com/difference-between-kevlar-and-carbon-fiber-dragonplate>
- [49] Carbon Fiber vs Fiberglass: What's the Difference?. In: *ZOLTEK* [online]. June 30, 2021 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://zoltek.com/carbon-fiber-vs-fiberglass/>
- [50] SATHISHKUMAR, T. P., S. SATHEESHKUMAR a Naveen JESUAROCKIAM. Glass fiber-reinforced polymer composites - A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. Jun 19, 2014, **33**(13), 1258–1275 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: doi:10.1177/0731684414530790
- [51] ZAHID, Bilal a Xiaogang CHEN. Impact evaluation of Kevlar-based angle-interlock woven textile composite structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. June 2013, **32**(12), 925-932 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: doi:10.1177/0731684413480006
- [52] ZOLTEK PX35 COMMERCIAL CARBON FIBER. In: *ZOLTEK* [online]. [2021] [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://zoltek.com/wp-content/uploads/2019/01/2021-PX35-Brochure-1.pdf>

- [53] Table of design material properties for structural steel. In: *Eurocodeapplied* [online]. © 2017 - 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties>
- [54] LURAN S KR2861/1C. In: *Ineos Styrolution* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.ineos-styrolution.com/Product/Luran-SC_Luran-S-KR2861-1C_SKU400700200243_lang_en_GB.html
- [55] Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Extruded. In: *MatWeb* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a8afcdac864d4b8f58d40570d2e5aa>
- [56] PET. In: *D² Designerdata* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polyethylene-terephthalate>
- [57] Wood, Panel and Structural Timber Products - Mechanical Properties. In: *TheEngineeringToolBox* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/timber-mechanical-properties-d_1789.html
- [58] EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained. In: *News European Parliament* [online]. Updated: 13-02-2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained>
- [59] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) o schvalování dvoukolových nebo tříkolových vozidel a čtyřkolek a dozoru nad trhem s těmito vozidly. In: . Štrasburk, 2013, číslo 168.
- [60] GREGORY, Jim. How Much Electricity Can a Human Generate?. In: *PedalPC* [online]. updated on 2022-08-05 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.pedalpc.com/blog/how-much-electricity-can-human-generate/>
- [61] WILKIE, D. R. Muscle Function: A Personal View. *Journal of Experimental Biology* [online]. 1985, March 1985, **115**(1), 1-13 [cit. 2023-03-06]. ISSN 0022-0949. Dostupné z: doi:10.1242/jeb.115.1.1
- [62] HUSTON, Jeffrey C., Brian J. GRAVES a David B. JOHNSON. *Three Wheeled Vehicle Dynamics* [online]. SAE International, 1982-02-01, **91**, 591-604 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: doi:10.4271/820139
- [63] BALDISSERA, Paolo a Cristiana DELPRETE. Rolling resistance, vertical load and optimal number of wheels in human-powered vehicle design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* [online]. 2017, **231**(1), 33-42 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1754-3371. Dostupné z: doi:10.1177/1754337115625002
- [64] Brzdový kotouč SHIMANO SM-RT56 6 děr. In: *KOLOKRÁM.cz* [online]. © 2022 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.kolokram.cz/brzdovy-kotouc-shimano-sm-rt56-6-der-p192590/>

- [65] SRAM Level TLM Disc Brake. In: *Bike-discount* [online]. [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.bike-discount.de/en/sram-level-tlm-disc-brake>
- [66] FRANTIŠEK, Vlk. *Podvozky motorových vozidel*. Brno: VLK, 2000. ISBN 80-238-5274-4.
- [67] SHIGLEY, Joseph E. a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. VUTIUUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [68] WOODS, David E. a Badih A. JAWAD. Numerical Design of Racecar Suspension Parameters. *SAE Transactions* [online]. 1999, **108**, pp. 3156-3161 [cit. 2023-03-25]. ISSN 0096736X. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/44733982>.
- [69] BGM7741B Front shock absorber. In: *Bgm Tuning* [online]. © 2023 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.bgm-tuning.com/en/product/bgm7741b-stodmpfer-vorne-bgm-pro-sc-f1-sport-240mm-vespa-px80-px125-px150-px200-t5-125cc-schwarz/>
- [70] YAR, Mazher Ahmed, Ying WANG, Xiaorong ZHOU a Constantinos SOUTIS. Corrosion behaviour of an industrial shot-peened and coated automotive spring steel AISI 9254. *Corrosion Engineering, Science and Technology* [online]. 2018, **53**(8), 564-573 [cit. 2023-03-25]. ISSN 1478-422X. Dostupné z: doi:10.1080/1478422X.2018.1511328
- [71] MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. *Race Car Vehicle Dynamics*. Warrendale, Pa: Society of Automotive Engineers, 1994. ISBN 1-56091-526-9.
- [72] Go-kart Steering Mechanism (Model) Working Animation in Solidworks. In: *Youtube* [online]. 15. 6. 2020 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=u4h8nWkKU80>. Kanál uživatele Solidworks Fun.
- [73] Wendekreis: ADAC-Ranking: Wer hat den Kleinsten?. In: *AutoBild* [online]. 25.07.2011 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.autobild.de/artikel/wendekreis-adac-ranking-1865771.html>
- [74] Welcome to SKF. *SKF* [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.skf.com/au>
- [75] Disc brake. In: *Peter Verdone Designs (PVD)* [online]. Oct. 24, 2017 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <http://www.peterverdone.com/wp-content/uploads/2018/06/2019-Shimano-Disc-Brake-Standards.pdf>
- [76] MU, Martin. How to choose Aluminum 6061 or 7075 for CNC project?. In: *DDPROTOTYPE* [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.ddprototype.com/how-to-choose-aluminum-6061-or-7075-for-cnc-projects/>
- [77] ČSN EN ISO 683-2 (420931). Oceli pro tepelné zpracování, oceli legované a oceli automatové - Část 2: Legované oceli k zušlechťování. 01/2019n. 1.
- [78] CHIORESCU, Dan, Esmeralda CHIORESCU, Sergiu OLARU, et al. The analysis of the parameters for deep drawing of cylindrical parts. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018, **178** [cit. 2023-04-23]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201817802011

- [79] Hřídelové klouby jednoduché s kluzným ložiskem DIN 808. *Norelem* [online]. © 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z:
https://www.norelem.com/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/DataSheet/cz/23/23403_Datasheet_4973_H_delov_klouby_jednoduch_s_kluzn_m_lo_iskem_DIN_808--cs.pdf
- [80] SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vyd. 5. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN ISBN978-80-7204-838-0.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a_1	[m]	Vzdálenost mezi ložisky
b	[m]	Rozchod kol
b_1	[m]	Vzdálenost mezi vertikální osou kola a ložiskem 1
C_{0r}	[N]	Základní radiální statická únosnost
c_k	[N·mm ⁻¹]	Tuhost na jednom kole (Ride rate)
c_p	[N·mm ⁻¹]	Výsledná tuhost pružiny
c_{p1}	[N·mm ⁻¹]	Tuhost pružiny v závislosti na vlastní frekvenci karoserie
c_{p2}	[N·mm ⁻¹]	Tuhost pružiny v závislosti na ovládání vozidla a namáhání vozovky
c_{pk}	[N·mm ⁻¹]	Tuhost pružiny v rovině kola
c_t	[N·mm ⁻¹]	Laterální tuhost kola
D	[m]	Střední průměr pružiny
d	[m]	Průměr drátu pružiny
D_{in}	[m]	Vnitřní průměr pružiny
D_{out}	[m]	Vnější průměr pružiny
D_{outMax}	[m]	Maximální vnější průměr pružiny
DP	[–]	Diplomová práce
$DR1$	[–]	Dolní kulový kloub
$DR2$	[–]	Uchytení dolního ramene ke karoserii
E	[GPa]	Modul pružnosti v tahu
e	[–]	Mezní hodnota poměru F_a a F_r
f_0	[–]	Součinitel pro výpočet základní statické únosnosti
F_{a1}	[N]	Axiální síla působící na ložisko 1
F_{a2}	[N]	Axiální síla působící na ložisko 2
FB	[%]	Poměr brzdných sil připadajících na přední nápravu v procentech
f_n	[Hz]	Vlastní frekvence karoserie
F_p	[N]	Síla působící na pružinu způsobená předpětím
F_{pr}	[N]	Síla působící na pružinu při statickém zatížení
F_{r1}	[N]	Radiální síla působící na ložisko 1
F_{r2}	[N]	Radiální síla působící na ložisko 2
F_{y1}	[N]	Odstředivá síla působící na kolo
F_{z1}	[N]	Síla působící na kolo při jízdě rovně

g	[m·s ⁻²]	Gravitační konstanta
G_s	[GPa]	Modul pružnosti ve smyku
h	[m]	Výška těžiště
$HR1$	[-]	Horní uchycení tlumiče
$IC1$	[-]	Pól otáčení kola při pohledu zepředu
$IC2$	[-]	Pól otáčení kola při pohledu z boku
i_p	[-]	Převod odpružení
k	[-]	Rázový součinitel
k_o	[-]	Bezpečnost na ose
k_t	[-]	Bezpečnost na těhlici
L	[m]	Rozvor kol
l_1	[m]	Vzdálenost mezi předním kolem a těžištěm
l_2	[m]	Vzdálenost mezi zadním kolem a těžištěm
m_1	[kg]	Provozní hmotnost
m_c	[kg]	Maximální předpokládaná hmotnost
MHD	[-]	Městská hromadná doprava
MKP	[-]	Metoda konečných prvků
m_{nk}	[kg]	Neodpružená hmotnost jednotlivých soustav kol
m_o	[kg]	Odpružená hmotnost velomobilu
$n_{\check{c}}$	[m]	Počet činných závitů
OSS	[-]	Overseat steering [Nadsedadlové řízení]
P	[W]	Výkon
P_e	[N]	Dynamické ekvivalentní zatížení
R	[m]	Poloměr zatáčky
R_{e_hlin}	[MPa]	Mez kluzu slitiny hliníku 6061-T6
R_{e_ocel}	[MPa]	Mez kluzu oceli 51CrV4
R_{PVne}	[m]	Poloměr otáčení předního vnějšího kola
ŘT1	[-]	Bod připojení řídicí tyče k těhlici
ŘT2	[-]	Bod připojení řídicí tyče k říditkům
SK	[-]	Střed klopení
USS	[-]	Underseat steering [Podsedadlové řízení]
v_{4_max}	[km·h ⁻¹]	Maximální rychlost čtyřkolového vozidla před převrácením

V_{del_max}	[km·h ⁻¹]	Maximální rychlost Delta vozidla před převrácením
V_{tad_max}	[km·h ⁻¹]	Maximální rychlost Tadpole vozidla před převrácením
y_p	[m]	Stlačení pružiny způsobené předpětím
y_s	[m]	Stlačení pružiny při statickém zatížení
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota
σ_{osa}	[MPa]	Maximální napětí na ose
$\sigma_{těh}$	[MPa]	Maximální napětí na těhlici
φ_{max}	[°]	Maximální úhel natočení vnějšího kola