

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **B0715A270013 – Strojní inženýrství**

Studijní specializace: **Konstruování strojů a technických zařízení**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Konstrukční návrh dvoumístné drezíny s proměnlivým rozchodem
s použitím komponent z elektrokola**

Autor: **Dominik DOLP**

Vedoucí práce: **Ing. Jiří KOŘÍNEK**

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Dominik DOLP
Osobní číslo:	S19B0270P
Studijní program:	B0715A270013 Strojní inženýrství
Specializace:	Konstruování strojů a technických zařízení
Téma práce:	Konstrukční návrh dvoumístné drezíny s proměnlivým rozchodem s použitím komponent z elektrokola.
Zadávací katedra:	Katedra konstruování strojů

Zásady pro vypracování

Navrhněte dvoumístnou kolejovou drezínu s elektrickým akumulátorovým pohonem pro použití na tratích s rozchodem 600mm – 1435mm. Předpokladem je využití většího množství nakupovaných komponent z oblasti elektrokol. Cílem je vytvořit zařízení, které bude rozebíratelné a snadno přepravitelné osobním automobilem s cílem na co nejnižší hmotnost.

V úvodní části bakalářské práce bude vypracována rešerže dostupných řešení. Výstupem z práce by byl samotný konstrukční návrh. Podrobnější parametry budou upřesněny při zadání.

Konzultant: Ing. Ladislav Tříška Ph.D., Strkan s.r.o.

Rozsah bakalářské práce: **30-40**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

- [1] HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. Příručka strojního inženýra: obecné strojní části. Praha: Computer Press, 1999. Edice strojaře. ISBN isbn80-7226-055-3.
- [2] HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. Příručka strojního inženýra: obecné strojní části. Praha: Computer Press, 2000. Edice strojaře. ISBN isbn80-7226-202-5.
- [3] HELLER, Petr. Kolejová vozidla. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2021. ISBN 9788026106937.
- [4] HELLER, Petr. Kolejová vozidla. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2021. ISBN 9788026107736.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Kořínek**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

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

Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. listopadu 2022

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Kořínkovi za jeho ochotu a trpělivost. Jeho odborné rady byly při řešení této práce velmi nápomocné. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, snoubence a přátelům za podporu během studia, která mě neustále motivuje se dále rozvíjet.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Dolp	Jméno Dominik	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kořínek	Jméno Jiří	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST – KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Konstrukční návrh dvoumístné drezíny s proměnlivým rozchodem s použitím komponent z elektrokola		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	54	TEXTOVÁ ČÁST	46	GRAFICKÁ ČÁST	8
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce se zaměřuje na konstrukční návrh dvoumístné drezíny s proměnlivým rozchodem při použití komponent z elektrokola. Cílem práce je navrhnout funkční a vyrobitelné vozidlo za rozumnou cenu. Obsahem této práce je rešeršní část, předběžné návrhy koncepce prvků vozidla a jejich následné zhodnocení a kontrolu.
KLÍČOVÁ SLOVA	drezína, proměnlivý rozchod, rám, elektromotor, railbike, řetězový

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Dolp	Name Dominik	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kořínek	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of a two-seater railbike with adjustable track width using E-bike components		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKS	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	54	TEXT PART	46	GRAPHICAL PART	8
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis focuses on design of a two-seater railbike with adjustable track width using E-bike components. Aim of this thesis is to develop a functional and manufacturable vehicle for reasonable price. The thesis contains a research part, preliminary design of different vehicle elements and their subsequent evaluation and check.
KEY WORDS	Draisine, variable track width, frame, electric motor, railbike

Obsah

1 Úvod.....	10
2 Rešerše	11
2.1. Historie kolejové dopravy	11
2.2. Rozdělení kolejových vozidel	13
2.3. Drezína s vlastním pohonem	13
2.4. Drezína poháněná lidskou silou	14
3 Koncepční návrhy	16
3.1. Návrh konstrukce	16
3.2. Průzkum trhu s motory	19
3.3. Návrh nastavitelnosti rozchodu	22
3.4. Návrh řešení kol	26
3.5. Vhodné materiály	28
4. Volba řešení.....	29
4.1. Volba konstrukce rámu	29
4.2. Volba motoru.....	30
4.3. Volba nastavitelnosti rozchodu	31
4.4. Volba řešení kol	31
4.5. Volba materiálu	32
5. Konstrukční proces vybrané varianty.....	33
5.1. Konstrukce rámu	33
5.2. Kontrola rámu pomocí metody konečných prvků (MKP)	34
5.3. Návrh a kontrola hřídele.....	36
5.4. Kontrola ložisek	39
5.5. Finální konstrukce vozidla	41
6. Závěr.....	43
Seznam použitých zdrojů	44
Seznam tabulek	45
Seznam obrázků	45
Seznam příloh.....	46

Seznam použitých zkratek

SWOT	Strengths weaknesses opportunities threats
MKP	Metoda konečných prvků
F	Síla
G	Tíha
M_t	Točivý moment
M_{max}	Maximální ohybový moment
τ_k	Napětí v krutu
σ_o	Napětí v ohybu
W_k	Modul průřezu v krutu
W_o	Modul průřezu v ohybu
σ_{red}	Redukované napětí
σ_k	Napětí na mezi kluzu
k	Koeficient bezpečnosti
d	Průměr
mm	Milimetr
N	Newton
Nm	Newton metr
kg	Kilogram
MPa	Megapascal

Ostatní zkratky jsou popsány v příslušných kapitolách

1 Úvod

Cílem této práce je navrhnout dvoumístnou kolejovou drezínu s elektrickým akumulátorovým pohonem, která musí být použitelná na standardních rozchodech tratí od 600 do 1435 mm.

Drezína je lehké kolejové vozidlo určené ke služebním nebo přepravním účelům. Může být poháněna motorem, nebo mechanicky silou svalů.

Motorové drezíny fungují na principu motocyklů, nebo automobilů, zatímco drezína poháněná lidskou silou funguje na principu jízdního kola, nebo jako jednoduché vozy, tzv. pumpovací drezíny vybavené klikou a dvouzvratnou pákou.

Drezína nese svůj název podle jména německého vynálezce Karla Draise, konstruktéra tzv. Laufmaschine (odrážedlo), jejíž derivace je dnes používána výhradně jako prostředek, na kterém se děti učí základy jízdy na kole. Draisův vynález připomíná svým vzhledem právě jízdní kolo, které má být funkčním základem pro konstrukci šlapací drezíny.

V úvodní části této práce bude zpracována rešerše a návrh dostupných řešení včetně skic. Rešerše se bude týkat i výběru potřebných komponent pro zhotovení elektricky poháněné drezíny. [1]

2 Rešerše

2.1. Historie kolejové dopravy

Pod pojmem kolejové vozidlo se rozumí takový dopravní prostředek, který je způsobilý k jízdě po kolejích. Vozidlo samotné je kolejemi vedeno i nesené.

Zmínky o nějakém způsobu kolejové dopravy jsou známy již z dob starověkého Říma nebo Řecka. Jednalo se o vozidla tažená lidmi nebo zvířaty a vedená v drážkách ve vápencovém základu. Tento základ tak v podstatě tvořil kolej a neumožňoval vozidlu sjet z cesty.

Ve starověké Číně však už byl používán koncept bližší tomu, který známe dnes. Vozidla byla opět tažena zvířaty, koleje však byly vyrobeny ze dřeva.

V 16. století se začala doprava po dřevěných kolejích značněji rozšiřovat v Evropě. V 18. století po vynalezení parního stroje pro vhánění vzduchu do vysokých pecí se výrazně zvýšila produkce železa, zejména v Británii. Povrchy dřevěných kolejích se začaly pokrývat plechy, což zvýšilo jejich odolnost a nosnost. Na přelomu 18. a 19. století se již začaly vyrábět koleje kompletně železné. [11] [12]



Obrázek 1 - Dřevěné koleje s vozem ze 16. století [2]

Nebyla to pouze výroba kolejí, která po vynalezení parního stroje dostala revoluce, ale tento vynález také začal nahrazovat pohon lidskou nebo zvířecí silou. Vozidla mohla jezdit rychleji, a to nyní bez dopadu na fyzické zdraví osob a zvířat. V 19. století také přišla první elektricky poháněná lokomotiva. Její elektromotor byl poháněn baterií. V průběhu času se ale jako efektivnější způsob ukázaly troleje, které zajišťovaly trvalý přísun elektrické energie a vozidlo nemuselo mít svůj vlastní. Baterie umístěná přímo ve vozidle by neposkytovala vozidlu dostatečný dojezd a také by zvyšovala hmotnost vozidla. Troleje se tak jako zdroj elektrické energie používají dodnes.

Další zlom nastal po vynalezení spalovacího motoru. Na přelomu 19. a 20. století se objevovaly první prototypy lokomotiv s dieslovými motory, v průběhu 20. století se pak začaly využívat ve velkém. Dnes jsou skoro výhradně k vidění právě elektrické a dieslové lokomotivy. Kromě konvenčních kolejí se dnes využívá například i technologií monorail (jednokolejnicová dráha) nebo maglev (magnetická levitace).



Obrázek 2 – Monorail [3]



Obrázek 3 – Maglev [4]

2.2. Rozdělení kolejových vozidel

Kolejová vozidla lze rozdělit několika způsoby. Jedním je rozdělení na hnaná, hnací vozidla a vozidla s vlastním pohonem. Mezi hnací se řadí lokomotivy. Mezi vozidla s vlastním pohonem patří například tramvaje, motorové vozy nebo i námi řešené drezíny.

Lokomotivy se dělí podle trakce na parní, diesellové, elektrické, pneumatické a setrvačnickové, dále dle účelu na traťové, průmyslové, důlní a speciální.

Hnaná vozidla je možno rozlišit podle způsobu, jakým jsou uváděna do pohybu. Mohou být hnána lidskou či zvířecí silou, nebo tažena hnaným vozidlem.

O drezínách můžeme mluvit jako o hnaných vozidlech i jako o vozidlech s vlastním pohonem. [10]

2.3. Drezína s vlastním pohonem

Motorové drezíny se používají především pro služební účely (údržba trati, měření). Historicky se používaly i pro vojenské účely, kde sloužily k hlídkování na tratích a průzkumu trati před průjezdem obrněného vlaku.

Tento druh kolejového vozidla se vyskytuje jako účelově postavený stroj (tj. od základu), nebo jako konverze silničního motorového vozidla.



Obrázek 4 - Obrněná drezína Tatra T18 [5]



Obrázek 5 - Měřicí drezína [6]

2.4. Drezína poháněná lidskou silou

Pro účely této práce se budeme zabývat drezínami poháněnými lidskou silou.

Tato vozidla v dnešní době slouží výhradně pro účely hobby a zážitkových jízd. V dřívějších dobách pro ně však existovalo využití například v dolech, údržbě železnic, někdy i pro přepravu osob. Taková vozidla mohla být tlačná, kde drezínu s pasažérem nebo nákladem tlačil člověk, nebo je člověk roztlačil a za jízdy naskočil. Obvyklejší však byly uživatelsky příjemnější způsoby pohonu, jako například pumpovací drezíny, které jsou známé z westernových filmů, nebo šlapací drezíny (railbikes), kterými se budeme zabývat.



Obrázek 6 - Pumpovací drezína [7]



Obrázek 7 - Šlapací drezína [8]

Neexistuje žádný sériově vyráběný exemplář takového vozidla. Jedná se výhradně o kusy vyrobené na zakázku, nebo častěji po domácku. Nejjednodušší konstrukce takového vozidla spočívá v podstatě v ponechání konstrukce jízdního kola s nehybnou vidlicí a v přidání kol určených pro jízdu po železnici. Na stranu se připevní rám s třetím (nebo i čtvrtým) kolem pro rovnováhu.

Pokud má však zájemce čas a peníze, nabízí se i výhodnější konstrukce, při které nedochází k přizpůsobení jiného vozidla pro tento účel, ale stavbě šlapací drezíny od základu. V tomto případě by samozřejmě bylo využito normalizovaných komponentů z jízdních kol. Také by bylo možné postavit vozidlo s lavicemi pro více pasažérů, které je používáno například v Ratíškovcích, kde slouží jako turistická atrakce na opuštěné trati. [9]



Obrázek 8 - Ratíškovická šlapací drezína

3 Koncepční návrhy

3.1. Návrh konstrukce

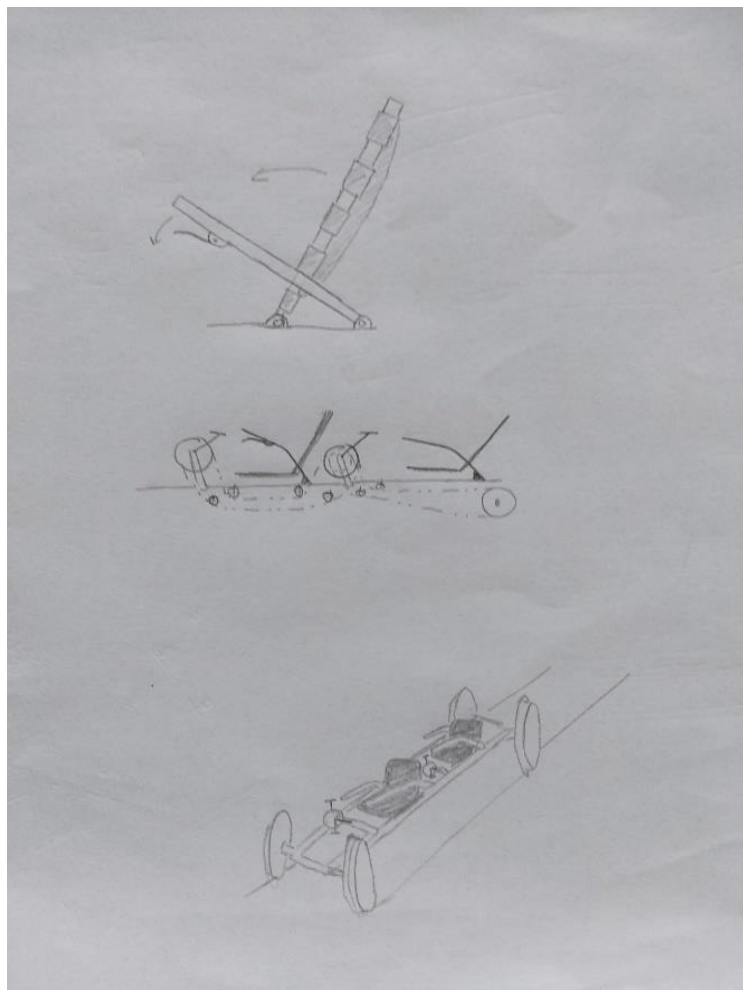
Pro začátek je třeba zvolit vhodnou koncepci, návrhy konstrukcí jsou uvedeny na náčrtcích. Také je potřeba rozhodnout, zda je vhodné ponechat pedály a využívat elektromotor pouze jako asistenci, nebo pedály vynechat a pohánět drezínu výhradně elektricky.

Varianta s pedály by garantovala delší dojezd i vyšší rychlosti. Při skládací konstrukci však přináší složitosti kvůli řetězům. Jelikož má drezína být dvoumístná, je třeba rozhodnout, zda by měl šlapat jeden pasažér, nebo oba. V takovém případě musí být ještě zajištěno, aby operátoři mohli šlapat nezávisle na sobě (pomocí volnoběžných spojek, nebo jednosměrných ložisek).

Další věc, kterou je nutno se zabývat je materiál. Ten musí být dostatečně pevný, musí zajistit dostatečnou tuhost rámu, kvůli manipulaci by měl být lehký a velkou roli samozřejmě sehrává cena.

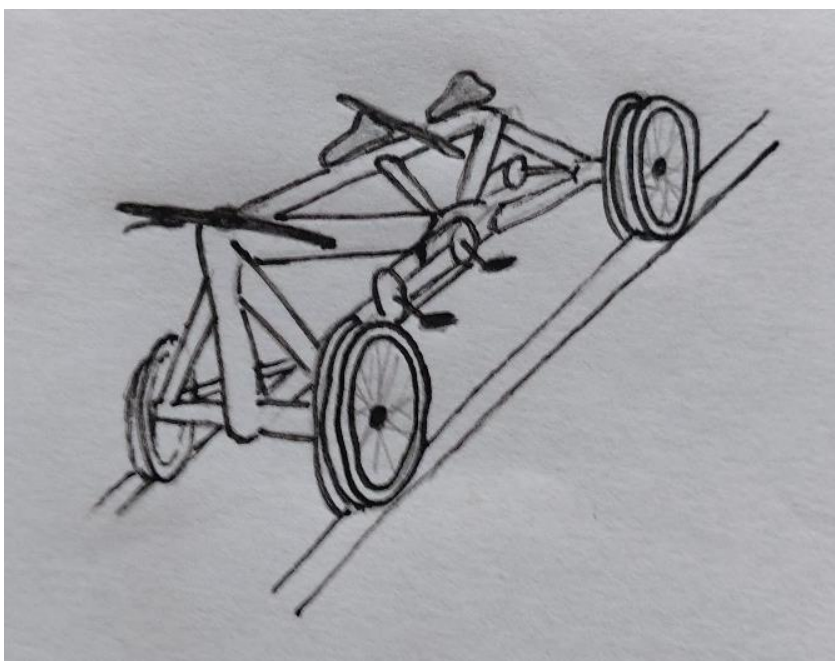
Koncepční návrhy jsou však univerzální pro různé případy pohonů, proto uvažujme pohon od šlapání obou pasažérů s asistencí elektrického motoru, následně bude posouzeno, která koncepce a pohon jsou nejvhodnější.

První varianta je plochá konstrukce se skládacími sedadly. Pro snadný převoz musí být drezína skládací, což by řešil kloub s aretací uprostřed, díky kterému by bylo možné vozidlo zlomit, čímž by bylo dosaženo kompaktních rozměrů. Výhodou je určitě příjemný posez s opěradlem a pedály před operátorem. Bylo by ale zapotřebí komplikovaného mechanismu napínáků řetězu, který by se v tomto případě musel ve složeném stavu složit společně s polovinou konstrukce. Další nevýhodou je velký rozvor a také fakt, že konstrukce bude namáhána ve velké míře ohybovým napětím.



Obrázek 9 - Náčrt konstrukčního provedení č.1

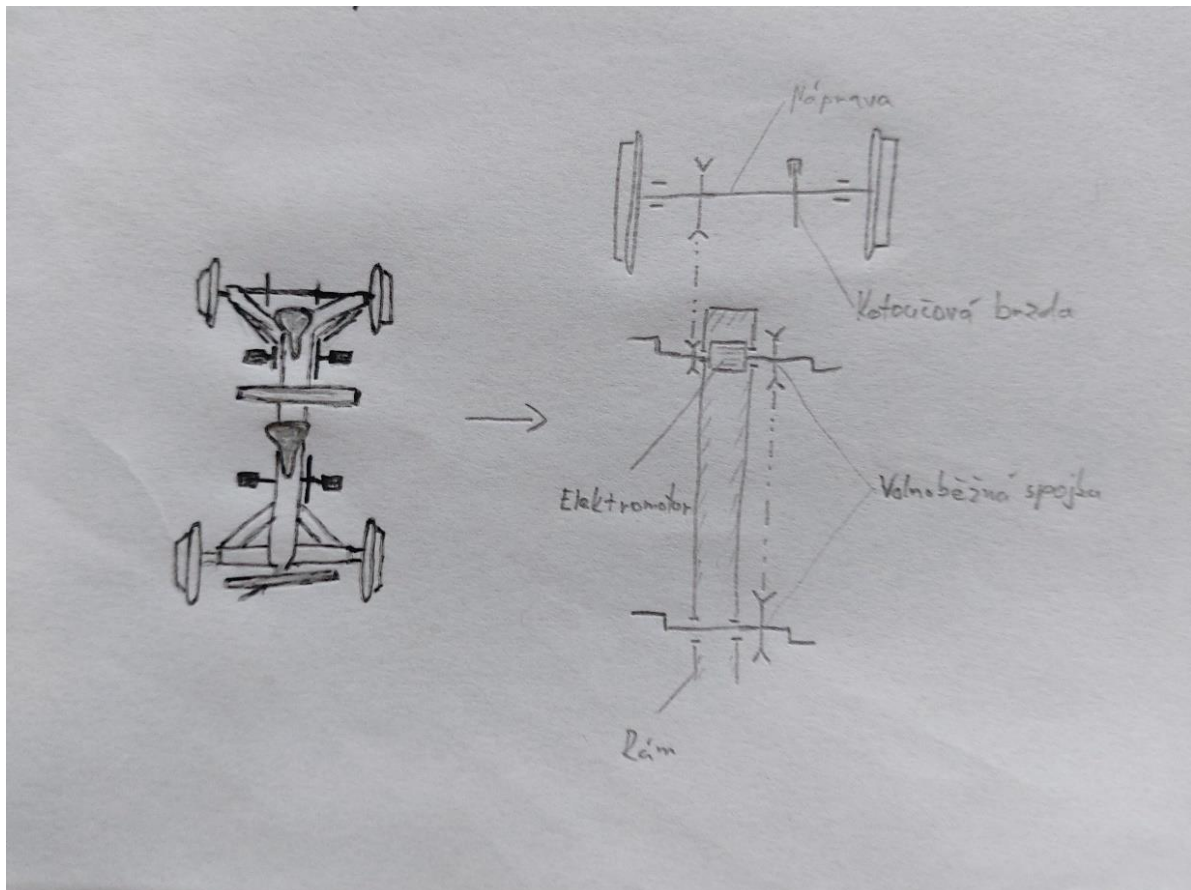
Druhá varianta se zdá být výhodnější vzhledem k poloze operátora, který je s takovou polohou seznámen už z jízdních kol. Rám je postaven vertikálně a v takovém tvaru rámu lze eliminovat, nebo alespoň výrazně omezit ohybové napětí, protože většinu zatížení zachytí pruty, které dohromady tvoří trojúhelníky. Tyto pruty budou namáhány převážně tlakovým nebo tahovým napětím. Také se vyplatí rám ve vrcholech vyztužit žebry. Nápravy a rukojeti budou demontovatelné a rám skládací pro dosažení kompaktních rozměrů pro převoz. Pro složení rámu lze využít pantů podobně jako u klasického skládacího jízdního kola. Volba tedy padá na tuto koncepci.



Obrázek 10 - Náčrt konstrukčního provedení č.2

Aby oba operátoři mohli šlapat nezávisle na sobě, musí být řetězové kolo na alespoň jedné ose pedálů vybaveno jednosměrným ložiskem. To je naznačeno ve schématickém náčrtu níže. Vhodnou volbou je pro tento případ středový motor z elektrokola pohánějící zadní nápravu a umístěný na zadních pedálech.

Přidáním jednosměrného ložiska by se však zvýšila složitost a jistě ovlivnila kompaktnost osy pedálu. Takové řešení najdeme například u dvojkola, které má obě osy pedálů napevno spojené řetězem. I v tomto případě je nejvýhodnější pozice motoru taková, jako byla zmíněna již dříve.



Obrázek 11 – Schématický náčrt

Abychom mohli rozhodnout o koncepci vozidla, musíme také prozkoumat trh elektromotorů. Na výběr je spousta modelů od spousty značek. Nejpopulárnějšími jsou motory značek Bosch, Bafang nebo Yamaha.

Následující kapitola se tedy bude věnovat právě průzkumu trhu s motory.

3.2. Průzkum trhu s motory

Při výběru motoru je nutno se kromě ceny zaměřit také na výkon a jednoduchost instalace. Protože je dnes elektrokolo trend, nabízí se na trhu dost možností od různých značek počínaje motory středovými (umístěnými ve středu kola) nebo nábojovými (umístěnými v ose zadního kola) určenými přímo k vestavbě, nebo sady umožňující konverzi konvenčního jízdního kola na elektrokolo, tzv. konverzní kity. Vhodné by bylo, aby veškerá sensorika, baterie a kabeláž byla v balení nebo snadno sehnatelná. Kvůli nutnosti vozidlo při převozu rozebrat by bylo nábojové motory nutno pokaždé odpojit, což o středových motorech neplatí.

Bafang BBS02

Jedná se o konverzní kit prodávaný pod značkami Bafang, EVBike nebo 8FUN. Je dostupný ve spoustě obchodech v Česku. Tento motor disponuje výkonem 750 W a pracuje při napětí 48 V. Maximální točivý moment tohoto pohonu je 100 Nm. Tato sada disponuje také integrovaným pedálovým senzorem a integrovanou řídicí jednotkou. Je uzpůsoben pro montáž do středů o průměrech 68-72 mm a váží 4,6 kg. Tato sada je jakousi střední třídou výrobce a jeho cena se pohybuje kolem 16 000 Kč v případě koupě samotného motoru. Lze jej však zakoupit jako celou sadu i s rámovou baterií. V takovém případě se cena pohybuje okolo 25 000 Kč. [15]



Obrázek 12 – Pohon BBS02

Bosch Performance line CX

Dle výrobce se jedná o pohon pro náročnější uživatele. Je schopný vyvinout točivý moment až 75 Nm a disponuje výkonem 250 W při napětí 36 V. Bavíme se o lehkém motoru, který váží pouze 2,9 kg. Pohon není konverzním kitem, vyžaduje proto specifické montážní body a tvary rámu, aby mohl být správně upevněn. Má také svou vlastní osu. Motory Bosch nejsou dobře dostupné v českých obchodech, které nabízejí pouze kompletní kola s tímto motorem. Na Ebay se však prodávají za cenu kolem 700 €, tedy necelých 17 000 Kč. Cenově spadá s předchozím pohonem do stejné kategorie, to se však nedá říct o parametrech. [13] [14]



Obrázek 13 – Pohon Performance line CX

Bafang M420

Značka Bafang se nespécializuje však pouze na konverzní kity, v posledních letech je jedním z největších výrobců komponentů elektrokol vůbec. Jako zástupce středového motoru této značky jsme vybrali motor M420. Co se parametrů týče, podobá se již zmíněnému motoru Bosch. Jedná se opět o jednotku s vlastní osou a specifickými montážními body, které se však zdají být jednodušší než právě u předchozího pohonu. Motor má výkon 250 W, pracuje při napětích 36, 43 a 48 V. Maximální točivý moment je 80 Nm. Oproti právě zmiňovanému motoru Bosch je o půl kilogramu těžší, při jinak podobných parametrech je značně snazší jej sehnat a zároveň je levnější. Cena se pohybuje okolo 10 000 Kč. [16] [17]



Obrázek 14 – Pohon M420

Zadní pohony výrobce Grand Rock

Zajímavou alternativou jsou zadní pohony od výrobce Grand Rock. Vyskytují se na trhu s výkony od 250 W až do 1000 W. Silnější varianty slibují zvládnutí větších stoupání bez nutnosti přišlapu. Nevýhodou zadních pohonů je, že nemají tlakové senzory právě na detekci přišlapu. Výhodou však je, že by bylo možno použít dva motory (v každém zadním kole jeden), také by tím byl rám kompaktnější. Cenově se dle různých výkonů jejich cena pohybuje mezi 4500 a 8000 Kč. [18]



Obrázek 15 – Motor Grand Rock 500 W

3.3. Návrh nastavitelnosti rozchodu

Jedním z požadavků je i proměnlivost rozchodu, aby vozidlo bylo použitelné na různých tratích. Osa kol by však neměla zásadně přesahovat ven z kola, proto se s rozchodem musí zkracovat i osa. Toho lze docílit pomocí teleskopické hřídele, nebo pomocí hřídele s odnímacími konci. Kvůli složitosti výroby, ale i nastavení rozchodu se nezdá být teleskopická hřídel vhodnou volbou, při nastavování by totiž bylo nutno přesně měřit rozchod během nastavování, následná aretace by musela být provedena nějakým svěrným spojem. Řešení s odnímatelnými konci hřídele by bylo uzpůsobeno na standardní rozchody v rozmezí 600 až 1435 mm, což zaručuje jednoduchost nastavení.

Dalším problémem k řešení jsou ramena zajišťující osy kol. Mohla by být pevná, to by ale znamenalo, že by byla přizpůsobena nejužšímu možnému rozchodu a při větších rozchodech by z nich hřídel zásadně přesahovala a byla by tak namáhána ohybem. Možné řešení tohoto problému je, že by ramena byla uložena v pantech, a právě rotací kolem osy pantů by se měnil rozchod, ale také výška, což může být nežádoucí.

Důležité je, aby bylo umožněno nastavení na rozchody vyskytující se v Česku, kterými jsou rozchody 600 mm, 760 mm, 1000 mm a 1435 mm. Bylo by proto praktické mít pro tyto rozchody připravenou jakousi formu aretace, aby právě tyto rozchody byly jednoduše nastavitelné a aby uživatel nemusel pokaždé tyto rozměry odměřovat.



Obrázek 16 - Rozdíl mezi úzkorozchodnou a běžnou železniční tratí [19]

Varianta A

První variantou, kterou se budeme zabývat je právě varianta s pohyblivými rameny. Jak už bylo uvedeno výše, rotací ramen kolem osy pantu se mění rozchod, ale bohužel i výška.

Částečným řešením změny výšky může být vyrobení dvou sad ramen, jednu pro užší a druhou pro širší rozchody. Vyrobit se v každém případě musí i dvě sady náprav, protože rozdíl rozchodů je větší než minimální požadovaný rozchod, proto nepřipadá v úvahu teleskopická náprava. Uživatel by tedy měl možnost si vzít s sebou pouze jednu sadu ramen a náprav podle toho, zda s vozidlem pojedete na úzkých nebo širokých rozchodech.

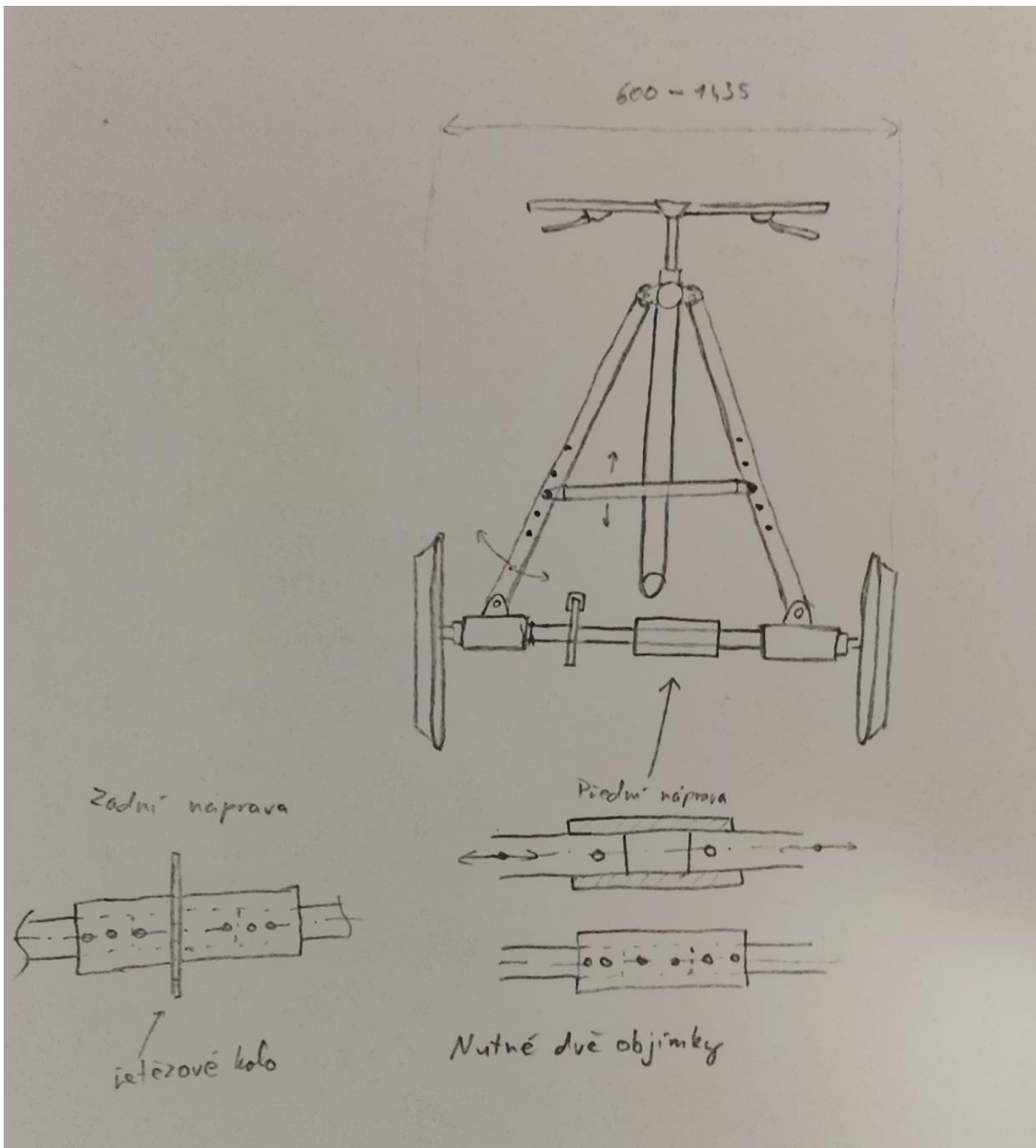
Dalším možným řešením je namontovat ramena k rámu pod ostřejším úhlem vzhledem k trati, změna výšky by tak byla zredukována, ale i tak by zůstaly dvě sady náprav.

Pro zajištění stability je mezi rameny vzpěra, která by ideálně byla přidělaná k rámu. Vzpěru lze namontovat dle šířky rozchodu v různých výškách do děr v ramenech.

Náboje nápravy jsou vůči rameni také otočné, aby mohly být při montáži nápravy souosé.

Náprava je rozdělena na 2 díly spojené objímkou s dírami na čep nebo šroub. Zadní náprava by byla řešena stejně, ale s řetězovým kolem na objímce.

Tato varianta se zdá být složitější než následující, ale nebyla by při výrobě potřeba přísných tolerancí, protože všechny členy jsou přidělané rotačně a drobné nepřesnosti neovlivní smontovatelnost ani nastavitelnost.



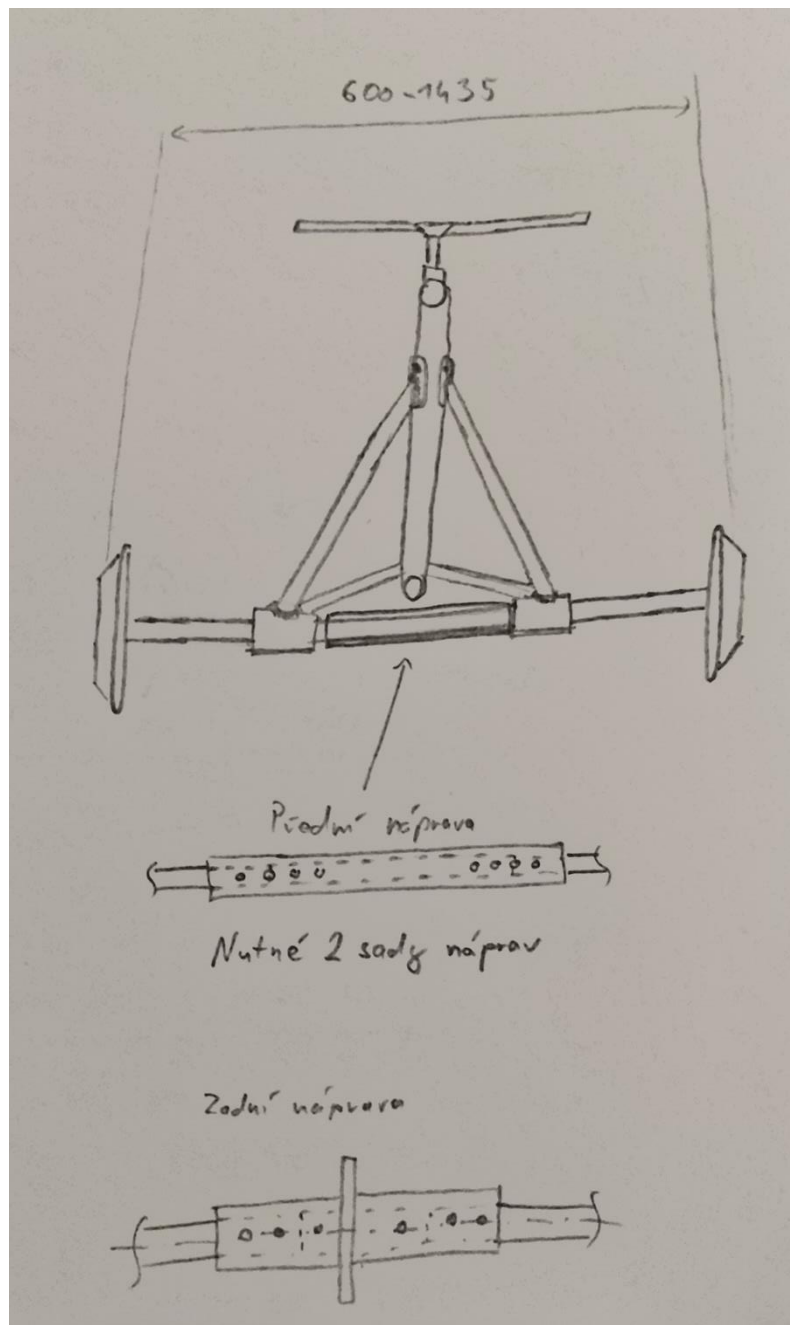
Obrázek 17 - Náčrt varianty s pohyblivými rameny

Varianta B

Druhá varianta má pevná, respektive demontovatelná nepohyblivá ramena. Změnou rozchodu se nezmění výška, ale při širokých rozchodech by konce náprav značně přesahovaly z náboje a nastalo by tak velké riziko průhybu náprav.

Nestačí ale jen posunout kolo, protože by z nich mohly vystupovat nápravy daleko za hranice trati. Konce náprav by tak musely být odnímatelné, nebo by bylo opět možno použít předešlý koncept s objímkami a alespoň dvěma sadami náprav.

Členy musí být geometricky přesné, protože budou montovány napevno a nebudou schopny vyrušit nepřesně lícující spoje. Nabízí se však i možnost vyřešit tuto variantu s podobnými typy spojů jako předchozí, avšak bez možnosti pohybu ramen. Takto by byla zajištěna alespoň souosost nábojů.



Obrázek 18 - Náčrt varianty s pevnými rameny

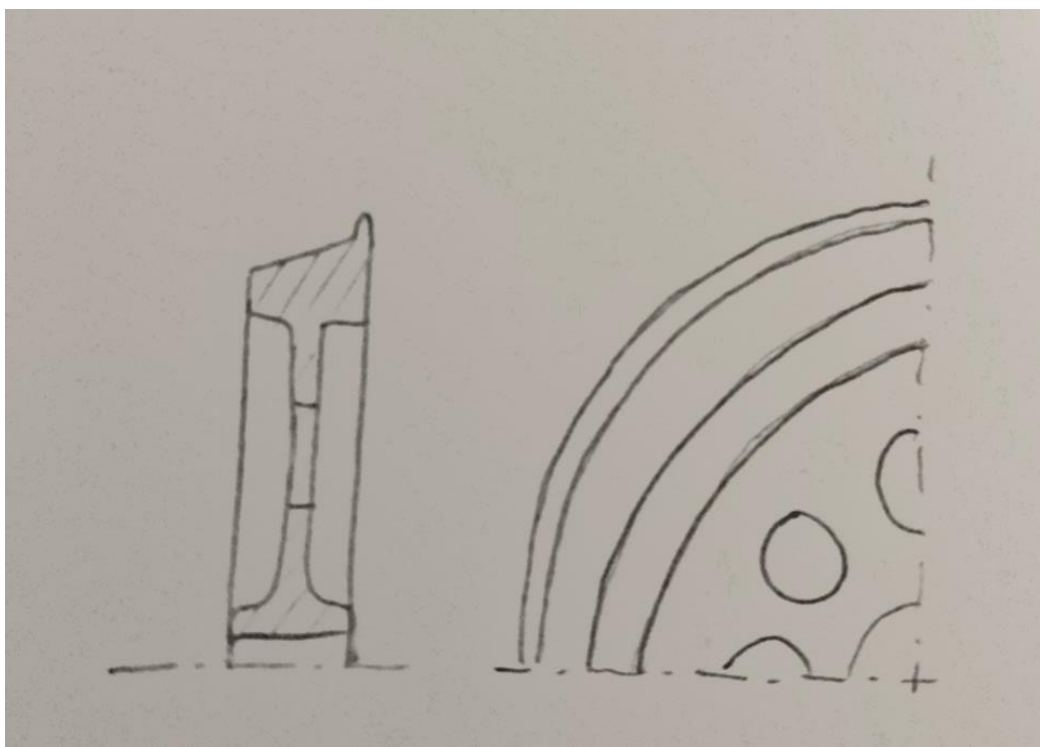
3.4 Návrh řešení kol

Vozidlo bude disponovat dvěma dvojkolími, kola ale nebudou nalisována na jedné nápravě, resp. části nápravy, protože nápravy budou spojeny objímkami (viz. předchozí bod). Kolo musí mít standardní profil, aby jej na železnici bylo možno bezpečně používat. My tedy budeme rozhodovat o koncepčním řešení a později i o velikosti.

Zde se nabízí dvě možnosti řešení, tedy kolo s vyměnitelným věncem a klasické kolo tvořené jedním kusem materiálu.

Varianta A

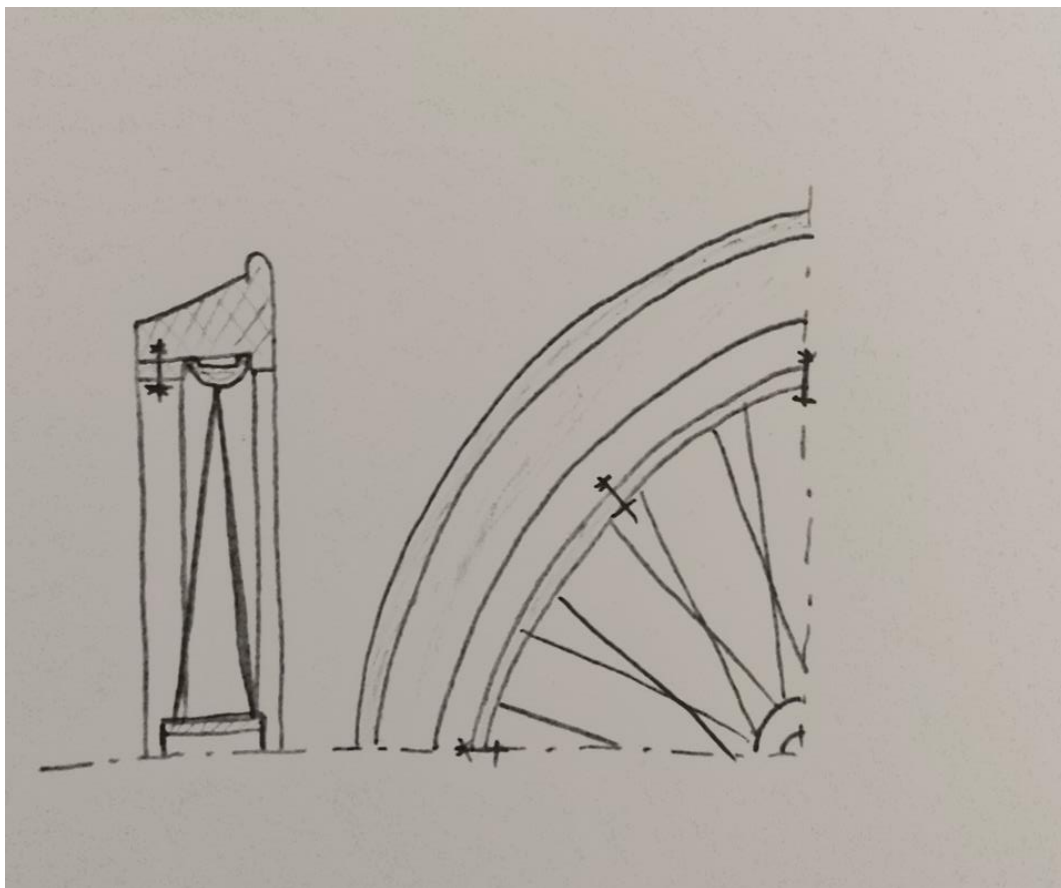
Celistvé kolo je, jak již bylo uvedeno, tvořeno jedním kusem materiálu. Má požadovaný profil a ve středu odvrtné díry pro odlehčení. Jejich nevýhodou by mohla být hmotnost (záleží na materiálu) a také fakt, že by se při výměně muselo vyhodit celé kolo.



Obrázek 19 - Náčrt celistvého kola

Varianta B

Vyměnitelný věnec by byl lepší v tom, že by se nemuselo při výměně celé kolo vyhodit a také může být věnec vyrobený z jiného materiálu než ráfek. Může být použit obyčejný disk s výpletem jako u jízdních kol nebo koloběžek. Na disk přijde právě věnec, který by byl zajištěn vnitřním kroužkem přišroubovaným po obvodu. Věnec by tak mohl být vyroben např. z plastu, což by celé kolo udělalo skutečně lehké.



Obrázek 20 - Náčrt kola s vyměnitelným věncem

3.5. Vhodné materiály

Při vypracovávání užšího výběru materiálů součástí šlapací drezíny je potřeba zohlednit několik vlastností. U rámu chceme, aby byl tuhý a lehký. Pro nápravy je třeba použít materiál s dostatečnou pevností, s největší pravděpodobností použijeme ocel. Kola musí odolávat opotřebením, nebo musí být alespoň zajištěna jejich snadná výměna. Velkým faktorem je také cena materiálu.

Pro standardní součásti, kterými jsou brzdy, sedla, pedály, řetězová kola a samotný řetěz se nemusíme volbou zabývat dlouho, protože použijeme nějaké jejich sériově vyráběné varianty. Zajímá nás hlavně aby brzdy měly dostatečný brzdný účinek a aby řetěz vydržel namáhání na něj vynaložené, což splní obyčejné řetězy jízdních kol.

Rám

Pokud bychom chtěli co nejlepší rám s co neoptimálnější tuhostí a pevností a aerodynamickým výkonem, mohli bychom vyrobit rám z karbonových vláken. Tento materiál umožňuje tvorbu profilu takového, aby dosáhl právě nejlepšího kompromisu mezi zmíněnými veličinami. Tato možnost je velice drahá, zvláště kvůli procesům výroby, kdy je třeba vyrobit speciální formy.

Na výrobu rámu jízdních kol se častěji využívá hliník, konkrétně hliníkové slitiny. Nejběžnější typy hliníkových slitin používaných na rámy jízdních kol jsou hliníkové slitiny řady 6000 (např. Al6061 nebo Al6066) a hliníkové slitiny řady 7000 (např. Al7005 nebo Al7075).

Hliníkové slitiny z řady 6000 jsou známé pro svou dobrou kombinaci pevnosti, hmotnosti a zpracovatelnosti. Jsou velmi populární pro výrobu rámu jízdních kol střední třídy a některých vyšších tříd.

Hliníkové slitiny z řady 7000 mají ještě vyšší pevnost než slitiny z řady 6000, což umožňuje vytvoření rámu s ještě lepší tuhostí a odolností proti únavě. Rám z hliníkové slitiny z řady 7000 je obvykle lehčí než z hliníkové slitiny z řady 6000, ale zároveň je často dražší.

Rozhodnutí, kterou hliníkovou slitinu použít, závisí na požadavcích výrobce, zaměření jízdního kola a také na cenovém rozpočtu. Výrobci mohou také upravovat složení hliníkových slitin a provádět další zpracování, aby dosáhli požadovaných vlastností rámu.

Dalšími z často využívaných materiálů pro výrobu rámu jízdních kol jsou oceli. Existuje mnoho různých typů oceli používaných pro výrobu kolových rámu, každá s jinými vlastnostmi a cenovými hladinami.

Mezi nejčastěji používané typy oceli pro výrobu kol patří chromoly (CrMo) a uhlíková ocel. Chromoly jsou slitiny oceli s obsahem chromu a molybdenu, které dodávají oceli vysokou pevnost a odolnost proti korozi. Tyto vlastnosti umožňují výrobu lehkých a pevných rámových konstrukcí. Uhlíková ocel je dalším populárním materiálem pro rámy jízdních kol, který se vyznačuje vysokou pevností a relativně nízkou hmotností.

4. Volba řešení

4.1. Volba konstrukce rámu

V první řadě jsme rozhodli o ponechání možnosti příšlapu obou operátorů. Toto bude zajištěno bez možnosti nezávislého šlapání, obě osy pedálů budou spojeny řetězem a budou mít vůči sobě konstantní převod.

Porovnáváme plochou konstrukci (viz. Obrázek 9) a vertikální konstrukci podobnou rámu jízdního kola (viz. Obrázek 10) metodou SWOT. Ta spočívá v sestavení tabulky kritérií a následné hodnocení variant od 1 do 4. Každé hodnocení je přenásobeno indexem.

Plochá konstrukce nabízí pohodlný posez a dobrou skladnost, bylo by ale komplikované řešit způsob přenosu kroutícího momentu na nápravu, protože řetězy by se od vyvýšených pedálů musely vést pod sedadlem po několika vložených řetězových kolech. Tato konstrukce nemá dobrou tuhost, což způsobuje, že celá konstrukce se bude konstantně ohýbat pod vahou pasažérů. Nastavování rozchodu by nebylo jednoduché a při zohlednění faktu, že nejužší rozchod, na kterém má být vozidlo schopno jezdit, je 600 mm, tak zjistíme, že to negativně ovlivní komfort posádky.

Mezitím druhá konstrukce přináší posez stejný jako na jízdním kole. Skladnost lze zajistit umožněním zlomení konstrukce na více místech. Stejně tak jako posez sdílí s jízdním kolem i uspořádání hnacího ústrojí. Tuhost tohoto rámu bude rozhodně lepší než v předchozím případě, protože v rámu jsou členy přenášející tlakové a tahové napětí (využití principu prutové soustavy). Tento rám bude pravděpodobně o něco těžší, ale nabízí větší flexibilitu řešení možných problémů.

Hodnocení konstrukcí rámu metodou SWOT					
Kritéria		Varianty a jejich hodnocení			
	Index	Plochá konstrukce		Vertikální konstrukce	
Tuhost	2	4	8	2	4
Jednoduchost	3	4	12	2	6
Možnost nastavení rozchodu	3	5	15	2	6
Skladnost	2	4	8	4	8
Komfort	2	3	6	4	8
Celkové hodnocení			49		32

Tabulka 1 - Hodnocení konstrukcí rámu metodou SWOT

Volíme tedy konstrukci podobnou jízdnímu kolu vzhledem k výhodám, mezi které mimo jiné patří i jednoduchost konstrukce a s ní spojená nízká náročnost výroby. Rozhoduje také fakt, že koncepce je přizpůsobivější úpravám při výskytu nečekaných komplikací.

4.2. Volba motoru

Při výběru motoru byla opět sestavena tabulka kritérií. Každý motor bude dle těchto kritérií zhodnocen. Každé kritérium má vlastní index, kterým se násobí obdržené hodnocení. Motory budou tentokrát hodnoceny na stupnici od 1 do 5. Mezi posuzovaná kritéria patří výkon, hmotnost, cena (v poměru k výkonu), jednoduchost montáže, sensorika (myšleno zejména tlakové senzory) a manipulace s vozidlem s již nainstalovaným motorem.

Hodnocení motorů metodou SWOT									
Kritéria		Varianty a jejich hodnocení							
	Index	Bafang BBS02		Bosch Performance line CX		Bafang M420		Grand Rock	
Výkon	2	5	10	2	4	2	4	4	8
Hmotnost	1	2	2	4	4	3	3	4	4
Cena	2	4	8	2	4	4	8	4	8
Jednoduchost montáže	3	5	15	2	6	2	6	4	12
Senzorika	1	4	4	4	4	4	4	1	4
Manipulace	3	5	15	5	15	5	15	3	9
Celkové hodnocení			54		37		40		45

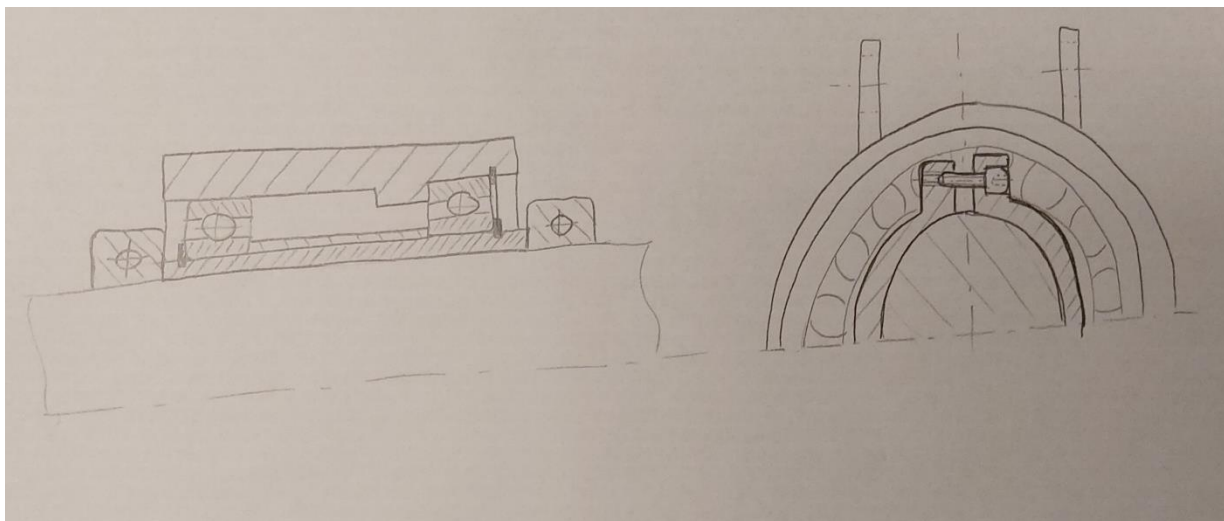
Tabulka 2 - Hodnocení motorů metodou SWOT

Po zhodnocení pohonů metodou SWOT jsme zjistili, že nejvýhodnější volbou pro stavbu šlapací drezíny je konverzní kit Bafang BBS02. Jak již bylo zmíněno, tento motor se prodává v sadě s baterií a příslušnou sensorikou, a to vše za rozumnou cenu. Protože se jedná o konverzní kit, montáž je velice jednoduchá, protože se motor pouze namontuje do osy stejně, jako by se namontovaly pedály.

4.3. Volba nastavitelnosti rozchodu

Zde vybíráme mezi variantou s pohyblivými rameny (viz. Obrázek 17) a variantou s pevnými rameny (viz. Obrázek 18). Nevýhodou pevných ramen je, že kolo se nachází na převislém konci hřídele a hřídel by byla namáhána na ohyb více, než bychom chtěli. Zvolili jsme proto verzi s pohyblivými rameny. Ta mimo lepšího rozložení zatížení zaručuje smontovatelnost i kdyby se při výrobě vyskytla nějaká nepřesnost. V obou případech musí být k vozidlu dvě sady ramen pro užší a širší rozchody, tedy jedna pro rozchody 600-1000 mm a jedna pro rozchody 1000-1435 mm. Hřídel bude dvojdílná a spojená uprostřed svěrnou spojkou, která umožní nastavení jakéhokoliv rozchodu. Pro běžné rozchody budou na hřídelích značky v podobě malých zářezů, které se pro nastavení daného rozchodu posunou k hraně spojky.

Ramena budou příčně spojena podpěrnou trubkou, která bude navíc připojena k rámu, aby za jízdy ramena neměla tendenci se ohýbat dopředu nebo dozadu. Tato výztuha, a tedy i ramena bude možno nastavit pro dva zvolené rozchody (pravděpodobně nejběžnější) a pro nastavení ostatních rozchodů poslouží již zmíněná svěrná spojka a konce hřídele budou vysunuty ven z náboje a budou tvořit převislý konec. Uvnitř náboje bude na ložiskách uložená trubka, ve které bude volně posouvateľná hřídel od kol. Ta se dále upevní svorkami z každé strany tak, aby svorky doléhaly na hranu trubky a zamezily tak relativnímu posuvu hřídele vůči trubce. To znamená, že i brzdový kotouč bude umístěn na trubce, aby se neposouval vůči náboji.



Obrázek 21 - Náčrt řešení rozebiratelného zajištění hřídele vůči trubce

4.4. Volba řešení kol

Byly posouzeny varianty celistvého kola (viz. Obrázek 19) a kola s vyměnitelným věncem (viz. Obrázek 20.) Celistvé kolo má vyšší hmotnost a při jeho výrobě by vzniklo velké množství kovového odpadu. Zvolili jsme kolo s vyměnitelným věncem, na které stačí koupit standardní ráfek s výpletem. Věncem by byl vyroben z nylonu, který se používá i na kolečkách paletových a nákladních vozíků s vysokou nosností. Tato kombinace věnce a ráfku se vyznačuje nízkou hmotností a dostatečnou únosností. Čtyři kola zaručeně unesou hmotnost dvou urostlých lidí.

4.5. Volba materiálu

Rám

U rámu nejdříve vybíráme mezi hliníkem a ocelí. Oceli jsou levnější a bývají obecně snáze svařitelné než hliník. Hliník je ale známý zejména tím, že se jedná o lehký materiál. Nízká hmotnost je klíčová, chceme-li aby s vozidlem šlo snadno manipulovat. Jeho pevnost je dostatečná.

Zbývá nám rozhodnout, který typ hliníku zvolíme. Nejpoužívanějšími slitinami jsou slitiny Al6061, Al6066, Al7005 nebo Al7075. Slitiny řady 7000 jsou výrazně lehčí, ale zároveň značně dražší než slitiny řady 6000. Rozhodující faktor je i svařitelnost, kterou má řada 6000 lepší.

Právě díky ceně a svařitelnosti volíme hliníkovou slitinu řady 6000, konkrétně Al6061 (podle evropské normy AW-6061). Ta se řadí mezi tzv. duraly. Má také velmi dobrou odolnost proti korozi. Její mez pevnosti v tahu činí až 276 MPa, modul pružnosti v tahu 68,9 GPa a modul pružnosti ve smyku 26 GPa.

Náprava

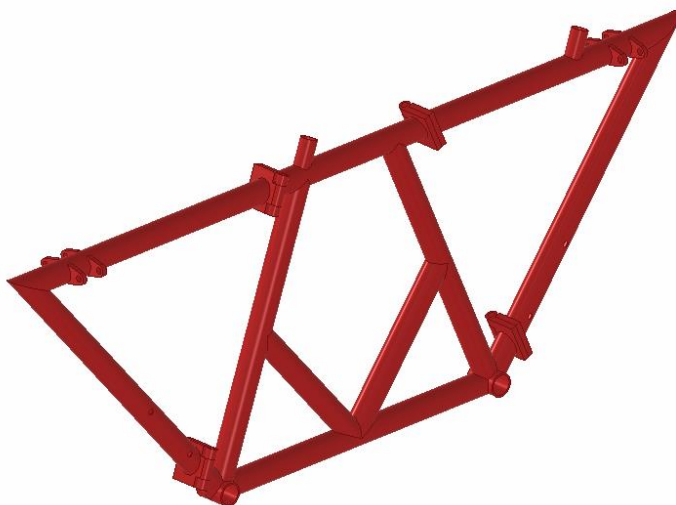
Pro nápravu využijeme nerezovou ocel. Z nerezových ocelí se vyrábí osy kol motocyklů, protože se pyšní vysokou odolností proti korozi, vysokou pevností, ale i tvrdostí. Konkrétně volíme nerezovou ocel ČSN 17349: X5CrNi18-10. Minimální mez pevnosti je 540 MPa, mez kluzu pak 230 MPa. Tyto parametry nás budou zajímat později, protože budeme pro hřídel provádět pevnostní kontrolu.

5. Konstrukční proces vybrané varianty

5.1. Konstrukce rámu

Náš rám je vyroben z trubek o průměru 42 mm a tloušťce stěny 2 mm z hliníku AL6061. Jak již bylo řečeno, rám navrhujeme tak, aby jeho konstrukce přenášela co nejvíce zatížení ve formě tahového nebo tlakového napětí. Využito bylo tedy principu podobného prutové soustavě, tedy konstrukce taková, aby tvořila polygony.

Rám lze také na dvou místech zlomit, tím se jeho délka pro převoz zmenší o více než polovinu.



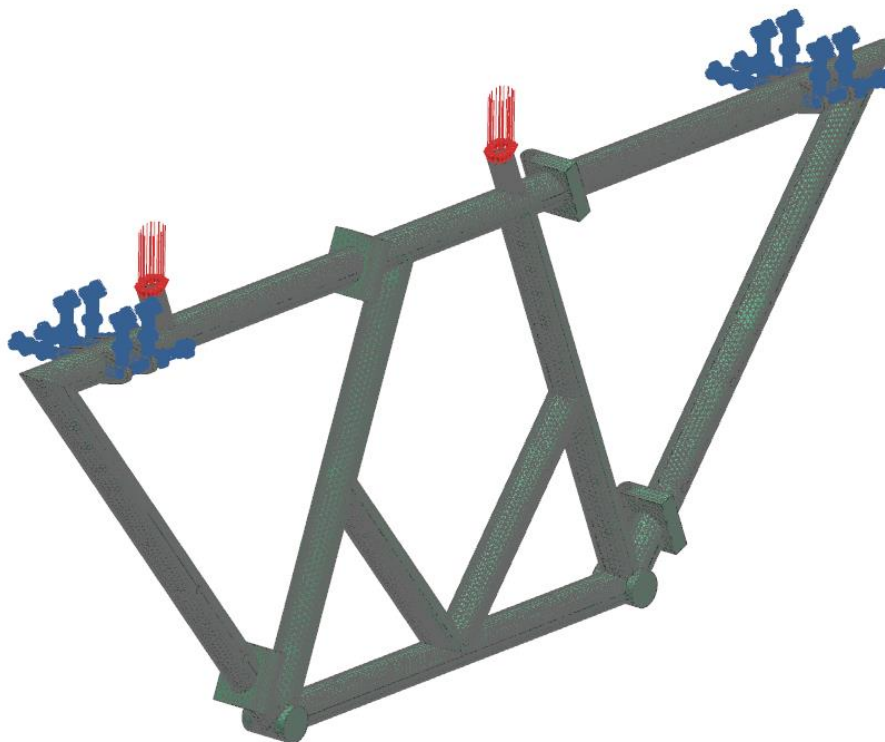
Obrázek 22 - Rám v rozloženém stavu



Obrázek 23 - Rám ve složeném stavu

5.2. Kontrola rámu pomocí metody konečných prvků (MKP)

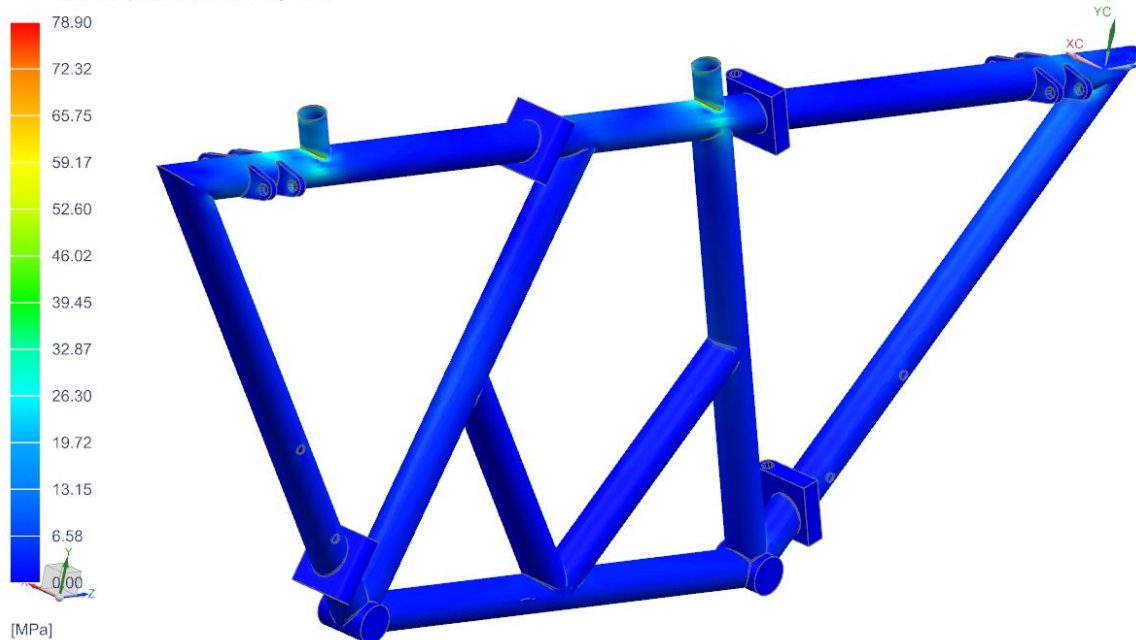
Abychom se ujistili, že rám je dostatečně pevný, podrobili jsme jej simulaci napětí. Velikost sil jsme zvolili jako ekvivalent hmotnosti dvou urostlých lidí, tedy 1200 N na dvou místech. Rám byl zavazben v úchytech, ve kterých budou pomocí čepů uchycená ramena.



Obrázek 24 - Silové účinky a vazby rámu

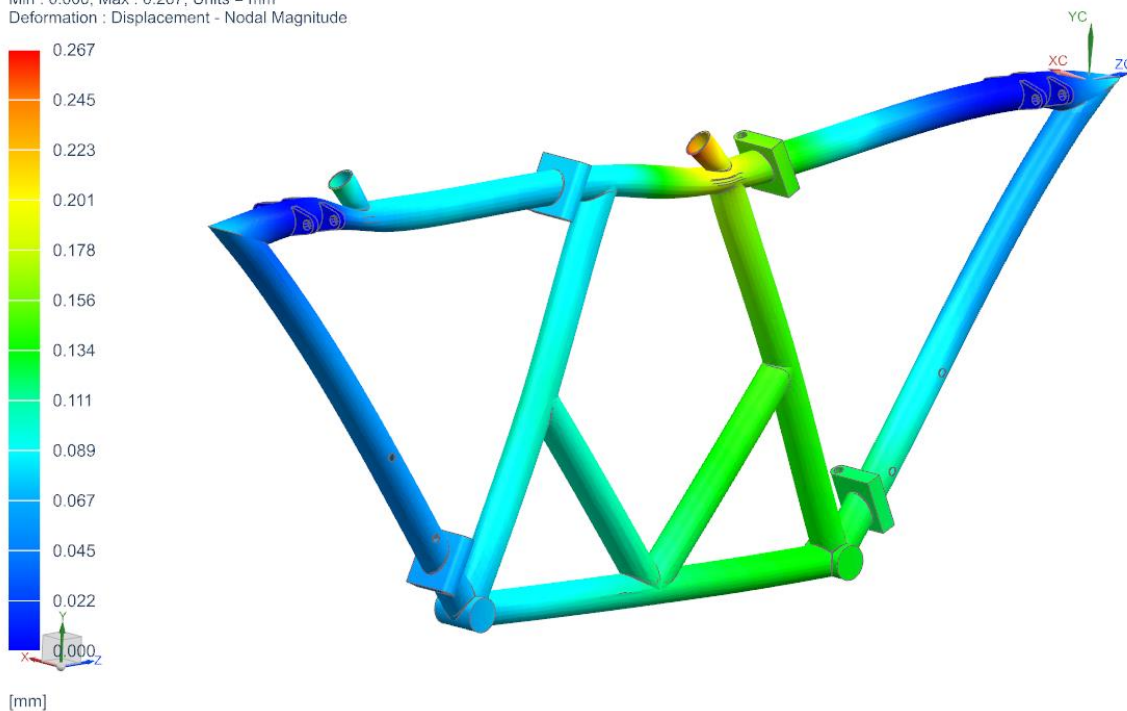
Zjistili jsme, že maximální hodnota napětí činí 78,9 MPa a maximální deformace 0,236 mm. Z toho vyplývá, že rám má větší únosnost, než je požadováno, navíc není pravděpodobné, že někdy poveze dva operátory s hmotností 120 kg. Rozložení napětí je vizualizováno na obrázku 25, stejně tak na obrázku 26 deformace, které jsou v měřítku zvětšeny.

Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
 Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
 Min : 0.00, Max : 78.90, Units = MPa
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 25 - Vizualizace napětí

Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
 Displacement - Nodal, Magnitude
 Min : 0.000, Max : 0.267, Units = mm
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

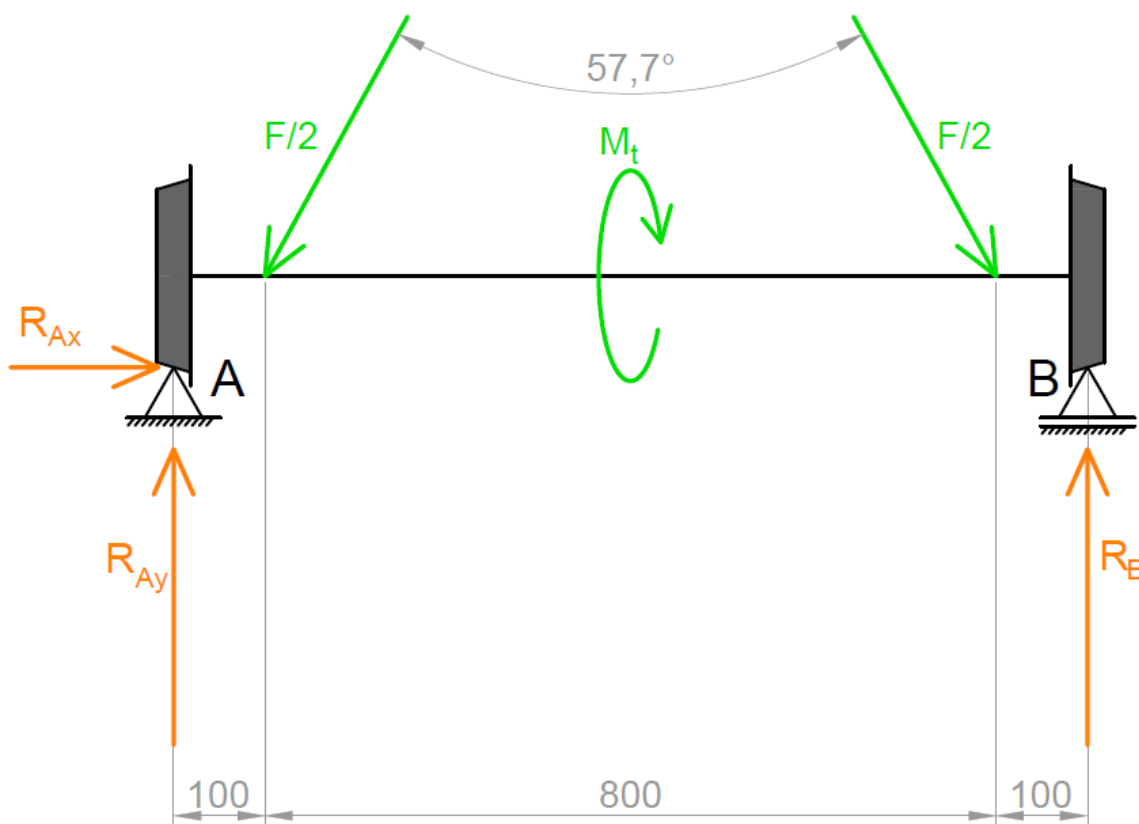


Obrázek 26 - Vizualizace deformací v měřítku

5.3. Návrh a kontrola hřídele

Při výpočtu hřídele zohledňujeme jak tíhu urostlé osoby, jako při kontrole rámu, tak i hmotnost samotného rámu. Uvažujeme, že každý hřídel je zatížen tíhou jedné osoby a polovinou tíhy rámu. Zadní hřídel je navíc zatížen točivým momentem jak od elektromotoru, tak od operátorů. Každé rameno přenáší polovinu celkové tíhy na hřídel. Čím užší je rozchod, tím menší je úhel svíraný rameny a velikost svislé složky síly se zvyšuje, zatímco podélné složky se vždy vyruší. To platí pro obě sady ramen pro nastavení rozchodů, protože v maximálním a minimálním nastavení svírají úhly skoro stejné. Hřídel počítáme jako nosník na dvou podporách s dvěma působícími silami. Pro předběžný výpočet nebudeme uvažovat, že hřídele jsou spojeny svěrnou spojkou.

Tíhu osoby volíme opět 1200 N a hmotnost rámu byla změřena pomocí funkce programu Autodesk Inventor. Hmotnost rámu je 6 kg, uvažujeme tedy zatížení tíhou 60 N. Maximální točivý moment zvoleného motoru činí 100 Nm a zapomenout nesmíme ani na točivý moment vyvinutý člověkem. Odhady expertů udávají, že elitní cyklista produkuje točivý moment přibližně 1,5 Nm na 1 kg vlastní váhy. Celkové zatížení dvou operátorů o hmotnosti 120 kg se schopnostmi profesionálního cyklisty nám dělá dalších 360 Nm. Všechna tato zatížení jsou z důvodu dostatečného dimenzování vyhnána do extrému. Počítáme s tím, že drezína je ve svém nastavení pro nejužší rozchod, tedy vertikální složky sil budou největší. Úhel svíraný rameny při tomto nastavení je $57,7^\circ$ při nastavení na rozchod 1000 mm. Působíště sil se nacházejí uprostřed náboje, vzdálenosti jsme odměřili z modelu. [20]



Obrázek 27 - Schéma řešeného nosníku

Stanovení zatížení:

$$F = \frac{2 \cdot G_{\text{člověk}} + G_{\text{rám}}}{2} = \frac{2 \cdot 1200 + 60}{2} = 1230 \text{ [N]}$$

$$M_t = 2 \cdot M_{\text{člověk}} + M_{\text{motor}} = 2 \cdot (120 \cdot 1,5) + 100 = 460 \text{ [Nm]}$$

Výpočet reakcí:

$$\sum F_{ix} = 0 \quad R_{Ax} - \frac{F}{2} \cdot \sin\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) + \frac{F}{2} \cdot \sin\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) = 0 \rightarrow R_{Ax} = 0$$

$$\sum F_{iy} = 0 \quad R_{Ay} - \frac{F}{2} \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) - \frac{F}{2} \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) + R_B = 0$$

$$R_{Ay} = F \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) - R_B$$

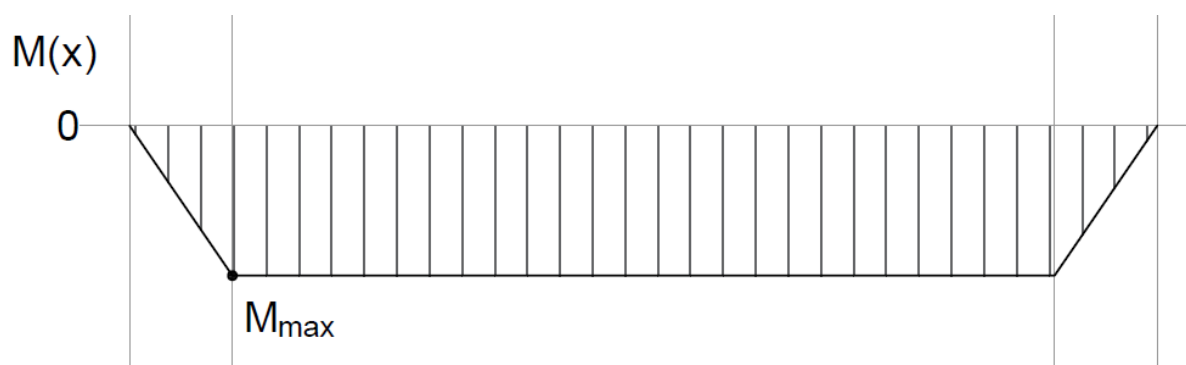
$$R_{Ay} = 1230 \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) - 538,67 = 538,67 \text{ [N]}$$

$$\sum M_{iA} = 0 \quad -\frac{F}{2} \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) \cdot 100 - \frac{F}{2} \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) \cdot 900 + R_B \cdot 1000 = 0$$

$$R_B = \frac{\frac{F}{2} \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) \cdot (100+900)}{1000} = \frac{1230 \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) \cdot (100+900)}{1000} = 538,67 \text{ [N]}$$

Průběh ohybového momentu:

Maximální ohybový moment: $M_{max} = R_{Ay} \cdot 0,1 = 53,867 \text{ [Nm]}$



Obrázek 28 - Průběh ohybového momentu

Můžeme si povšimnout, že ohybový moment nabyde svého maxima v místě působení námi zvolených vnějších silových účinků, dále mezi nimi je konstantní. Tento model nám proto stačí na výpočet pevnosti hřídele našeho dvojkolí.

Na hřídel působí jak ohybové napětí, tak i napětí v krutu vyvinuté pohonem. Kvůli zástavbě volíme průměr hřídele 40 mm. Po výpočtu jednotlivých napětí provedeme kontrolu vůči mezi kluzu, k čemuž si dopočítáme redukované napětí dle hypotézy HMH. Výslednou bezpečnost zhodnotíme a v případě nespokojenosti provedeme na hřídeli úpravu. Požadovaná velikost koeficientu bezpečnosti je 3.

Ohybové napětí:

$$\sigma_o = \frac{M_{max}}{W_o} = \frac{M_{max}}{\frac{\pi d^3}{32}} = \frac{53,867}{\frac{\pi \cdot 4^3}{32}} = 8,57 [MPa]$$

Napětí v krutu:

$$\tau_k = \frac{M_t}{W_k} = \frac{M_t}{\frac{\pi d^3}{16}} = \frac{460}{\frac{\pi \cdot 4^3}{16}} = 36,61 [MPa]$$

Redukované napětí dle hypotézy HMH:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau_k^2} = \sqrt{8,57^2 + 3 \cdot (36,61)^2} = 63,99 [MPa]$$

Materiál zvolený pro hřídel je nerezová ocel ČSN 17349: X5CrNi18-10, která má mez kluzu 230 MPa. Redukované napětí porovnáme s napětím na mezi kluzu.

$$k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red}} = \frac{230}{63,99} = 3,59$$

Výsledná bezpečnost vyšla dostatečná, můžeme ale ještě zaexperimentovat s dutým profilem, který by při stejném průměru byl značně lehčí. Požadovanou bezpečnost volíme 3 a na základě této bezpečnosti vypočítáme minimální hodnotu vnitřního průměru.

$$k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red}} \rightarrow \sigma_{red} = \frac{\sigma_k}{k} \rightarrow \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau_k^2} = \frac{\sigma_k}{k}$$

$$\sqrt{\left(\frac{M_{max}}{W_o}\right)^2 + 3\left(\frac{M_t}{W_k}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{M_{max}}{\frac{\pi(D^3 - d_{max}^3)}{32}}\right)^2 + 3\left(\frac{M_t}{\frac{\pi(D^3 - d_{max}^3)}{16}}\right)^2} = \frac{\sigma_k}{k}$$

$$d_{max} = \sqrt[3]{D^3 - \frac{k}{\pi \cdot \sigma_k} \cdot \sqrt{(32 \cdot M_{max})^2 + 3 \cdot (16 \cdot M_t)^2}}$$

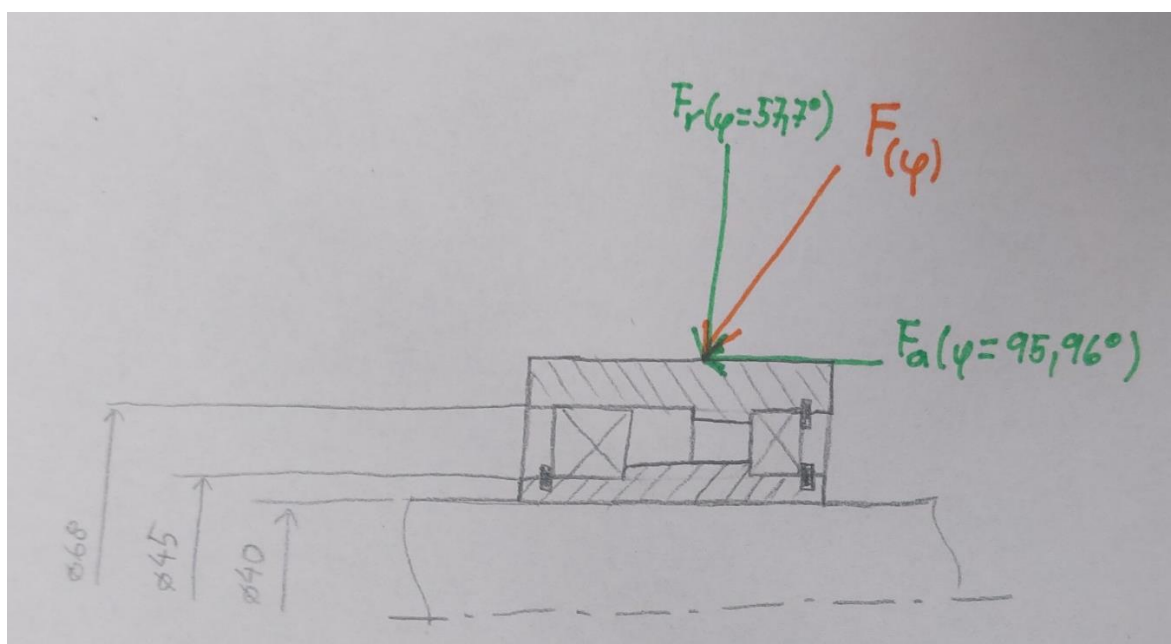
$$d_{max} = \sqrt[3]{40^3 - \frac{3}{\pi \cdot 230} \cdot \sqrt{(32 \cdot 53,867)^2 + 3 \cdot (16 \cdot 460)^2}} = 3,9 [mm]$$

Dutý průřez nedává smysl, jelikož maximální vnitřní průměr vyšel 3,9 mm, tedy stěna minimálně 18 mm tlustá. Zůstáváme tedy u volby hřídele s kruhovým průřezem.

5.4. Kontrola ložisek

Ke kontrole ložisek můžeme opět použít závislost působících sil na úhlu. Radiální síla bude opět ve svém maximu při nejužším rozchodu, ale u axiální síly je tomu přesně naopak. Uvažujme tedy radiální sílu při nejužším nastavení a axiální sílu při nastavení nejširším.

Nejmenší úhel jsme použili u předchozího výpočtu, ten činí $57,7^\circ$, největší úhel byl opět změřen z modelu a jeho velikost je $95,96^\circ$.



Obrázek 29 - Silové účinky na ložisko

Ložisko vlevo přenáší pouze radiální síly, ložisko vpravo je navíc i axiálně vodící. Jako radiální účinek můžeme uvažovat vertikální sílu stejnou, jakou jsme uvažovali ve výpočtu reakcí. Jelikož působí uprostřed náboje, přeneše každé ložisko polovinu tohoto zatížení (toto jsme si v podstatě dokázali i při výpočtu reakcí, kdy byly silové účinky také symetrické). Axiální sílu dopočítáme z úhlu $95,96^\circ$.

Radiální složka síly F pod úhlem $57,7^\circ$:

$$F_v = \frac{F}{2} \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) = \frac{1230}{2} \cdot \cos\left(\frac{57,7^\circ}{2}\right) = 538,67 \text{ [N]}$$

Radiální síla přenášená ložiskem:

$$F_r = \frac{F_v}{2} = 269,33 \text{ [N]}$$

Axiální složka síly F pod úhlem $95,96^\circ$:

$$F_a = \frac{F}{2} \cdot \sin\left(\frac{95,96^\circ}{2}\right) = \frac{1230}{2} \cdot \sin\left(\frac{95,96^\circ}{2}\right) = 456,89 \text{ [N]}$$

Trvanlivost ložiska:

$$L_h = \frac{16\,667}{n} \cdot \left(\frac{C}{F_e}\right)^m$$

Trvanlivost v hodinách určíme z tohoto vztahu, kde n je počet otáček za minutu, C je základní dynamická únosnost ložiska a F_e je ekvivalentní dynamické zatížení. Koeficient m se určuje podle dotyku, v našem případě je dotyk bodový, tedy koeficient m má hodnotu 3.

Námi zvolený motor je schopen pracovat maximálně v 83 otáčkách za minutu. Motor je ale s hřídelem spojen ozubeným převodem s převodovým poměrem 1,4, otáčky na hřídeli budou tedy větší než otáčky motoru. Otáčky na hřídeli spočítáme následujícím vztahem.

$$n_h = n_m \cdot i = 83 \cdot 1,4 = 116,2 \text{ min}^{-1}$$

Ložisko volíme od výrobce SKF, konkrétně s označením 61909 s vnitřním průměrem 45 mm a vnějším průměrem 68 mm. Z webového katalogu výrobce jsme zjistili, že jeho základní dynamická únosnost činí 14 kN a výpočtový součinitel f_0 je 15,9.

Výpočet ekvivalentního dynamického zatížení ložiska:

$$F_e = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

Koeficienty X a Y jsou katalogové hodnoty.

Výpočtové součinitele pro kuličková ložiska			
Jednořadá ložiska a dvouřadá ložiska Normální vůle			
$f_0 F_a / C_0$	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3
0,345	0,22	0,56	1,99
0,689	0,26	0,56	1,71

Obrázek 30 - Výpočtové součinitele pro kuličková ložiska

$$\frac{f_0 \cdot F_a}{C_0} = \frac{15,9 \cdot 456,89}{14\,000} = 0,519 \qquad \frac{F_a}{F_r} = \frac{456,89}{269,33} = 1,696 > e$$

Jelikož je poměr axiální a radiální síly větší než koeficient e , musíme volit koeficienty X a Y . Poměr axiální síly vynásobené výpočtovým součinitelem f_0 s dynamickou únosností nám vyšel nejbližše hodnotě 0,689, volíme tedy koeficient X 0,56 a koeficient Y 1,71. [21]

$$F_e = X \cdot F_r + Y \cdot F_a = 0,56 \cdot 269,33 + 1,71 \cdot 456,89 = 932,107 \text{ [N]}$$

Trvanlivost ložiska je pak:

$$L_h = \frac{16\,667}{n} \cdot \left(\frac{C}{F_e}\right)^m = \frac{16\,667}{116,2} \cdot \left(\frac{14000}{932,107}\right)^3 = 486\,002 \text{ [hod]}$$

Ložiska dle výpočtu vydrží 486 002 hodin, tedy je nepravděpodobné, že se ložiska za celou dobu životnosti vozidla opotřebí tak, aby musela být vyměněna.

5.5 Finální konstrukce vozidla

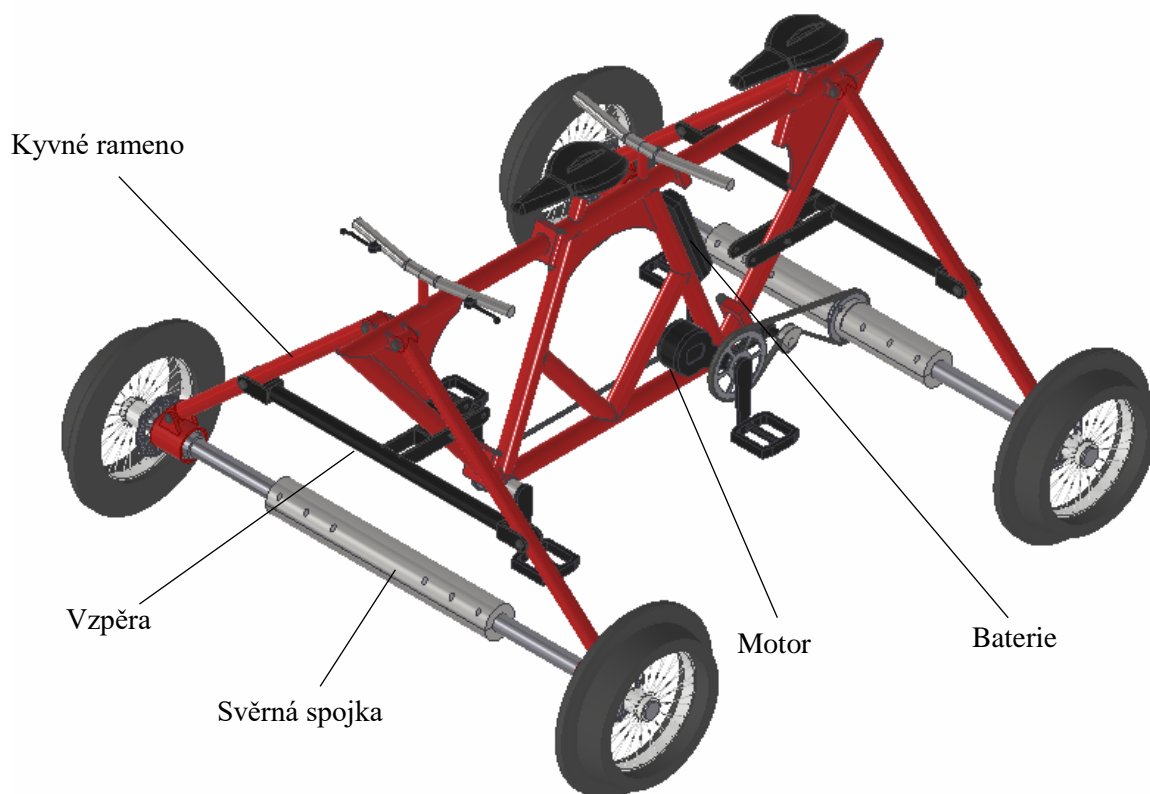
Finální verze vozidla se skládá z vyráběných komponent, kterými jsou rám, ramena, vzpěry mezi rameny, věnce kol, náboje, osy kol a jejich svěrné spojky. Zadní svěrná spojka má z důvodu umístění řetězového kola dva zářezy na každou stranu a v místě řetězového kola nemá žádnou svěrnou funkci. Rám byl ještě opatřen žebry pro další zvýšení tuhosti.

Značné množství tvoří také součásti nakupované, jimi jsou sedla, řetězová kola, řetězy, osy pedálů, říditka, brzdová soustava, motor s příslušenstvím a také ráfky s výpletem. Ty budou na hřídel připevněny za použití spoje příčným šroubem, proto bude nutná jejich malá úprava v podobě vyvrtání díry.

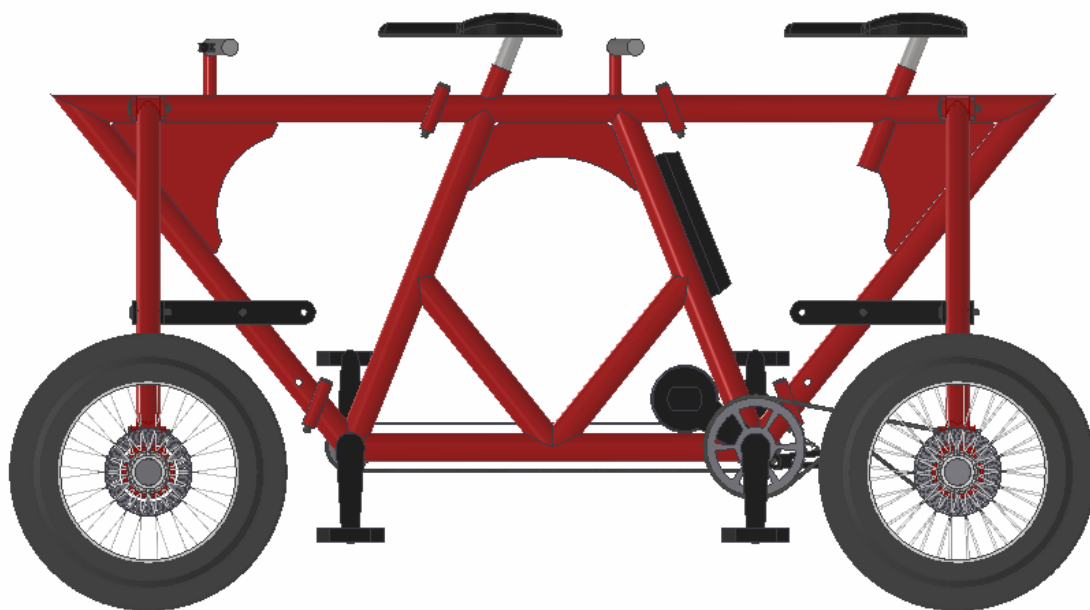
Pedály obou operátorů jsou spojeny převodem 1:1 pomocí řetězu. Na ose zadních kol je také motor, který přenáší točivý moment na zadní nápravu pomocí řetězu. Na řetězu spojícím právě motor s nápravou musí být napínák řetězu s poměrně velkým rozsahem. Při nastavování různých rozchodů se totiž osová vzdálenost řetězových kol mění a je nutno tedy udělat délku řetězu „proměnlivou“. Napínací kolo bude tedy na dlouhé páce, která bude tažnou pružinou zajišťovat neustálé předpětí na řetěz. Přístup k ovládání brzd má jen jeden operátor.

Nastavitelnost rozchodu spočívá pro dva zvolené standardní rozchody v odebrání vzpěry mezi rameny, následné natočení ramen a zajištění opět vložením vzpěry. Hřídel je opatřena zmíněnou svěrnou spojkou, díky které ji lze zkracovat a prodlužovat.

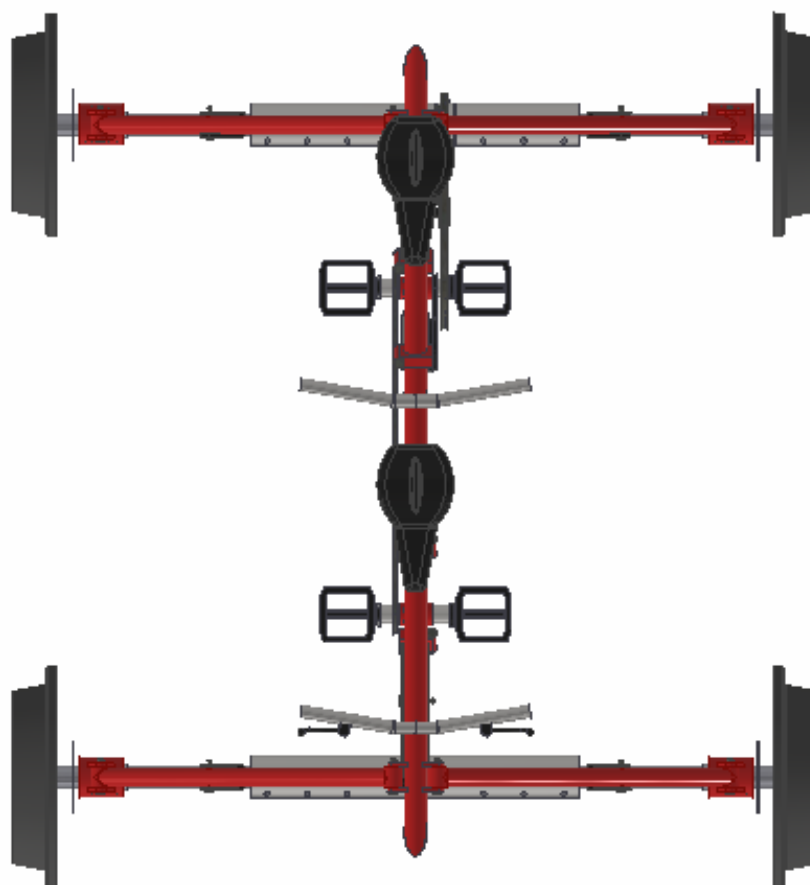
Rám lze zlomit na dvou místech, čímž lze dosáhnout kompaktních rozměrů pro převoz například v zavazadlovém prostoru automobilu.



Obrázek 31 - Pohled na celý konstrukční celek



Obrázek 32 - Boční pohled

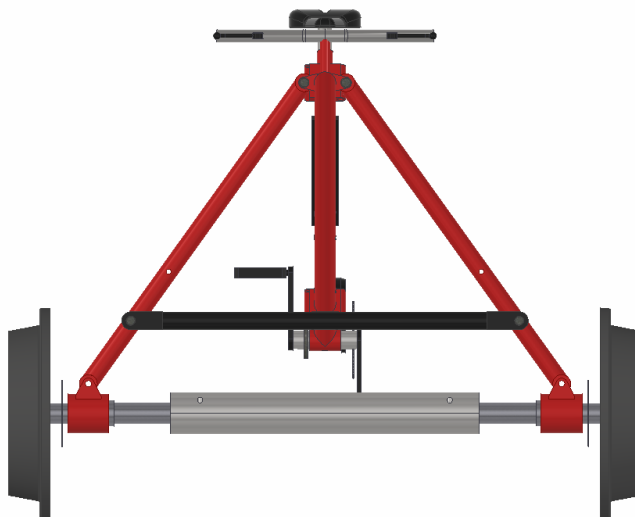


Obrázek 33 - Pohled shora

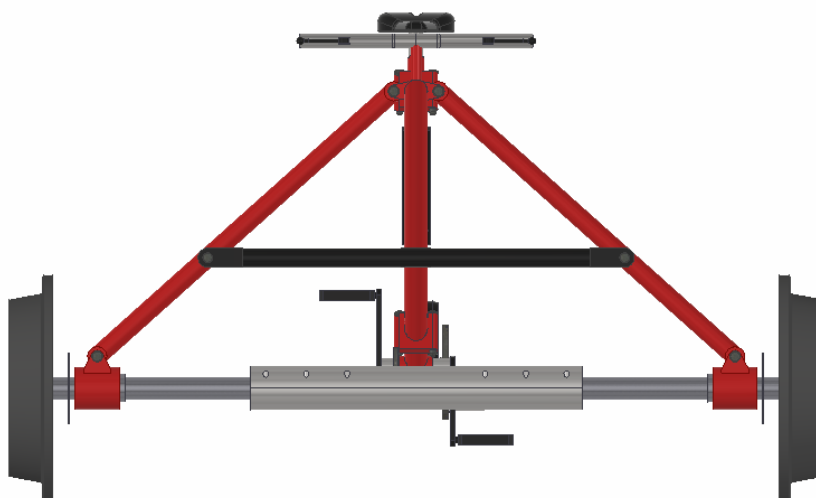
6. Závěr

Cílem této bakalářské práce byl konstrukční návrh dvoumístné drezíny s proměnlivým rozchodem za použití komponent z elektrokola. Po získání informací prostřednictvím rešeršní činnosti. Po dospecifikování požadavků byly provedeny předběžné konstrukční návrhy dostupných řešení ve formě náčrtů, ze kterých následně byla zvolena nejvhodnější varianta pro každý posuzovaný komponent. Při rozhodování bylo využito i metody SWOT ve zjednodušené podobě. Jedním z nejdůležitějších faktorů byla ovšem cena.

Po zvolení nejvýhodnějších variant řešení jsme začali s návrhem vozidla jako celku. Jako první jsme navrhli rám a princip, jakým se bude skládat pro potřeby transportu. Samotný rám byl následně zkontrolován za pomoci metody MKP. Po kontrole rámu přišla na řadu ještě pevnostní kontrola hřídele soukolí a výpočet trvanlivosti ložisek. Následovala finalizace návrhu konstrukce s ohledem na všechna zjištění a výsledky, ke kterým jsme se dopracovali. Pokračováním této práce by mohla být optimalizace hmotnosti a pevnosti rámu.



Obrázek 34 - Pohled zepředu při nastavení na rozchod 1000 mm



Obrázek 35 - Pohled zepředu při nastavení na rozchod 1435 mm

Seznam použitých zdrojů

- [1] Draisine - Wikipedia. [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Draisine>
- [2] Copyright © [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: https://external-preview.redd.it/0v-B-0OI_woNRERaLBzVa9b_A58vI6-fng20c5ZMAg.jpg?auto=webp&v=enabled&s=bae42089d50704b5f40bd7f4947a681ed0faf1f9
- [3] Monorail | railway | Britannica. *Encyclopedia Britannica / Britannica* [online]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/monorail-railway>
- [4] Maglev – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Maglev>
- [5] Drezína – Wikipedie. [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Drez%C3%ADna>
- [6] Malá měřicí drezína – CTD. *CTD – Centrum techniky a diagnostiky* [online]. Dostupné z: <https://www.tudc.cz/index.php/diagnosticke-prostredky/mmd/>
- [7] [online]. Copyright © [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: https://live.staticflickr.com/4105/5087179604_e90f6299f6_b.jpg
- [8] Wikimedia. [online]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/45/Draisine-templin.jpg>
- [9] Šlapací drezína & Muzeum ve vagóně | Ratíškovice – ŤAPKÁME.CZ. *ŤAPKÁME.CZ – Výletní portál pro rodiny s dětmi po Jihomoravském a Zlínském kraji | kalendář akcí | necestovní blog* [online]. Dostupné z: <https://tapkame.cz/slapaci-drezina-muzeum-ve-vagone-ratiskovice/>
- [10] 301 Moved Permanently. *301 Moved Permanently* [online]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/page-rozdeleni.html>
- [11] History of rail transport - Wikipedia. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_rail_transport
- [12] [online]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kks/zsdm/prednasky/index.html>
- [13] Středový motor Bosch Performance Line CX | EKOLO.CZ. *NEJLEPŠÍ ELEKTROKOLA = EKOLO.CZ v Praze 6* [online]. Copyright © 2007 [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://ekolo.cz/stredovy-motor-bosch-performance-line-cx>
- [14] Bosch Performance Line CX Motor 32km/h 75Nm 2. Generation Ersatz-Austauschmotor | eBay. *Elektronik, Autos, Mode, Sammlerstücke, Möbel und mehr Online-Shopping / eBay* [online]. Copyright © 1995 [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://www.ebay.de/itm/304124039215?var=603245140099&mkevt=1&mkcid=1&mkrid=707-53477-19255-0&campid=5338624525&toolid=20006&customid=54d6e8074912b8fc6dd1343229b637e4>
- [15] Konverzní kit 48V/750W středový motor 8FUN | E-pohon - elektrokola a sety na přestavbu pro všechny. *E-pohon - elektrokola a sety na přestavbu pro všechny* [online]. Dostupné z: <https://www.e-pohon.cz/Konverzni-kit-48V-750W-stredovy-motor-8FUN-d406.htm#detail-anchor-description>

[16] Středový motor Bafang M420 | EKOLO.CZ. *NEJLEPŠÍ ELEKTROKOLA = EKOLO.CZ v Praze 6* [online]. Copyright © 2007 [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://ekolo.cz/stredovy-motor-bafang-m420>

[17] SPECIALISTÉ ELEKTROKOL. *SPECIALISTÉ ELEKTROKOL | Eshop pro sportovce se zaměřením na cyklistiku.* [online]. Dostupné z: https://www.specialisteelektokol.cz/komponenty-a-ostatni-prislusenstvi-2/stredovy-motor-bafang-gear-drive-m420-na-e-bike-bez-prislusenstvi/?gclid=CjwKCAiAleOeBhBdEiwAfgmXfyowglYOo3d9gyqcVkr45O8Qz_ZC1NUJ4BV21SCJTdS6XMBccdMfTBoCwvEQAvD_BwE

[18] *Elektrokola Přerov* [online]. Copyright © 2009 Všechna práva vyhrazena. [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <http://www.elektro-skutr.eu/products/konverzni-kit-500w-36v-750w-48v-zadni-kolo/> <https://trenujemeshop.cz/karbonovy-vs-hlinikovy-cyklisticky-ram>

[19] Úzkorozchodná dráha – Wikipedie. [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9Azkorozchodn%C3%A1_dr%C3%A1ha#/media/Soubor:%C3%9Azkorozchodn%C3%A1_dr%C3%A1ha1.jpg

[20] Pedal power — Science Learning Hub. *Welcome! — Science Learning Hub* [online]. Copyright © 2007 [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1348-pedal-power>

[21] SKF. [online]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-61909>

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hodnocení konstrukcí rámu metodou SWOT	29
Tabulka 2 - Hodnocení motorů metodou SWOT	30

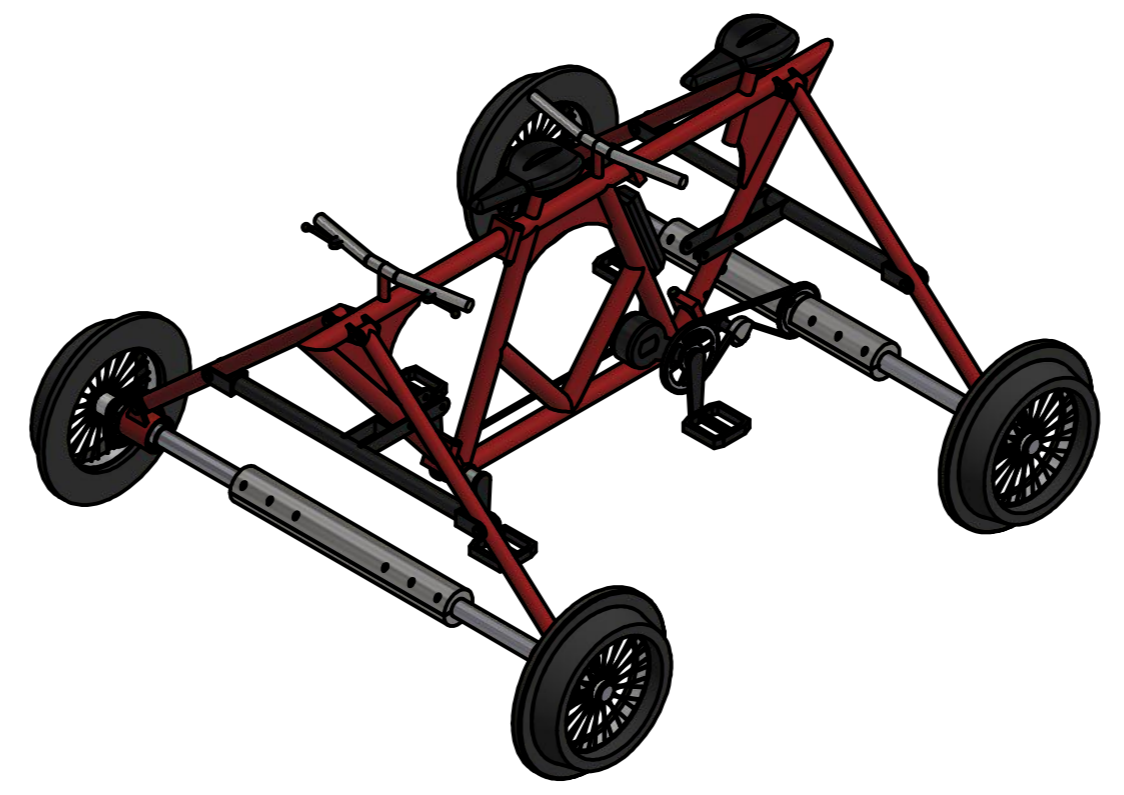
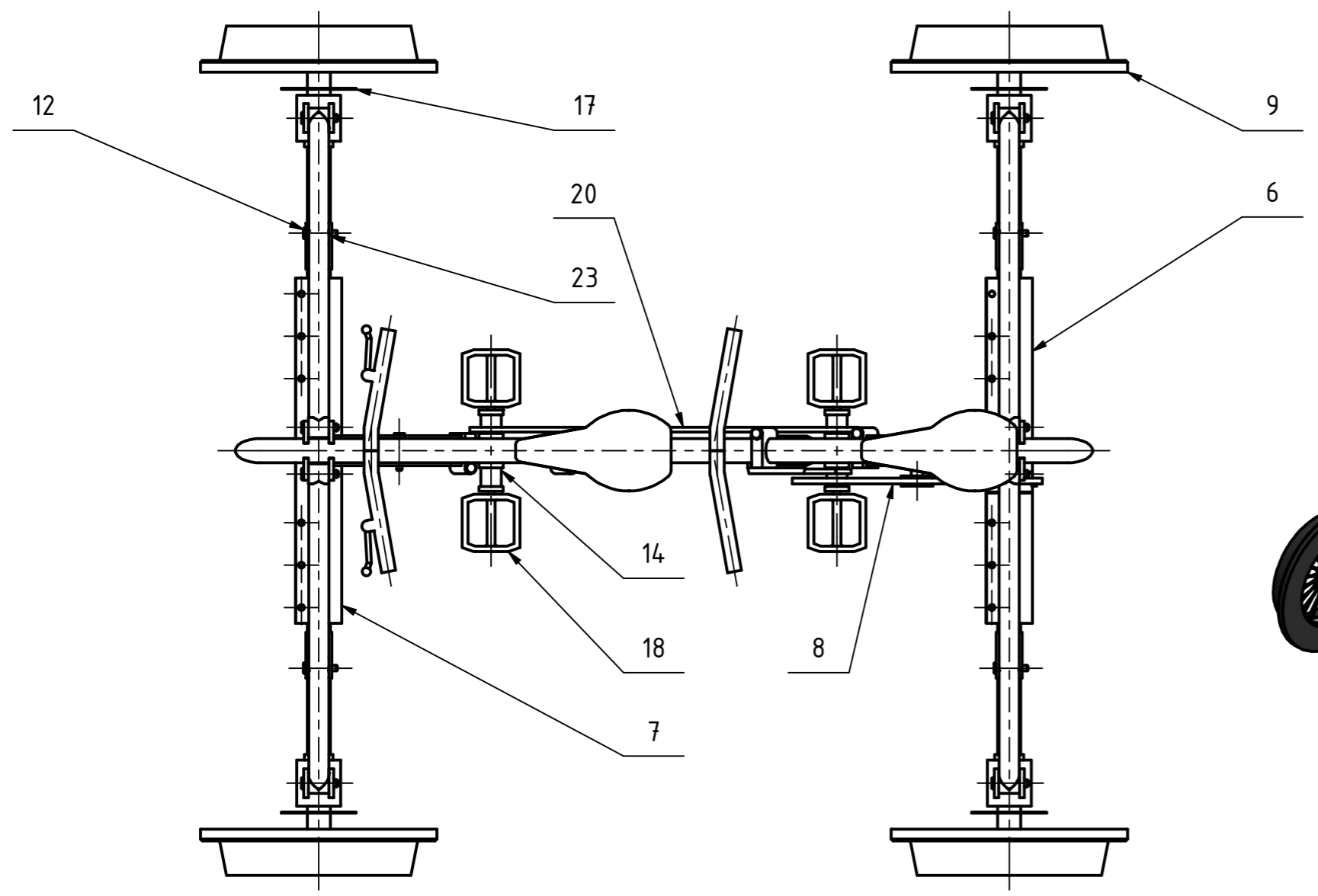
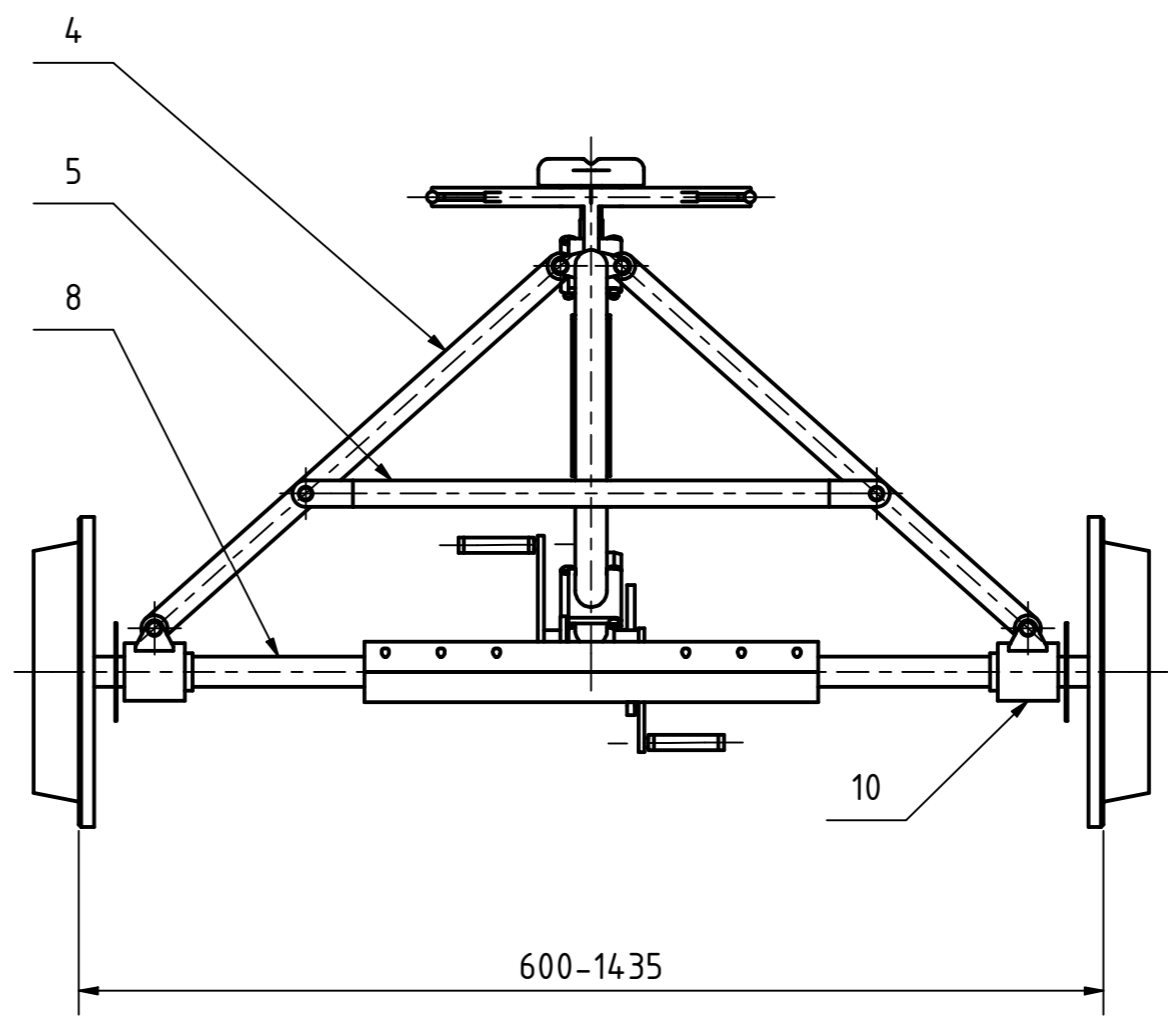
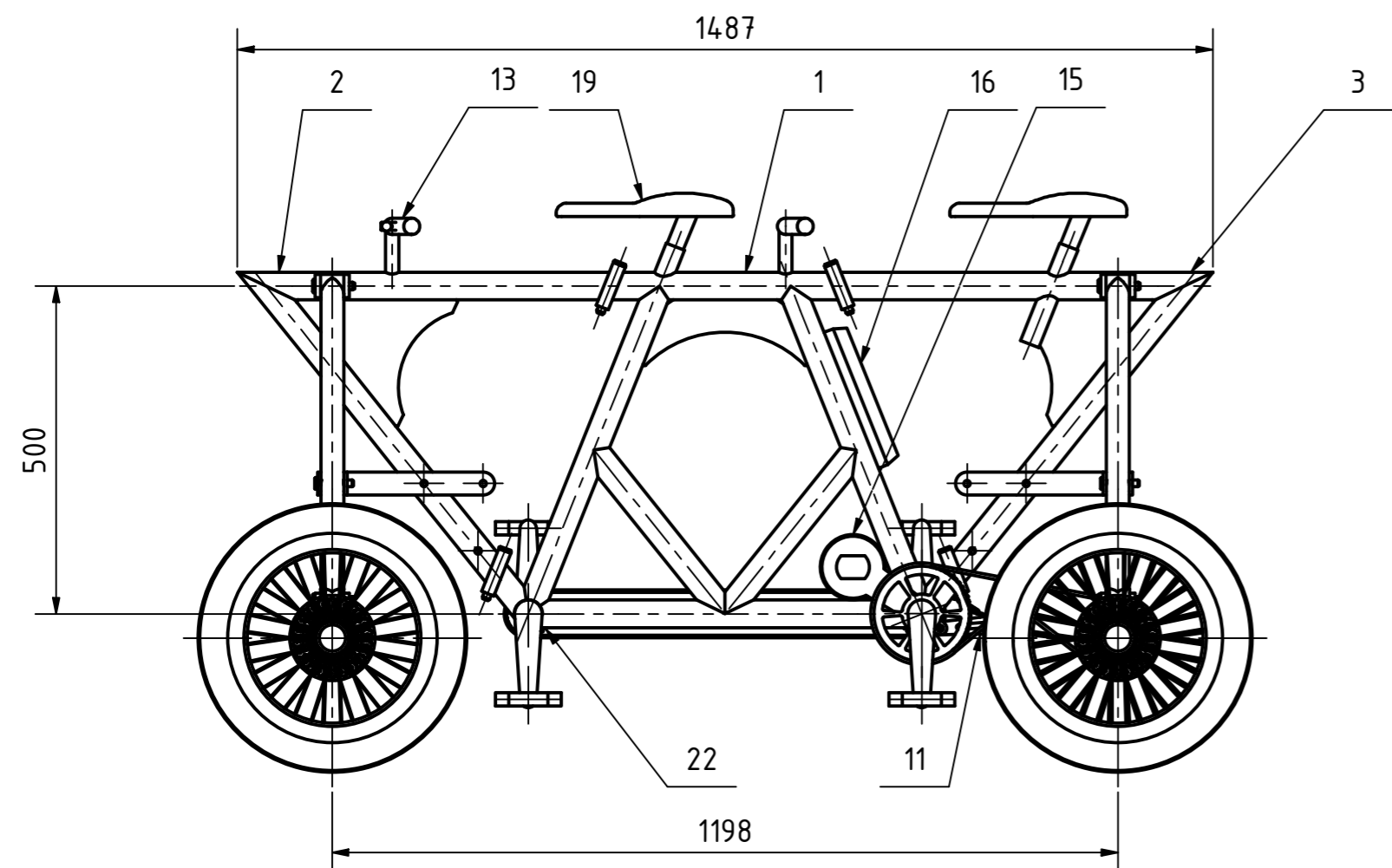
Seznam obrázků

Obrázek 4 - Dřevěné koleje s vozem ze 16. století [2]	11
Obrázek 5 – Monorail [3]	12
Obrázek 6 – Maglev [4]	12
Obrázek 4 - Obrněná drezína Tatra T18 [5]	13
Obrázek 5 - Měřicí drezína [6]	13
Obrázek 6 - Pumpovací drezína [7]	14
Obrázek 7 - Šlapací drezína [8]	14
Obrázek 8 - Ratiškovická šlapací drezína	15
Obrázek 9 - Náčrt konstrukčního provedení č.1	16
Obrázek 10 - Náčrt konstrukčního provedení č.2	17
Obrázek 11 – Schématický náčrt	18
Obrázek 12 – Pohon BBS02	19

Obrázek 13 – Pohon Performance line CX	20
Obrázek 14 – Pohon M420.....	20
Obrázek 15 – Motor Grand Rock 500 W	21
Obrázek 16 - Rozdíl mezi úzkorozchodnou a běžnou železniční tratí [19]	22
Obrázek 17 - Náčrt varianty s pohyblivými rameny	24
Obrázek 18 - Náčrt varianty s pevnými rameny	25
Obrázek 19 - Náčrt celistvého kola	26
Obrázek 20 - Náčrt kola s vyměnitelným věncem	27
Obrázek 21 - Náčrt řešení rozebiratelného zajištění hřídele vůči trubce	31
Obrázek 22 - Rám v rozloženém stavu	33
Obrázek 23 - Rám ve složeném stavu	33
Obrázek 24 - Silové účinky a vazby rámu	34
Obrázek 25 - Vizualizace napětí	35
Obrázek 26 - Vizualizace deformací v měřítku	35
Obrázek 27 - Schéma řešeného nosníku	36
Obrázek 28 - Průběh ohybového momentu.....	37
Obrázek 29 - Silové účinky na ložisko.....	39
Obrázek 30 - Výpočtové součinitele pro kuličková ložiska.....	40
Obrázek 31 - Pohled na celý konstrukční celek	41
Obrázek 32 - Boční pohled.....	42
Obrázek 33 - Pohled shora	42
Obrázek 34 - Pohled zepředu při nastavení na rozchod 1000 mm.....	43
Obrázek 35 - Pohled zepředu při nastavení na rozchod 1435 mm.....	43

Seznam příloh

- Příloha 1 – Výkres sestavy vozidla
- Příloha 2 – Výkres sestavy náboje kola
- Příloha 3 – Výrobní výkres pevné části náboje kola
- Příloha 4 – Výrobní výkres otočné části náboje kola
- Příloha 5 – Výrobní výkres distanční trubky



KUSOVNÍK			
POZ.	KS	ČÍSLO VÝKRESU	NÁZEV
23	18	DIN 11024	PRUŽINOVÁ ZÁVLAČKA d=2
22	2		ŘETĚZOVÉ KOLO 1
21	1		ŘETĚZ 2
20	1		ŘETĚZ 1
19	2		SEDLO
18	2		SADA PEDÁLŮ
17	1		BRZDOVÝ SYSTÉM
16	1		BATERIE
15	1		POHON BAFANG BBS02
14	1		OSA PEDÁLŮ
13	2	KKS/BP - 1008	ŘÍDÍTKA
12	18	KKS/BP - 1007	ZAJIŠŤOVACÍ ČEP
11	1	KKS/BP - 1000E	NAPÍNÁK ŘETĚZU
10	4	KKS/BP - 1000D	SESTAVA NÁBOJE
9	4	KKS/BP - 1000C	SESTAVA KOLA
8	4	KKS/BP - 1006	HŘÍDEL
7	1	KKS/BP - 1000B	SVĚRNÁ SPOJKA PŘEDNÍ
6	1	KKS/BP - 1000A	SVĚRNÁ SPOJKA ZADNÍ
5	2	KKS/BP - 1005	VZPĚRA MEZI NÁPRAVY
4	4	KKS/BP - 1004	RAMENO NÁPRAVY
3	1	KKS/BP - 1003	RÁM - ZADNÍ
2	1	KKS/BP - 1002	RÁM - PŘEDNÍ
1	1	KKS/BP - 1001	RÁM - STŘED

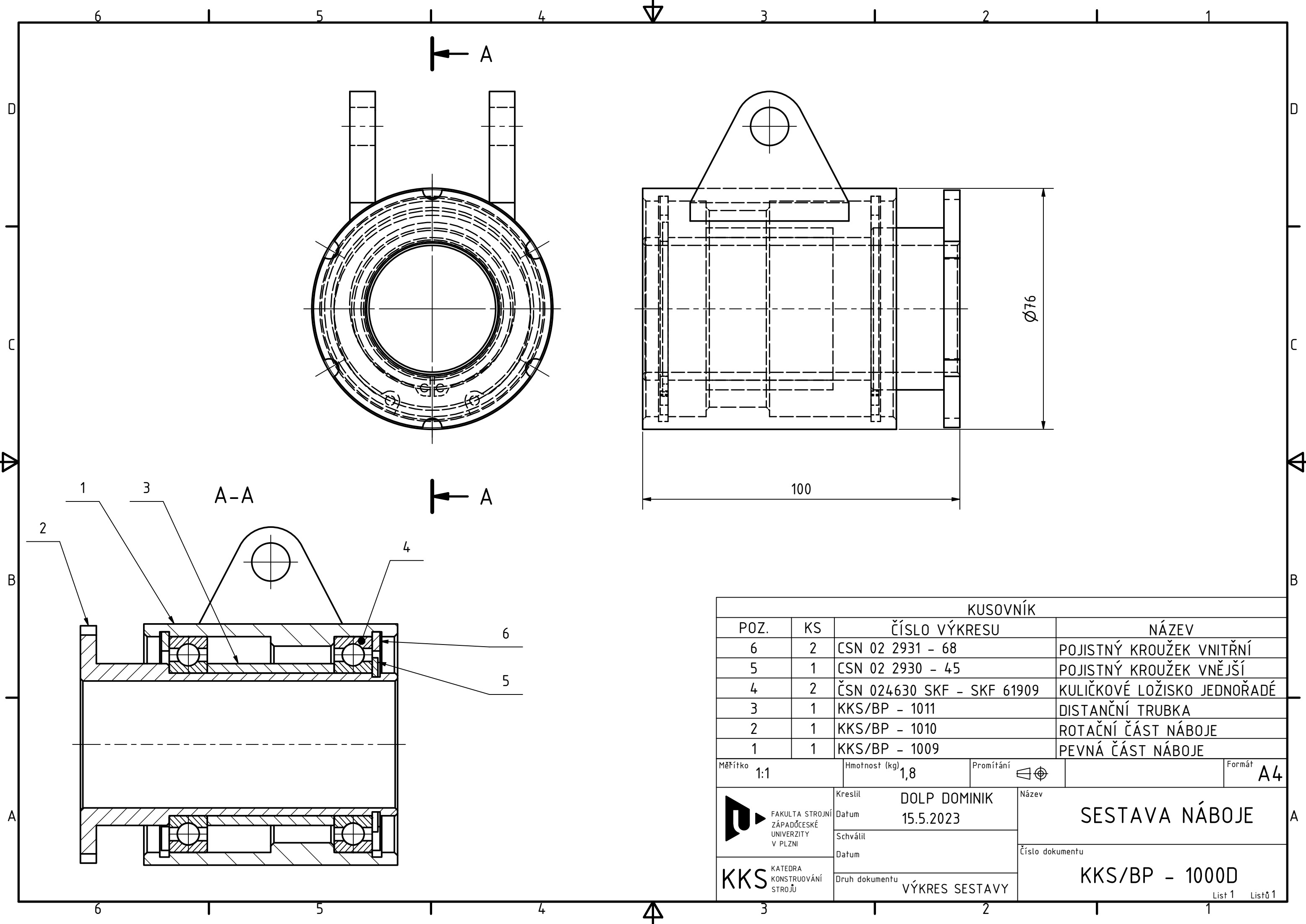
Měřítko 1:10 Hmotnost (kg) 16,2 Promítání Formát A2

Kreslit DOLP DOMINIK Datum 15.5.2023
 Schválit
 Datum
 Číslo dokumentu KKS/BP - 1000

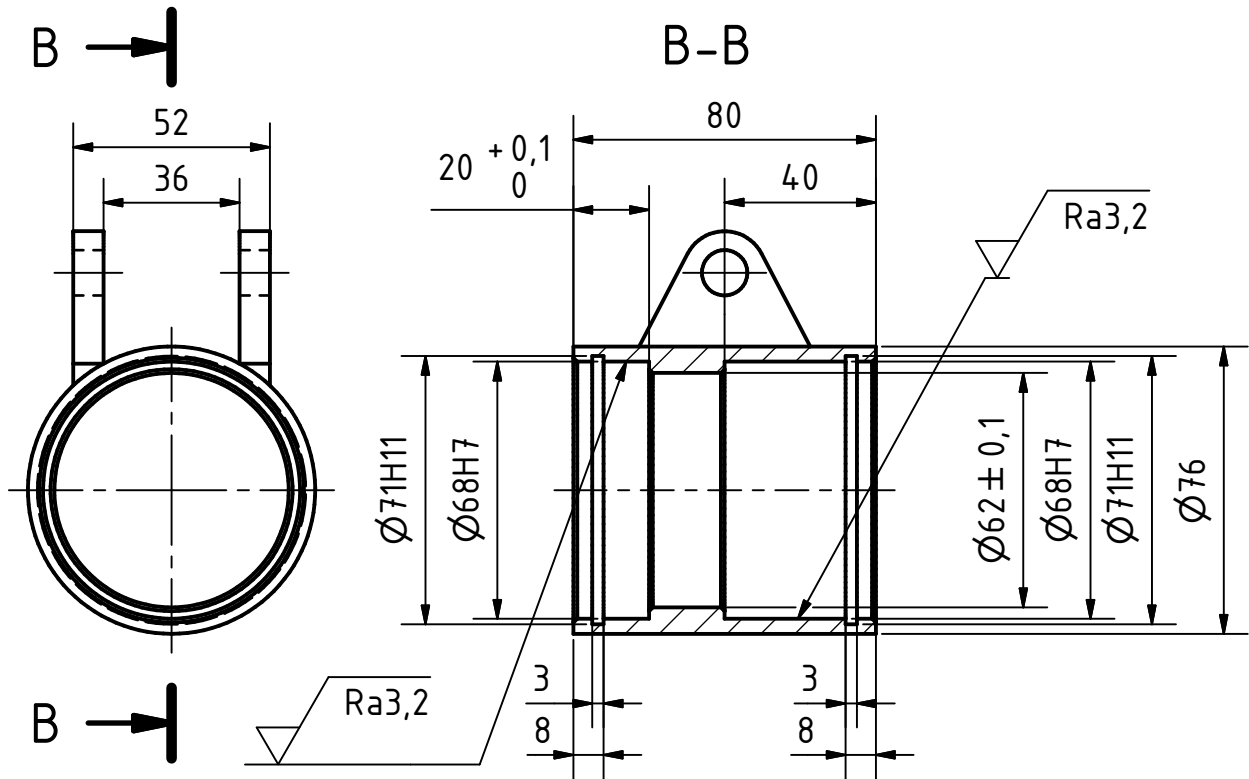
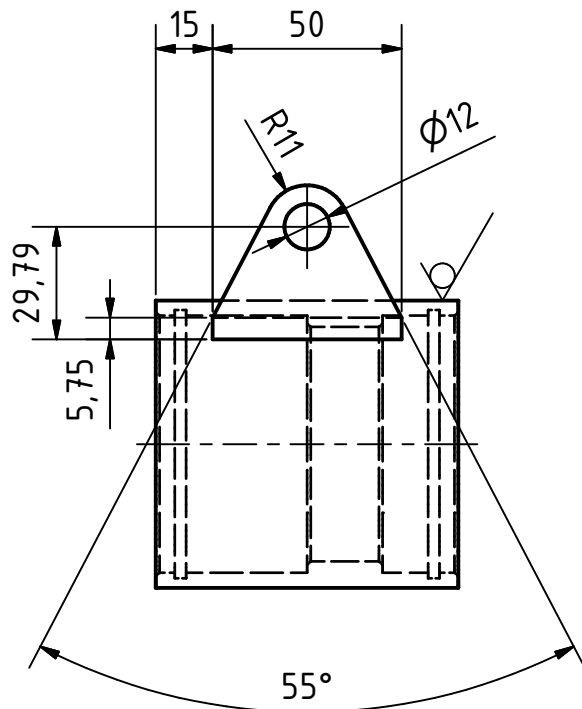
FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI
 KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ

Název ŠLAPACÍ DREŽÍNA
 Druh dokumentu VÝKRES SESTAVY

Page 1 of 1

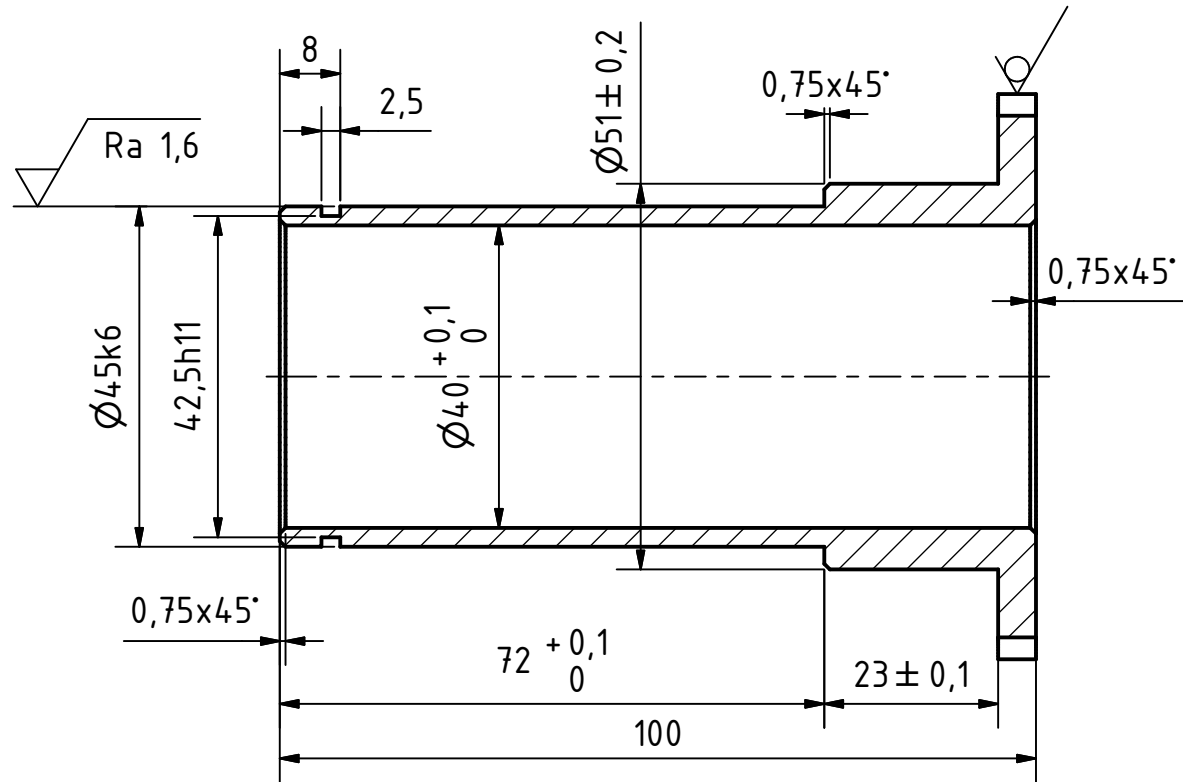
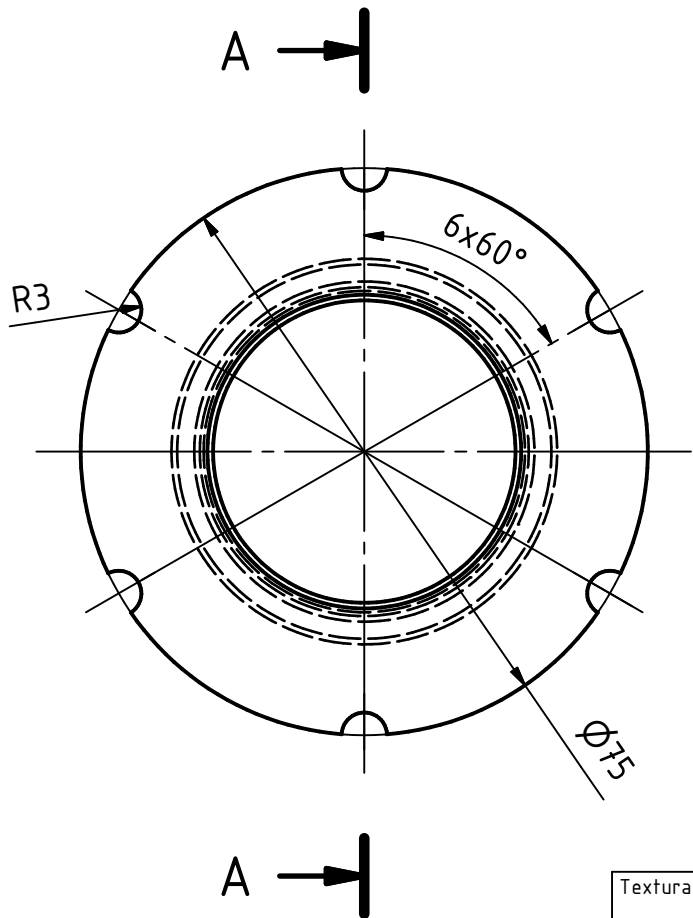


KUSOVNÍK			
POZ.	KS	ČÍSLO VÝKRESU	NÁZEV
6	2	CSN 02 2931 - 68	POJISTNÝ KROUŽEK VNITŘNÍ
5	1	CSN 02 2930 - 45	POJISTNÝ KROUŽEK VNĚJŠÍ
4	2	ČSN 024630 SKF - SKF 61909	KULIČKOVÉ LOŽISKO JEDNOŘADÉ
3	1	KKS/BP - 1011	DISTANČNÍ TRUBKA
2	1	KKS/BP - 1010	ROTAČNÍ ČÁST NÁBOJE
1	1	KKS/BP - 1009	PEVNÁ ČÁST NÁBOJE
Měřítko 1:1		Hmotnost (kg) 1,8	Promítání
FAKULTA STROJNÍ ZÁPADČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI		Kreslil DOLP DOMINIK Datum 15.5.2023	Název SESTAVA NÁBOJE
KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ		Schválil Datum	Číslo dokumentu KKS/BP - 1000D
		Druh dokumentu VÝKRES SESTAVY	Formát A4

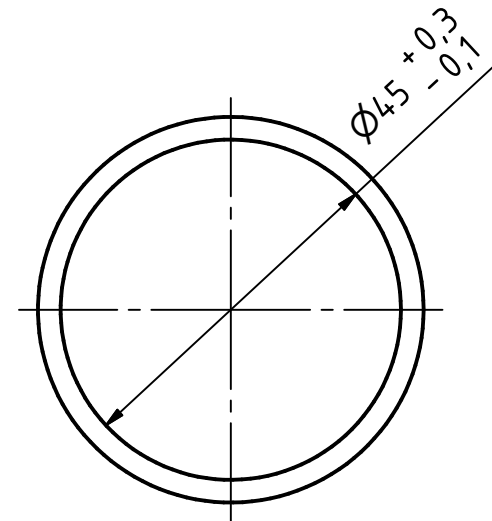
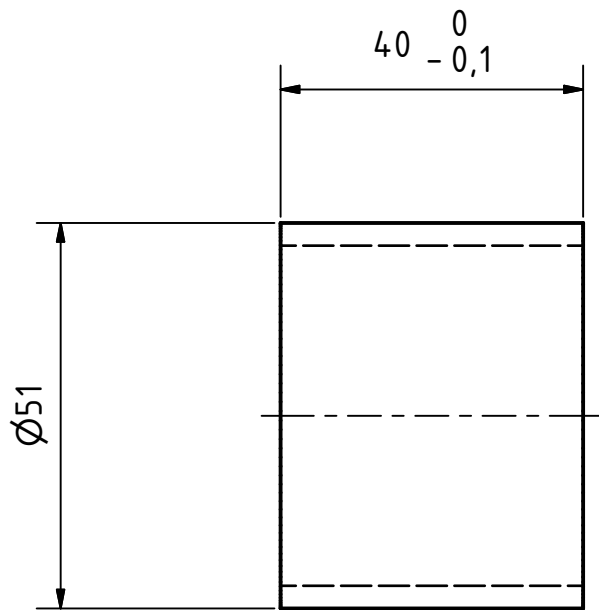


HRANY SRAZIT 1x45°

Textura povrchu 	Hrany ISO 13715 	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768 - mK
		Hmotnost (kg) 0.9	Tolerování ISO 8015
			Promítání
Materiál - Polotovár ČSN 42 0954	ODLITEK		Formát A4
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil DOLP DOMINIK	Název PEVNÁ ČÁST NÁBOJE	
	Datum 15.5.2023	Číslo dokumentu KKS/BP - 1009	
KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Schválil		
	Datum		
	Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES		



Textura povrchu 	Hrany ISO 13715 	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768 - mK
		Hmotnost (kg) 0.6	Tolerování ISO 8015
Materiál - Polotovár 11 500.0 TYČ D75 ČSN 42 5510.12		Promítání 	
FAKULTA STROJNÍ ZÁPADČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil DOLP DOMINIK	Název ROTAČNÍ ČÁST NÁBOJE	
	Datum 15.5.2023		
KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Schválil	Číslo dokumentu KKS/BP - 1010	
	Datum		
Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES		Lisť 1 Lisťu 1	



Textura povrchu 	Hrany ISO 13715 	Měřítko 1:1	Přesnost ISO 2768 - mK
		Hmotnost (kg) 0.3	Tolerování ISO 8015
Materiál - Polotovár 11 500.0 TYČ D55 ČSN 42 5510.12		Formát A4	
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADŮČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil DOLP DOMINIK	Název DISTANČNÍ TRUBKA	
	Datum 15.5.2023		
KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Schválil	Číslo dokumentu KKS/BP - 1011	
	Datum		
Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES		List 1 Lisfu 1	