

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270017 - Konstruování strojů a technických zařízení
Studijní specializace: Konstruování vozidel a manipulačních zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh nápravnice pro úzkorozchodné tramvajové vozidlo

Autor: Bc. David GRŮN
Vedoucí práce: Ing. Václav KRAUS, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David GRŮN**
Osobní číslo: **S21N0017K**
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**
Specializace: **Konstruování vozidel a manipulačních zařízení**
Téma práce: **Návrh nápravnice pro úzkorozchodné tramvajové vozidlo**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Návrh nápravnice pro úzkorozchodné tramvajové vozidlo (specifikace rozměrů a konstrukčního řešení, materiálů a technologie). Pevnostní výpočet pro zadané zatížení.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání

Osnova práce

1. rešerše
2. návrh konstrukčního řešení
3. zhodnocení řešení
4. výpočet MKP + technologie výroby
5. výrobní dokumentace
6. ekonomické zhodnocení práce, závěr

Konzultant: Ing. Jiří Říha , Škoda Transportation, a.s., Plzeň

Rozsah diplomové práce: **40-60 stran A4**

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

HELLER, Petr. *Kolejová vozidla I.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2017. ISBN 978-80-261-0693-7.

HELLER, Petr. *Kolejová vozidla II.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2017. ISBN 978-80-261-0773-6

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Václav Kraus, Ph.D.

Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce:

16. října 2021

Termín odevzdání diplomové práce:

28. května 2022

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.

děkan

Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2021

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Václavovi Krausovi, Ph.D. za jeho čas, cenné rady a připomínky při zpracování diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat konzultantovi diplomové práce Ing. Jiřímu Říhovi za jeho praktické rady a informace.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Grún	Jméno David	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kraus, Ph.D.	Jméno Václav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh nápravnice pro úzkorozchodné tramvajové vozidlo		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	72	TEXTOVÁ ČÁST	60	GRAFICKÁ ČÁST	12
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje rešerši v oblasti tramvajových vozidel. Následně se zabývá specifikací vhodných materiálů a určením metody výroby. Návrh nápravnice pro úzkorozchodnou tramvaj byl proveden v softwaru CATIA V5. V softwaru ANSYS proběhla pevnostní analýza konstrukce, která zahrnovala 4 zadané stavy napětí. Na základě výsledků byla provedena optimalizace konstrukce pro snížení maximálního napětí. V závěru práce se nachází ekonomické zhodnocení. Diplomová práce obsahuje výkresy v příloze.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	nápravnice, tramvaj, úzký rozchod, pevnostní analýza, konstrukce, ekonomické zhodnocení

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Grún	Name David	
STUDY PROGRAMME	N0715A270017 Design engineering of machines and technical devices		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kraus, Ph.D.	Name Václav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of axlebridge for narrow gauge tram vehicle		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	72	TEXT PART	60	GRAPHICAL PART	12
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis contains recherche in the area of the tram vehicles. After that it specifies appropriate materials and determines manufacturing method. The design of the axlebridge for narrow gauge tram was made in software CATIA V5. Stress analysis of the mechanical design, which contained 4 different tensions, was done in software ANSYS. Based on the generated results the mechanical design was optimized for reduction of the maximal tension. The economical evaluation is placed at the end of diploma thesis. The diploma thesis contains drawings in the attachments.
KEY WORDS	axlebridge, tram, narrow gauge, stress analysis, mechanical design, economical evaluation

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
1 Úvod.....	13
2 Podvozky tramvají.....	15
2.1 Rozchod koleje	15
2.2 Nízkopodlažní vozidla	15
2.3 Podvozky tramvají.....	15
2.3.1 Otočné podvozky pro nízkopodlažní tramvajová vozidla.....	16
2.3.2 Neotočné podvozky pro nízkopodlažní tramvajová vozidla	17
2.4 Náprava a nápravnice	18
2.5 Koncepce nízkopodlažních tramvají	19
2.6 Nápravová ložiska	21
2.7 Kola	22
2.8 Brzdy	23
2.9 Pohon volně otočných kol	24
2.9.1 Skupinový pohon dvojkolí	24
3 Nízkopodlažní úzkorozchodné tramvaje.....	25
4 Konstrukční návrh nápravnice	27
4.1 Materiály pro nápravnici	29
4.1.1 S355NL	29
4.1.2 S460NL	29
4.1.3 42CrMo4+QT.....	29
4.1.4 34CrNiMo6+QT.....	29
4.1.5 30CrNiMo8+QT.....	29
4.1.6 G20Mn5+N	29
4.1.7 G24Mn6+QT2.....	30
4.2 Způsoby výroby nápravnice	31
4.2.1 Nápravnice odlitá celá.....	31
4.2.2 Nápravnice kovaná celá	31
4.2.3 Odlitek se spojnicí.....	31
4.2.4 Výkovek se spojnicí	31
4.3 Vyhodnocení výrobních technologií	32
4.4 Návrh nápravnice.....	33

4.4.1	Rameno nápravnice	34
4.4.2	Spojnice	35
4.4.3	Svar.....	36
4.5	Výpočet nápravnice	37
4.5.1	Výpočet vertikální výjimečné síly.....	38
4.5.2	Výpočet příčné výjimečné síly	38
4.5.3	Výpočet podélné výjimečné síly	38
4.5.4	Kombinace namáhání	39
4.6	Pevnostní analýza	41
4.6.1	Síť.....	42
4.6.2	Okrajové podmínky	43
4.6.3	Výsledky.....	46
4.7	Optimalizace konstrukce	51
4.8	Zhodnocení výpočtů	53
4.8.1	Trvalá deformace.....	53
4.8.2	Mez pevnosti a stability.....	54
5	Ekonomické zhodnocení	55
6	Závěr.....	57
	Seznam použitých zdrojů	58
	Seznam použitých norem	58
	Seznam použitých zdrojů na internetu	58
	Seznam ostatních zdrojů.....	59
	Seznam použitých softwarů	59
	Seznam volně vložených příloh	60

Přehled použitých zkratk a symbolů

FST	Fakulta strojní
KKS	Katedra konstruování strojů
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní norma
MHD	Městská hromadná doprava
T.K.	Temeno kolejnice
g	Gravitační zrychlení [m/s^2]
m_1^+	Nápravové zatížení plného vozu [kg]
m_{nh}	Nevypružené hmoty [kg]
m_{jvh}	Jednou vypružené hmoty [kg]
P1	Váha cestujících – výjimečné zatížení [kg]
m_n	Maximální nápravové zatížení [kg]
m_{np1}	Hmotnost podvozku bez vypružených hmot [kg]
m^+	Hmotnost podvozku [kg]
a_{yb}	Zrychlení pro výjimečné zatížení [m/s^2]
Re	Mez kluzu [MPa]
Rm	Mez pevnosti [MPa]
A	Tažnost [%]
KV	Nárazová energie [J]
σ_c	Maximální napětí v konstrukci [MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu [MPa]
R_m	Mez pevnosti [MPa]
S_1	Bezpečnostní faktor trvalé deformace [-]
S_2	Bezpečnostní faktor stability [-]

Seznam obrázků

Obr. 1: První elektrická tramvaj [5]	13
Obr. 2: Nápravnice GHH-Bonatrans [9]	14
Obr. 3: Různé rozchody kolejí [11].....	15
Obr. 4: Podvozek 15T [31].....	16
Obr. 5: Podvozek Siemens Combino SF 30 [11]	17
Obr. 6: Náprava od společnosti Walbo Railway [14]	18
Obr. 7: Koncepty tramvají [1].....	19
Obr. 8: Kompaktní ložisková jednotka SKF [15]	21
Obr. 9: Schéma složeného kola [16]	22
Obr. 10: Složené kolo společnosti Bonatrans [17].....	22
Obr. 11: Kolejnicová brzda Alfa Union [21]	23
Obr. 12: Schéma pohonu tramvaje Combino od firmy Siemens [1].....	24
Obr. 13: Škoda 18T [22]	25
Obr. 14: Stadler Tango [23]	25
Obr. 15: Škoda 30T [24]	26
Obr. 16: Breda VLC [25]	26
Obr. 17: Náčrtek výroby nápravnice – a) nápravnice se spojnicí; b) nápravnice vcelku.....	31
Obr. 18: Sestava nápravnice.....	33
Obr. 19: Rameno – odlitek	34
Obr. 20: Rameno - obrobek.....	34
Obr. 21: Spojnice – odlitek	35
Obr. 22: Spojnice – obrobek	35
Obr. 23: Svar – spojnice a rameno	36
Obr. 24: Svar - oko a spojnice.....	36
Obr. 25: Sestava nápravnice pro výpočet.....	37
Obr. 26: Stav 1	39
Obr. 27: Stav 2	40
Obr. 28: Stav 3	40
Obr. 29: Stav 4	40
Obr. 30: Síť v místech obrobení.....	42
Obr. 31: Síť v místech pod ložiskovým domem	42
Obr. 32: Remote points	43
Obr. 33: Pružiny	44
Obr. 34: Okrajové podmínky	45

Obr. 35: Deformace 1. stavu	46
Obr. 36: Napětí 1. stavu	47
Obr. 37: Detail napětí 1. stavu.....	47
Obr. 38: Deformace 2. stavu	48
Obr. 39: Napětí 2. stavu	48
Obr. 40: Deformace 3. stavu	49
Obr. 41: Napětí 3. stavu	49
Obr. 42: Deformace 4. stavu	50
Obr. 43: Napětí 4. stavu	50
Obr. 44: Optimalizace ramene nápravnice	51
Obr. 45: Optimalizace spojnice	51
Obr. 46: Napětí na optimalizované konstrukci.....	52

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hlavní parametry podvozku ForCity Alfa (15T) [31]	16
Tabulka 2: Hlavní parametry podvozku SF 30 [13].....	17
Tabulka 3: Parametry tramvaje Škoda 18T [22]	25
Tabulka 4: Parametry tramvaje Stadler Tango [1]	25
Tabulka 5: Parametry tramvaje Škoda 30T [24]	26
Tabulka 6: Parametry tramvaje Breda VLC [1]	26
Tabulka 7: Chemické složení jednotlivých ocelí [28], [29]	30
Tabulka 8: Mechanické vlastnosti jednotlivých ocelí [28], [29].....	30
Tabulka 9: Hodnocení kritérií	32
Tabulka 10: Potřebné hodnoty pro výpočet	37
Tabulka 11: Orientace sil v jednotlivých stavech	39
Tabulka 12: Cena dle materiálu dle množství	55
Tabulka 13: Hmotnost materiálů na nápravnici	55
Tabulka 14: Kritéria pro počet 0-50 ks	56
Tabulka 15: Kritéria pro počet 500 ks a více	56
Tabulka 16: Cenový rozdíl jednotlivých variant.....	56

1 Úvod

Tramvaj se řadí mezi kolejová vozidla městské hromadné dopravy s významným využitím ve velkých městech. Tramvaj využívá vlastní těleso pro jízdu, tudíž je jen velmi zřídka omezená rostoucími kolonami aut, dopravními nehodami, zaplněnou křižovatkou a tak podobně. Vůči automobilové dopravě jsou tramvaje více ekologické, zabírají mnohem méně prostoru, produkují méně hluku a pojmu značné množství cestujících. Oproti ostatním vozidlům MHD tramvaje disponují větší přepravní kapacitou než autobusy nebo trolejbusy. Tramvaj je naopak omezená špatnou manévrovatelností nebo delší brzdou dráhou.

První tramvaj byla tažená koňmi a obsluhovala cestující v Paříži v roce 1853. První tažená tramvaj byla poprvé použita na území dnešní České republiky v roce 1869, a to konkrétně na území Brna. Následně se začala využívat na území Prahy o 6 let později. První elektrickou tramvaj (viz Obr. 1) vynalezl Werner von Siemens. Ta byla do provozu uvedena v roce 1881. [4] V roce 1891 představil František Křížik první elektrickou tramvaj v Praze. [1] Tramvaje od té doby prošly významným vývojem.

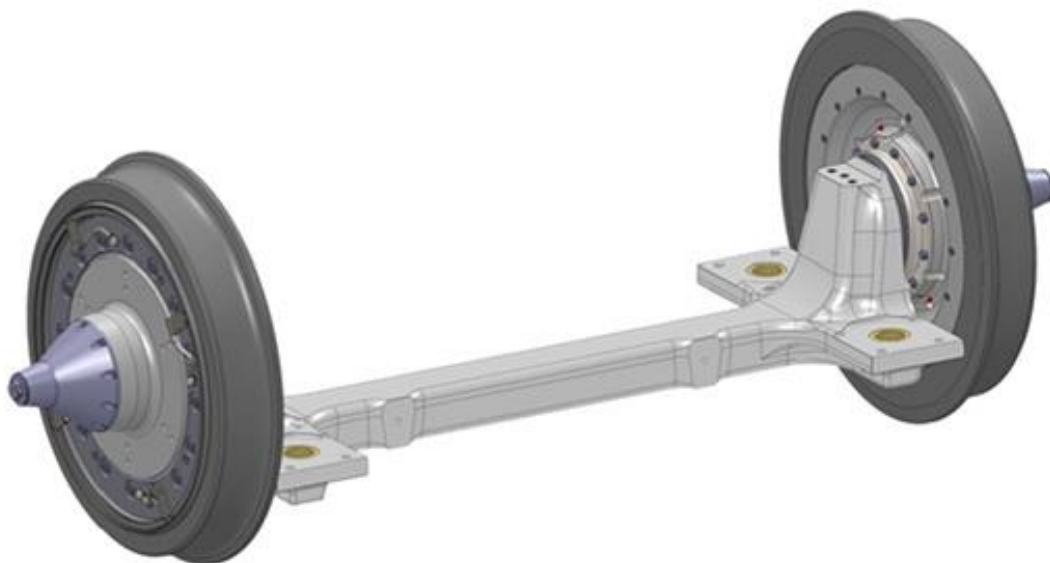


Obr. 1: První elektrická tramvaj [5]

V prvopočátku se koleje využívali v dolech a lomech. Tyto koleje byly dřevěné a vagóny o malé velikosti neměli vlastní pohon, tudíž je dělníci museli táhnout ručně. Následně se musel celý systém zdokonalit, jelikož se dřevěné koleje rapidně opotřebovávali. Následovalo využití pojezdových kol s přírubovým tvarem. Postupem času byly vagóny tažené koňmi. Koncept využití kolejí v dolech se začal zabývat i převozem cestujících a jiného nákladu v otevřeném prostranství. Koleje a vagóny se tedy začali standardizovat a bylo nutné řešit například i rozchod kolejí. První lokomotiva byla uvedena do provozu v roce 1804, a to na kolejích o rozchodu 1321 mm. [8] Masivní rozvoj lokomotiv proběhl na začátku 19. století. George Stephenson vynalezl lokomotivu s podvozkem o rozchodu 4 stop a 8 palců (1422 mm). Jeho koncept se stal nejvíce využívaný. Následně došlo k malé modifikaci a tento rozchod se ustálil na hodnotě 4 stop a 8,5 palce (1435 mm). Tento rozchod se od té doby označuje jako Stephensonův rozchod nebo také jako normální rozchod.

Stephensonův rozchod je v dnešní době využívaný zhruba na 60 % všech tratí na světě. Ostatní rozchody jsou označovány jako široké (> 1435 mm) nebo úzké (< 1435 mm). Úzkorozchodné koleje jsou rozšířené například v Africe, Asii, Japonsku nebo Taiwanu. Užší rozchody se obvykle spojují s nižšími náklady, jelikož potřebují méně materiálu pro stavbu. Menší rozchod se promítne i tím, že se mohou stavět menší mosty a tunely. Užší rozchod je výhodný v kopcovitém terénu, kde výrazně sníží náklady na stavbu. Naopak nevýhoda spočívá v nižším maximálním nápravovém zatížení a také nižší maximální rychlosti.

Trendy dnešní doby cílí na to, aby byla městská hromadná doprava v maximální možné míře bezbariérová. K dosažení tohoto cíle významně napomáhají nízkopodlažní vozidla. Podlaha je ve výšce 350 mm nad temenem kolejnice, přičemž výška nástupní plochy může být i nižší než 290 mm. [1] V tomto případě je místo nástupu jen nepatrně vyšší, než je výška ostrůvku zastávky, což vede ke snadnému nástupu a výstupu zejména pro lidi s omezenou pohyblivostí. Také však umožňuje rychlou obměnu všech cestujících. Dále je zahrnuta výsuvná plošina pro kočárky a osoby pohybující se na vozíku. Nízká podlaha však výrazně ovlivňuje volnost konstrukce a zavádí do procesu nelehké konstrukční výzvy v oblasti konstrukce podvozků. K dosažení nízké podlahy slouží několik konceptů. Je možné využít částečně nízkopodlažní vozidlo s podvozkem s dvojkolím, přičemž pro přechod z prostoru s nízkou podlahou do prostoru s vysokou podlahou slouží dva až tři vysoké schody nebo šikmá rampa. Je také možné použít podvozek s dvojkolím s menším průměrem kol, kde přechod mezi jednotlivými prostory řeší šikmá rampa nebo schod. [1] Posledním řešením předešlého problému je využití nápravnice poskytující rovnou podlahu nebo přechod, který je realizován pomocí rampy s velmi nízkým sklonem. Konstrukční návrh nápravnice je cílem této diplomové práce.

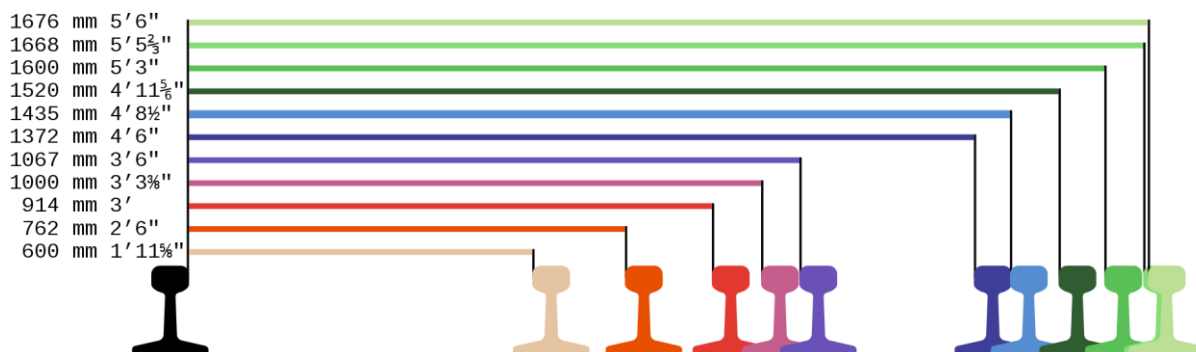


Obr. 2: Nápravnice GHH-Bonatrans [9]

2 Podvozky tramvají

2.1 Rozchod koleje

V dnešní době je nejrozšířenější takzvaný Stephensonův rozchod (přibližně 60 % světa). V České republice a v Evropě je obvykle označován jako normální rozchod o nominální hodnotě 1435 mm. [10] Maximální rozchod v oblouku je 1470 mm. Dále se rozlišují rozchody široké a úzké. Například Irsko, jihovýchod Brazílie a Austrálie používají široký rozchod 1600 mm. Úzký rozchod 1067 mm je používán na jihu Afriky a také na území Japonska. Dalším velmi rozšířeným rozchodem je takzvaný metrový rozchod, který najdeme ve Švýcarsku, Španělsku, Liberci, Bratislavě a tak dále.



Obr. 3: Různé rozchody kolejí [11]

2.2 Nízkopodlažní vozidla

Nízkopodlažní vozidla městské hromadné dopavy byla vyvinuta zejména za účelem dostupnosti pro osoby se zdravotním postižením, avšak vývoj přinesl pozitivní změnu pro všechny cestující. [12] Snížená podlaha nabízí vyšší strop, což umožňuje využití větších oken a lepší odvětrávání prostoru. Větší vnitřní prostor dodává celkový pocit prostornosti. Hlavním benefitem je téměř souběžná podlaha s chodníkem eliminující schody v tramvaji, což umožňuje rychlou výměnu cestujících na zastávkách. Nízká podlaha splňuje vysoké požadavky na obměnu cestujících. Mezi tyto požadavky patří i nástup a výstup invalidů a osob s omezenou schopností pohybu. Pro nástup a výstup vozíčkářů slouží elektrická výsuvná rampa, která může být v nových modelech tramvají ovládaná dálkově.

2.3 Podvozky tramvají

Doprava ve městě s sebou nese dodatečné požadavky, které jsou kladeny na podvozek. Koleje ve městě se vyznačují malými oblouky (poloměr oblouku může být menší než 20 m), většími sklony, přičemž výkon trakčního podvozku obvykle nepřesahuje 120 kW na nápravu. Požadavky na nová nízkopodlažní vozidla posunuly konstrukce tramvajových podvozků do nové dimenze [1]. V České republice musí podvozek splnit příslušné normy nebo případnou normu státu (pokud existuje), ve kterém bude tramvaj provozována.

Rozvor tramvajových podvozků se pohybuje mezi 1800 - 1900 mm, průměr kol u nízkopodlažních tramvají se pohybuje v rozmezí 400 - 700 mm (u standardních tramvají není průměr větší než 700 mm), nápravové zatížení je maximálně 12,5 tun. Koleje jsou často na úrovni vozovky a jsou značně znečišťovány. Z toho důvodu jsou podvozky vybaveny blatníky a stěrkami.

2.3.1 Otočné podvozky pro nízkopodlažní tramvajová vozidla

Otočný podvozek je možno definovat tak, že při jízdě v oblouku se podvozek otáčí vůči skříni vozidla.

2.3.1.1 Otočný podvozek Škoda ForCity

Podvozek je otočný a 100% nízkopodlažní. Tento podvozek však s sebou nese náročné konstrukční výzvy. Kupříkladu posunutí podvozku co nejvíce k čelu vozu znamená, že střed otáčení je umístěn mimo střed podvozku, a tudíž je dvojkolí pod prostorem pro cestující co nejméně namáháno na příčný pohyb. Prostor mezi koly je prázdný díky nápravnicí a individuálním pohonem jednotlivých volně otočných kol. Nápravnice má na sobě připravené konzoly pro kotoučové brzdy a zahloubení pro primární vypružení. Toto vypružení zajišťují pryžokovové silentbloky. Pryžokovové silentbloky nesou plochý rám podvozku. Kolébka s ložiskem pro montáž skříně je uložena přes sekundární vypružení (šroubovitě pružiny). Přenos sil zajišťují dvě ojníčky, které fungují zároveň jako torzní tlumiče. [1]

Tabulka 1: Hlavní parametry podvozku ForCity Alfa (15T) [31]

Označení	ForCity Alfa – 15T
Maximální rychlost	60 km/h
Nápravové zatížení	1435
Rozchod	1435 mm
Rozvor	1900 mm
Průměr kola	666 mm
Nejmenší poloměr oblouku	18 m
Váha	~ 4,9 t



Obr. 4: Podvozek 15T [31]

2.3.2 Neotočné podvozky pro nízkopodlažní tramvajová vozidla

Neotočný podvozek je pevně svázan se skříní vozidla. V oblouku se natáčí zároveň se skříní a může se vychylovat pouze o několik jednotek stupňů od podélné osy.

2.3.2.1 Neotočný podvozek Siemens Combino plus SF 30 TFV/LFW

První verze podvozku Combino SF 30 od společnosti Siemens byla vyvinuta v roce 1998. Od té doby prochází neustálým vývojem. Dle označení rozdělujeme podvozky na hnací (TFV) a běžné (LFW). Podvozek se nachází ve středu článku, což umožňuje natáčení podvozku přibližně o $4,5^\circ$. Podlaha je ve výšce 350 mm od temena kolejnice po celé délce vozidla. Přenos podélných sil je realizován pomocí tažně tlačné tyče, která je uložena do dvou silentbloků. Primární vypružení je řešeno použitím kuželovitých pryžových pružin. Sekundární vypružení je zajištěno čtyřmi pryžokovovými silentbloky ve tvaru přesýpacích hodin (viz Obr. 5) a paralelními tlumiči, což umožňuje relativně velké příčné pohyby. Podvozek je hnán podélným motorem, díky němuž má podvozek níže položené těžiště a malé neodpružené hmoty. Motor je možné montovat či demontovat bez nutnosti nadzvednutí podvozku. Brzdy jsou integrovány v hnacím agregátu. [1], [13]

Tabulka 2: Hlavní parametry podvozku SF 30 [13]

Označení	SF 30 C
Maximální rychlost	70 km/h
Nápravové zatížení	2x 10 t
Rozchod	1435 mm
Rozvor	1800 mm
Průměr kola	600/520 mm
Nejmenší poloměr oblouku	15 m
Váha	~ 4,9 t
Dodatečné vybavení podvozku	Pískování, mazání okolků, absorpce hluku



Obr. 5: Podvozek Siemens Combino SF 30 [11]

2.4 Náprava a nápravnice

Náprava je válcová strojní součást, na níž jsou odstupňovány jednotlivé průměry dle funkce a namáhání dané části nápravy. Mezi hlavní části patří čepy, sedla těsnících kroužků, sedla nábojů a dřík.

Čepy slouží k nalisování nápravových ložisek. Sedla těsnících kroužků umožňují montáž těsnění nápravových ložisek pro zabránění vnikání prachu, vody a tak podobně. Sedla nábojů slouží k montáži kol a ložisek. V některých případech se využívají přídavná sedla pro brzdové kotouče a části pohonu. Dřík se nachází mezi jednotlivými částmi sedel nápravy. Mezi jednotlivými částmi se nachází plynulé přechody, které definuje norma ČSN EN 13103-1. Tyto přechody snižují nebezpečí koncentrace ohybového napětí. [3] K této koncentraci obecně dochází v případě použití ostrých hran. Poloha čepů pro nápravová ložiska a sedel pro nalisování kol dělí dvojkolí na dvojkolí s vnějšími nebo vnitřními čepy, což ovlivňuje velikost dvojkolí. Nápravy mohou být duté nebo plné. Duté nápravy mohou být použity u hnacích i běžných podvozků. Duté nápravy umožňují ultrazvukovou kontrolu při provozu bez nutnosti demontáže dvojkolí a dalších komponent.

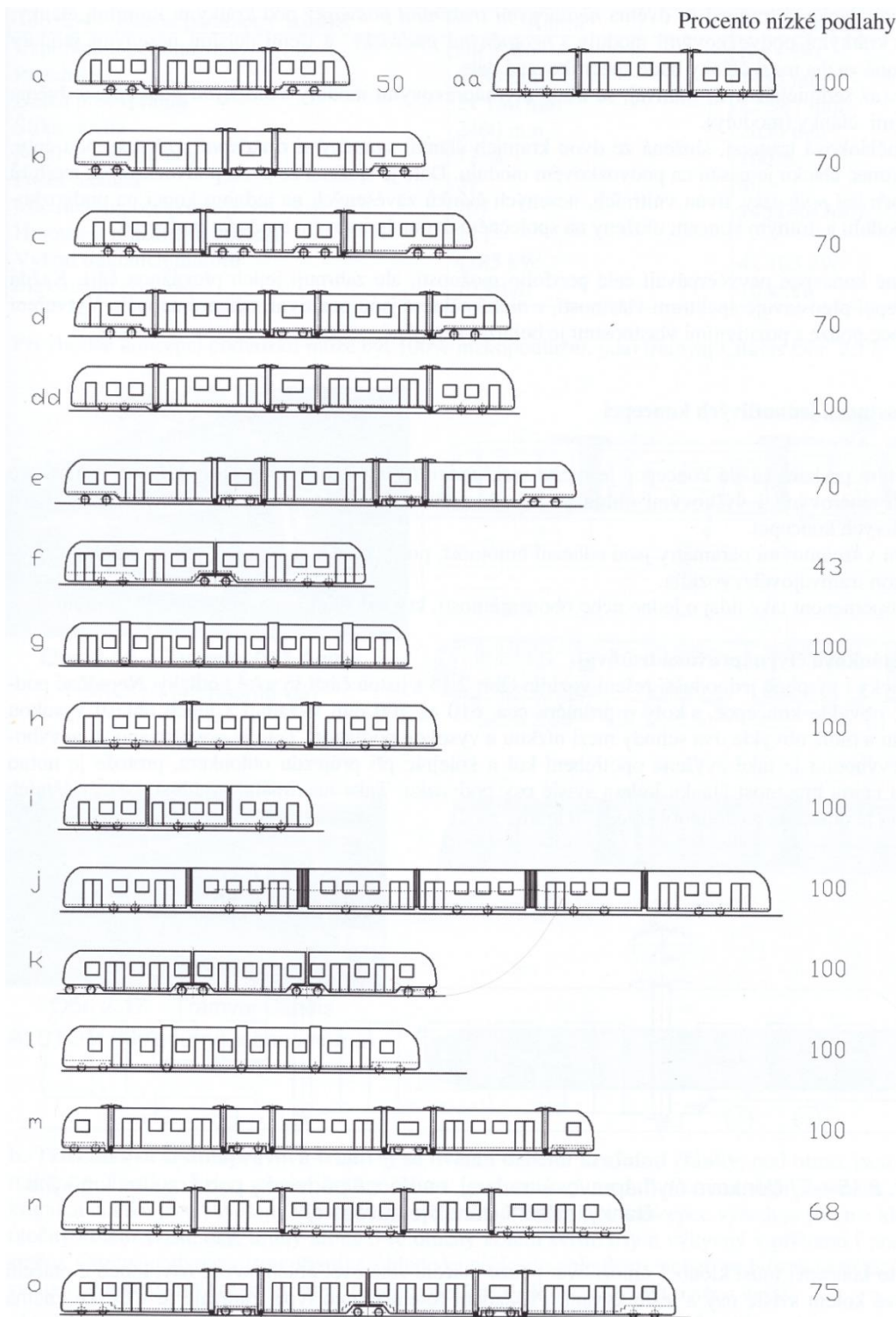


Obr. 6: Náprava od společnosti Walbo Railway [14]

Pro nízkopodlažní tramvaje s výškou podlahy do 350 mm je možným konstrukčním řešením použití nápravnice se samostatnými volně otočnými koly. Koncept nápravnice disponuje velkým zástavbovým prostorem, tudíž je možné razantně snížit podlahu. Průměr kol je obvykle v rozmezí 400 – 700 mm. Nápravnice obsahuje čepy pro uložení volně otočných kol nebo ložiskový domek pro nalisování ložiska. Na nápravnici se nachází také zahloubení pro primární vypružení. V případě hnacího podvozku je každé kolo poháněno vlastním trakčním motorem. Jednotlivá kola buďto obsahují brzdové kotouče a brzda je umístěna na brzdové konzoly nebo brzda může být integrována v pohonném systému. Konzoly brzd mohou být přímo na nápravnici nebo na rámu podvozku. Kola jsou obvykle odpružená pryží pro snížení hluku. Nápravnice, kromě nízkého těžiště a již zmíněné nízké podlahy, s sebou přináší spíše konstrukční komplikace. [1]

2.5 Koncepte nízkopodlažních tramvají

Od počátku vývoje nízkopodlažních tramvají vznikla řada koncepcí, z nichž lze vyčlenit několik významných provedení (viz Obr. 7). Článkové vozidlo musí plnit řadu základních požadavků, aby správně plnilo svojí funkci. Dále na vozidlo spadá několik aditivních požadavků, jako například průjezd horizontálními či vertikálními (konvexními a konkávními) oblouky. Každá koncepce se určitým způsobem vyjímá, což s sebou bohužel nese i jistá negativa.



Obr. 7: Koncepty tramvají [1]

Tramvaje je možné dělit dle různých charakteristik [1]:

- dle směru: jednosměrná, obousměrná
- dle koncepce: dvounápravová, čtyřnápravová, kloubová (článková, LRV, Tram-Train), vlečné vozy
- dle napěťové soustavy
- dle rozchodu
- dle výšky podlahy od T.K.
- dle podílu nízké podlahy

Dvounápravové tramvaje se dnes dále nevyužívají. Jedná se o historická vozidla, která byla využívána přibližně do 70. let minulého století. Jízdní vlastnosti, pohodlí, kapacita, rychlost a tak podobně jsou u dalších typů tramvají značně překonány.

Čtyřnápravové tramvaje oproti předchozímu typu lépe splňují rostoucí požadavky na vozidla MHD, jako jsou požadavky na počet sedících a stojících cestujících, větší dynamické parametry, zrychlení, průjezdnost malými oblouky či rychlou a efektivní výměnu cestujících. Mezi výhody patří výborné jízdní vlastnosti, dynamika, spolehlivost a pohodlí. Naopak mezi hlavní nevýhody patří vysoká podlaha, která zapříčiňuje obtížnou rychlou výměnu cestujících.

Čtyřnápravové částečně nízkopodlažní tramvaje obsahují střední nástupní nízkopodlažní prostor. Přejít mezi nízkou a vysokou podlahou je řešen pomocí schodů či rampy. Tento koncept částečně řeší nevýhody spojené s vysokou podlahou.

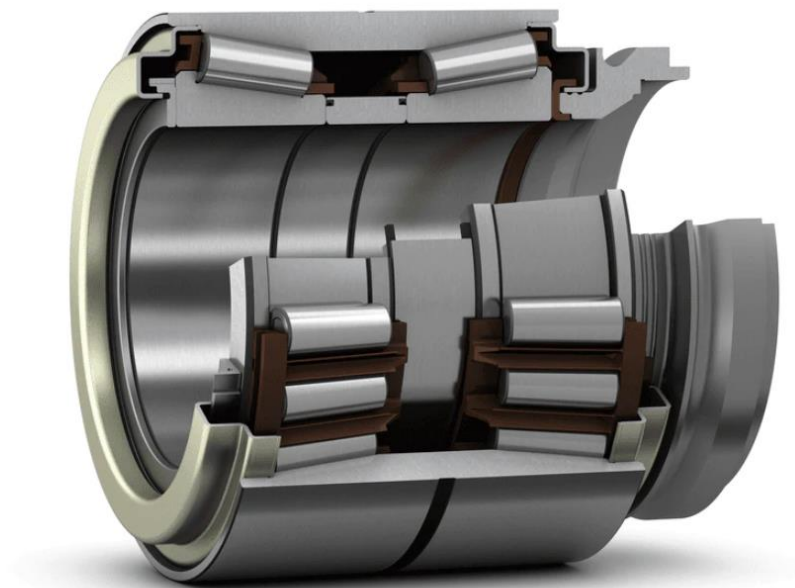
Kloubové tramvajové vozidlo splňuje zvýšené požadavky na přepravní kapacitu pomocí spřahování dvou či více vozidel. V případě vysokopodlažní varianty má stejné nevýhody jako čtyřnápravová tramvaj. Kloubová tramvaj však umožňuje obousměrný provoz, což ve vhodné zejména v případě, kdy vozidlo není možné otáčet na konečné stanici nebo jiné točně.

2.6 Nápravová ložiska

Nápravové ložisko je významný konstrukční prvek, jehož hlavním úkolem je spojení dvojkolí s ostatními mechanickými částmi pojezdu. Umožňuje otáčení dvojkolí a přenos silových účinků ve svislém, příčném a podélném směru. V současné době se používají výhradně valivá ložiska, z důvodu jasně převažujících vlastností oproti kluzným ložiskům. Mezi nepoužívanější typy ložisek patří:

- dvouřadá kuželíková
- dvouřadá soudečková naklápěcí
- dvojitá jednořadá válečková
- kompaktní ložiskové jednotky (TBU)

Právě kompaktní ložiskové jednotky jsou často používány, jelikož jejich vlastnosti jsou nejvhodnější. Tato ložisková jednotka jako základ využívá dvouřadé kuželíkové ložisko. Jednotka je z obou čel zalisována plechovými víky a dokonale utěsněna. Polymerové boční vložky tlumí rázy a zajišťují tichý chod. Ložiskové jednotky obsahují integrovaný systém snímání otáček, teploty nebo například vibrací. Tento systém převádí informace do palubní diagnostiky vozidla. Snímání otáček je důležité u hnacích vozidel při rozjezdu a brzdění, při kterém ochraňuje tramvaj před prokluzem kol [2], [3].



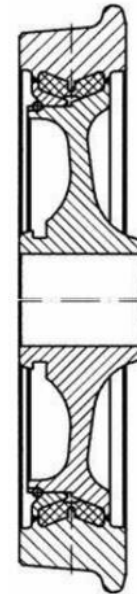
Obr. 8: Kompaktní ložisková jednotka SKF [15]

2.7 Kola

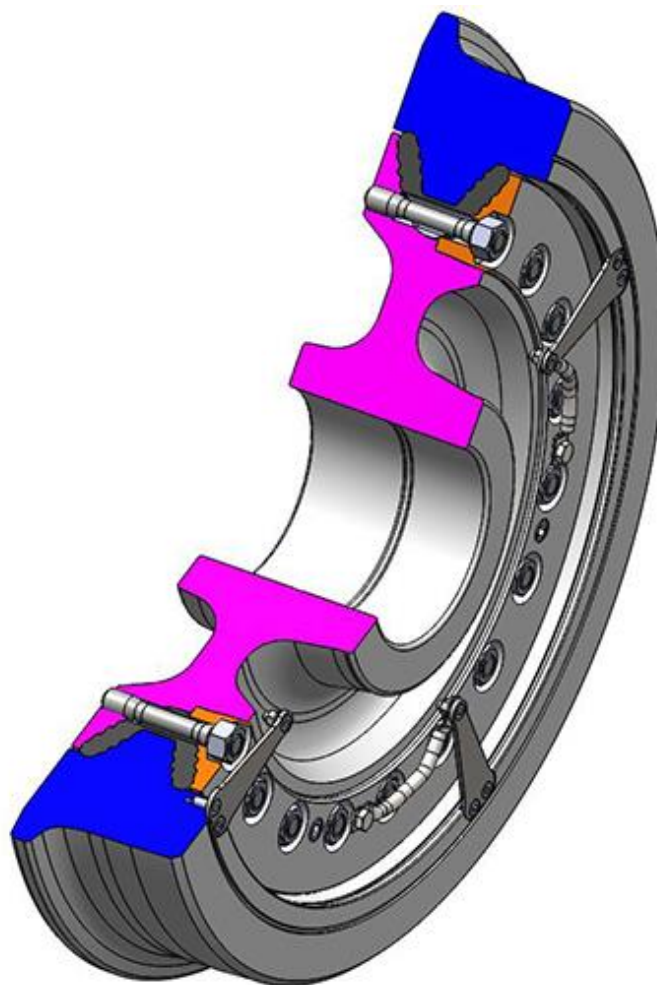
Kola jsou nepostradatelnou součástí všech typů kolejových vozidel. Složené pryží odpružené kolo obsahuje elastické a tlumící prvky, které jsou vloženy mezi věncovou a nábojovou částí. [3]

Kola složená mohou být šroubovaná, nešroubovaná s bloky namáhanými na tlak od zatížení vozu nebo nešroubovaná s bloky namáhanými na smyk od zatížení vozu.

- + obruč při opotřebování je vyměnitelná
- + možnost použití rozdílných materiálů
- + snížení hluku vozidla
- degradace pryže
- nevhodné pro dlouhodobé odstavení vozidla
- nutné uzemnění vozidla propojením obruče a kotouče



Obr. 9: Schéma složeného kola [16]



Obr. 10: Složené kolo společnosti Bonatrans [17]

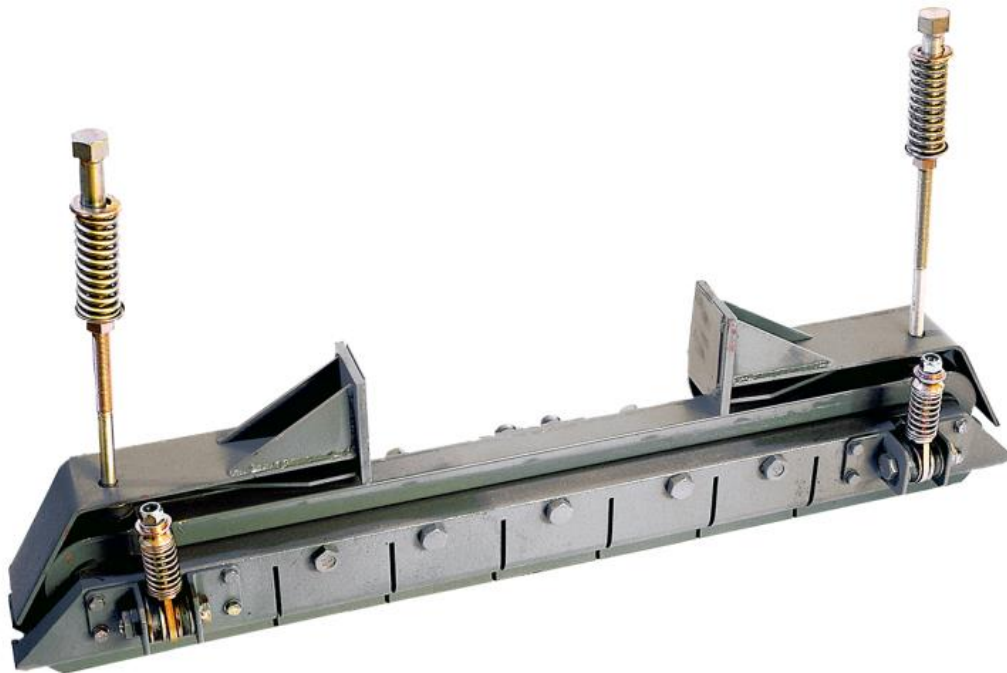
2.8 Brzdy

V závislosti na přenosu brzdě síly mezi vozidlem a kolejnicí jsou definovány dva systémy - adhezní a neadhezní. Účinnost adhezního brzdového systému je ovlivněna schopností kola přenášet tečné síly na kolejnici. [18] Naopak neadhezní brzdový systém je zcela nezávislý na kvalitě styku kola s kolejnicí, avšak slouží pouze jako doplněk pro adhezní brzdy.

U konvenčních železničních vozů s nápravou je brzdový kotouč obvykle nalisován na připravená sedla, které jsou umístěny na nápravě. V závislosti na hmotnosti a maximální rychlosti vozu jsou na nápravě nalisovány 2 až 4 brzdové kotouče. V případě malého zástavbového prostoru (například hnací podvozek s motorem na nápravě) mohou být kotouče umístěny na čelních plochách kol. Předchůdcem kotoučové brzdy byla zdržová (špalíková) mechanická brzda.

K hlavním výhodám kotoučové brzdy patří zejména plynulé brzdění, nízká hlučnost a úspora stlačeného vzduchu, jelikož pro aktivaci kotoučové brzdy je zapotřebí velmi malý zdvih pístu brzdového válce. Naopak hlavní nevýhoda kotoučové brzdy je nutnost využití dodatečných prvků pro očištění jízdní plochy pro zvýšení součinitele adheze. [19]

Velmi často je na některých podvozcích umístěna kolejnicová brzda. Třecí kolejnicová brzda se řadí mezi neadhezní brzdové systémy. Existují dva typy. Buďto elektromagnetická kolejnicová brzda nebo kolejnicová brzda s permanentními magnety. Dále je možné dělit kolejnicové brzdy dle vzdálenosti brzděho trámce od temene kolejnice. Nízké uložení – vzdálenost trámce od temene je přibližně 10 mm. Vysoké uložení – vzdálenost trámce činí zhruba 55 mm. Brzděná třecí síla je generována elektromagnety (nebo permanentními magnety), které přitahují trámec směrem k temenu kolejnice. Velikost síly je ovlivněna buzením, délkou brzděho trámce a materiálem stykové plochy (součinitel tření). Kolejnicová brzda doplňuje adhezní brzdový systém, a jelikož se rychle opotřebovává, tak není využívána pro provozní brzdění. Hlavní výhoda spočívá v nezávislosti na trolejové vedení. Je totiž napájena z trakční baterie, což umožňuje využití pro nouzové, parkovací či zajišťovací brzdění. [20]



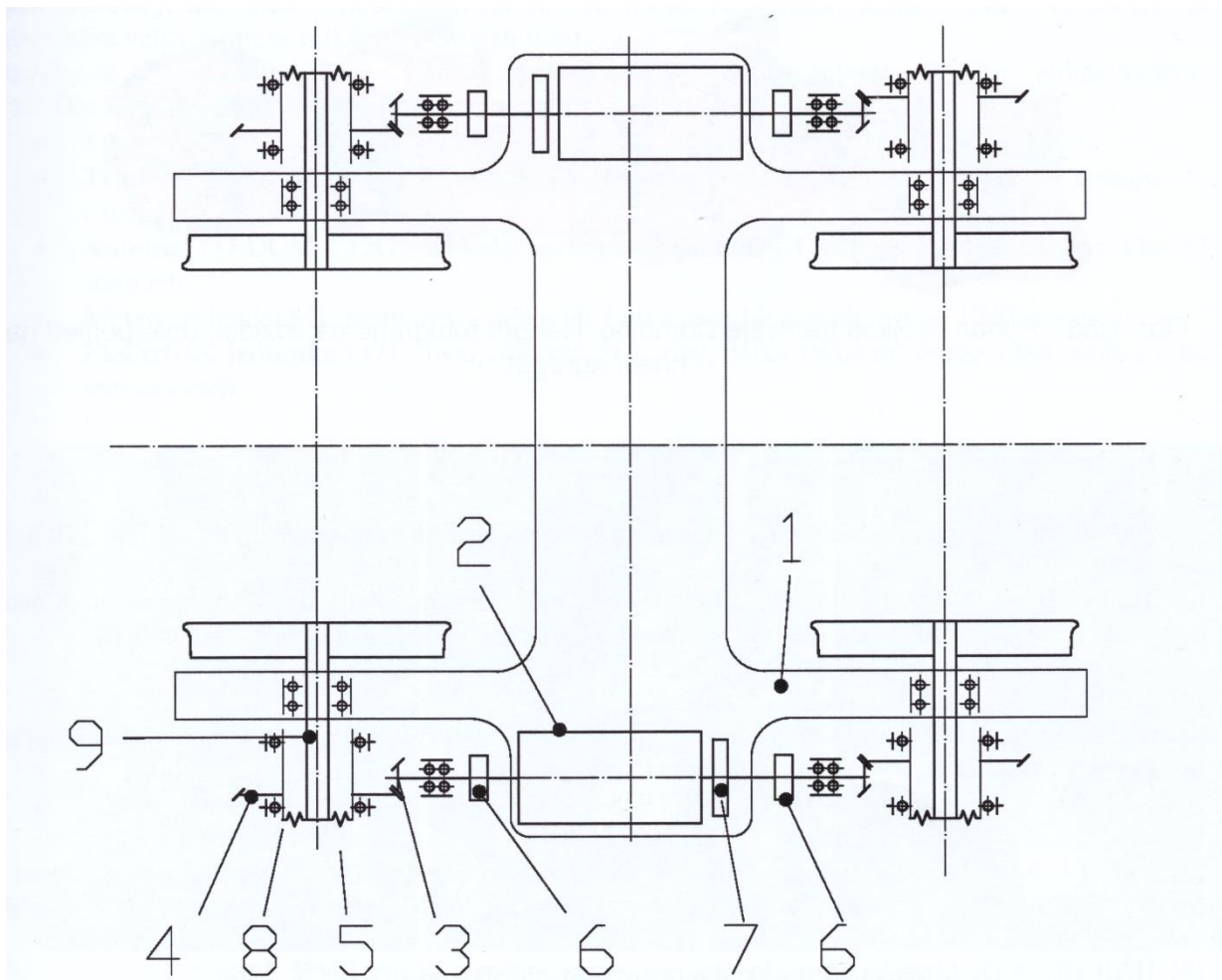
Obr. 11: Kolejnicová brzda Alfa Union [21]

2.9 Pohon volně otočných kol

Nápravnice nabízí několik druhů pohonů. Mezi tyto pohony patří pohon v kole, pohon se svislou osou motoru, pohon kloubovou hřídelí v dutině motoru nebo skupinový motor dvojkolí.

2.9.1 Skupinový pohon dvojkolí

Tento typ využívá kupříkladu tramvaj Combino od firmy Siemens. Ze schématu (viz Obr. 7) vyplývá princip tohoto pohonu. Trakční motor (2) je upevněn na rámu (1). Z obou stran motoru vystupuje hřídel. Na obou stranách hřídele probíhá přenos momentu přes pružnou spojku (6) na pastorek (3). Výstupní hřídel motoru obsahuje kotoučovou brzdu (7). Následně je moment přenášen na velké kuželové kolo (4), které je uloženo na duté hřídeli (8). Tato hřídel je spojena s nápravou (9) přes další pružnou spojku (5). Celé pohonné ústrojí je pevně upevněno k rámu a je zcela vypružené. [1]



Obr. 12: Schéma pohonu tramvaje Combino od firmy Siemens [1]

3 Nízkopodlažní úzkorozchodné tramvaje

Škoda 18T – Eskişehir, Turecko

Pětičlávková jednosměrná 100% nízkopodlažní tramvaj s třemi dvounápravovými neotočnými podvozky a čtyřmi trakčními motory. Tramvaj také obsahuje trakční baterie, které umožňují jízdu bez trolejového vedení s maximálním dojezdem 5 km.

Tabulka 3: Parametry tramvaje Škoda 18T [22]

Rozchod	Podíl nízké podlahy	Výkon	Rychlost	Rok výroby
1000 mm	100 %	4x100 kW	70 km/h	2018



Obr. 13: Škoda 18T [22]

Stadler Tango – Basilej, Švýcarsko

Šestičlávková jednosměrná 75% nízkopodlažní tramvaj. Tramvaj je složena z 2x3 modulů. Konce modulů jsou posazeny na jeden podvozkový modul.

Tabulka 4: Parametry tramvaje Stadler Tango [1]

Rozchod	Podíl nízké podlahy	Výkon	Rychlost	Rok výroby
1000 mm	75 %	4x125 kW	80 km/h	2018



Obr. 14: Stadler Tango [23]

Škoda 30T – Bratislava, Slovensko

Pětičlávková jednosměrná tramvaj, která je z 92% nízkopodlažní. Disponuje čtyřmi podvozky, z nichž krajní jsou otočné. Z typu 29T vychází typ 30T, který je obousměrný.

Tabulka 5: Parametry tramvaje Škoda 30T [24]

Rozchod	Podíl nízké podlahy	Výkon	Rychlost	Rok výroby
1000 mm	92 %	6x100 kW	65 km/h	2015



Obr. 15: Škoda 30T [24]

Breda VLC – Lille, Francie

Čtyřčlávková obousměrná 100% nízkopodlažní tramvaj s dvounápravovými hnacími podvozky u krajních článků. Mezi ostatními články se nachází nestandardní jednonápravový podvozek, který umožňuje dostatečně širokou uličku s nízkou podlahou pro cestující.

Tabulka 6: Parametry tramvaje Breda VLC [1]

Rozchod	Podíl nízké podlahy	Výkon	Rychlost	Rok výroby
1000 mm	100 %	2x205 kW	70 km/h	1994



Obr. 16: Breda VLC [25]

4 Konstrukční návrh nápravnice

Upřesňující zadání od zadavatele:

PODVOZEK HNACÍ, OTOČNÝ

ROZCHOD:	1 000 mm
ROZKOLÍ:	950 mm
ROZVOR:	1 850 mm
PRŮMĚR KOL:	650 / 560 mm
ŠÍŘE KOL:	100 mm
VÝŠKA PODLAHY NAD TK:	350 mm
VEDENÍ DVOJKOLÍ:	KONUSFEDER

PRIMÁRNÍ PRUŽINA

VNĚJŠÍ PRŮMĚR OBALOVÉ PLOCHY:	110 mm
VÝŠKA PRUŽINY:	100 mm
SVISLÁ TUHOST:	520 N/mm
PŘÍČNÁ A PODÉLNÁ TUHOST:	450 N/mm
POČET NA PODVOZEK:	8 ks

POHON

MAX. ROZJEZD. /BRZDOVÝ MOMENT:	1,3 kNm
--------------------------------	---------

BRZDOVÁ JEDNOTKA

BRZDNÁ SÍLA:	38 kN
STATICÝ SOUČ. TŘENÍ TŘECÍ DVOJICE:	0,5
DYNAMICKÝ SOUČ. TŘENÍ TŘECÍ DVOJICE:	0,35
TŘECÍ POLOMĚR:	140 mm
POČET NA NÁPRAVNICI:	2 ks
TYP:	BJ SE STŘADAČEM

KOLEJNICOVÁ BRZDA

BRZDNÁ SÍLA:	70 kN
--------------	-------

SMETADLO – není instalováno

HMOTNOSTI

NEVYPRUŽENÉ HMOTY:	1 075 kg
JEDNOU VYPRUŽENÉ HMOTY:	2 900 kg
DVOJKOLÍ:	1 050 kg
PODVOZEK:	4 500 kg

ZATÍŽENÍ NA NÁPRAVNICI

STAV – EL E:	8 000 kg/NÁPRAVA
STAV – EL O:	10 000 kg/NÁPRAVA
STAV – EL F:	11 000 kg/NÁPRAVA

TĚŽISTĚ VOZU

STAV – EL E:	2 050 mm
STAV – EL O:	1 950 mm
STAV – EL F:	1 820 mm

MATERIÁL

PLECH	S355NL
ODLITEK	G20Mn5+N

SE SVAŘOVÁNÍM

NORMY

PRO VÝPOČET NÁPRAVNICE:	ČSN EN 13 749
	ČSN EN 13 103-1
	FKM-Richtlinie

NÁVRH NA VYJÍMEČNÉ ZATÍŽENÍ

VYJÍMEČNÉ SÍLY:	PODÉLNÉ
	PŘÍČNÉ
	SVISLÉ

4.1 Materiály pro nápravníci

4.1.1 S355NL

Svařitelná nelegovaná konstrukční ocel. V případě S355NL se jedná o za tepla válcovanou, středně tažnou, nízkouhlikovou manganovou ocel. Má výbornou svařitelnost a dobrou rázovou houževnatost. Shodný stupeň jakosti s ČSN 11 503, kterou plně nahrazuje. Na rozdíl od ČSN 11 503 zaručuje hodnoty při zkoušce rázem při -50 °C. [26]

4.1.2 S460NL

S460NL je vysokopevnostní nízkolegovaná konstrukční ocel. Tato ocel má ekvivalent pouze v EN 10027-2, dle normy ČSN nemá označení. Ocel je vhodná zejména pro kované výrobky. S460NL je svařitelná s dobrou rázovou odolností i při nízkých teplotách. [26]

4.1.3 42CrMo4+QT

Jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou chrom – molybdenovou ocel. Má vyšší prokalitelnost, tudíž je možné ji použít pro namáhané díly, jako jsou kupříkladu hřídele. Ekvivalent ČSN 15 142. Má horší obrábitelnost než 42CrMoS4, z důvodu nižšího obsahu síry. Nemá zaručenou svařitelnost. Postfix +QT označuje zušlechtěnou ocel. [27]

4.1.4 34CrNiMo6+QT

Středně legovaná ušlechtilá chrom – nikl – molybdenová ocel s vysokou prokalitností pro vysoce namáhané díly. Má příznivý poměr pevnosti k mezi kluzu a vysokou houževnatost, díky které brzdí šíření únavových trhlin. Vyznačuje se také vysokou mezí únavy při střídavém a kombinovaném namáhání. ČSN ekvivalent je 16 343. Postfix +QT označuje zušlechtěnou ocel. Svařitelnost je obtížná. [27]

4.1.5 30CrNiMo8+QT

Středně legovaná ušlechtilá chrom – nikl – molybdenová ocel s vysokou prokalitností pro velmi namáhané a rozměrné díly. Mezi hlavní přednost patří vysoké hodnoty meze únavy při střídavém a kombinovaném namáhání. Není náchylná k popouštěcí křehkosti. Kalí se převážně do oleje. Nemá ČSN ekvivalent. Postfix +QT označuje zušlechtěnou ocel. Není vhodná ke svařování. [27]

4.1.6 G20Mn5+N

Jedná se o nízkolegovanou manganovou ocel na odlitky pro nízkoteplotní aplikace. ČSN ekvivalent 42 2712. Postfix +N označuje normalizačně žíhaný nebo normalizačně válcovaný materiál. Má dobrou svařitelnost. [27]

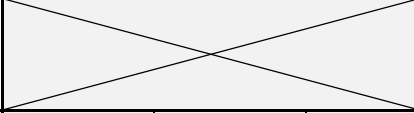
4.1.7 G24Mn6+QT2

G24Mn6 je nízkolegovaná manganová ocel na odlitky. Má relativně nízkou tažnost a poměrně vysokou pevnost v tahu v porovnání s ostatními materiály pro odlitky. ČSN ekvivalent 42 2709. Postfix +QT2 označuje kalenou a temperovanou ocel. [27]

Tabulka 7: Chemické složení jednotlivých ocelí [28], [29]

Materiál	Chemické složení [%]				
	C	Si	Mn	Ni	P
S355NL	max. 0,18	max. 0,5	0,9-1,65	max. 0,5	max. 0,025
S460NL	max. 0,2	max. 0,6	1-1,7	max. 0,8	max. 0,025
42CrMo4+QT	0,38-0,45	max. 0,4	0,6-0,9	-	max. 0,025
34CrNiMo6+QT	0,3-0,38	max. 0,4	0,5-0,8	1,3-1,7	max. 0,025
30CrNiMo8+QT	0,26-0,34	max. 0,4	0,5-0,8	1,8-2,2	max. 0,025
G20Mn5+N	0,17-0,23	max. 0,6	1-1,6	max. 0,8	max. 0,02
G24Mn6+QT2	0,2-0,25	max. 0,6	1,5-1,8	-	max. 0,02
	S	Cr	Mo	Cu	V
S355NL	max. 0,02	max. 0,3	max. 0,1	max. 0,55	max. 0,12
S460NL	max. 0,02	max. 0,3	max. 0,1	max. 0,55	max. 0,2
42CrMo4+QT	max. 0,035	0,9-1,2	0,15-0,3	-	-
34CrNiMo6+QT	max. 0,035	1,3-1,7	0,15-0,3	-	-
30CrNiMo8+QT	max. 0,035	1,8-2,2	0,3-0,5	-	-
G20Mn5+N	max. 0,02	max. 0,3	max. 0,12	max. 0,3	max. 0,03
G24Mn6+QT2	max. 0,015	-	-	-	-

Tabulka 8: Mechanické vlastnosti jednotlivých ocelí [28], [29]

Materiál	Mechanické vlastnosti							
				KV [J]				
				20 °C	0 °C	-20 °C	-40 °C	-50 °C
Re min [MPa]	Rm min [MPa]	A [%]						
S355NL	275-355	450-630	22	63	55	47	31	27
S460NL	370-460	530-720	22	63	55	47	31	27
42CrMo4+QT	460-900	700-1300	10 - 14	20	-	-	14	-
34CrNiMo6+QT	600-1000	950-1400	9 - 13	45	-	-	40	-
30CrNiMo8+QT	800-850	930-1230	8 - 10	45	-	-	44	-
G20Mn5+N	300	480-620	20	50	-	-	27	-
G24Mn6+QT2	400-550	600-800	12 - 18	-	-	27	27	-

Re... mez kluzu

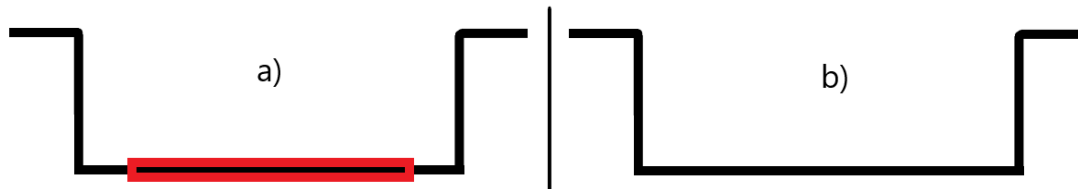
Rm... mez pevnosti

A... tažnost

KV... nárazová energie

4.2 Způsoby výroby nápravnice

Výrobu nápravnice je možné rozdělit na dva obecné typy. Nápravnice je kompletována přivařením spojnice nebo je vyrobena vcelku. Varianta se spojnici nápravnice (viz Obr.9 a)), která je vyrobena samostatně, nabízí možnost použití jiného materiálu a jiných výrobních metod. Spojnice je buďto odlitek nebo svařenec z plechů. Následně je spojnice přivařena k nápravnici. V případě druhé varianty (viz Obr.9 b)) je nápravnice vyrobena vcelku a je možné použít jen jeden materiál a jednu výrobní metodu (odlívání nebo kování).



Obr. 17: Náčrtek výroby nápravnice – a) nápravnice se spojnici; b) nápravnice vcelku

4.2.1 Nápravnice odlitá celá

Kompletní nápravnici je možné vyrobit odlitím. Složitá forma umožňuje dosažení komplexních tvarů, což ovšem přináší určité nevýhody. Spojnice bude mít horší mechanické vlastnosti, které je nutné kompenzovat zvýšením objemu materiálu, což zvyšuje cenu i hmotnost. Složitá forma je drahá na výrobu, tudíž se tato technologie hodí spíše pro středně až velkosériovou výrobu.

4.2.2 Nápravnice kovaná celá

Výroba nápravnice pomocí kování vyniká ve finálních mechanických vlastnostech výkovku. Nápravnice má však velmi složitý tvar a je nutné použít zápustkové kování, při kterém jsou použity speciální formy určitého tvaru a výkovek je postupně tvarován ve finální produkt. Výroba forem a energetická náročnost procesu způsobuje, že tato technologie bývá velmi drahá. Z toho důvodu je nutné uvažovat se středně až velkosériovou výrobou, aby byla cena konečného výrobku přijatelná.

4.2.3 Odlitek se spojnici

Tento způsob výroby koreluje s odlitím nápravnice vcelku. Krajní části nápravnice jsou vyrobeny odlitím. Střední část (spojnice) však může být vyrobena svařením ocelových plechů nebo také odlitím. Tímto odpadá cenová náročnost velké složité formy a horší mechanické vlastnosti spojnice. Je však nutné zvolit navzájem svařitelný materiál. Nevýhodou této metody jsou rizika, která sváření doprovází (například vady jakou jsou trhliny a tak podobně).

4.2.4 Výkovek se spojnici

Krajní části nápravnice jsou vyrobeny zápustkovým kovááním jako v předchozí metodě, kdy je nápravnice kována vcelku. Další postup je stejný jako v předchozí podkapitole 4.2.3. .

4.3 Vyhodnocení výrobních technologií

Následující tabulka slouží pro určení vhodné výrobní varianty dle jednotlivých kritérií. Každé kritérium jednotlivých výrobních metod je obodováno určitým počtem bodů. Škála bodování se pohybuje v rozmezí 1 až 5 bodů. V případě, že dané kritérium je nejvhodnější, tak obdrží 5 bodů. Naopak, pokud je nejhorší, tak je ohodnoceno 1 bodem.

Tabulka 9: Hodnocení kritérií

Výrobní metoda Kritérium	Nápravnice odlitá celá	Nápravnice kovaná celá	Nápravnice odlitá se spojnicí	Výkovek se spojnicí
Cena výroby	4	4	2	3
Hmotnost	1	1	5	4
Náročnost	3	3	3	1
Mechanické vlastnosti	4	5	3	3
Sériovost	4	4	5	3
Suma	16	17	18	14

Dle přechozí tabulky bylo zvolena výrobní metoda odlité nápravnice se spojnicí, jelikož suma jednotlivých kritérií je nejpříznivější.

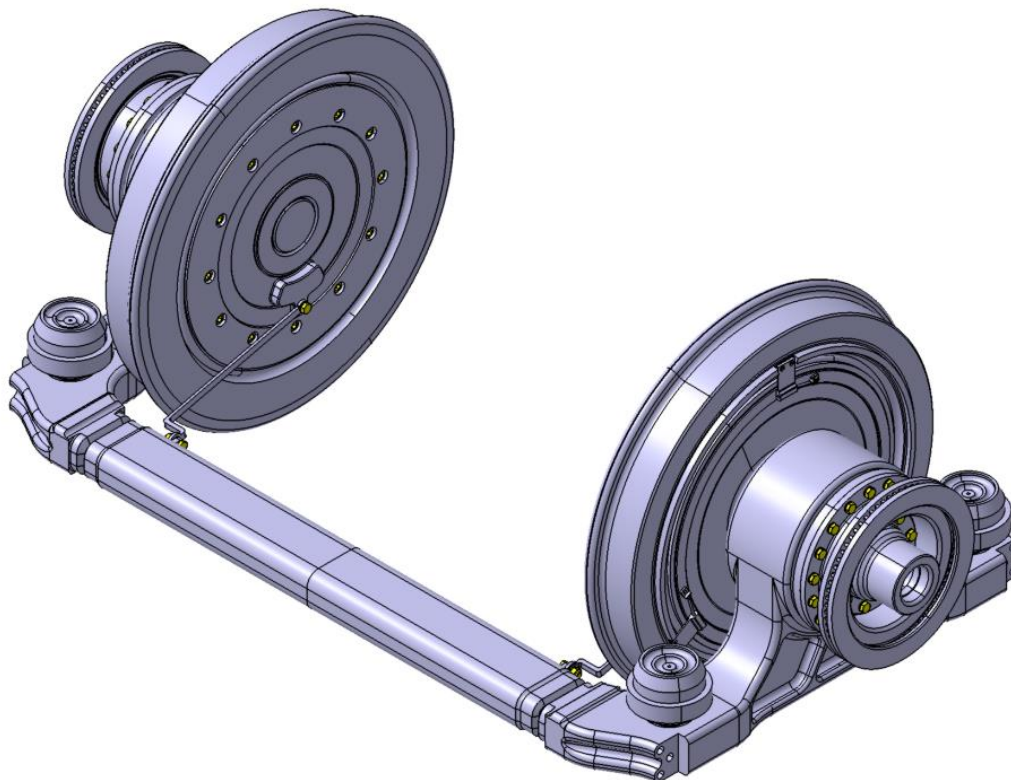
4.4 Návrh nápravnice

Návrh nápravnice vychází z různých konceptů nápravnic, jako například ze zmíněného podvozku 15T nebo podvozku Siemens Combino SF30. Konečný návrh probíhal na základě upřesňujícího zadání od zadavatele.

Jedním ze základních požadavků je rozchod 1000 mm a rozkolí 950 mm, z toho důvodu byla použita varianta, ve které jsou kola uložena ve vnitřním prostoru nápravnice. Kola jsou složená a odpružená pryží. Kolo je nalisováno na hřídel, která je uložena v ložiskovém domku. Uložení zajišťuje kompaktní ložisková jednotka TBU. Na hřídel je pomocí šroubových spojů připojen brzdový kotouč. Motor přenáší moment na hřídel pomocí pružné spojky, která je také připojena pomocí šroubových spojů.

Na ramenech nápravnic jsou otvory a dosedové plochy pro primární vypružení. Funkci primárního vypružení plní čtyři konusfedery, neboli kuželové pryžokovové pružiny. Pružiny sestávají z vnitřní části, která je umístěna v otvoru a zajištěna šroubem. Následně obsahuje dva pryžové elementy, které jsou umístěny mezi vnější obalovou plochou a vnitřní částí. Mezi pryžovými elementy se nachází kovová podložka.

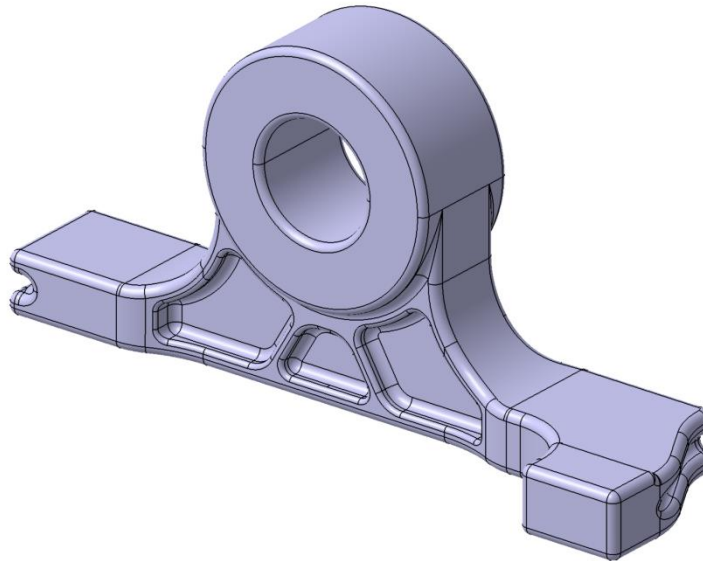
Uzemnění se nachází mezi věncovou a nábojovou částí. Následně je však nutné uzemnit i nábojovou část kola, což zajišťuje uzemňovací zařízení, které je pomocí ložisek uloženo v nábojové části kola. Toto zařízení je pevně spojeno se spojnicí prostřednictvím táhla. K redukci rázů a vibrací slouží silentblok umístěný v oku spojení mezi spojnicí a táhlem.



Obr. 18: Sestava nápravnice

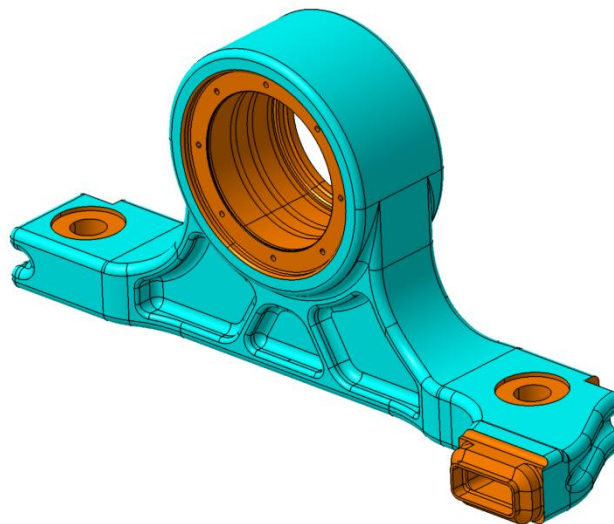
4.4.1 Rameno nápravnice

Rameno nápravnice je vyrobeno odlitím z materiálu G20Mn5+N, který má dobrou svařitelnost. Odlitek obsahuje vybrání na určitých místech pro redukci hmotnosti.



Obr. 19: Rameno – odlitek

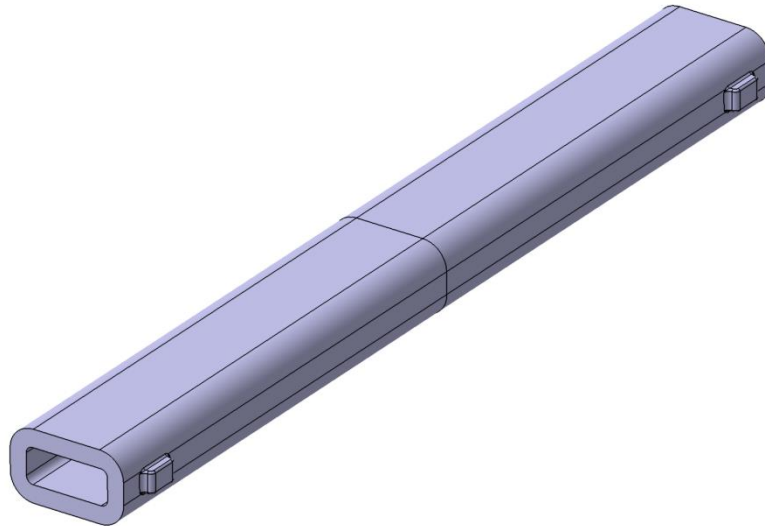
Odlitek je následně obroben. Obrobené plochy jsou značeny oranžově. Je nutné vytvořit otvory pro primární vypružení. Ze spodní strany je vytvořena dosedová plocha pro tvarovou podložku, která slouží pro uchycení vypružení pomocí šroubového spoje. Dále je obrobena vnitřní strana ložiskového domku a také vnitřní čelo nápravnice, které slouží pro umístění příruby pro zachycení ložiska. Další obrobení se vyskytuje na vnější straně, která slouží pro umístění konzoly kolejnicové brzdy nebo pro manipulaci s ramenem. Poslední obrobení je v místech, které slouží pro svaření ramene se spojnicí. Druhé rameno má symetrické provedení.



Obr. 20: Rameno - obrobek

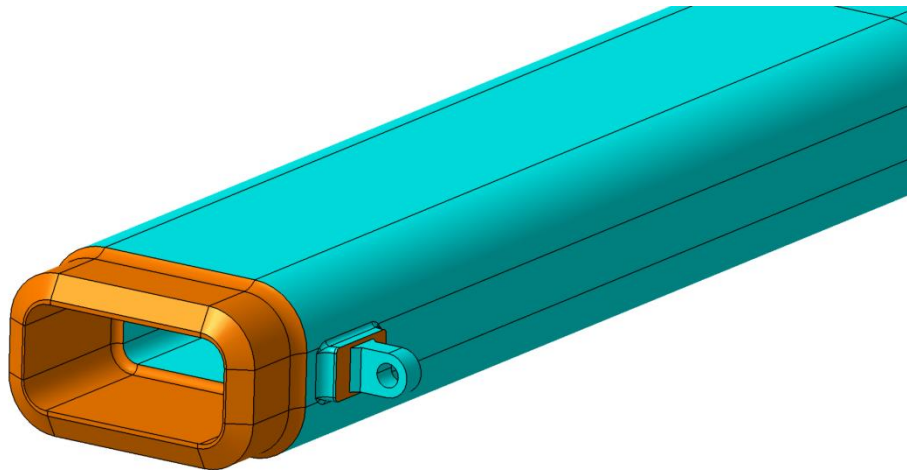
4.4.2 Spojnice

Odlitek spojnice je vyroben ze stejného materiálu jako rameno nápravnice. Na odlitek jsou následně navařeny oka pro uchycení táhla uzemňovacího zařízení. Tyto oka jsou vyrobeny z plechu z oceli S355NL. Tato ocel je za tepla válcovaná a má výbornou svařitelnost.



Obr. 21: Spojnice – odlitek

Odlitek je následně obroben, čímž vznikne plocha svaření spojnice s ramenem. Tyto plochy jsou značeny oranžově. Tloušťka obrobené spojnice činí 12 mm.

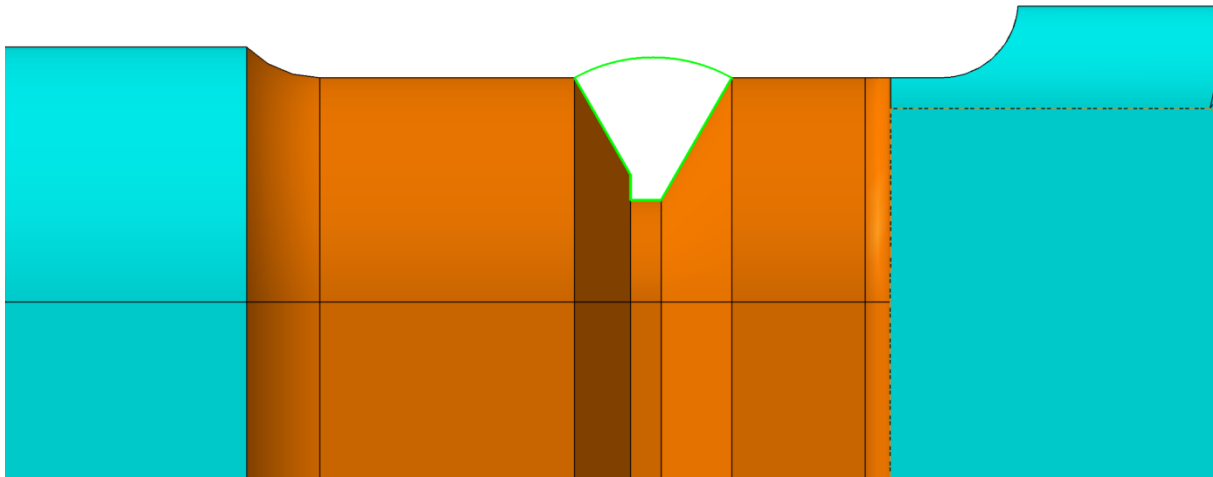


Obr. 22: Spojnice – obrobek

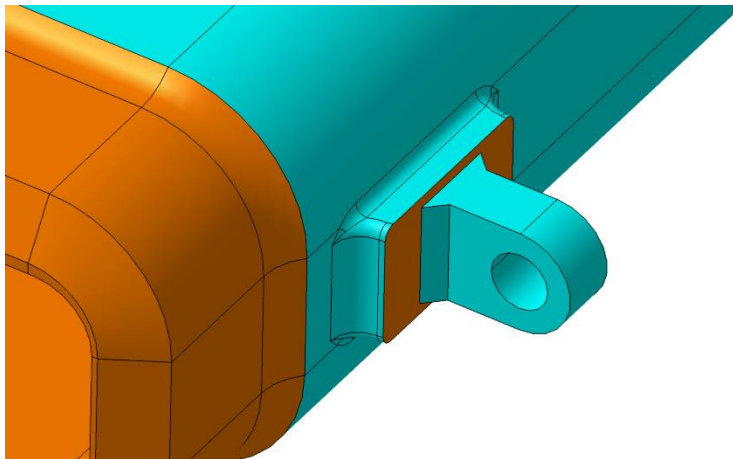
4.4.3 Svar

Spojnice s ramenem nápravnice jsou pevně spojeny pomocí svaru. Jedná se o V-svar, přesah svaru činí 2 mm. Mezera mezi jednotlivými prvky dosahuje hodnoty 3_0^{+1} mm. Otupení na straně spojnice činí 2 mm. Úhel svaru je 60° . Bezpečnostní kategorie CP B. Oko je ke spojnici přivařeno pomocí oboustranného koutového svaru. Bezpečnostní kategorie CP C1. Kontrola svarů pomocí ultrazvuku dle EN ISO 17640, magnetickou zkouškou dle EN ISO 17638 a vizuální kontrolou dle EN ISO 17637A ve 100 % objemového množství.

Dle ČSN EN 24063 byla zvolena metoda 135, což je obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (neboli metoda MAG).



Obr. 23: Svar – spojnice a rameno

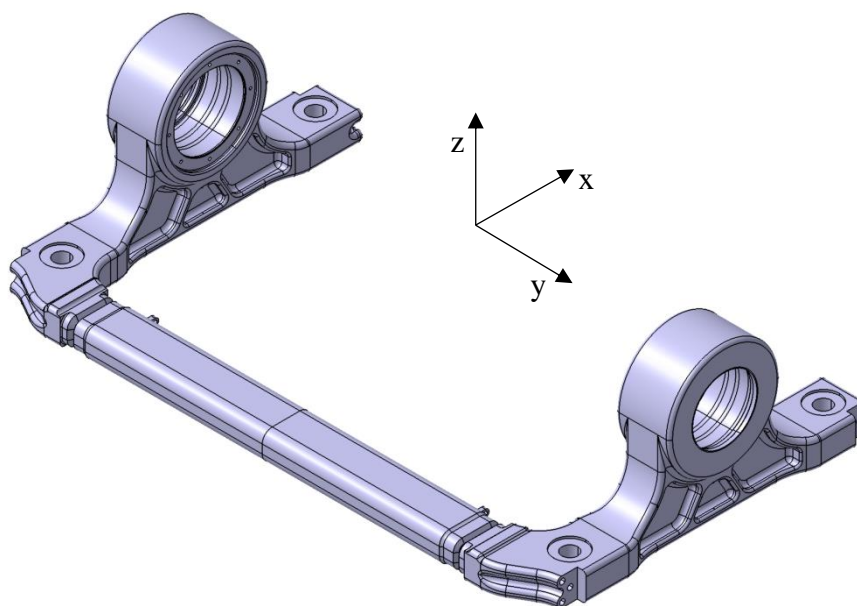


Obr. 24: Svar - oko a spojnice

4.5 Výpočet nápravnice

Pevnostní výpočet výjimečného zatížení byl proveden v souladu s VDV 152 [4] a ČSN EN 13749 [5]. Tramvajové vozidlo spadá do kategorie P-IV (dle ČSN VDV 152) a kategorie B-IV (dle ČSN EN 13479). Výpočet je proveden na navržené nápravnici (viz Obr. 25).

Souřadný systém je zobrazen na obrázku níže. Kladný směr osy ,x' (podélná osa vozidla) je ve směru jízdy. Osa ,y' je příčná osa vozidla. Kladný směr osy ,z' směřuje vzhůru od temena kolejnice (rovina ,xy').



Obr. 25: Sestava nápravnice pro výpočet

Potřebná data (viz Tabulka) pro výpočet nápravnice dle VDV 152 [4] a ČSN EN 13749 [5].

Tabulka 10: Potřebné hodnoty pro výpočet

Název	Označení	Hodnota	Jednotka
Gravitační zrychlení	g	9,81	m/s ²
Nápravové zatížení plného vozu	m ₁ ⁺	11 000	kg/náprava
Nevypružené hmoty	m _{nh}	1 075	kg
Jednou vypružené hmoty	m _{jvh}	2 900	kg
Váha cestujících – výjimečné zatížení	P1	3 000	kg
Maximální nápravové zatížení	m _n	11 000	kg
Hmotnost podvozku bez vypružených hmot	m _{np1}	6 925	kg
Hmotnost podvozku	m ⁺	4 500	kg

4.5.1 Výpočet vertikální výjimečné síly

$$F_{zMAX} = (m_1^+ - m_{nh} - m_{jvh}) * g = (11000 - 1075 - 2900) * 9,81 = 68\,915,25\,N$$

Zatížení ve vertikálním směru na jednu primární pružinu:

$$F_z = \frac{F_{zMAX}}{4} \doteq 17\,228,81\,N$$

4.5.2 Výpočet příčné výjimečné síly

Hodnoty zrychlení pro výjimečné zatížení pro kategorii P-IV udává VDV 152 [4].

$$F_{yMAX} = (m_1^+ + P1) * a_{yc} + \frac{(m^+ - m_{nh}) * a_{yb}}{2}$$
$$F_{yMAX} = (8000 + 3000) * 3,3 + \frac{(4500 - 1075) * 8,5}{2}$$
$$F_{yMAX} = 50\,856,25\,N$$

Pro výjimečné zatížení platí:

$$F_{yEX} = 0,6 * F_{yMAX} = 30\,513,75\,N$$

Zatížení v příčném směru na jednu primární pružinu:

$$F_y = \frac{F_{yMAX}}{4} \doteq 7\,628,44\,N$$

4.5.3 Výpočet podélné výjimečné síly

$$F_{xMAX} = 0,41 * (g * (m_1^+ + P1) + \frac{g * (m^+ - m_{nh})}{2})$$
$$F_{xMAX} = 0,41 * (9,81 * (8000 + 3000)) + \frac{9,81 * (4500 - 1075)}{2} = 61\,042,73\,N$$

Zatížení ve vertikálním směru na jednu primární pružinu:

$$F_x = \frac{F_{xMAX}}{4} \doteq 15\,260,68\,N$$

4.5.4 Kombinace namáhání

Svislá síla má pouze jeden směr, jelikož se jedná o zatížení od vozu. Příčné a podélné síly mohou mít 2 směry. Z toho důvodu vznikají 4 stavy namáhání.

V následující tabulce jsou shrnuty směry sil F_x , F_y , F_z . Kladné směry jsou uvažovány následovně (viz Obr. 25):

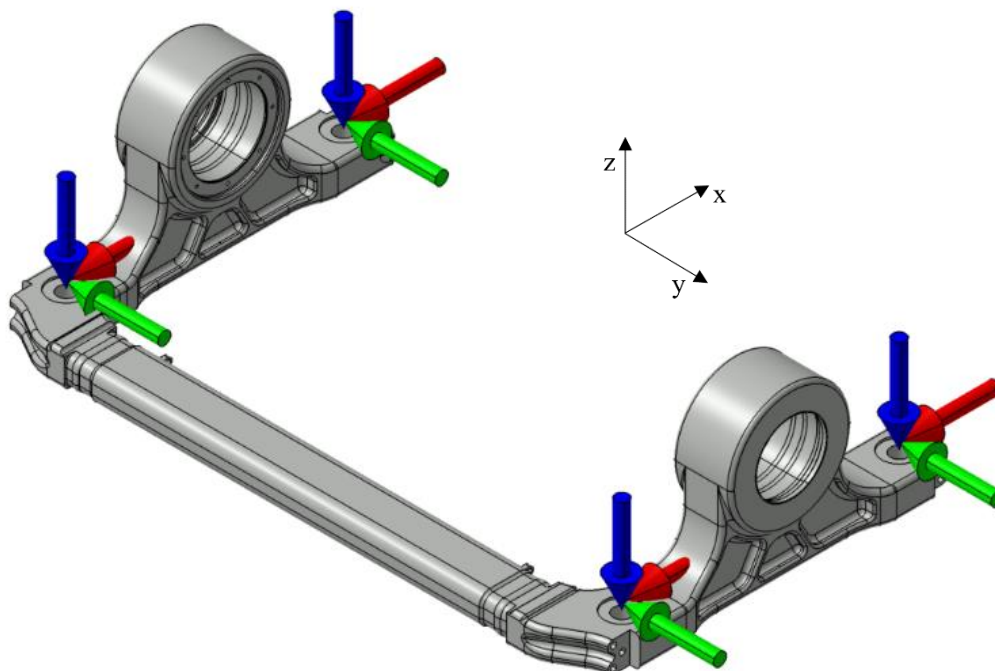
- směr x: kladný ve směru jízdy
- směr y: kladný ve směru k pravému rameni nápravnice
- směr z: kladný ve směru od temena kolejnice

Tabulka 11: Orientace sil v jednotlivých stavech

	Stav 1	Stav 2	Stav 3	Stav 4
F_x	- 15 260,68 N	+15 260,68 N	- 15 260,68 N	+ 15 260,68 N
F_y	- 7 628,44 N	- 7 628,44 N	+ 7 628,44 N	+ 7 628,44 N
F_z	- 17 228,41 N			

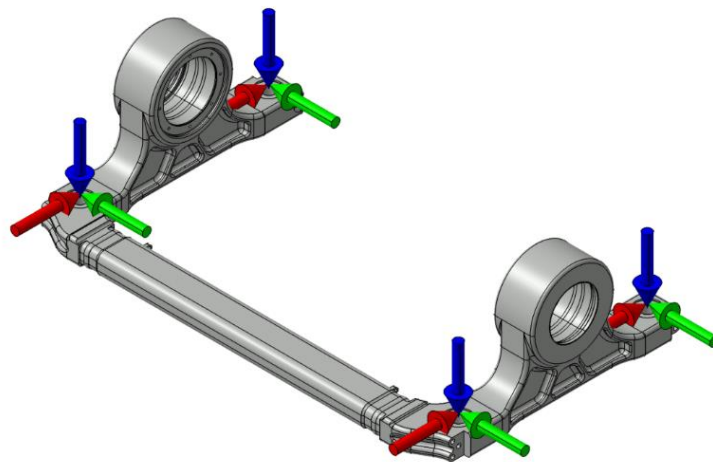
4.5.4.1 1. stav

Tento stav vychází ze záporné orientace sil F_x a F_y . Zatížení ve směru z je v záporném směru, jelikož síla tlačí směrem k temenu kolejnice. Síla F_z má ve všech stavech stejný směr. V následujících podkapitolách jsou znázorněny ostatní stavy, které se řídí Tabulkou 11.



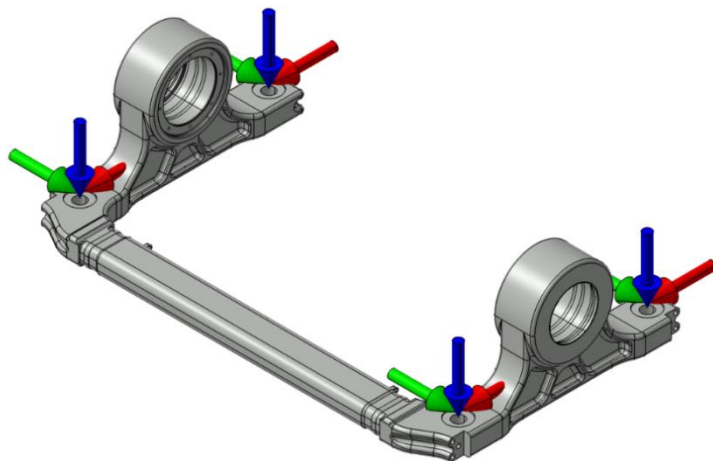
Obr. 26: Stav 1

4.5.4.2 2. stav



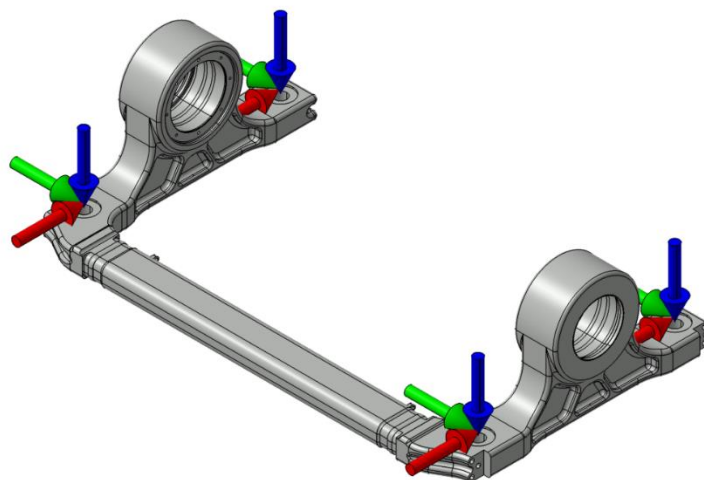
Obr. 27: Stav 2

4.5.4.3 3. stav



Obr. 28: Stav 3

4.5.4.4 4. stav



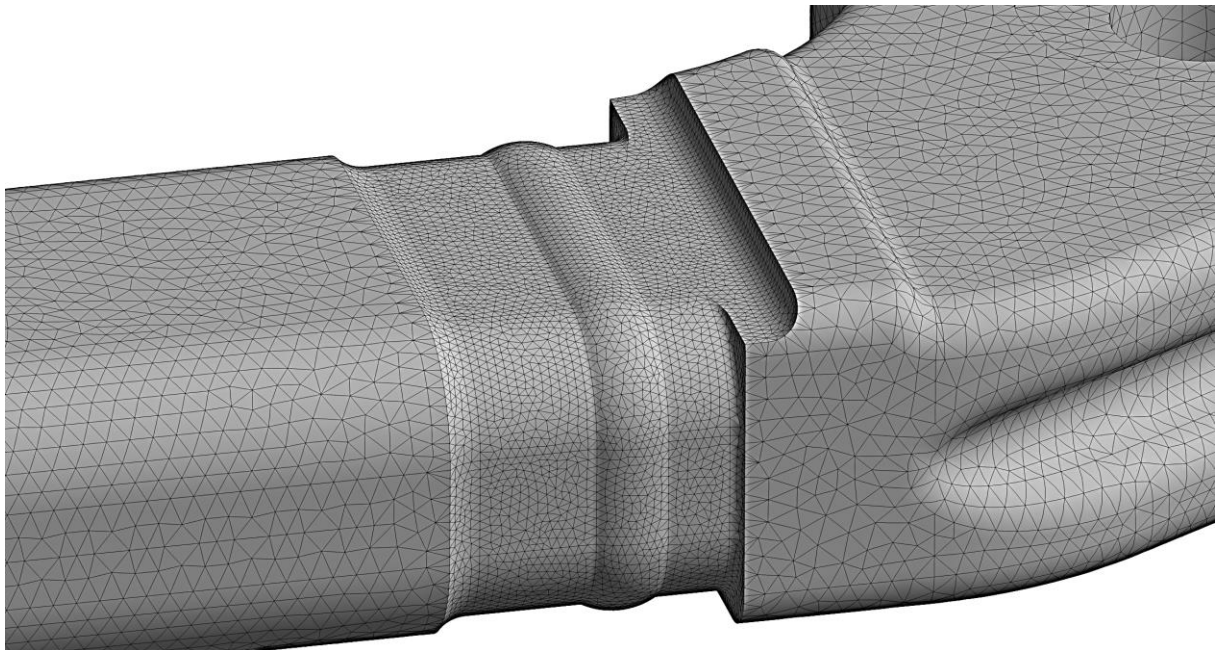
Obr. 29: Stav 4

4.6 Pevnostní analýza

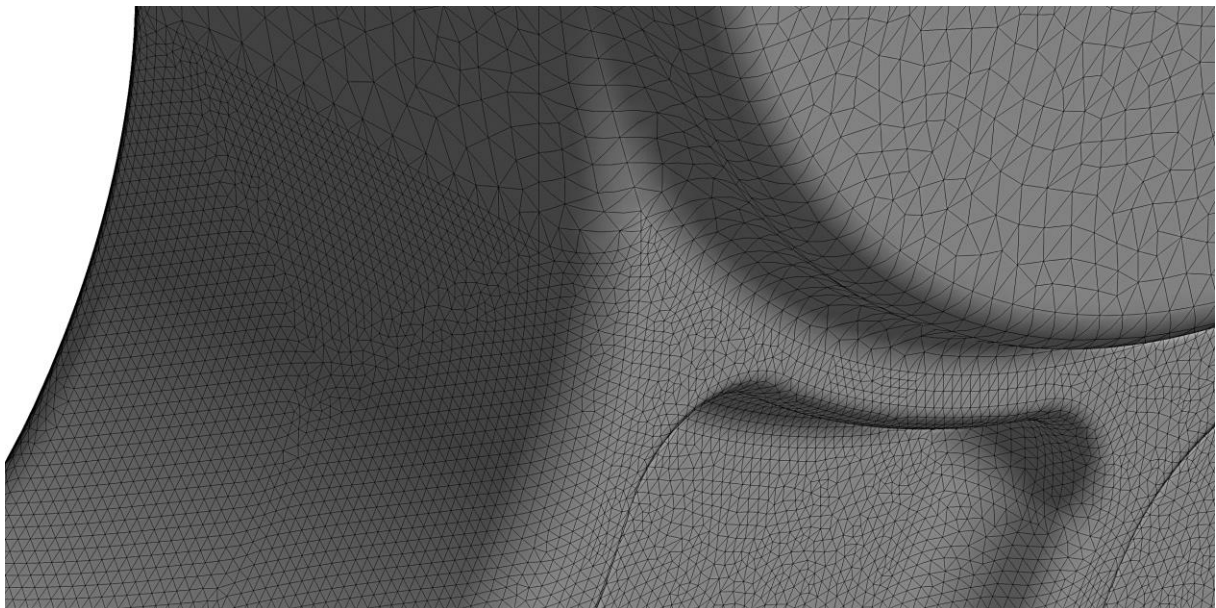
Pevnostní analýza navržené nápravnice byla uskutečněna pomocí metody konečných prvků ve výpočetním softwaru ANSYS, konkrétně v ANSYS Mechanical – Static Structural. Pevnostní analýza umožňuje výpočet průhybu, maximálních a minimálních napětí v konstrukci a mnoha dalších parametrů, které jsou pro hodnocení konstrukce důležité. Konstruktor může díky výsledkům zhodnotit vlastnosti konstrukce. Následně je možné určit, zdali je konstrukce vyhovující či nikoliv. V případě nevyhovující konstrukce je možné se zaměřit například na použitý materiál nebo kritická místa konstrukce.

4.6.1 Síť

Pro zasicování nápravnice byla použita síť o velikosti elementu 5 mm. Po zkušebním výpočtu, který byl proveden pro 1. stav a hustota sítě byla nastavena na 15 mm, byla určena kritická místa a na těchto místech byla síť zhuštěna na velikost elementu 2 mm. Díky zhuštění sítě je možné dosáhnout přesnějších výsledků. Kritická místa se nachází v místech obrobení pro svar (viz Obr. 30) a v místech pod ložiskovým domkem (viz Obr. 31), které slouží k redukci hmotnosti nápravnice. Výpočetní program vyžaduje selekci metody zasicování a jejího algoritmu. Jako metoda zasicování byla zvolena doporučená metoda „Tetrahedrons“, a dále algoritmus tvorby sítě s názvem „Patch Conforming“, které zohledňuje tvar nápravnice. Finální síť použitá pro výpočty se skládá z 3,8 milionu uzlů a 2,6 milionu elementů. V programu byl nastaven odpovídající materiál.



Obr. 30: Síť v místech obrobení



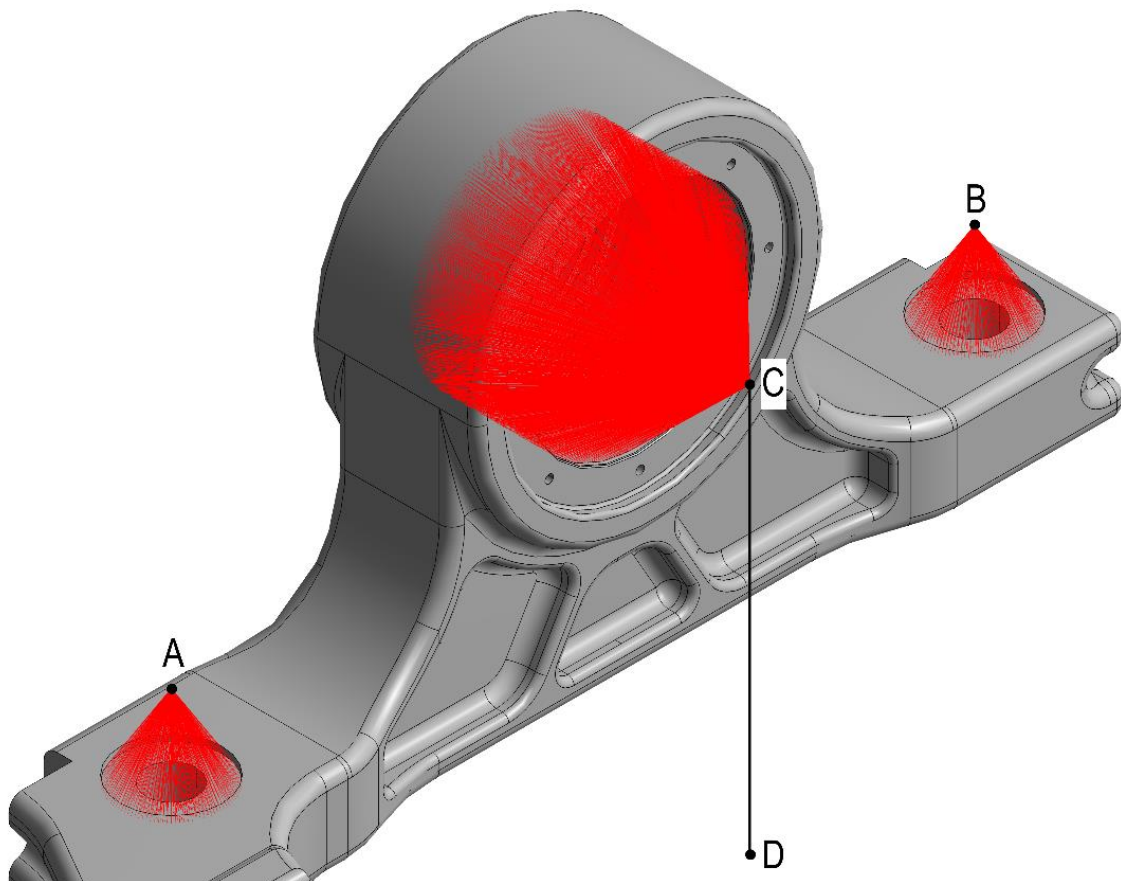
Obr. 31: Síť v místech pod ložiskovým domkem

4.6.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky se dělí na geometrické (určují vazby a uložení tělesa) a silové (určují zatížení tělesa). Tyto podmínky jsou rozhodující z hlediska výsledků pevnostní analýzy. Podmínky definují chování tělesa, tudíž je nutné určit podmínky tak, aby výsledné chování modelu tělesa simulovalo reálné těleso. V případě chybně definovaných okrajových podmínek může dojít k dosažení nereálných výsledků nebo k tomu, že program není schopen generovat žádné výsledky.

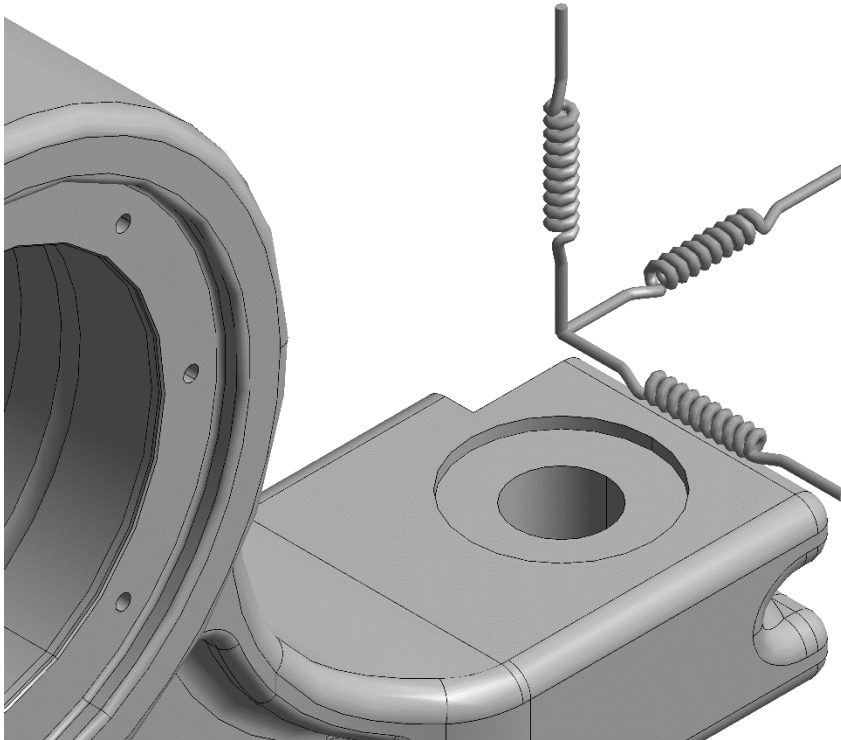
Pro vytvoření okrajových podmínek v softwaru ANSYS je nutné nejdříve připravit model, k čemuž slouží řada pomocných prvků. V závislosti na typu úlohy jsou vhodné prvky typu „Remote Points“ a „Connections“.

„Remote Points“ slouží k vazbě bodu s plochou v určité vzdálenosti, díky čemuž lze nasimulovat body primárního vypružení (viz Obr. 32 – body A a B), na které budou následně aplikovány síly. Body jsou ve vzdálenost 65 mm od stykové plochy konusfederu s ramenem nápravnice. Další bod se nachází na ose otáčení kola. Tento bod (viz bod C) je svázán s vnitřní plochou ložiskového domku, kde je nalisované ložisko. Poslední bod (viz bod D) je svázán s bodem C a nahrazuje kolo, což umožňuje definovat okrajové podmínky na místě styku s kolejnicí. Vzdálenost bodů CD je poloměr kola, tedy 325 mm. Tyto body byly popsány na jedné straně nápravnice pro lepší znázornění. Druhá strana nápravnice byla vytvořena analogicky.



Obr. 32: Remote points

Druhým typem pomocných prvků jsou „Connections“, konkrétně typ „Spring: Body-Ground“. Prvky simulující pružinu dovolují uvažovat tuhosti pružiny, které jsou definovány v upřesňujícím zadání. Primární vypružení je nahrazeno třemi prvky (viz Obr. 33), jež jsou spojeny se zmíněnými „Remote Points“. Prvky jsou umístěny ve směru x , y a z . Prvek ve směru z simuluje svislou tuhost o velikosti 520 N/mm. Obdobně prvky x a y simulují podélnou a příčnou tuhost o velikosti 450 N/mm.



Obr. 33: Pružiny

Další nastavení výpočtu probíhá v modulu „Static Structural“, ve kterém se určují síly, momenty, podpory a tak podobně. Tento modul zároveň obsahuje záložku „Solution“, ve které se nastavuje výstup výpočtu, jako například celková deformace tělesa, napětí a tak dále.

S ohledem na vytvořené pomocné prvky je vhodné využít elementy typu „Remote Force“ a „Remote Displacement“, které je možné umístit na zmíněné „Remote Points“.

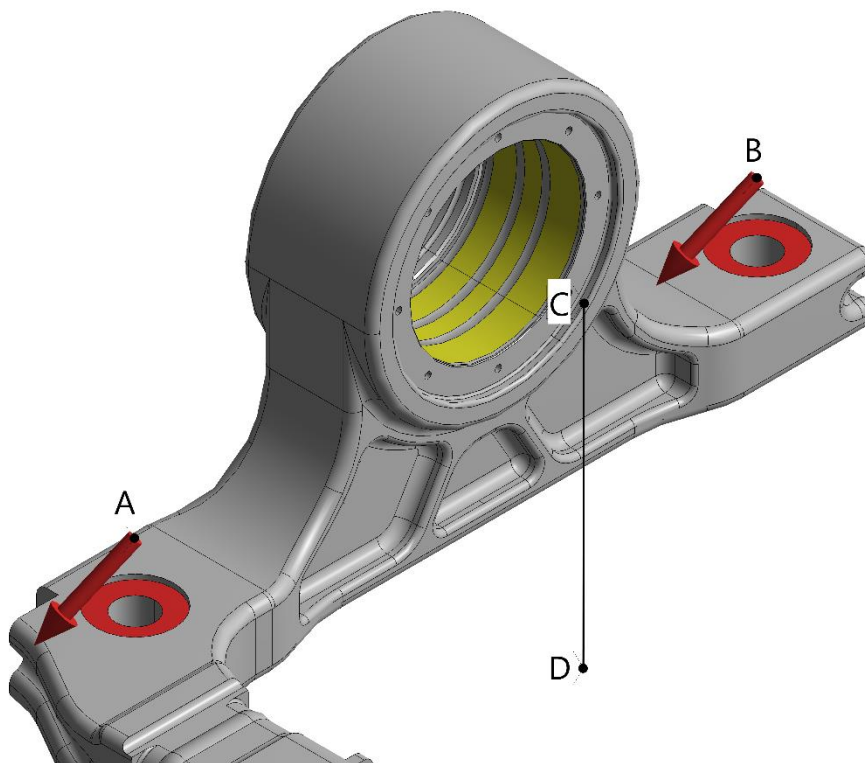
Síly typu „Remote Force“ byly umístěny na jednotlivé body, které nahrazují primární vypružení. ANSYS upřednostňuje výpočet, ve kterém se uvažuje jeden typ zatížení na jeden bod. Proto byly vytvořeny celkem čtyři síly. Každá síla obsahuje 3 složky F_x , F_y a F_z .

„Remote Displacement“ umožňuje posouvat jednotlivé body v prostoru nebo je naopak zafixovat v daných směrech.

Body jsou v prostoru zafixovány následovně (viz Obr. 34):

- styk levého kola s kolejnicí (bod D): zamezení pohybu ve směru x , y , z
- styk pravého kola s kolejnicí na druhé straně: zamezení pohybu ve směru x , z
- střed levého kola (bod C): zamezení pohybu ve směru x

Tento postup platí pro záporné síly ve směru y , tedy pro 1. a 2. stav výpočtu. Postup pro kladné síly ve směru y , tedy pro 3. a 4. stav je možné určit analogicky (body budou zafixovány opačně, tzn. okrajové podmínky pro levé kolo jsou nahrazeny podmínkami pro kolo pravé a naopak).



Obr. 34: Okrajové podmínky

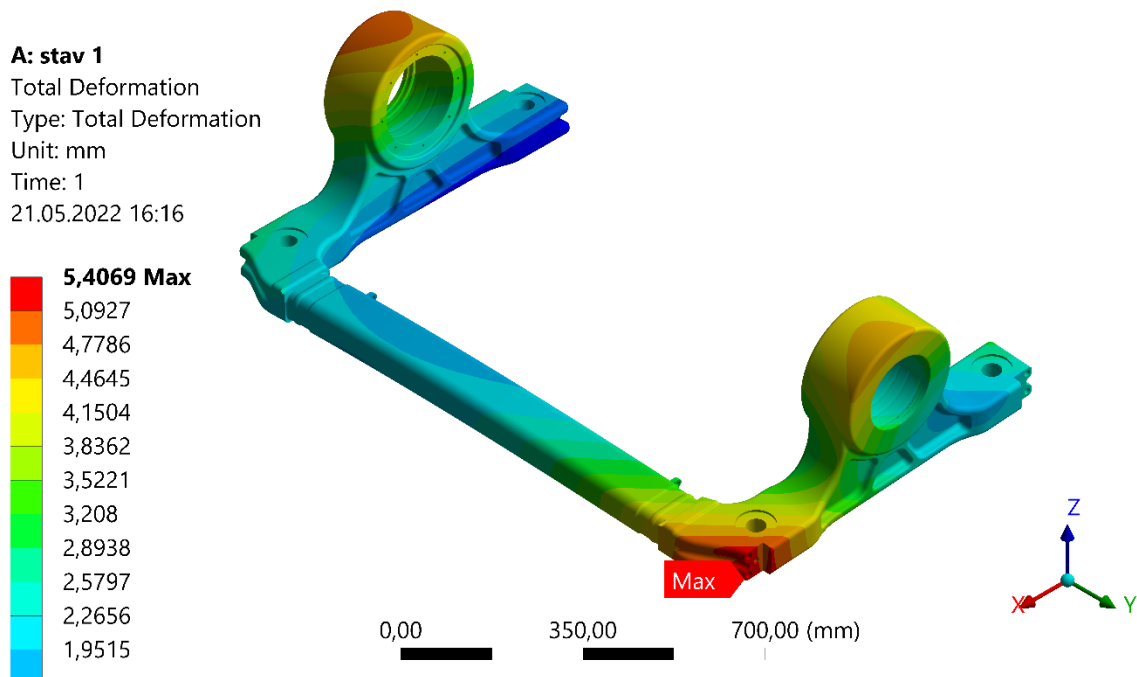
4.6.3 Výsledky

V následujících podkapitolách se nachází celkové deformace a napětí na nápravnici. První stav obsahuje obrázek s rozložením napětí na celé nápravnici. V dalších stavech je tento obrázek vynechán a je umístěn pouze detail na nejvíce namáhanou oblast nápravnice.

4.6.3.1 1. stav

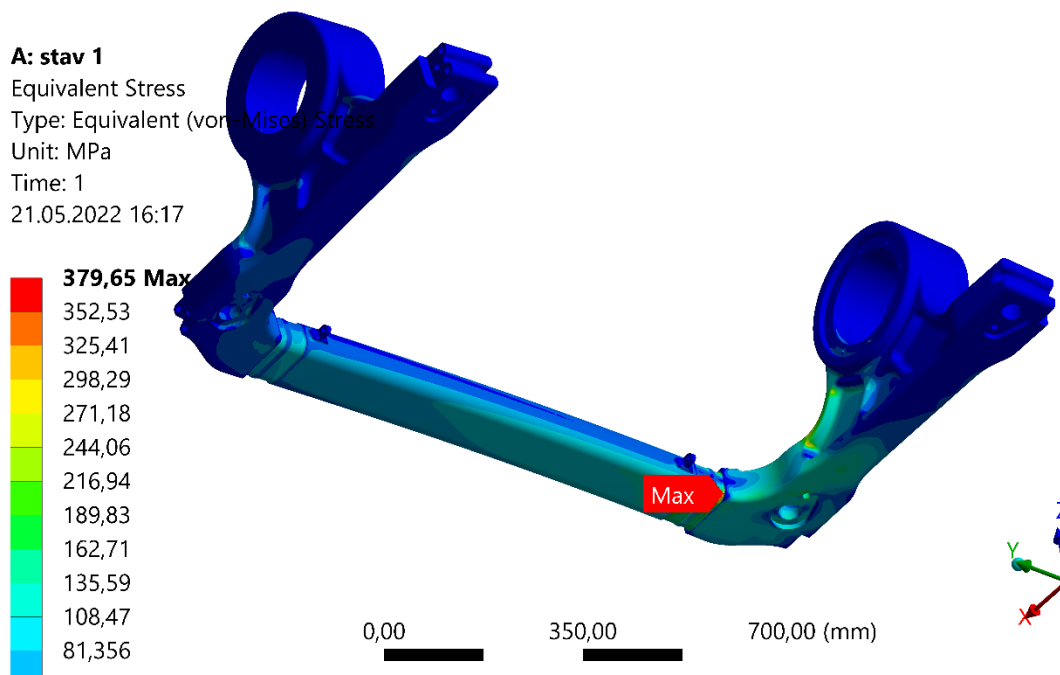
Tento stav je zatížen silami $F_x = -15\,260,68\text{ N}$; $F_y = -7\,628,44\text{ N}$; $F_z = -17\,228,41\text{ N}$.

Maximální deformace činí 5,4 mm v místě pro uchycení konzoly kolejnicové brzdy (viz Obr. 35). K další významné deformaci dochází na horní části levého ložiskového domku, kde deformace dosahuje hodnoty přibližně 5 mm.



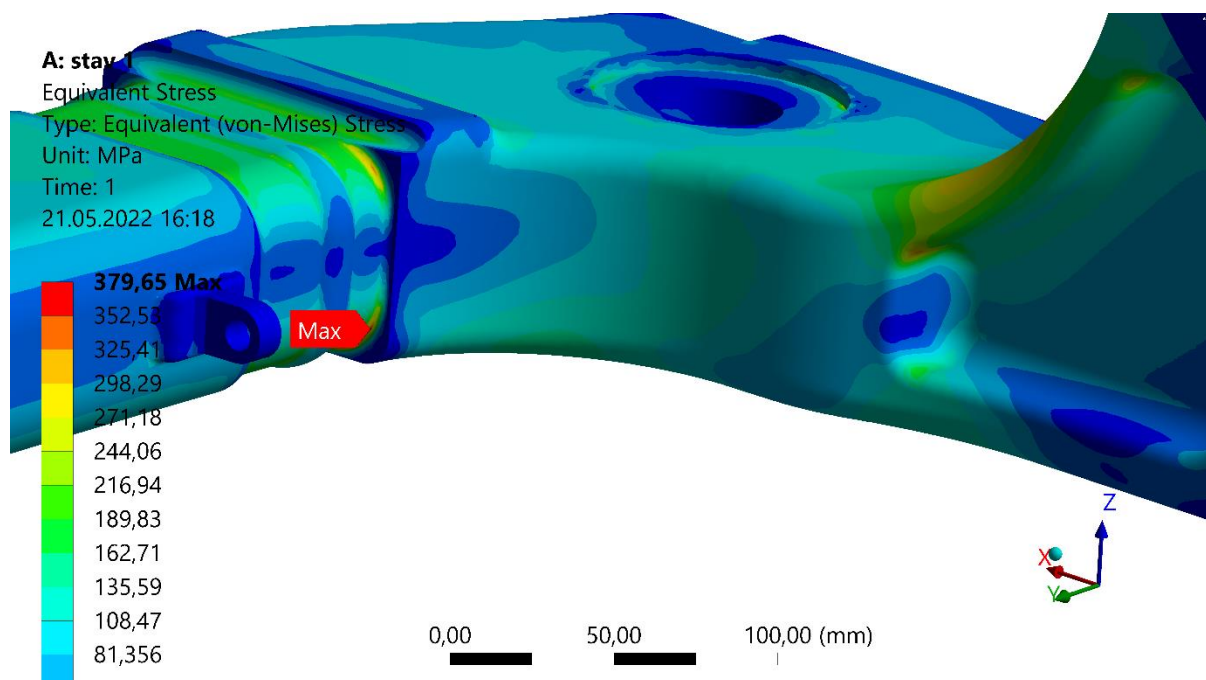
Obr. 35: Deformace 1. stavu

Maximální napětí dosahuje hodnoty 379,65 MPa v místech, ve kterých dochází k přechodu mezi obrobenou a neobrobenou částí ramena nápravnice (viz Obr. 36). Toto místo je kritické, jelikož se zde nachází malý rádius, ve kterém se koncentruje napětí.



Obr. 36: Napětí 1. stavu

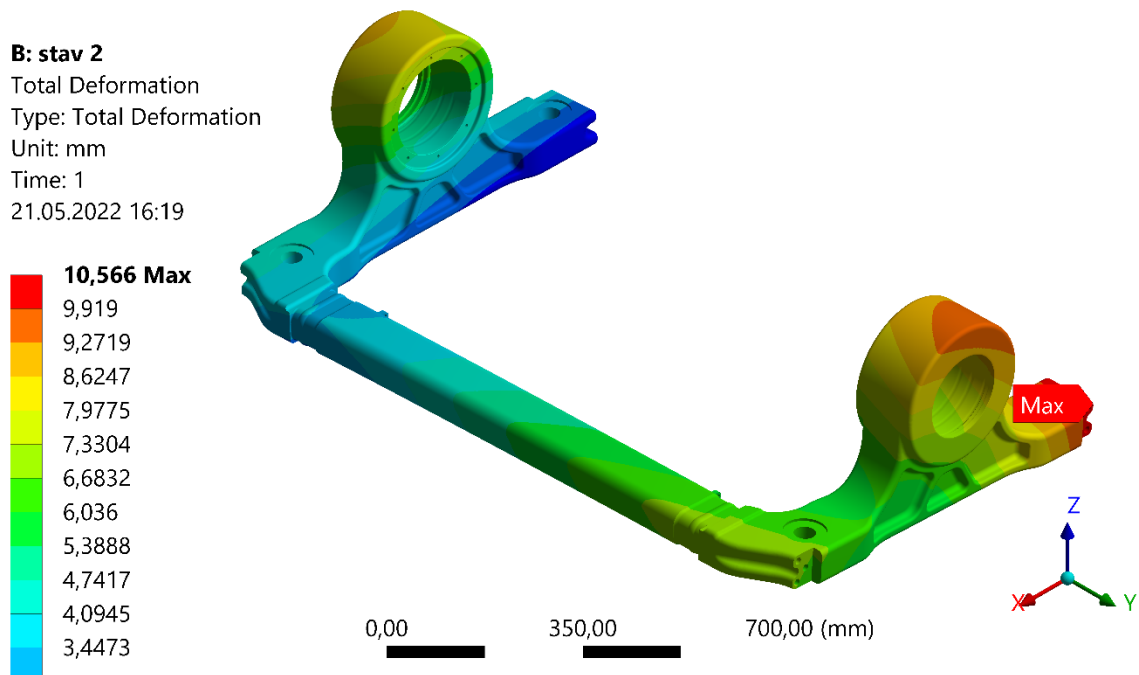
Dalším velmi namáhaným místem je žebro ramena nápravnice, ve kterém velikost napětí dosahuje hodnoty zhruba 350 MPa (viz Obr. 37).



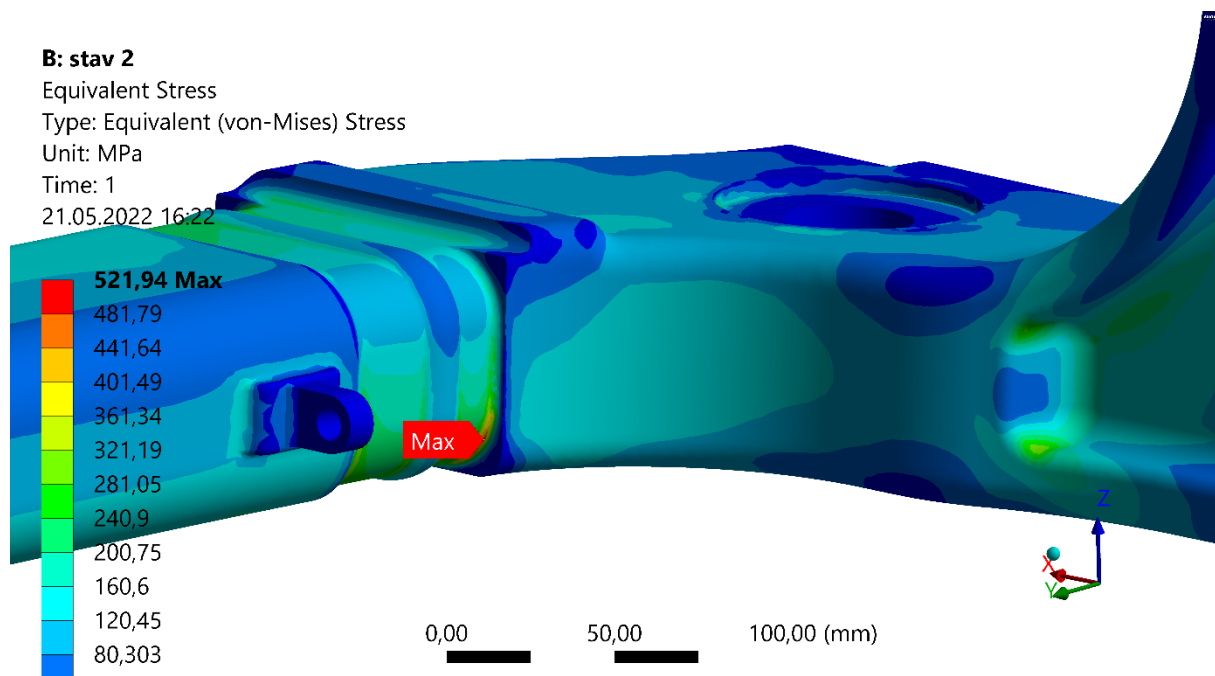
Obr. 37: Detail napětí 1. stavu

4.6.3.2 2. stav

Maximální hodnota napětí je 521,94 MPa v místech přechodu mezi obrobenou a neobrobenou částí ramena nápravnice. Maximální hodnota deformace je 10,56 mm na místech pro uchycení šroubů pro manipulaci s nápravnicí.



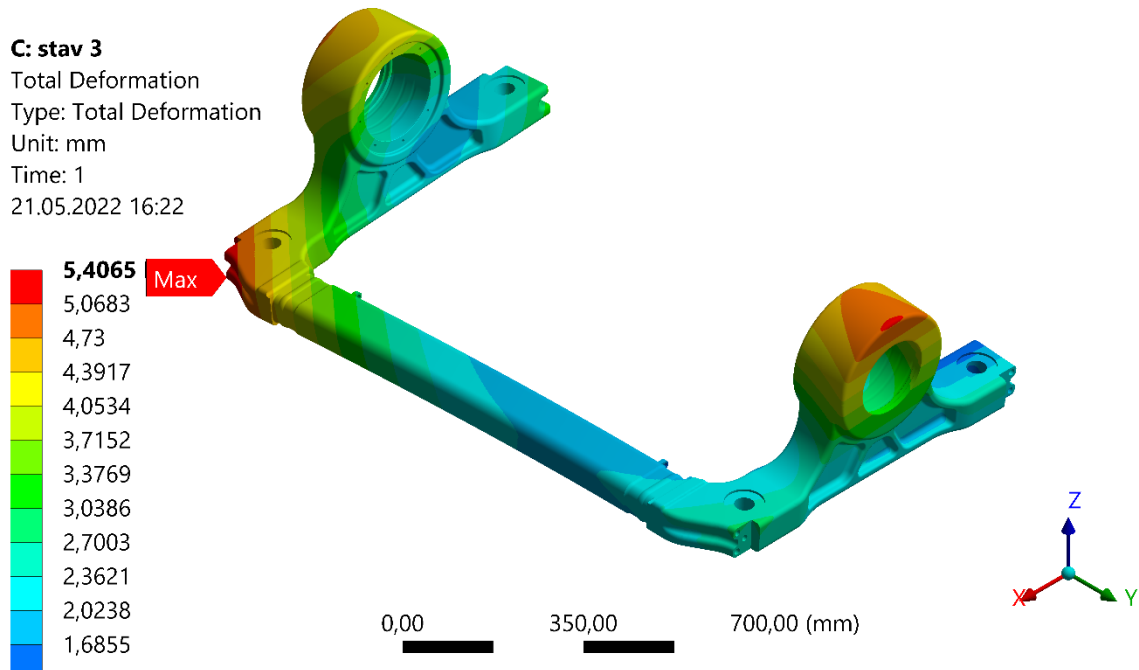
Obr. 38: Deformace 2. stavu



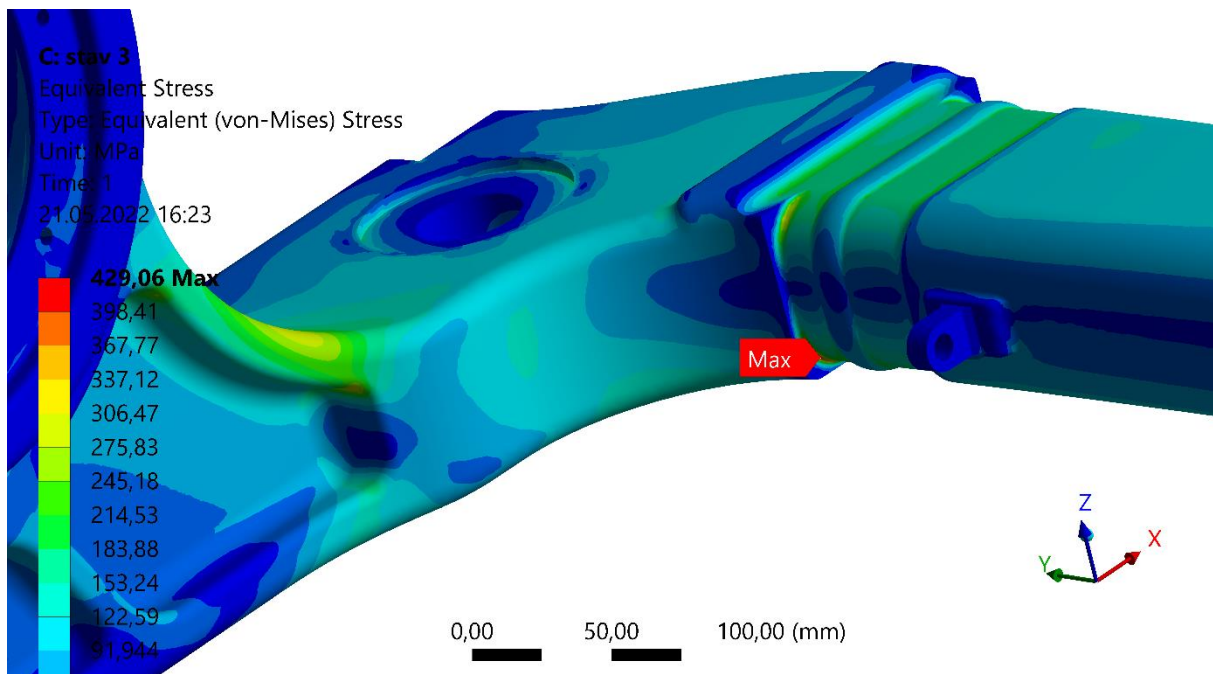
Obr. 39: Napětí 2. stavu

4.6.3.3 3. stav

Maximální napětí činí 429,06 MPa v místech přechodu mezi obrobenu a neobrobenu částí ramena nápravnice. Maximální hodnota deformace dosahuje 5,4 mm na místech pro uchycení konzoly kolejnicové brzdy.



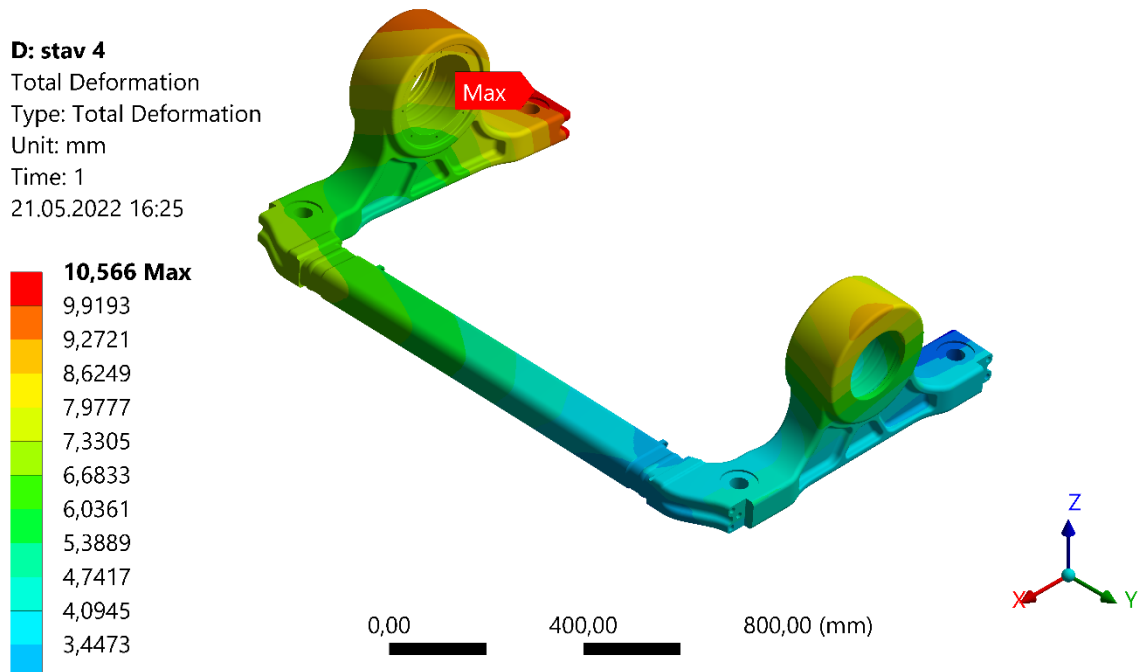
Obr. 40: Deformace 3. stavu



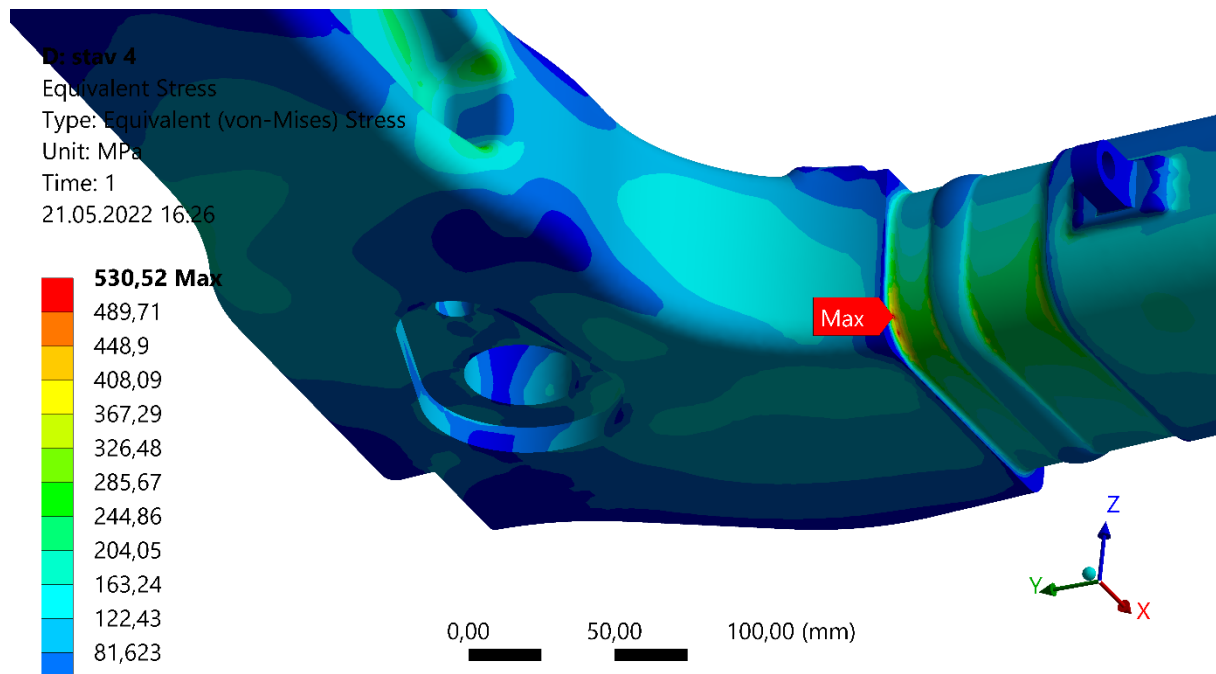
Obr. 41: Napětí 3. stavu

4.6.3.4 4. stav

Tento stav vykazuje největší napětí o hodnotě 530,52 MPa, v obdobných místech jako předchozí stavy. K maximální deformaci dochází na otevřeném konci ramena nápravnice.



Obr. 42: Deformace 4. stavu

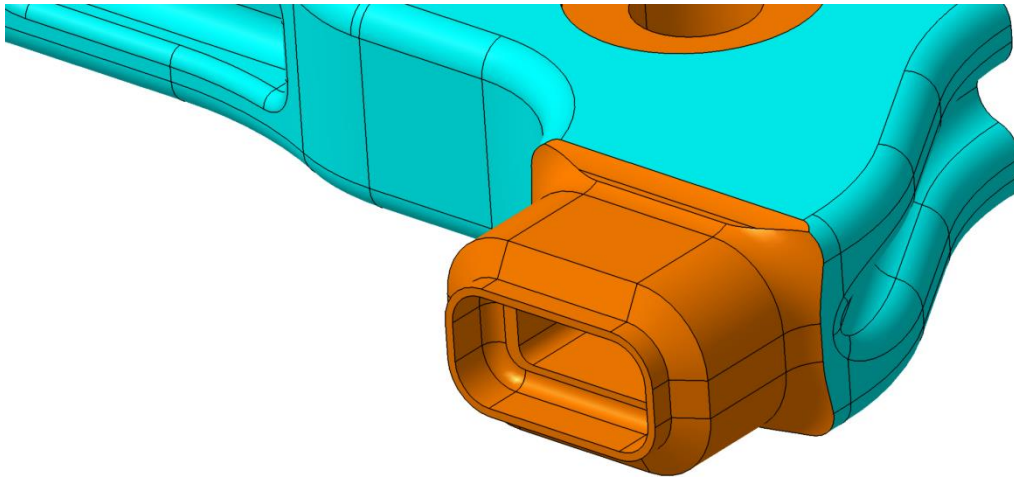


Obr. 43: Napětí 4. stavu

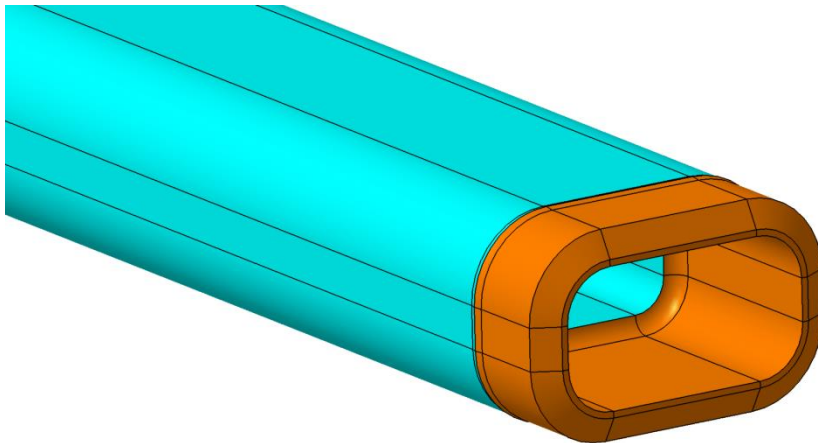
4.7 Optimalizace konstrukce

Pevnostní výpočet jasně ukazuje, že se v rádiusu v oblasti přechodu obrobené plochy koncentruje napětí. Stav 2 a 4 jsou pro konstrukci nejméně příznivé. Jsou to stavy, kdy podélná síla působí směrem k otevřenému konci nápravnice.

Na základě těchto poznatků byla upravena geometrie nápravnice v kritických místech. Došlo k úpravě geometrie na rameni nápravnice, díky čemuž má výsledná obrobená plocha příznivější tvar.

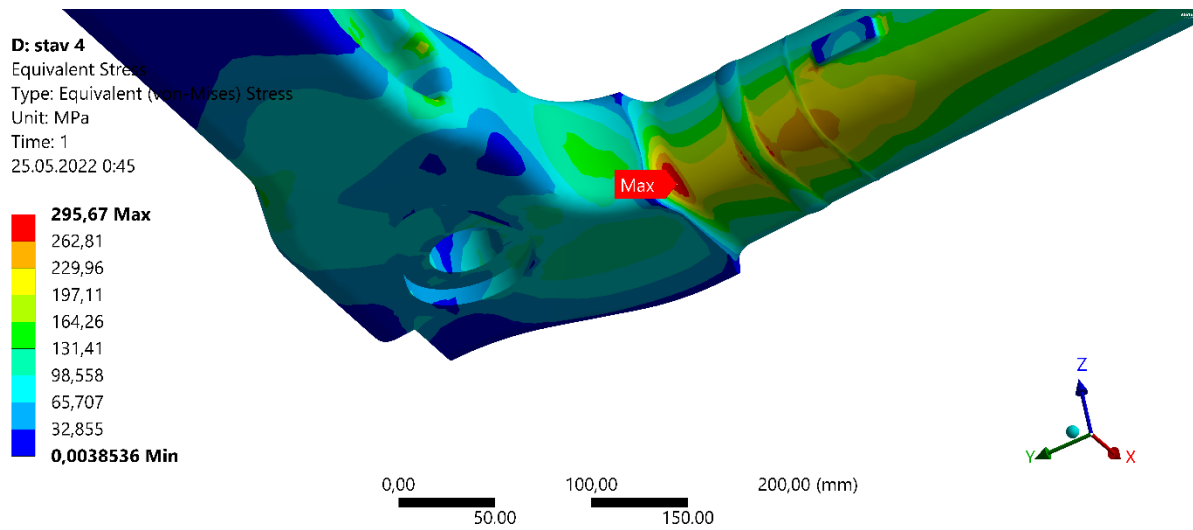


Obr. 44: Optimalizace ramene nápravnice



Obr. 45: Optimalizace spojnice

Po získání nového výpočtu je možné dojít k závěru, že se v nejméně příznivém stavu snížilo napětí o téměř 240 MPa (viz Obr. 46). Na základě těchto informací je možné konstatovat, že vybraný materiál G20Mn5+N vyhovuje.



Obr. 46: Napětí na optimalizované konstrukci

4.8 Zhodnocení výpočtů

Dle normy ČSN EN 13 749 [5] je možné určit další kritéria, která uvádí, zdali je konstrukce vyhovující či nikoliv. Těmito kritérii jsou mez pevnosti a stability a trvalá deformace. Z těchto kritérií se zjišťují faktory bezpečnosti, které zohledňují výsledné napětí ve výrobku, mez kluzu a mez pevnosti materiálu.

4.8.1 Trvalá deformace

Do vztahu vstupuje největší zjištěné napětí, tedy o napětí ze stavu č. 4. Dále do vztahu vstupuje mez kluzu nebo smluvní mez kluzu. V případě materiálu G20Mn5+N dosahuje smluvní mez kluzu při teplotě 20°C hodnoty 300 MPa.

Potřebné parametry:

Maximální napětí v konstrukci...	$\sigma_c = 295,67 \text{ MPa}$
Smluvní mez kluzu...	$R_{p0,2} = 300 \text{ MPa}$
Bezpečnostní faktor trvalé deformace...	S_1
Využití materiálu...	U

$$U = \frac{\sigma_c * S_1}{R_{p0,2}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_c * S_1}{R_{p0,2}} = 1$$

$$S_1 = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_c} \geq 1$$

$$S_1 = \frac{300}{295,67} = 1,01 \geq 1$$

Bezpečnostní faktor vyhovuje.

4.8.2 Mez pevnosti a stability

Do vztahu vstupuje největší zjištěné napětí, tedy opět napětí ze stavu č. 4. Dále do vztahu vstupuje mez pevnosti materiálu. V případě materiálu G20Mn5+N se mez pevnosti pohybuje v rozmezí 480-620 MPa (viz Tabulka 8 – str. 31).

Potřebné parametry:

Maximální napětí v konstrukci...	$\sigma_c = 295,67 \text{ MPa}$
Mez pevnosti...	$R_m = 480 \div 620 \text{ MPa}$
Bezpečnostní faktor stability...	S_2
Využití materiálu...	U

$$U = \frac{\sigma_c * S_2}{R_m} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_c * S_2}{R_m} = 1$$

$$S_2 = \frac{R_m}{\sigma_c} \geq 1,5$$

$$R_m \geq 1,5 * \sigma_c = 443,5 \text{ MPa}$$

Bezpečnostní faktor vyhovuje, jelikož mez pevnosti vybraného materiálu je dostatečná.

5 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení se zabývá cenou jednotlivých variant v závislosti na vyrobeném množství. Variantou č. 1 je zvolená metoda popsána v kapitole 4.3., tedy odlitek se spojnicí. Variantou č. 2 je výroba pomocí výkovků. Toto zhodnocení bere v potaz cenu materiálu a zároveň ceny určitých operací, jako je například cena svařování, obrábění, lakování a tak podobně. Avšak hlavním faktorem výsledné ceny je zejména celkové vyrobené množství. Ceny materiálů a jednotlivých operací jsou orientační a byly zadány zadavatelem. Na základě zadání diplomové práce má být vyrobeno 500 ks nápravnic.

Tabulka 12 popisuje ceny polotovarů v závislosti na množství. V případě odlitků cena s přibývajícím množstvím klesá, kdežto cena plechů a výkovků se nemění.

Tabulka 12: Cena dle materiálu dle množství

Cena materiálů dle množství [ks]	0-50	50-100	100-500	500-více
Cena odlitků [Kč/kg]	315	295	260	210
Cena výkovků [Kč/kg]	298	298	298	298
Cena plechů [Kč/kg]	80	80	80	80

Tabulka 13 obsahuje hmotnosti polotovarů dle varianty.

Tabulka 13: Hmotnost materiálů na nápravnici

Hmotnost materiálů na nápravnici	Varianta č.1	Varianta č.2
Odlitky [kg]	233	0
Výkovky [kg]	0	254
Plechý [kg]	0,5	0,5

V následujících tabulkách (viz Tabulka 14 a Tabulka 15) se nacházejí ceny jednotlivých materiálů a operací. Z čehož je zřejmé, že ceny jednotlivých operací jsou stejné. Rozhoduje tedy cena polotovarů.

Tabulka 14: Kritéria pro počet 0-50 ks

Kritéria pro 0-50 nápravnic	Varianta č.1	Varianta č.2
Cena plechů [Kč]	750	750
Cena výkovek [Kč]	0	78 000
Cena odlitků [Kč]	44 000	0
Cena svařování [Kč]	14 750	14 750
Cena obrábění [Kč]	21 500	21 500
Cena lakování [Kč]	12 450	12 450
Cena dodatečných operací [Kč]	24 500	24 500
Celková cena 1 rámu [Kč]	117 950	151 950

Tabulka 15: Kritéria pro počet 500 ks a více

Kritéria pro 500 a nápravnic	Varianta č.1	Varianta č.2
Cena plechů [Kč]	750	750
Cena výkovek [Kč]	0	64 500
Cena odlitků [Kč]	21 500	0
Cena svařování [Kč]	14 750	14 750
Cena obrábění [Kč]	21 500	21 500
Cena lakování [Kč]	12 450	12 450
Cena dodatečných operací [Kč]	24 500	24 500
Celková cena 1 rámu [Kč]	95 450	138 450

Na závěr je v následující tabulce znázorněn cenový rozdíl jednotlivých variant. Při použití varianty č. 1 dojde k úspoře ve výši 43.000,- Kč na jednom kusu. V případě zadaného množství 500 ks se ušetří přibližně 21.500.000,- Kč.

Tabulka 16: Cenový rozdíl jednotlivých variant

Náklady na rám při výrobě 500 ks	1 ks [Kč]	500 ks [Kč]
Varianta č.1	95 450	47 725 000
Varianta č.2	138 450	69 225 000
Úspora nákladů	43 000	21 500 000

6 Závěr

Hlavním cílem diplomové práce byl návrh nápravnice pro úzkorozchodné nápravové vozidlo, včetně pevnostního výpočtu pro zadané zatížení.

První část diplomové práce se zabývá rešerší týkající se kolejových vozidel, přesněji podvozků tramvajových úzkorozchodných kolejových vozidel a jejich komponentů.

Druhá část diplomové práce se zabývá konstrukčním návrhem nápravnice s ohledem na upřesňující zadání. Nejprve byly shrnuty materiály vhodné pro konstrukci nápravnice, včetně jejich chemického složení a mechanických vlastností. Dále bylo žádoucí zmínit různé metody výroby nápravnic. Poté byly jednotlivé metody zhodnoceny dle určitých kritérií. Na základě tohoto zhodnocení byla vybrána nejvhodnější metoda výroby nápravnice. V souvislosti s koncepty uvedené v rešerši byla v softwaru CATIA V5 navržena nápravnice včetně ostatních komponent, jako jsou kola, hřídel, primární vypružení, uzemnění, brzdový kotouč či spojka. Pro rameno nápravnice a spojnice byly vytvořeny modely odlitku i obrobku. Software ANSYS provedl pevnostní výpočet pomocí metody konečných prvků na modelu nápravnice, konkrétně na obrobeném stavu se svary. Následně byly zhodnoceny výsledky, podle kterých byla upravena geometrie nápravnice pro snížení výsledného napětí. Poté byl proveden opětovný výpočet. Zhodnocení konstrukce zároveň proběhlo pomocí normy ČSN 13 749. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že výsledný návrh nápravnice vyhovuje. Na závěr bylo použito ekonomické zhodnocení.

V případě použití v praxi by bylo nutné provést několik operací navíc. Například by bylo vhodné vytvořit několik různých variant konstrukce a následně provést komplexnější výpočty pro zjištění nejvhodnější varianty. Pevnostní analýza se nezabývala zatížením od brzd a motoru nebo provozním zatížením, což je v praxi nezbytné pro návrh nápravnice. Dále se často přistupuje k výrobě prototypu a jeho zkouškám. Pokud daný návrh splňuje všechny požadavky norem, tak může dojít k tvorbě kompletní dokumentace a následné výrobě.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HELLER, DOSTÁL. *Kolejová vozidla III*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. ISBN 978-80-261-0028-7.
- [2] LATA. *Konstrukce kolejových vozidel II*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-696-6.
- [3] HELLER. *Kolejová vozidla I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. ISBN 978-80-261-0693-7.

Seznam použitých norem

- [4] VDV 152. *Recommendations on the Design for Strength of Urban Rail Rolling Stock according to BOStrab*. Cologne: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, 2016.
- [5] ČSN EN 13749. *Železniční aplikace – Dvojkolí a podvozky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

Seznam použitých zdrojů na internetu

- [6] Siemens. *Werner von Siemens*. [online]. 2016. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:79526895df552002ded8cf62384d6c72f155d7e4/2016-lifelines-werner-von-siemens-web.pdf>
- [7] Siemens. *A detour to success*. [online]. 2016. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en/company/about/history/stories/first-electric-streetcar.html>
- [8] M.J.T. Lewis. *Steam on the Penydarren*. [online]. 2008. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <http://www.irsociety.co.uk/Archives/59/Penydarren.htm>
- [9] GHH-BONATRANS. *Inovativní výrobky*. [online]. 2016. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.ghh-bonatrans.com/cs/vyzkum-a-vyvoj/inovativni-vyrobky/>
- [10] MACHAČ. *Jak vznikl normální rozchod?*. [online]. 2004. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <http://www.speaker.cz/localbahn/view.php?cisloclanku=2004102402>
- [11] WIKIMEDIA. *Track gauges*. [online]. 2012. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Track_gauge.svg
- [12] HUMAN TRANSIT. *The Joy of High Ceilings*. [online]. 2009. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://humantransit.org/2009/05/the-joy-of-high-ceilings-also-called-low-floors.html>
- [13] Siemens. *SF 30 Combino plus*. [online]. 2019. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b1b1af45-8dfe-4888-a297-73b1b3e914da/mors-b10024-00-datasheet-bogies-sf30c-deenus-144_original.pdf
- [14] WALBO. *Nápravy*. [online]. 2020. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.walborailway.cz/produkty/napravy>
- [15] SKF. *Tapered roller bearing units*. [online]. 2016. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.skf.com/sg/industries/railways/solutions/tapered-roller-bearing-units>
- [16] HELLER. *Dvojkolí kolejových vozidel*. [online]. 2010. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~pheller/ZSDM/ZSDM%20Dvojkoli.pdf>
- [17] GHH-BONATRANS. *Kola*. [online]. 2017. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.ghh-bonatrans.com/cs/produkty-a-sluzby/kola/>

- [18] DANZER. *Adheze*. [online]. 2016. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20200526222719/http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/et/ET%20skripta%20Danzer/ETR700.pdf>
- [19] ČAPEK. *OPTIMAL DESIGN OF LOW-FLOOR TRAM*. [online]. 2007. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <http://www.railway2007.fd.cvut.cz/proceedings/Capek+Kolar.pdf>
- [20] EDUCON. *Problematika brzd*. [online]. 2005. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015050202>
- [21] ALFA UNION. *Kolejnicové brzdy*. [online]. 2017. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.alfaunion.cz/produkty-kolejnicove-brzdy-detail-15>
- [22] ŠKODA TRANSPORTATION. *ForCity Classic*. [online]. 2018. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/forcity-classic-eski-ehir/>
- [23] URBAN TRANSPORT MAGAZINE. *BLT Baselland erteilt Stadler Zuschlag für neue Tramflotte*. [online]. 2018. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.urban-transport-magazine.com/blt-baselland-erteilt-stadler-zuschlag-fuer-neue-tramflotte/>
- [24] ŠKODA TRANSPORTATION. *ForCity Plus*. [online]. 2018. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/tramvaj-forcity-plus-bratislava>
- [25] URBAN ELECTRIC TRANSIT. *Breda VLC*. [online]. 2016. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://transphoto.org/photo/12/52/66/1252665.jpg>
- [26] BOLZANO. *Technická příručka*. [online]. 2020. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane>
- [27] MATERIAL PROPERTIES. *Cast Alloy Steel*. [online]. 2016. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-group/Cast-Alloy-Steel>
- [28] RODACCIAI. *Technical Sheet*. [online]. 2013. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://www.rodacciai.com/download.php>
- [29] STEELNUMBER. *Steel Numbers*. [online]. 2012. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/number_en10027_eu.php
- [30] MATMATCH. *G20Mn5*. [online]. 2015. [cit. 16.3.2022] Dostupné z: <https://matmatch.com/materials/minfm35182-en-10213-grade-g20mn5-quenched-and-tempered-qt->

Seznam ostatních zdrojů

- [31] Škoda Transportation, a.s.

Seznam použitých softwarů

CATIA V5

ANSYS Mechanical

Siemens NX

Word

Excel

Seznam volně vložených příloh

Příloha č. 1 – výkres: rameno nápravnice

Příloha č. 2 – výkres: sestava – svaření

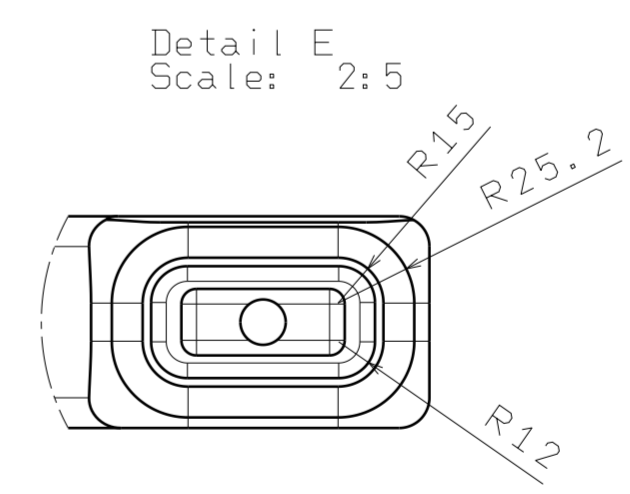
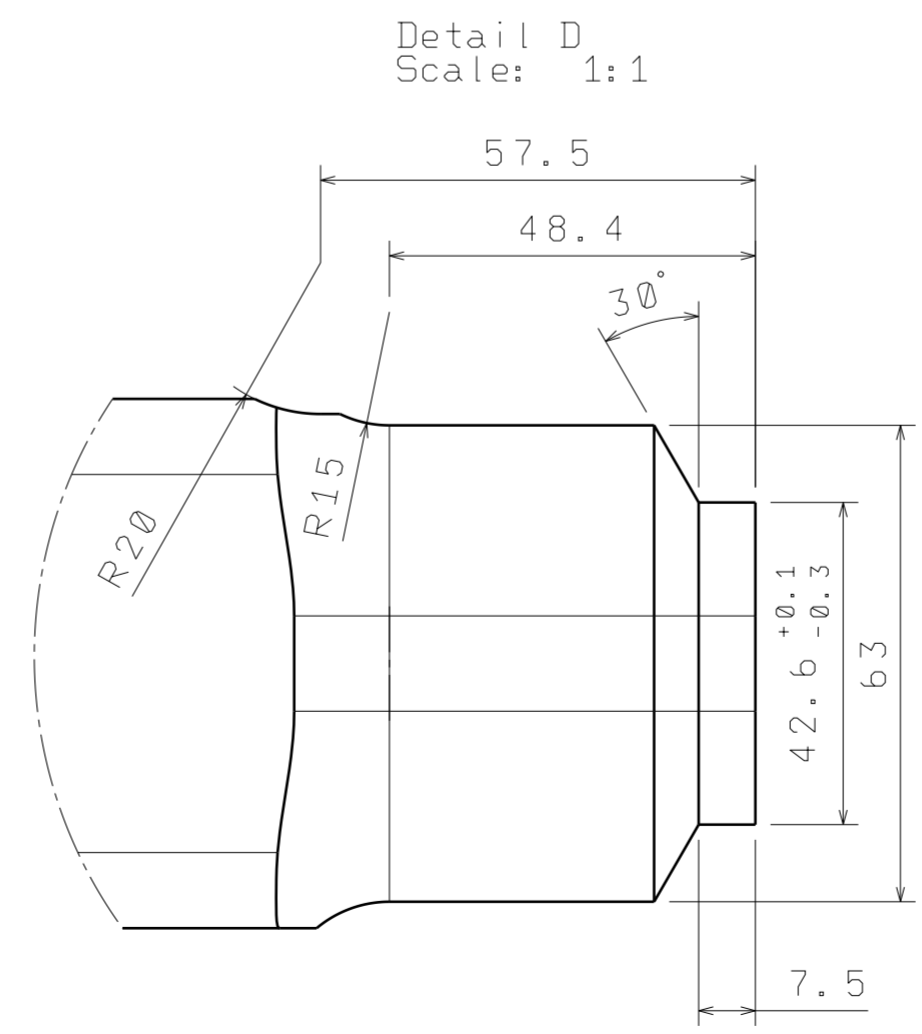
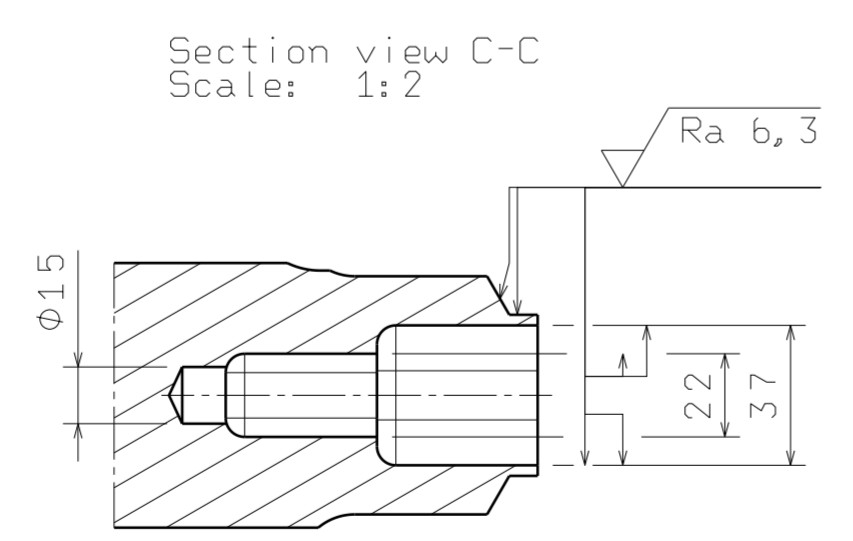
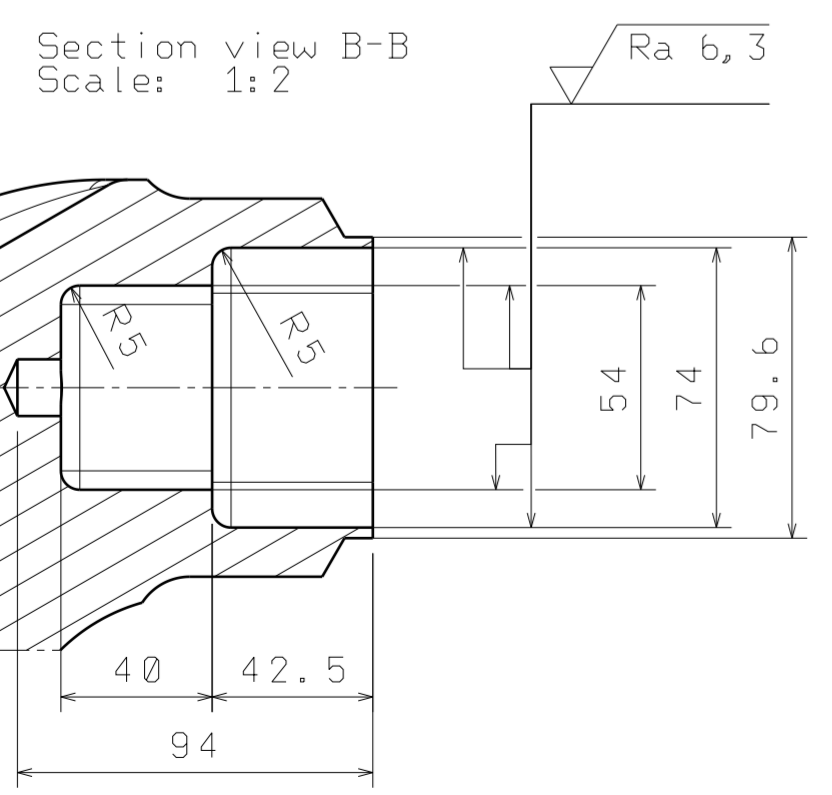
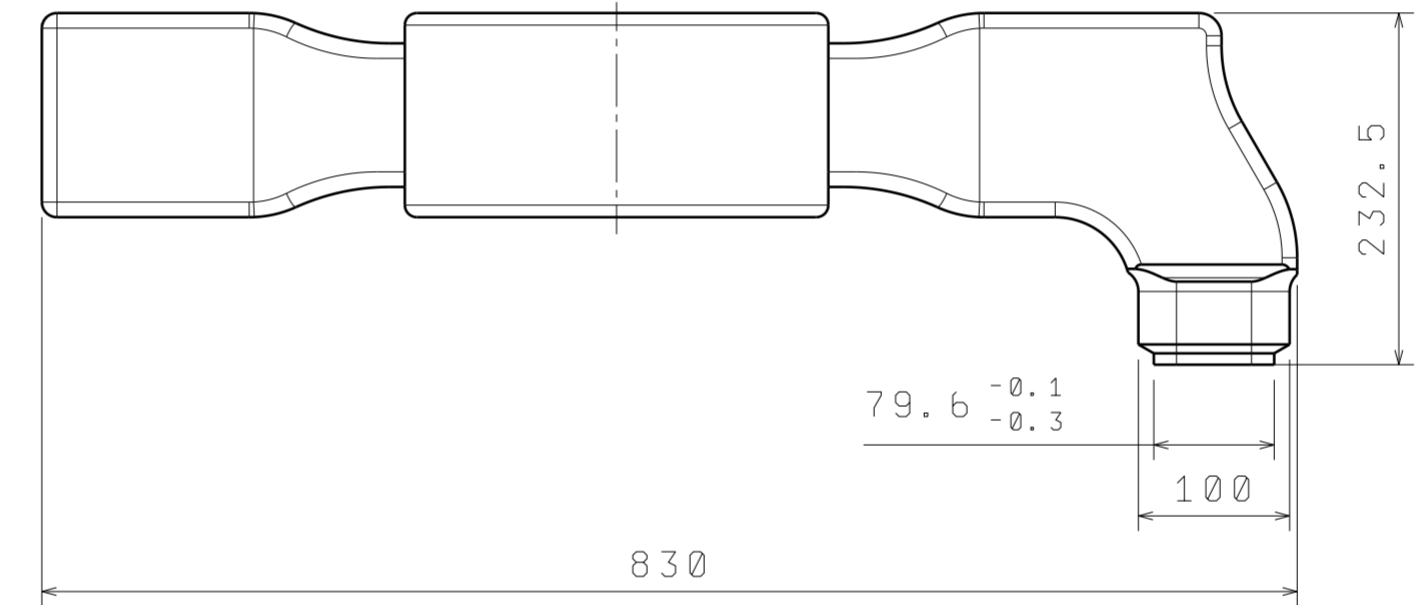
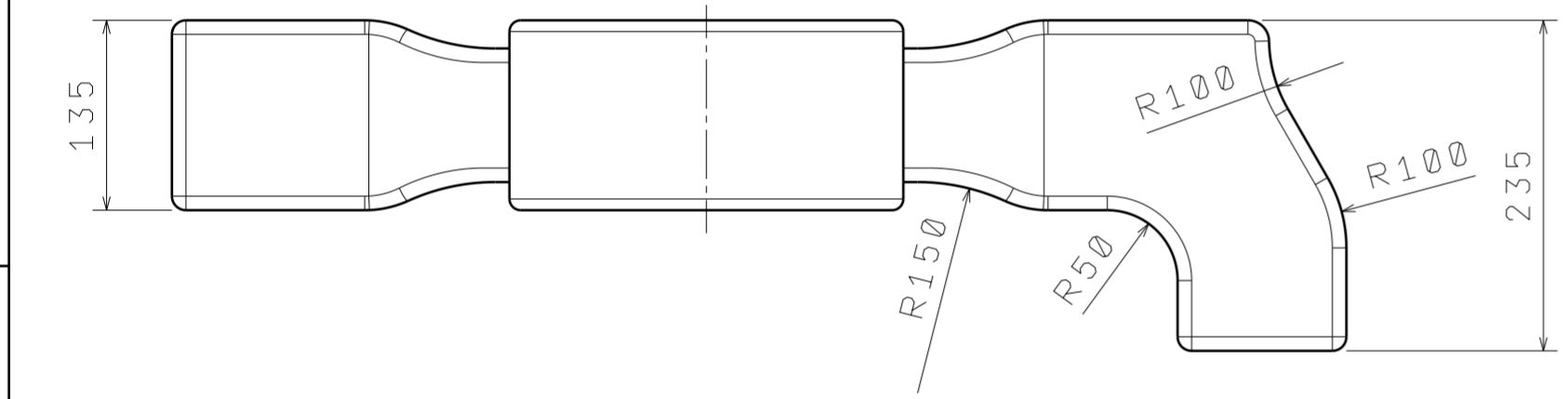
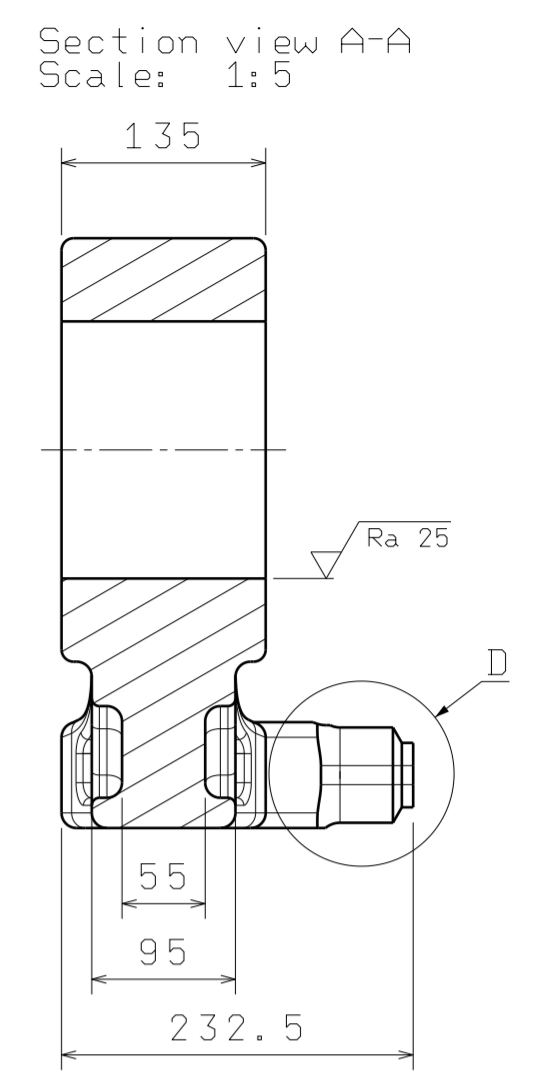
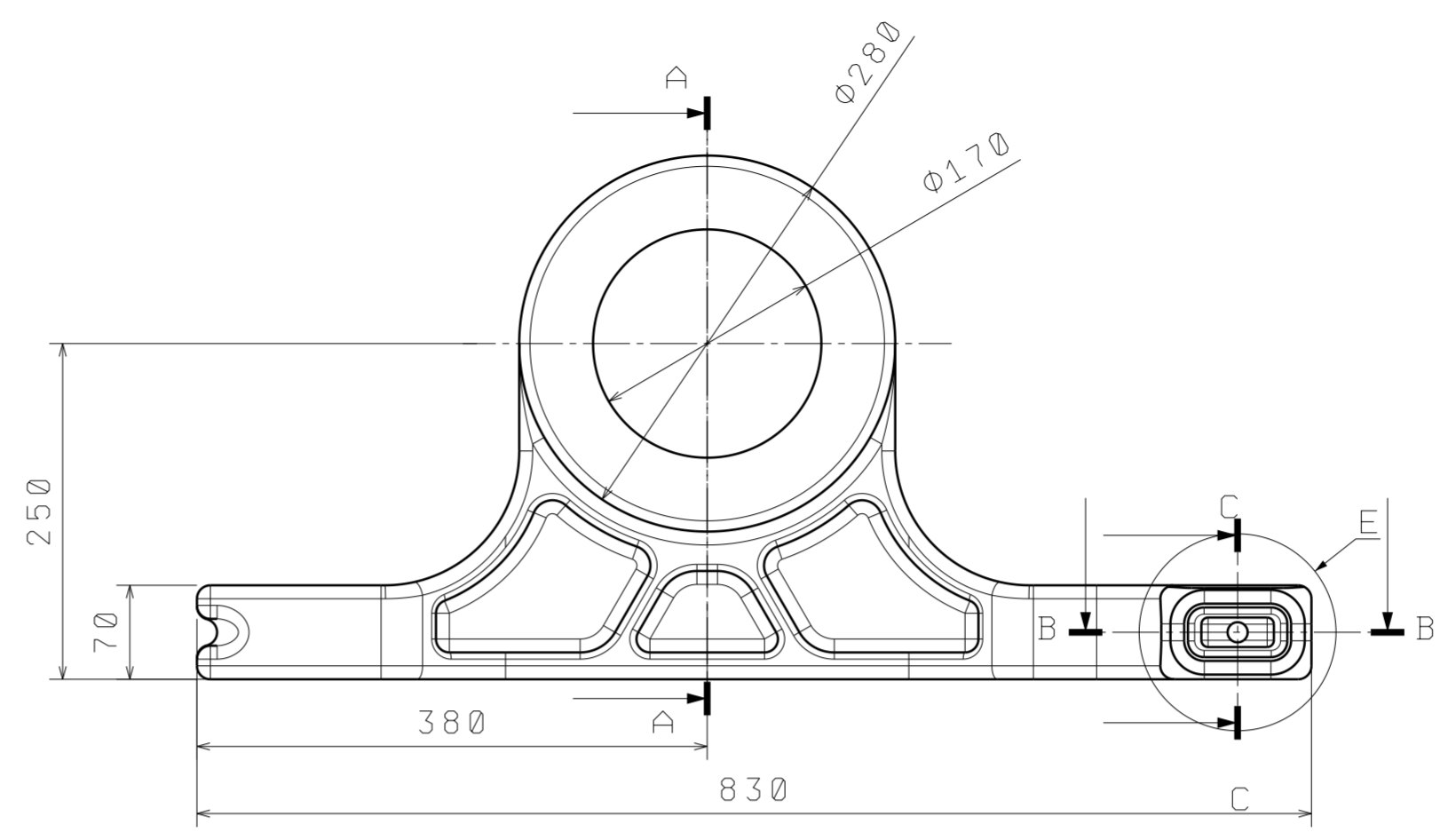
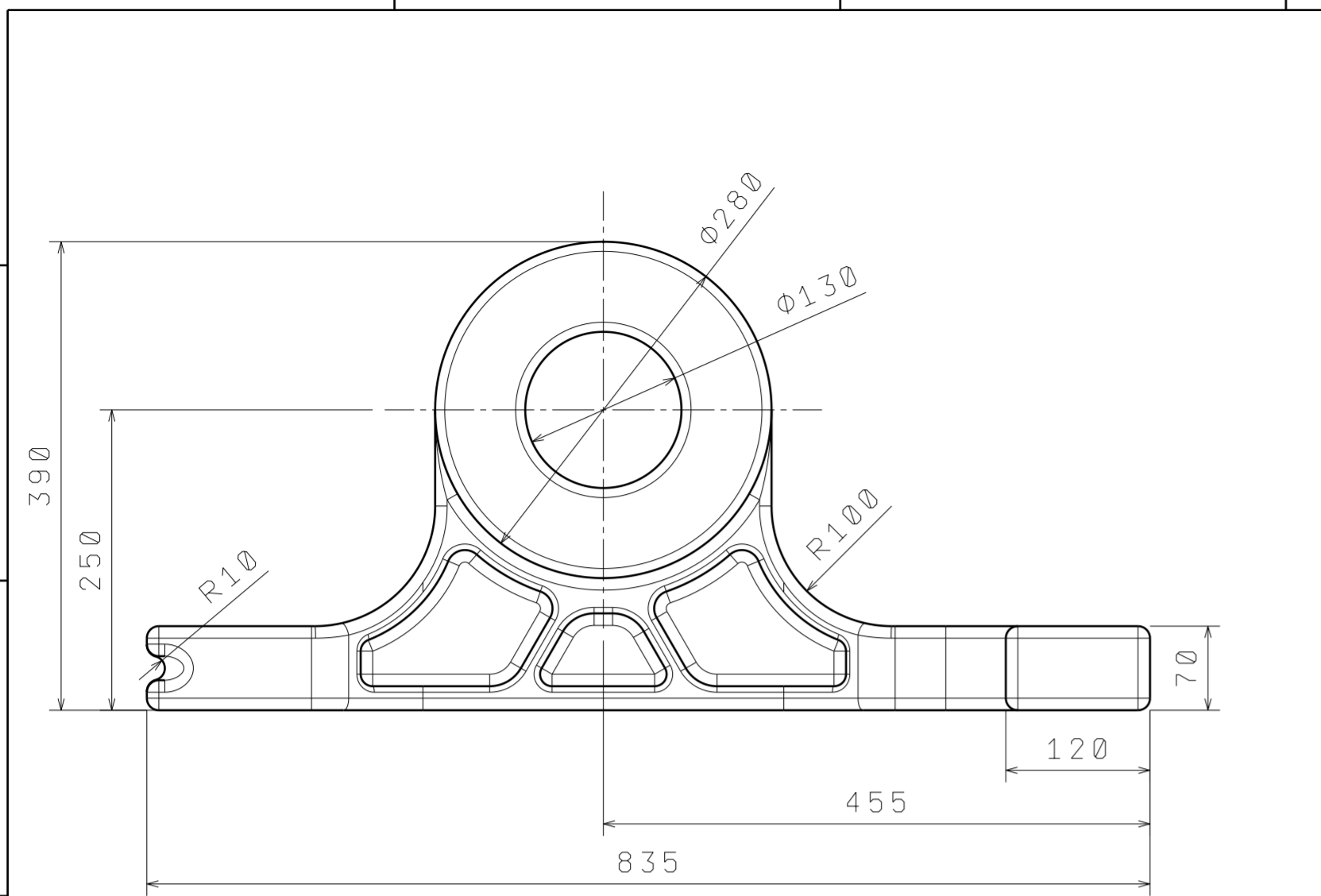
Příloha č. 3 – kusovník

Příloha č. 4 – výkres: sestava – obrobek

Příloha č. 5 – výkres: sestava

PŘÍLOHA č. 1

Výkres: Rameno nápravnice



DESIGNED BY: David Grún	Rameno nápravnice	I	-
DATE: 25.05.2022		H	-
CHECKED BY: -	Západočeská univerzita v Plzni	G	-
DATE: -		F	-
SIZE: A2	Grún_1	E	-
SCALE: 1:5		D	-
WEIGHT (kg): 116,62	1/4	C	-
UNWINDING NUMBER: -		B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.		A	-

PŘÍLOHA č. 2

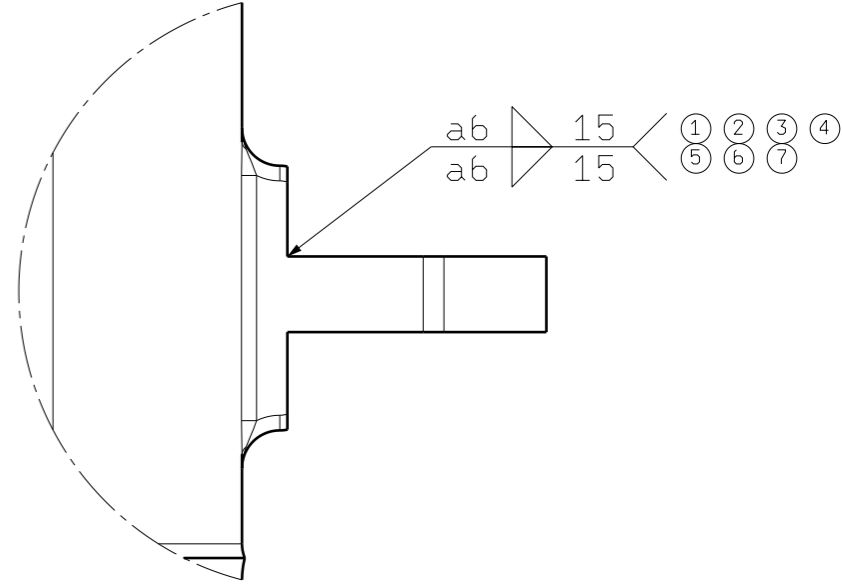
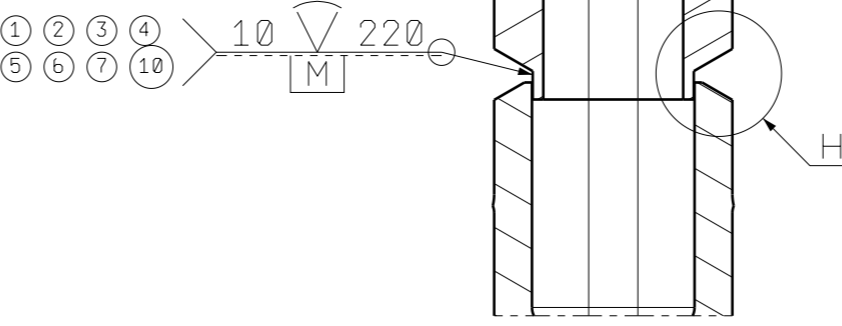
Výkres: Sestava – svaření

H G F E D C B A

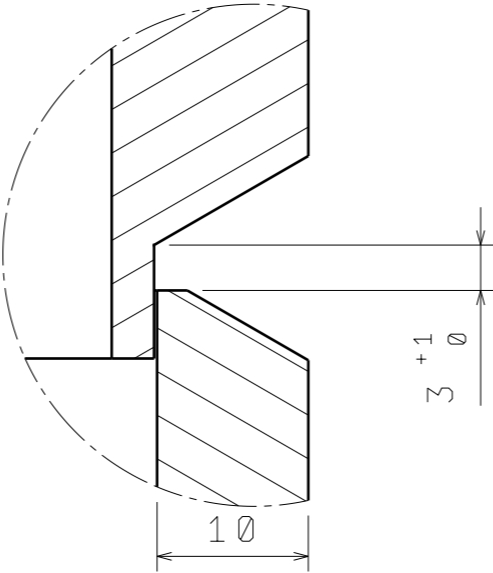
Section view F-F
Scale: 1:2

Detail G
Scale: 1:1

① ② ③ ④
⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑩

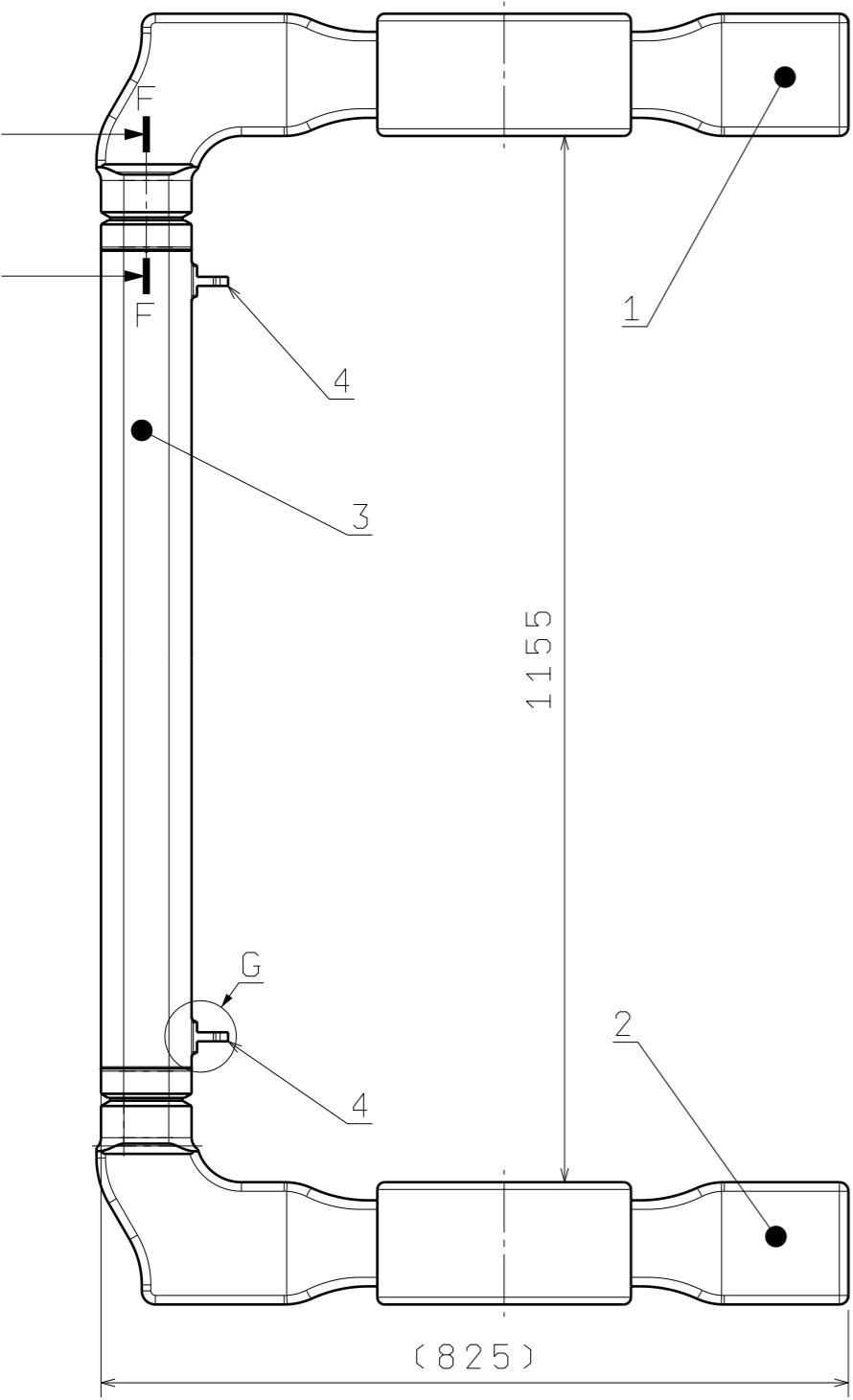


Detail H
Scale: 2:1



POZNÁMKY:

- SVAŘOVÁNÍ DLE EN 150085 - CL1
- 1. TŘÍDA PROVEDENÍ SVARU CP B (CP 2)
- 2. STUPEŇ JAKOSTI DLE EN ISO 5817 B (C)
- 3. SVAŘENO 135 EN ISO 14341 - A - G 42 3 M21 3Si1
- 4. ZKOUŠKA ULTRAZVUKEM (UT) PODLE EN ISO 17640 A EN ISO 11666 (100 % OBJEMOVÉHO MNOŽSTVÍ)
- 5. MAGNETICKÁ ZKOUŠKA (MT) PODLE EN ISO 17638 A EN ISO 13278 (100 % OBJEMOVÉHO MNOŽSTVÍ)
- 6. ÚPRAVA POVRCHU PRO NDT ZKOUŠKY
- 7. SMĚR BROUŠENÍ KOLMO NA SVARY
- 8. MAX. PODBROUŠENÍ 5 % TLOUŠTKY ZÁKLADNÍHO MATERIÁLU
- 9. NÁPRAVNICI ŽÍHAT NA ODSTRANĚNÍ PNUTÍ
- 10. SVAR VYDRÁŽKOVAT



DESIGNED BY: David Grún	Sestava - svaření		I	-
DATE: 25.05.2022			H	-
CHECKED BY: -	Západočeská univerzita v Plzni		G	-
DATE: -			F	-
SIZE: A3	Grún_2		E	-
SCALE: 1:10			D	-
WEIGHT (kg): 232,64	DRAWING NUMBER: Grún_2	SHEET: 2/4	C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			B	-
			A	-

H G F E D C B A

PŘÍLOHA č. 3

Kusovník

KUSOVNÍK	26.05.2022	Str: 1/1
Název: NÁPRAVNICE - SESTAVA		
Hmotnost: 232,64 kg	MJ: kg	Vypracoval: Grún David

Pozice	ID	Typ
	Název	Materiál
	Množství	Hmotnost

1	DP-1	Odlitek
	Rameno nápravnice - levé	G20Mn5+N
	1 ks	103,14 kg

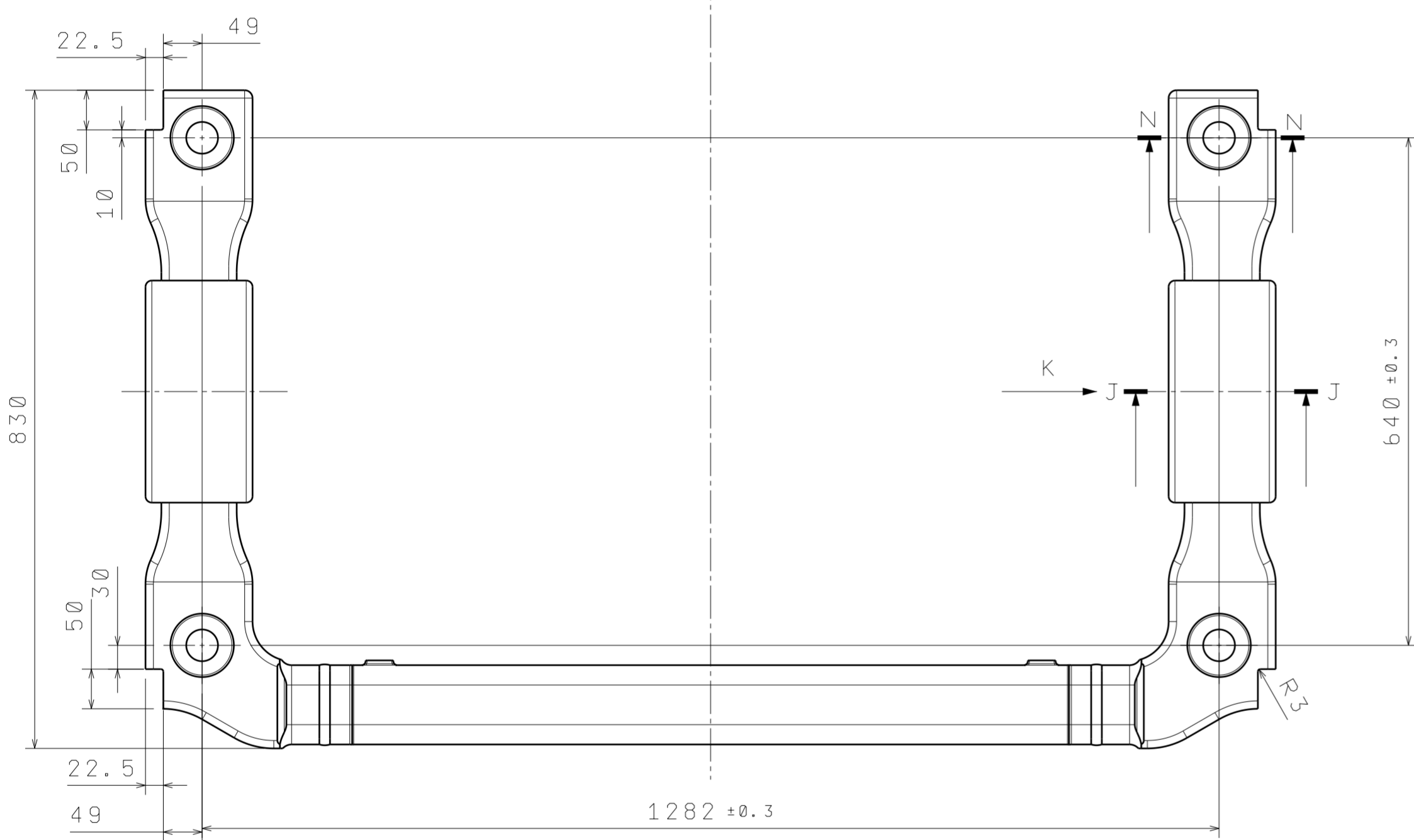
2	DP-2	Odlitek
	Rameno nápravnice - pravé	G20Mn5+N
	1 ks	103,14 kg

3	DP-3	Odlitek
	Spojnice	G20Mn5+N
	1 ks	25,97 kg

4	DP-4	Plech
	Oko	S355NL
	2 ks	0,2 kg

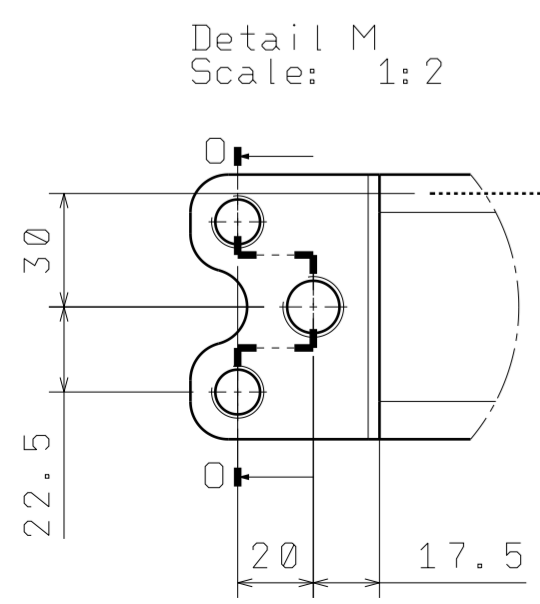
PŘÍLOHA č. 4

Výkres: Sestava - obrobek

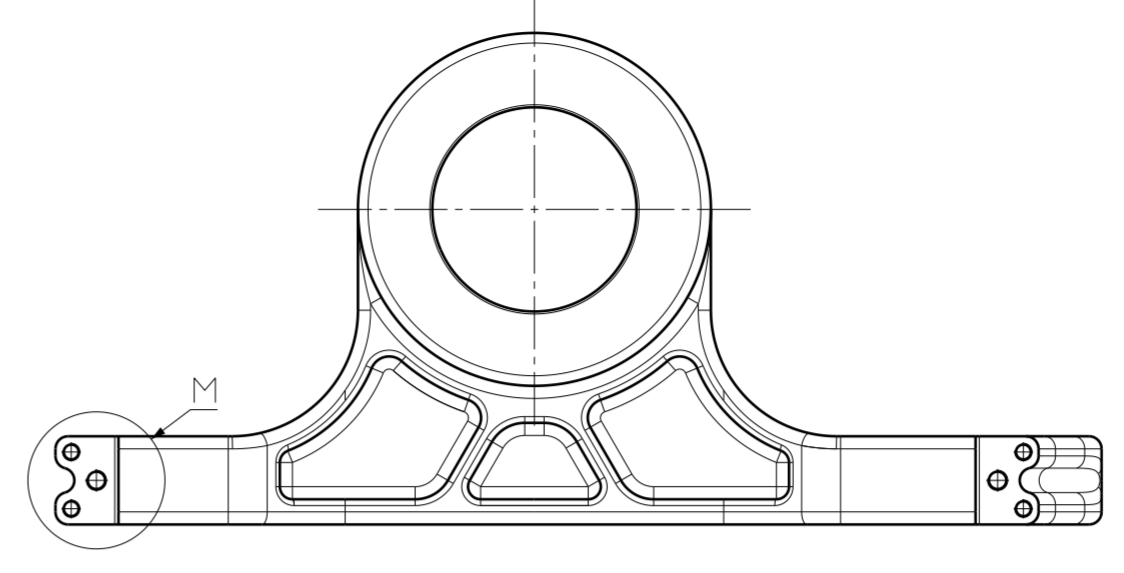
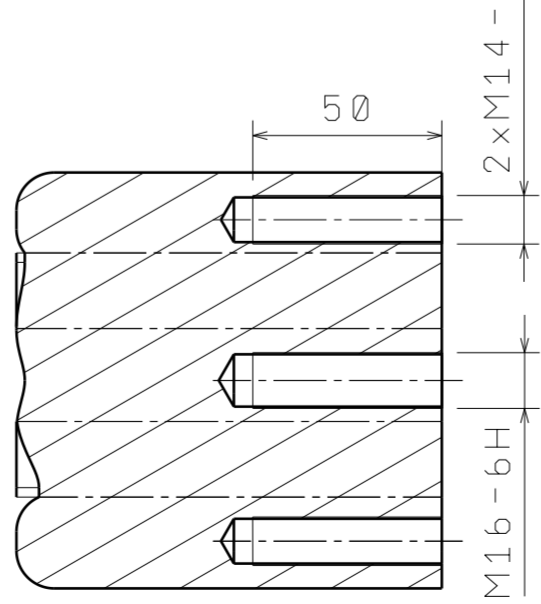
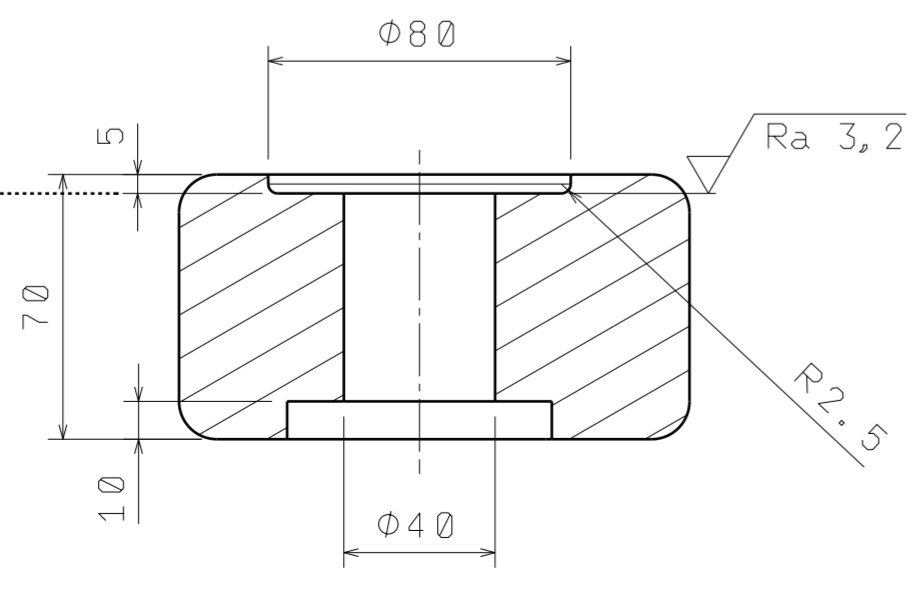


Section view N-N
Scale: 1:2

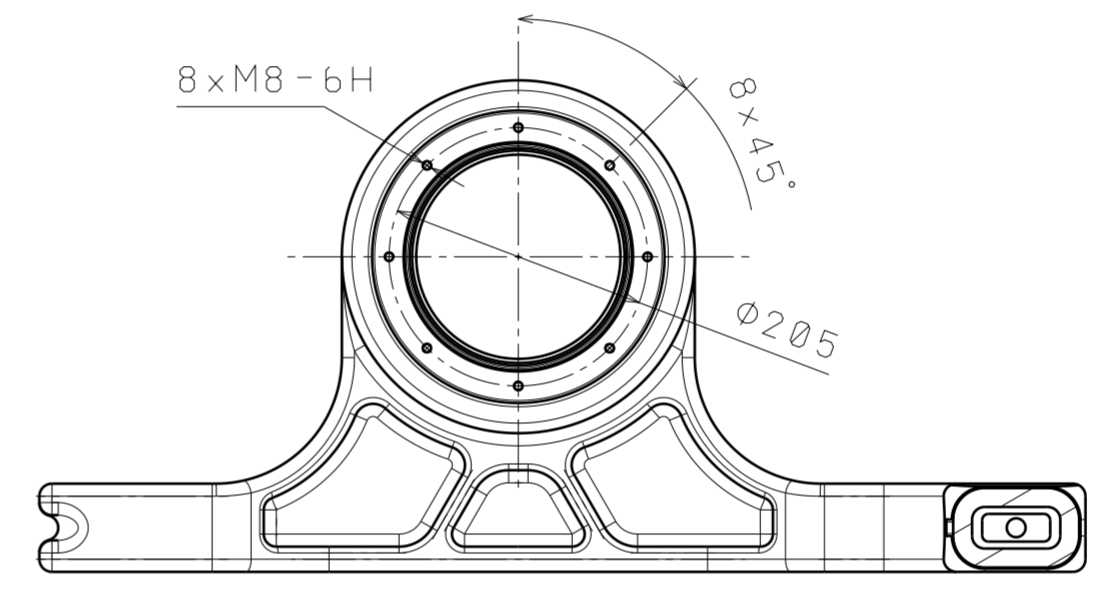
Section view O-O
Scale: 1:2



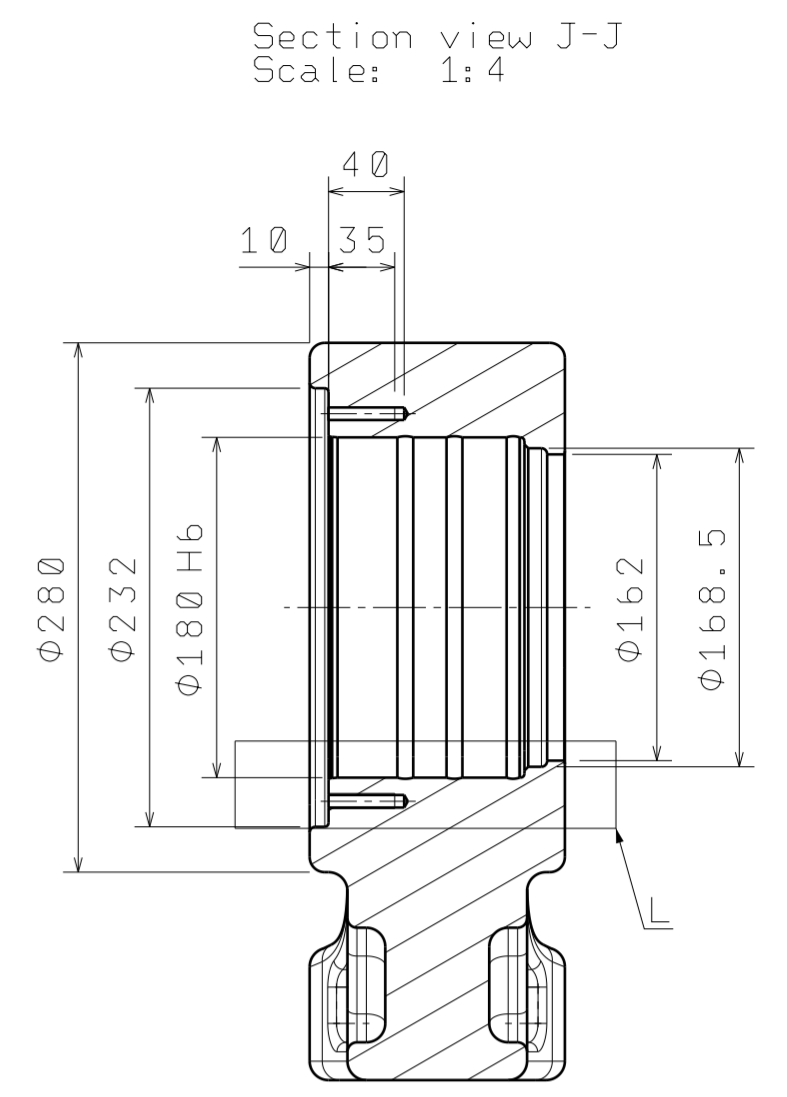
Detail M
Scale: 1:2



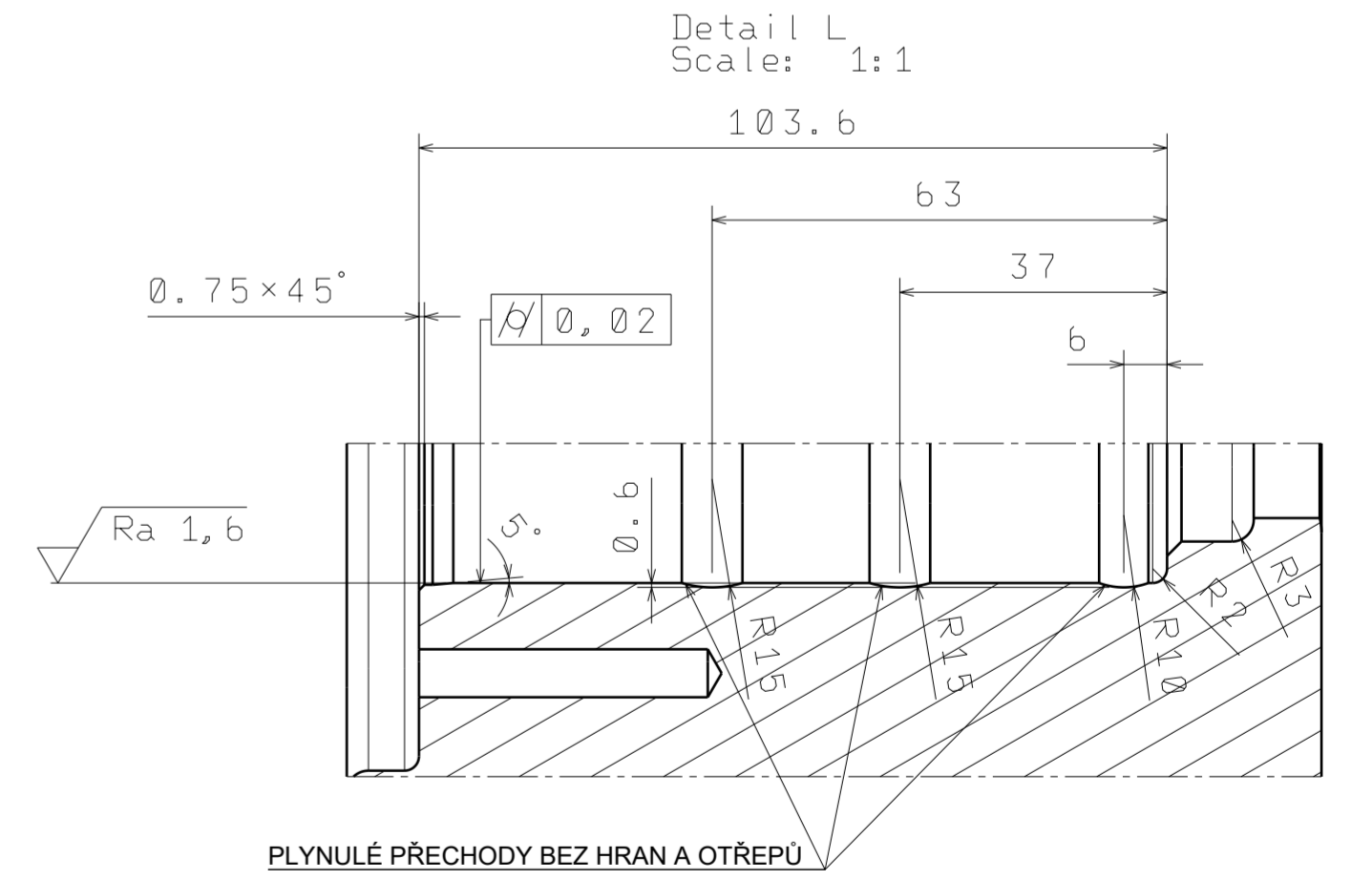
Auxiliary view K
Scale: 1:5



Auxiliary view P
Scale: 1:3



Section view J-J
Scale: 1:4



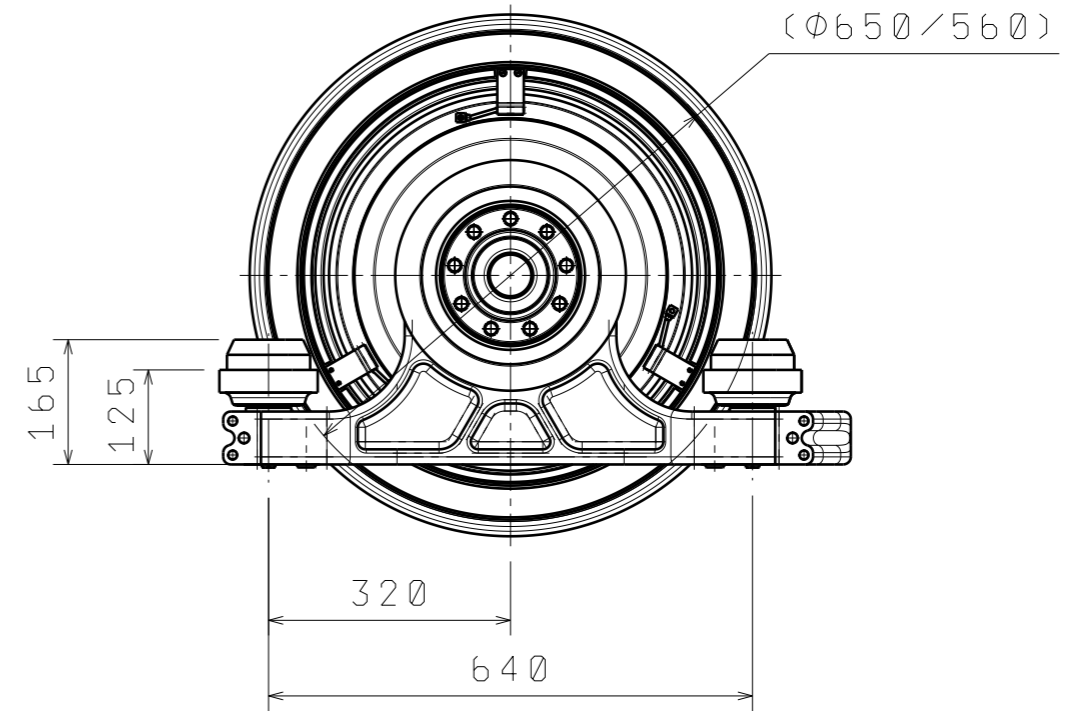
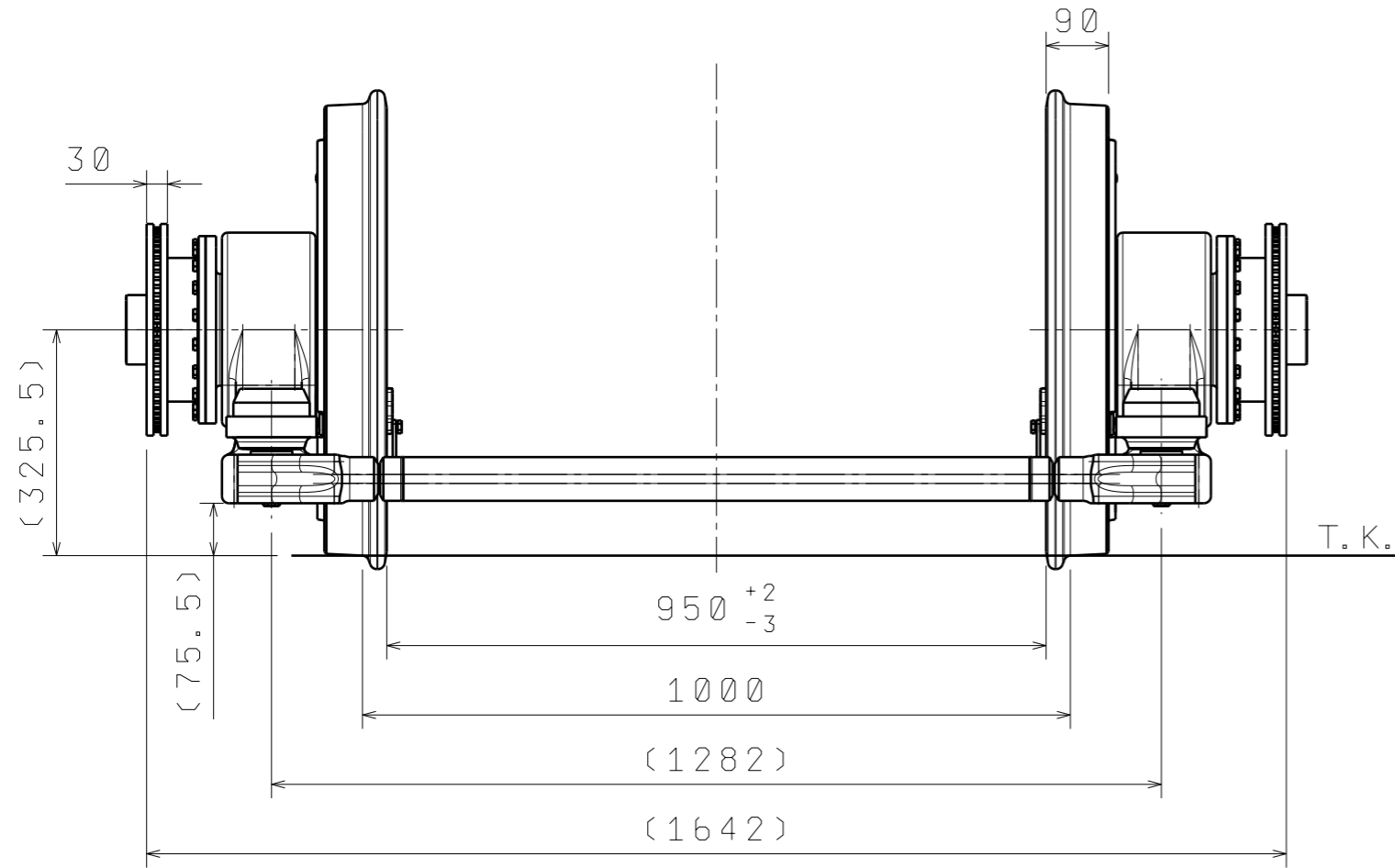
Detail L
Scale: 1:1

PLYNULE PŘECHODY BEZ HRAN A OTRĚPŮ

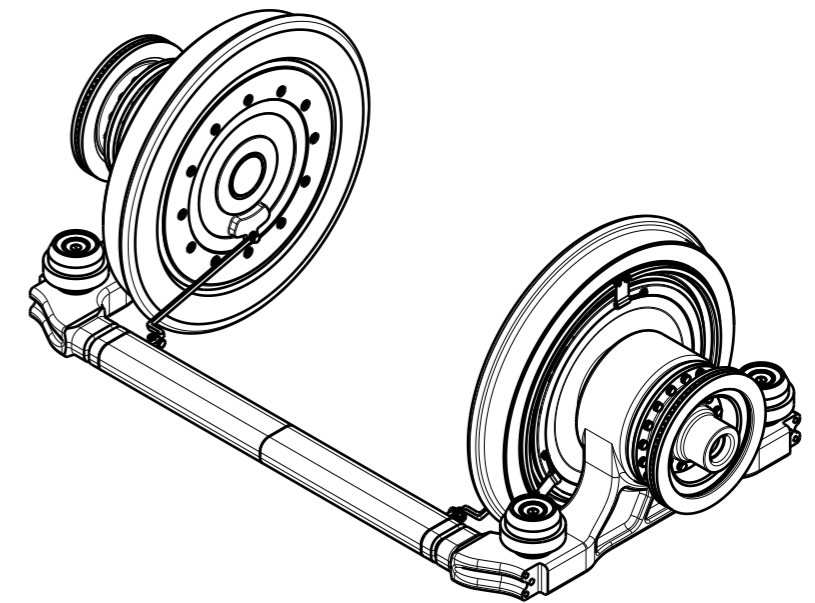
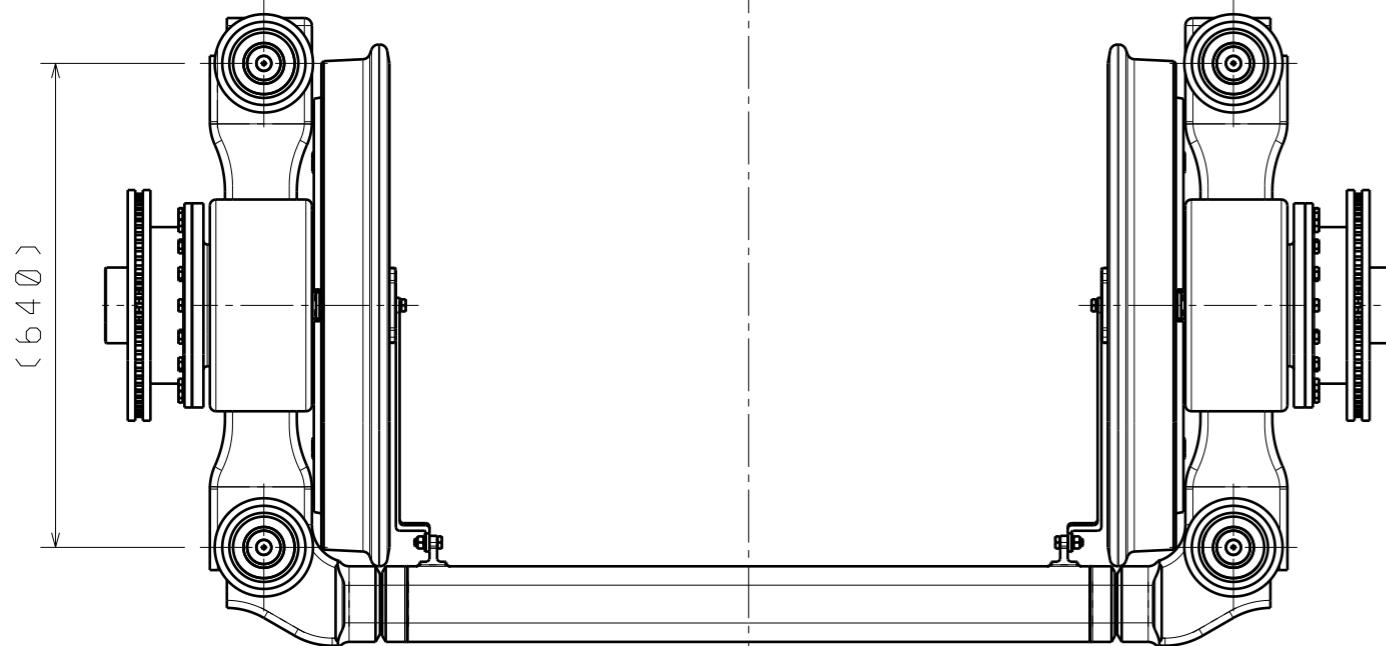
DESIGNED BY: David Grún	Sestava - obrobek	I	-
DATE: 25.05.2022		H	-
CHECKED BY: -	Západočeská univerzita v Plzni	G	-
DATE: -		F	-
SIZE: A2	Grún_3	E	-
SCALE: 1:5		D	-
WEIGHT (kg): 203,64	3/4	C	-
UNPAKING NUMBER: -		B	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.		A	-

PŘÍLOHA č. 5

Výkres: Sestava



Axonometrický pohled (1:15)



DESIGNED BY: David Grún	Sestava - kompletní		I	-	
DATE: 25.05.2022			H	-	
CHECKED BY: -	Západočeská univerzita v Plzni		G	-	
DATE: -			F	-	
SIZE A3		Grún_4		E	-
SCALE 1:10				D	-
WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER	SHEET	C	-	
		4/4	B	-	
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			A	-	