



# NÁVRH KONSTRUKCE SPECIÁLNÍHO RÁMU HORSKÉHO KOLA

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení  
*Autor práce:* **Bc. Miloš Čadek**  
*Vedoucí práce:* Ing. Petr Zelený, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miloš Čadek**  
Osobní číslo: **S13000846**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**  
Název tématu: **Návrh konstrukce speciálního rámu horského kola**  
Zadávající katedra: **Katedra výrobních systémů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je vývoj rámu horského kola, určeného pro zakázkovou výrobu, dle speciálních požadavků jezdce.

Zásady pro vypracování:


- 1) Úvod do problematiky, výběr klíčových kritérií návrhu
- 2) Volba mechanismu odpružení zadní stavby
- 3) Posouzení vhodnosti použití technologie 3D tisku (SLM)
- 4) Tvorba CAD modelu
- 5) Kinematická a dynamická analýza
- 6) Deformačně napěťová analýza
- 7) Vypracování úplné výrobní dokumentace

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **60 stran textu včetně příloh**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

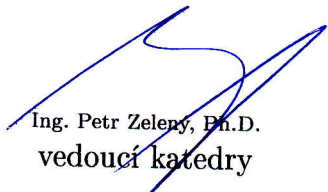
- [1] **JELÍNEK, M.** *Návrh rámu horského kola a jeho deformačně napěťová analýza pomocí MKP.* Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.  
[2] **MARIÁN, J.** *Projekt sjezdového kola.* Liberec, 2005. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.  
[3] **GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER.** *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing.* New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Zelený, Ph.D.**  
Katedra výrobních systémů  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Petr Šantavý**  
NO QUESTION BIKE

Datum zadání diplomové práce: **14. listopadu 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2015**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Petr Zelený, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 14. listopadu 2014

## **Prohlášení**

*Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.*

*Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.*

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

*Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.*

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

*Datum:*

*Podpis:*

## **Poděkování**

Děkuji panu Ing. Petru Zelenému, Ph.D. a Ing. Petru Šantavému za věnovaný čas při psaní diplomové práce a cenné rady při kontrole a úpravách konstrukčního návrhu. Dále bych rád poděkoval katedře výrobních systémů a automatizace, za umožnění práce s vybavením jejich laboratoře.

**Téma:** NÁVRH KONSTRUKCE SPECIÁLNÍHO RÁMU HORSKÉHO KOLA

### **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem konstrukce rámu horského kola, který má za úkol nahradit stávající konstrukční řešení. Rám je se svými speciálními rozměry určen pro konkrétní osobu s vrozenou růstovou vadou. Některé rozměry návrhu rámu kola jsou odvozeny od původní konstrukce, některé byly upraveny pro zlepšení jízdních vlastností a lepší funkci zadního zavěšení. Diplomová práce se také zabývá uplatněním technologie 3D tisku (SLM) v daném konstrukčním návrhu. Výsledkem diplomové práce je CAD model konstrukčního návrhu, výkresová dokumentace, vyrobený funkční prototyp horních vahadel na 3D tiskárně a návrh metodiky získání optimálního tvaru součásti vůči zatížení.

**Klíčová slova:** rám, návrh, jízdní kolo, freeride, dynamická analýza, MKP, optimalizace topologie, 3D tisk, SLM

**Theme:** SPECIAL MOUNTAIN BIKE FRAME DESIGN

### **Abstract**

This paper contains a mountain bike frame design, which was designed to outmatch the old carbon fibre frame. Frame has special dimensions which fits a specific person with congenital height disability. Some basic frame dimensions were obtained from the carbon fibre frame, some were adjusted to get desired driveability and suspension characteristics. Master thesis also contains information about usability of 3D print technology in the design. The outcome of this paper is a CAD model of the frame assembly with drawings, a prototype of upper rocker made by 3D print technology and methodics to obtain optimal part design for a multi-load case.

**Keywords:** frame, design, bicycle, freeride, dynamic analysis, FEA, topology optimization, 3D printing, SLM

## Obsah

1. Úvod.....	13
2. Cyklistické disciplíny.....	14
2.1. Cross country (XC).....	14
2.2. Enduro .....	15
2.3. Freeride .....	15
2.4. Downhill .....	16
3. Základní geometrie rámu jízdního kola .....	17
4. Zavěšení zadního kola.....	19
4.1. Terminologie .....	19
4.2. Jednočepový systém .....	23
4.3. Čtyřčepové systémy zavěšení .....	24
4.3.1. Faux bar .....	24
4.3.2. Instant Center Tracking (ICT) .....	24
4.3.3. Dual link.....	26
4.3.4. Active Braking Pivot (ABP).....	27
4.3.5. Softail.....	27
5. Analýza karbonového rámu .....	28
6. Návrh Al rámu .....	31
6.1. Přední vidlice.....	31
6.2. Zadní tlumič.....	32
6.3. Připojovací rozměry rámu .....	34
6.4. Materiál.....	34
6.5. Prostor rámu .....	35
6.6. Konstrukční a technologické řešení.....	37
7. Analýza Al rámu .....	39
7.1. Zhodnocení dosažených charakteristik.....	50
8. Zatěžovací zkoušky.....	53
8.1. Impact test.....	55
8.2. Zatížení rámu při jízdě v sedě.....	56
8.3. Zatížení rámu při jízdě ve stoje .....	56
8.4. Zatížení s využitím dyn. koef. při dopadu na obě kola.....	57
8.5. Zatížení rámu při dopadu na zadní kolo .....	58



8.6.	Zatížení při brždění.....	58
8.7.	Vlastní frekvence.....	58
9.	Deformačně napěťová analýza.....	59
9.1.	Dopad na zadní kolo.....	60
9.2.	Dopad na obě kola s dynamickým koeficientem.....	62
9.3.	Impact test.....	63
9.4.	Únavový test.....	65
10.	Posouzení vhodnosti použití technologie 3D tisku.....	67
10.1.	Terminologie.....	67
10.2.	SLM 280 HL.....	69
10.3.	Konkrétní aplikace - letecký průmysl.....	70
10.4.	Konkrétní aplikace - cyklistika.....	72
11.	Optimalizace strojních součástí.....	74
11.1.	Vahadlo.....	74
11.2.	Zatížení vahadla.....	74
11.3.	Odlehčení součásti.....	74
11.4.	Optimalizace tvaru obrysu vahadla.....	75
11.5.	Optimalizace topologie.....	77
11.6.	OT pomocí Altair solidThinking Inspire.....	79
11.7.	OT pomocí CAESS ProTOpCI a PTC CREO 2.0.....	81
11.8.	OT vahadla finálního návrhu Al rámu.....	83
11.9.	Výroba konečného návrhu vahadla.....	86
12.	Zhodnocení návrhu součásti metodou OT a její výroby.....	88
13.	Závěr.....	91

## Seznam použitých zkratek a symbolů

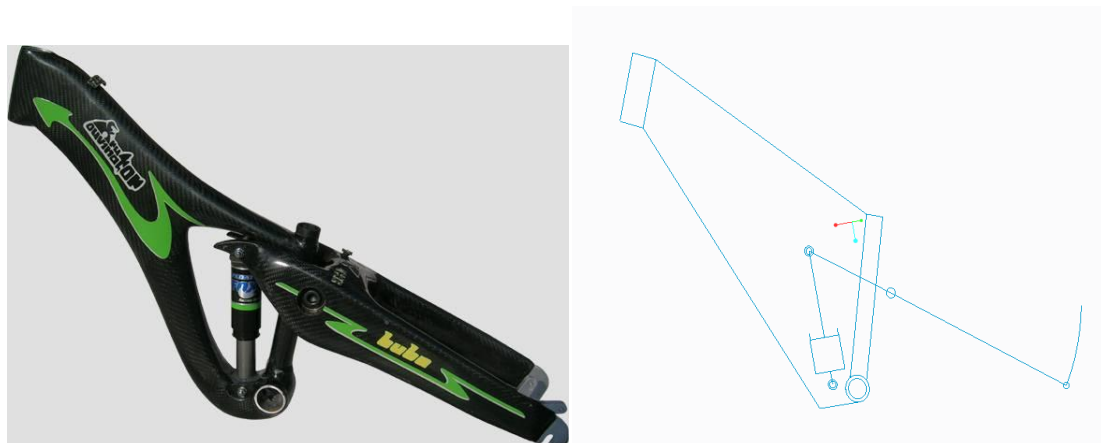
3DP	3D tisk
ABS	akrylonitrilbutadienstyren, polymer
Al	chemická značka, hliník, chemická značka
AM	aditivní výroba
AMR	Adaptive Mesh Refinement
Ar	argon, chemická značka
AR	anti-rise
AS	anti-squat
BB	výška šlapacího středu
CAD	computer aided design
cm	centimetr, jednotka délky
E [MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
Ep	potenciální energie
F	dopadová síla
FDM	Fused Deposition Modeling
FEA	Finite Element Analysis
FW	wheel force
g	gram, jednotka hmotnosti
G [MPa]	Modul pružnosti ve smyku
GE	General Electric
h	výška dopadu tělesa
HA	úhel hlavové trubky
HDD	pevný disk počítače
HL	délka hlavové trubky
CHS	horizontální vzd. osy zadního kola od šlapacího středu
inch	palec, jednotka délky

J	Joule, jednotka práce a energie
k	bezpečnost vůči smluvní mezi kluzu
kg	kilogram, základní jednotka hmotnosti
kg/m <sup>3</sup>	kilogram na metr krychlový, jednotka hustoty
KP	konečný prvek
KSA	katedra výrobních systémů a automatizace
LR	leverage ratio
m	hmotnost
MKP	metoda konečných prvků
mm	milimetr, jednotka délky
mm/min	milimetr za minutu, jednotka rychlosti
MPa	Megapascal, jednotka tlaku
MR	motion ratio
MTB	mountain bike
N	Newton , základní jednotka síly
N <sub>2</sub>	dusík, chemická značka
OP	okrajové podmínky
OT	optimalizace topologie
Pa	Pascal, základní jednotka tlaku
PC	personal computer
PK	pedal kickback
PLA	kyselina polylactonová, polymer
psi	libra síly na čtvereční palec, jednotka tlaku
R <sub>m</sub>	mez pevnosti
RP	rapid prototyping
R <sub>p0,2</sub>	smluvní mez kluzu
SA	úhel sedlové trubky

SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
ST	délka sedlové trubky
Ti	titan, chemická značka
TT	délka horní rámové trubky
VM	redukované napětí Von Mises
WB	rozvor kol
x,y	výchylka

## 1. Úvod

Práce se zabývá návrhem celoodpruženého horského kola se speciálními a ojedinělými požadavky na celkovou konstrukci. Požadavky jsou dány zejména charakterem užití (downhill, freeride) a uživatelem, který má jistá fyzická omezení (obr.1.2.). Doba používání karbonového kola dala za vznik právě tomuto návrhu, tato doba (6 let) již dalece překračuje životnost takto namáhaných kompozitových rámců z uhlíkových vláken. Navržená konstrukce bude tak po domluvě využívat kovových trubek, dle finančních a výrobních možností.



*Obrázek 1.1: Původní karbonový rám a jeho výpočtový drátový model*



*Obrázek 1.2: Jakub Ouvín*

## 2. Cyklistické disciplíny

Druhá kapitola popisuje obecně shrnuté charakteristické znaky a požadavky na rámy kol všech zmíněných disciplín v této práci. Disciplíny jsou seřazené dle obvyklé velikosti zdvihu zadního kola. Vlastnosti horských kol dle charakteru užití jsou shrnuty v tabulce 1.

**Tabulka 1:** shrnutí vlastností horských kol pro různé MTB disciplíny

Disciplína	hlavový úhel [°]	průměry kol [in]	šířka pláštěů [in]	počet talířů/pastorků	hmotnost kola [kg]	zdvihový poměr přední/zadní [mm]
XC	do 71	26, 27.5, 29	1.95 až 2.1	3/10	9 až 14	100-120/0-100
Enduro	65 až 68	26, 27.5	2 až 2.35	3/11, 1/11	13 až 16	130-160/140
Freeride	63 až 66	26, 27.5	2.5 až 3	1/10	16.5 až 20	160-200/160-230
Downhill	63 až 64	26, 27.5	2.35 až 2.5	1/7	15 až 20	200/ 200- 230

### 2.1. Cross country (XC)

XC je prozatím jedinou disciplínou, která reprezentuje horská kola na olympiádě. Na olympiádu se tento sport dostal v roce 1996. Typickým terénem XC disciplíny jsou nepevněné lesní cesty s přírodními překážkami v podobě bahna nebo vodního brodu. Rámy kol určených pro tuto disciplínu jsou jedny z nejlehčích, celý rám je dnes většinou vyroben z karbonu. Mohou mít pevnou nebo i odpruženou zadní stavbu se zdvihem zadního kola do 100 mm a podobným zdvihem přední vidlice. Na obrázku 2.1 je zobrazen XC speciál Jaroslava Kulhavého, olympijského vítěze z Londýna 2012. S hmotností na hranici 9 kg jde o nejlehčí kolo na 29" s odpruženou zadní stavbou. [1]



**Obrázek 2.1:** Specialized S-Works Epic Carbon 29" World Cup [1]

Rámy určené pro cross country mají vyšší hlavový úhel, až 71° a převážně mají uzamykatelná odpružení. A jsou většinou konstruována na kola s větším průměrem, než je standardních 26".

## 2.2. Enduro

Endurové rámy mají oproti XC ráům nižší hlavový úhel a vyšší zdvihy, až 160/150 mm. Mohou disponovat i uzamykatelným odpružením. Enduro rámy jsou v porovnání s XC rámy určené pro delší a o něco prudší sjezdy, s například i menšími umělými skoky a jinými překážkami. Styl jízdy odpovídá spíše „hravější“ jízdě na single tracku než-li dlouhým maratonům s velkým převýšením jako je tomu u XC. S jízdou do kopce se zde, ale oproti kategorii freeride nebo downhill rozhodně počítá. Rámy jsou vyráběny z karbonu nebo i z hliníkových slitin a tak jsou kola poměrně lehká. S výhodou využívají teleskopických sedlovek, které jdou za jízdy snadno zasunout i vysunout a usnadňují jízdu při sjezdu. Výška sedlovky není na těchto kolech jediným stavitelným prvkem, dalším může být třeba přední vidlice. Například Suntour Durolux má stavitelný zdvih od 120 do 180 mm. Enduro kola mají nejčastěji 26", novým trendem jsou ale i 27.5". Dalším rozdílem oproti XC je také častý ISCG návarek na rámu kola pro připevnění napínáku řetězu. Kategorii těchto kol lze také najít pod názvy Trail nebo All Mountain.



*Obrázek 2.2: Enduro rám Santa Cruz Bronson - 650B Enduro Racer [2]*

## 2.3. Freeride

Freeride můžeme volně přeložit jako jízda ve volném terénu. Termín „freeride“ se užívá u mnoha adrenalinových sportů jako je lyžování, snowboarding, motocross nebo právě cyklistika. Freeride je charakteristický jízdou neupraveným, neupraveným terénem s umělými nebo přírodními překážkami. U této disciplíny se zpravidla neměří čas, hodnotí se plynulost jízdy, náročnost vybrané stopy a provedení triků. Nejznámější freeridový závod je bezesporu Red Bull Rampage, který se jezdí v americkém státu Utah.



*Obrázek 2.3: Cam McCaul, Red Bull Rampage 2012 [3]*

Rámy určené pro freeride jsou charakteristické vysokými zdvihy s velkou progresivitou zadní stavby. Mohou mít jednorunkovou nebo dvoukorunkovou přední vidlici. Většina těchto rámu je spíše než z karbonu vyrobena ze slitin hliníku EN AW 7020T6 nebo EN AW 6061T6. Jsou to kola určená pro nejtvrďší zacházení s hlavovým úhlem okolo  $63^\circ$  až  $66^\circ$ , tedy menším než například rámy XC nebo enduro, hmotností se nejčastěji blíží k hranici mezi 16-18 kg. Freeridový rám je zobrazen např. na obrázku 4.1.

## **2.4. Downhill**

Tato disciplína je také řazená mezi extrémní sporty. Její podstatou je projet vymezenou trať v co nejrychlejším čase. Trať je často složená z velice prudkých a rychlých úseků těžkým nezpevněným terénem. Podobně jako u XC, ani zde se při závodech neberou ohledy na počasí. Nejznámějším závodem je seriál světového poháru.

Rámy určené pro sjezd mají hlavový úhel většinou kolem  $63^\circ$ . U sjezdových rámu hraje velkou roli jejich hmotnost, kvůli lepší ovladatelnosti. Nejdražší kola určená pro sjezd s karbonovým rámem mají hmotnost kolem 15 kg. Zdvihy sjezdových rámu se pohybují v rozmezí od 200 mm pro zadní kolo a stejně tak pro přední vidlici. Sjezdový rám je také charakteristický dvoukorunkovou přední vidlicí, brzdovými kotouči s nejvyšším průměrem 203 mm nebo malou silniční kazetou s pastorky o počtu zubů 11-19. Všechny sjezdové rámy jsou vybaveny napínáky řetězu a širším typem pláštěů. Pod každým pláštěm je daleko odolnější a těžší duše s vyšší tloušťkou stěny pryže než je tomu například u XC kol. Na obrázku 2.4 je zobrazeno sjezdové kolo několikanásobného mistra světa v kategorii downhill Grega Minnaara. Kolo je postavené na karbonovém rámu Santa Cruz V10 s celkovou hmotností 15 kg. [4]

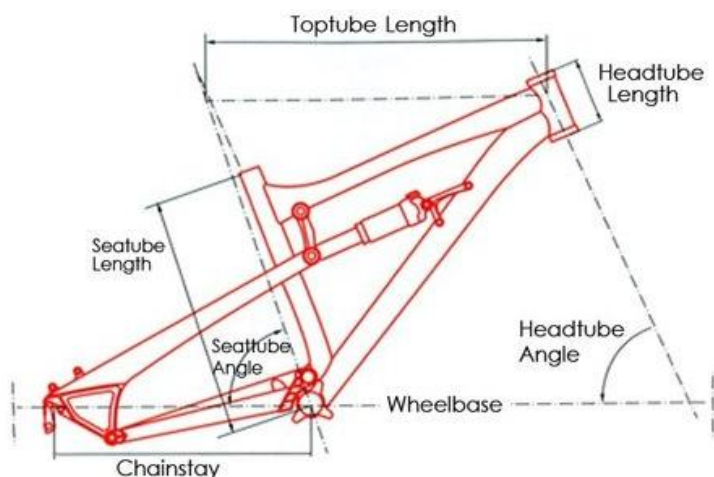




**Obrázek 2.4:** Santa Cruz V10 na kterém vyhrál Greg Minnaar titul mistra světa v roce 2013 [4]

### 3. Základní geometrie rámu jízdního kola

Geometrie rámu má velký vliv na jízdní vlastnosti celého kola. Navrhovaný rám je určený spíše pro velké skoky, tvrdé dopady a sjezd těžkým lesním terénem. Mluvíme tak spíše o disciplínách označovaných jako freeride a downhill, než-li enduro nebo XC. Tomuto určení odpovídají obecné zásady pro geometrii, které platí i u tohoto speciálního návrhu. Obecné zásady nebo doporučení spočívají v dodržení určitých mezních hodnot úhlů a délkových rozměrů důležitých z hlediska jízdních vlastností. Mezi tyto rozměry patří hlavně níže zmíněné (obrázek 3.1).



**Obrázek 3.1:** Geometrie rámu s popisem základních parametrů [5]

Headtube Angle (HA) = úhel hlavové trubky

Headtube Length (HL) = délka hlavové trubky

Wheelbase (WB) = rozvor kol

Chainstay (CHS) = horizontální vzdálenost osy zadního kola od šlapacího středu

Bottom bracket height (BB) = výška šlapacího středu

Toptube Length (TT) = délka horní rámové trubky  
Seattube Length (ST) = délka sedlové trubky  
Seattube Angle (SA) = úhel sedlové trubky

**Hlavový úhel** je úhel mezi horizontální rovinou a osou hlavové trubky. V hlavové trubce je přes hlavové složení uložena přední vidlice. Strmější hlavový úhel určuje rám k lepším jízdám vlastnostem při stoupání a umožňuje také rychlejší, resp. citlivější zatáčení. Nižší hlavový úhel určuje rám k pomalejšímu zatáčení a znepríjemňuje jízdou do kopce. Nižší hlavový úhel, ale také poskytuje větší stabilitu při vyšších rychlostech. Typický rám kola určený pro cross country nebo i silniční cyklistiku má hlavový úhel obvykle kolem 71°, sjezdový rám má pak HA okolo 65°. [5]

**Rozvor kol** označuje vzdálenost osy předního a zadního kola. Delší rozvor kol zaručuje při vyšších rychlostech stabilnější chování rámu a při nižších rychlostech zhoršuje manévrovatelnost. Rám s kratším rozvorem kol je ovladatelnější, ale při vyšších rychlostech drží hůře stopu.

**Délka zadní stavby** neboli chainstay je vzdálenost mezi šlapacím středem a osou zadního kola. Tento rozměr je součástí rozvoru kol a s tím se pojí důsledky chování rámu při jízdě. Kratší délka zadní stavby se hodí pro rámy kol, od kterých se očekává pohotová a agresivní jízda z kopce. Tyto rámy umožňují snadnější jízdu po zadním kole a jsou také ovladatelnější ve vzduchu. Kratší zadní stavba je také tužší. [5]

**Výška šlapacího středu** je vertikální vzdálenost šlapacího středu od spojnice středů předního a zadního kola. Je to důležitý parametr pro rychlou manévrovatelnost v ostrých zatáčkách. Velikost BB souvisí s rozsahem zdvihu zadní stavby. Pokud je šlapací střed příliš nízko, hrozí při kompresi zavěšení nebezpečí kolize pedálů a klik s nerovnostmi povrchu.

**Délka horní rámové trubky** se označuje jako horizontální délka mezi středy sedlové a hlavové trubky. Zkrácení této délky může vést ke zkrácení rozvoru kol. Ideální délku většina výrobců odvozuje od výšky cyklisty, z které je pak odvozena délka paží a trupu. Delší horní rámová trubka u cyklisty menšího vzrůstu může mít za následek například bolesti šíje a obtíže krční páteře.

**Úhel sedlové trubky** ovlivňuje polohu těžiště cyklisty při jízdě v sedě a také polohu kyčelních kloubů vůči šlapacímu středu. Vyšší úhel sedlové trubky posune cyklistu blíže k přednímu kolu, čímž umožní jezdcům šlapat rychleji. Ze stejného důvodu umožňuje jízda ve stoje větší výkon cyklisty při sprintech. [5]

## 4. Zavěšení zadního kola

Úvodem této kapitoly jsou rozepsány některé základní termíny, užívané k popisu vlastností zavěšení zadního kola. Také jsou zde představeny výhody a nevýhody vybraných způsobů zavěšení.

### 4.1. Terminologie

**Zavěšení (suspension)** je komplexní systém, který se skládá ze zadního kola, tuhosti pláště, tlaku vzduchu v duši zadního kola, tuhosti tlumiče a členů mechanismu které připojují zadní kolo k rámu a umožňují vzájemný pohyb mezi zadním kolem a rámem.

**Zdvih (travel)** označuje výchylku při kompresi zavěšení. Zdvih zadního kola je měřen vertikálně. Zdvih tlumiče označuje vzdálenost mezi vnějším a vnitřním kluzákem tlumiče. [6]

**Trajektorie osy (wheel travel)** je graficky znázorněná dráha pohybu osy zadního kola během komprese zavěšení, při nepohyblivém rámu. Osa zadního kola koná obecný rovinný pohyb, který je většinou částí kružnice.

**Leverage ratio (LR)** nebo také pákový poměr, je poměr mezi zdvihem zadního kola a kompresí tlumiče. LR křivka se vykresluje v závislosti na kompresi tlumiče a její tvar udává charakter zavěšení. Klesající LR křivka označuje rostoucí funkci síly s kompresí zavěšení. Při uvažované konstantní hmotnosti cyklisty a například rostoucím počátečním bodem křivky LR u různých rámu, nelze použít tlumič o stejné tuhosti. S výše položenou charakteristikou LR je nutné použít tužší tlumič. [6] [7]

$$LR = \frac{\text{zdvih zadního kola}}{\text{komprese tlumiče}} \quad (1)$$

**Motion ratio (MR)** je inverzní LR. MR podobně jako LR charakterizuje průběh chodu zavěšení. Klesající MR křivka však označuje klesající sílu v zadním kole. MR je známý pojem u náprav dvoustopých vozidel. [7]

**Wheel force ( $F_w$ )** je síla v ose zadního kola. Pokud známe hodnotu MR a průběh zatěžovací charakteristiku tlumiče, můžeme určit sílu v zadním kole  $F_w$ . Diagram Wheel Force označuje závislost  $F_w$  na zdvihu zadního kola. [7]

$$F_w = MR * F_s \quad (2)$$

$F_s$  = síla v tlumiči

**Wheel rate (WR)** je celková tuhost zavěšení zahrnující zatěžovací charakteristiku tlumiče a průběh LR. WR křivka, je závislost WR na zdvihu zadního kola. K výpočtu tohoto parametru poslouží rovnice (3). [7]

$$WR = k * MR^2 \quad (3)$$

$k$  = tuhost pružiny tlumiče

**Chain growth (prodloužení řetězu) a pedal kickback (PK)** popisují reakci pohonu na kompresi zavěšení. Kompresi zavěšení vzniká v řetězu tahová síla, která vyvolává moment ve směru proti otáčení hodinových ručiček. Vyvolaný moment způsobuje natočení klik pohonu proti směru pohybu šlapání. Velikost natočení je vyjádřena v úhlových stupních a závisí na typu zavěšení, aktuálním převodu a na umístění napínacích prvků řetězu. Natočení kliky v závislosti na zdvihu zadního kola je vyneseno v diagramu pedal kickback. Ilustrativní hodnoty vlivu převodu na velikosti natočení kliky jsou ukázány na rámu Giant Reign v tabulce 2. [6]

**Brake-squat (BS)** je komprese při brždění. Pro většinu návrhů platí, že při zablokování zadního kola brzdou způsobuje brzdný moment kompresi zavěšení (obrázek 4.1). Cyklista má pak pocit, že zavěšení při brždění „tuhne“, zadní kolo ztrácí trakci a cyklista musí více tlumit nerovnosti tělem. Takové zavěšení lze označit jako neaktivní při brždění. [7]



**Obrázek 4.1:** Rám Kona Stinky 2009, kompresivní působení brzdných účinků, šipka znázorňuje směr pohybu vahadla při brždění vlivem momentu  $M_B$  [8]

Neaktivní zavěšení lze najít u každého jednočepového systému s typem konstrukce dle obrázku 4.1. nebo 4.5. Oba tyto typy konstrukce mají třmen brzdy na takovém členu, který definuje trajektorii osy zadního kola. Některá „pokročilejší“ zavěšení mají třmen brzdy zadního kola na takové části zavěšení, která nedefinuje trajektorii zadního kola (třmen na těhlici - Trek ABP, Dual link atd.). Tyto efektivně ruší závislost reakce zavěšení na brždění a umožňují důsledky brždění na zavěšení řešit nezávisle na poloze zadního kola. [7]



**Obrázek 4.2:** Trek Session 9.9 s typem zavěšení ABP, znázornění extenzivního působení brzdných účinků, šipky znázorňují směry pohybu vahadel při brždění vlivem momentu  $M_B$  [9]

Zavěšení aktivní, čili nezávislé na funkci brzdy je na obrázku 4.2. Úhel mezi těhlicí a spodním vahadlem se vlivem brždění zmenšuje, brzdný moment tedy působí na celý mechanismus spíše extenzivně. U systému ABP je však díky umístění čepu těhlice v ose zadního kola celý efekt extenze minimální a lze hovořit o systému, který je nezávislý na brždění. Systém zavěšení, který má citelné problémy s extenzí při brždění je například starší typ rámu Tomac 204 Magnum (obr.4.3). U rámu Tomac je takto způsobená extenze zavěšení tak velká, až zavěšení úplně ztrácí funkci.



**Obrázek 4.3:** Tomac's 204 Magnum [10]

K celé problematice aktivního nebo neaktivního zavěšení zadní stavby je dobré poznamenat, že na jízdách kolech tohoto typu se zadní brzdou většinou nepřibrzdí. Brždění zadního kola probíhá hlavně v krátkých a prudkých dávkách, což reakci zavěšení na brždění ještě umocňuje.

**Anti-squat (AS)** je známý pojem v zavěšení kol automobilů nebo motocyklů. AS se užívá ke zhodnocení míry komprese zavěšení při akceleraci. Komprese v tomto případě

vzniká setrvačnou silou cyklisty při zrychlování vlivem šlapání. Anti-squat je vyjádřen v procentech a označuje kompenzaci komprese extenzivními účinky hnacích sil pohonu. [11]

Výhodou rámu kola s větší hodnotou anti-squatu je efektivnější šlapání a udržení přímější jízdní pozice. Použití takto nastaveného zavěšení, je účelné zejména pro jízdu do kopce nebo sprinty. [12]

Hodnota anti-squatu není konstantní a mění se v závislosti na zdvihu zadního kola. Z tohoto důvodu se posuzuje hlavně hodnota, kdy zdvih odpovídá hodnotě sag. Sag je doporučená rovnovážná poloha zdvihu tlumiče zahrnující hmotnost cyklisty, vyjadřuje se v procentech a je udána výrobcem. Většinou se pohybuje v rozmezí 20-25 %. Pro downhill a freeride může být tato hodnota až 30 % celkového zdvihu (obrázek 4.4). [12]



**Obrázek 4.4:** Závislost anti-squatu na zdvihu pístnice tlumiče se znázorněnou sag oblastí, jedná se o rám Giant Reign s 27.5" koly [12]

AS a PK nezávisí pouze na aktuálním zdvihu zadního kola, ale jsou velice závislé i na aktuálním převodu. Tento fakt přehledně zobrazuje následující tabulka.

**Tabulka 2:** Měření vlastností rámu Giant Reign 27.5" 2015 (pozn. převod: převodník/zadní pastorek) [12]

Konfigurace	A	B	C	D
Převod	38/11	24/36	38/21	24/13
Poměr	3.45	0.67	1.81	1.85
Anti-squat [%]	63	126	81	170
Pedal kickback [°]	1.2	26	3.6	13

Z tabulky lze vyčíst nastavení zavěšení vzhledem k převodu a tím i jeho použití. Konfigurace A má nejvyšší převod, natočení kliky je zde velice malé. Hodnota AS je sice nejmenší, ale v rychlých sekcích není šlapání prioritou. Z těchto důvodů je tato kombinace vhodná pro sjezdovou disciplínu. Konfigurace B je úplným opakem konfigurace A. Převod 24/36 je určen pouze pro strmá stoupání. Vysoký PK nebo menší citlivost vůči nerovnostem, většinou nehraje příliš velkou roli. Důležitá je vysoká hodnota AS zaručující vysokou tuhost zavěšení při šlapání, což rámu propůjčí i geometrii s vyšším hlavovým úhlem, která se pro stoupání více hodí. Vlastnosti konfigurace C vykazují druhou nejnižší hodnotu AS a PK dosahuje hodnoty  $3.6^\circ$ . Převodový poměr má hodnotu 1.81, je použit přední velký převodník a zadní pastorek s 21 zuby. Konfigurace D má téměř stejný převodový poměr, tentokrát je však použit prostřední převodník a zadní pastorek s 13 zuby. Výsledek této kombinace je vysoký AS, až 170% a PK s hodnotou  $13^\circ$ . [12]

Tabulka 2 ukazuje sladění vlastností zavěšení zadního kola s volbou převodu k odpovídajícímu typu jízdy. Analýza je provedena na rámu Giant Reign 27.5" 2015 s patentovaným systémem zavěšení Maestro. [12]

**Anti-rise (AR)** popisuje chování zavěšení při brždění. Jak již bylo zmíněno, většina typů zavěšení je navržena tak, že síly vyvolané bržděním způsobují kompresi zavěšení (BS). Kompresi zavěšení bržděním, tedy BS, kompenzuje extenzi zavěšení, která při brždění vzniká vlivem setrvačnosti. Míra kompenzace této extenze vlivem BS je právě AR. AR může být kvantifikován použitím grafických metod a vykreslen jako funkce zdvihu zadního kola, stejně jako AS. Například hodnota  $AR = 70\%$  znamená, že BS relativně dobře kompenzuje extenzi snahou o kompresi zavěšení a extenze se projeví v menší míře. [7] [11]

## 4.2. Jednočepový systém

Jednočepový systém je charakteristický jedním vahadlem, které je uloženo na centrálním čepu. Trajektorie zadního kola je kružnice. Třmen zadní brzdy je uchycen k tomuto vahadlu. Jedná se o neaktivní typ zavěšení, pokud není rám vybaven plovoucím třmenem. Jednočepové rámy jsou lehké a jednoduché na údržbu. Rám s polohou centrálního čepu na obrázku 1.1 se vyznačuje vysokou hodnotu AS a PK. Tento jednočepový rám je pečlivě analyzován v kapitole 5. Další, pravděpodobně nejznámější jednočepový rám v kategorii sjezdových kol je zobrazen na obrázku 4.5.



**Obrázek 4.5:** Rám Orange 224-DH určený pro downhill, jednočep [13]

### 4.3. Čtyřčepové systémy zavěšení

Vzhledem k pozici uchycení třmene u čtyřčepového systému lze rozlišit dva základní typy zavěšení. Faux bar a Horst Link, na který vlastní patent firma Specialized. Velice snadno zaměnitelný s tímto zavěšením je systém Active Braking Pivot (obrázek 4.2), na který vlastní patent společnost Trek Bicycle Corporation. Všechny tyto tři typy zavěšení jsou probrány v následujících kapitolách.

#### 4.3.1. Faux bar

Faux bar je sice čtyřčepový systém, má ovšem vlastnosti jednočepu, jedná se vlastně o přepákový jednočep. Faux bar má třmen brzdy a zadní kolo uchyceno ke spodní vidlici. Trajektorie zadního kola je kružnice, která je definována jedním centrálním čepem, stejně jako u jednočepového systému. Výhoda tohoto systému je nízký pedal kickback a relativně lehká konstrukce zavěšení. Nevýhodou je brake squat. Systém při brždění tuhne a dochází ke ztrátě trakce. Pro cyklistu tak může být jízda na rámu s tímto systémem zavěšení náročnější a to hlavně v prudkých a nerovných pasážích. Zavěšení je zobrazeno na obrázku 4.1. Problém nezávislosti zavěšení na brždění u typu faux bar nebo jednočepového systému, lze řešit pomocí tzv. plovoucího třmenu (obrázek.4.6). [14]



**Obrázek 4.6:** Rám Kona Stinky a D.O.P.E. systém plovoucího třmenu zadní brzdy [15]

Systém plovoucího třmenu se na trhu poprvé objevil v roce 2007 a bohužel se neosvědčil. Neosvědčil se zejména kvůli vysokým nárokům na tuhost v extrémním použití těchto rámu. Často docházelo ke vzniku vůle v uložení systému a k ohnutí prutu, který spojuje rám se třmenem.

#### 4.3.2. Instant Center Tracking (ICT)

ICT je čtyřčepový systém, který má však třmen brzdy i zadní kolo uchycené k těhlici. Zavěšení má všechny výhody systému faux bar a navíc má lepší vlastnosti při brždění než faux bar, je daleko citlivější k nerovnostem než klasický jednočepový systém a zároveň zamezuje kompresi zavěšení při šlapání. [16]

Důvodem lepších vlastností systému ICT je proměnná poloha okamžitého středu otáčení osy zadního kola. Okamžitý střed otáčení se také nazývá pólem pohybu nebo instant



center of rotation (IC). IC lze umístit i do konstrukčně nerealizovatelných míst, například v místě ráfku zadního kola nebo i několik metrů před samotným kolem. Změna polohy IC s kompresí, umožňuje konstruktérům větší možnosti při návrhu trajektorie osy zadního kola než je tomu u jednočepu. V případě, kdy by se IC nacházel v konfiguraci, která by odpovídala poloze čepu rámu s jednočepovým zavěšením, bude chování obou typů zavěšení totožné. Někteří výrobci a literatura označují takto proměnný střed otáčení jako „virtual pivot point” nebo „floating pivot point”. Pokud první (čep rameno/rám a rameno/těhlice) a třetí člen (čep vahadlo/rám a vahadlo/těhlice) mechanismu proložíme přímkami, pak jejich průsečík je IC (obrázek 4.7). [14] [11]

Jakákoli okamžitá poloha IC může hrát významnou roli v chování kola. Například pro jednočep, který má umístěný centrální čep v ose sedlové trubky. Pokud je čep umístěn nad horní větví řetězu, pak bude zavěšení vykazovat AS při šlapání. Pokud by byl čep umístěn pod tažnou větví řetězu, bude reakce zavěšení při šlapání přesně opačná. Síly spojené s pohonem nejsou jedinými, které působí kolem bodu IC. Je nutné brát v úvahu i síly při brždění. [17] [11]

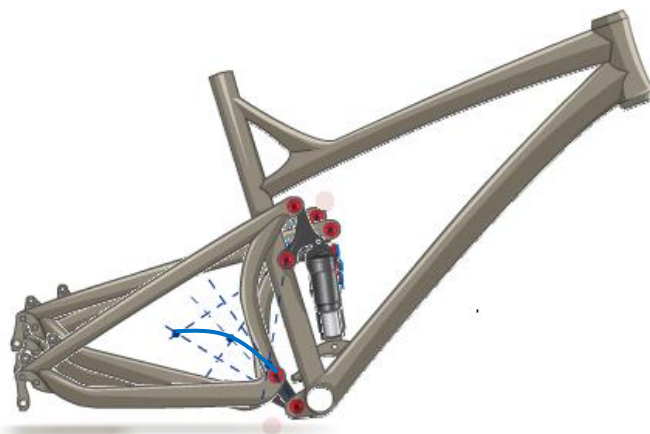
Výhoda ICT například oproti Horst Link, který může být obdobné konstrukce je právě v poloze IC nad tažnou větví řetězu, jak je zobrazeno na obrázku 4.7. [16]



**Obrázek 4.7:** Ellsworth ICT, zobrazení IC s polohou nad tažnou větví řetězu [18]

### 4.3.3. Dual link

Dual link se od klasické čtyřčepové konstrukce odlišuje velice krátkým spodním ramenem, kratším horním vahadlem a trojúhelníkovou těhlicí v jejímž vrcholu je uloženo zadní kolo. Zástupci tohoto zavěšení jsou například DW-Link (obrázek 4.9), Santa Cruz VPP (obrázek 2.2 a 2.4), Giant Maestro (obrázek 4.4), Lapierre X-Control (obrázek 4.8) atd.



**Obrázek 4.8:** Lapierre FPS2 X-Control, zobrazení třech poloh mechanismu s proloženou trajektorií pohybu bodu IC [19]

Výhodou těchto systémů obecně, jsou dobré vlastnosti při brždění a nízké hodnoty PK při zachování vysokých hodnot AS. Americký konstruktér Dawe Weagle, autor řešení DW-link na svém webu hovoří o precizním nastavení hodnot AS tam, kdy je potřeba, tedy na počátku zdvihu v oblasti SAG hodnoty. Díky čemuž může ráům používajícím DW-link dopřát níže položený šlapací střed, bez obav kolize pedálů nebo klik s nerovnostmi terénu při šlapání. Cyklista pak cítí pozitivní efekt níže položeného šlapacího středu, v lepší ovladatelnosti a ostrém zatáčení kola. DW-Link také netuhne při ostrém brždění, zůstává aktivní a neztrácí trakci při brždění. To umožňuje jezdcům brzdit později a celkově tak jízdu ve větších rychlostech. [20]



**Obrázek 4.9:** Rám Pivot Phoenix Carbon určený pro sjezd, se systémem zavěšení DW-Link [21]

#### 4.3.4. Active Braking Pivot (ABP)

System zavěšení ABP je čtyřčepový systém. Má dvě vahadla, mezi kterými je uchycen tlumič. System má všechny výhody z výše uvedených mechanismů a díky umístění společného čepu těhlice a spodního vahadla v ose zadního kola vykazuje dobré a citlivé chování i s úplně zabrzděným zadním kolem. Nezávislost brždění na typu zavěšení umožňuje jezdcovi daleko agresivnější, bezpečnější a rychlejší způsob jízdy. Uložení tlumiče plovoucím způsobem na spodní vahadlo je také možné dosáhnout většího zdvihu zadního kola při stejné nebo i menší rozteči tlumiče, než ve výše uvedených typech. Velice podobný systém je Split Pivot jehož autorem je Dawe Weagle, který má patent na společné umístění čepu těhlice a zadní vidlice v ose zadního kola, ale nemá plovoucí tlumič, tedy spodní vahadlo. System ABP je na obrázku 4.2.

#### 4.3.5. Softail

Softail je rám kola s takovou odpruženou zadní stavbou, kde je čep nahrazen pružnou částí zadní stavby. Pružná část může být tvořena tenkou titanovou nebo uhlíkovou planžetou. Pružná část, nebo také jinak zóna flexe, lze vytvořit i zeslabením průřezu. Softailové řešení je nevhodné pro velké zdvihy a má vysoké nároky jak na technologii výroby, tak na konstruktéra. Problémem u těchto rámu je nízká torzní tuhost a únavová pevnost. Například, rámy značky Pells mají lepené planžety a lepený spoj je právě místem častých poruch. Tyto rámy se ani tak nehodí pro obvyklé užití jako spíše pro závodní účely, u kterých se počítá s omezenou životností všech dílů. Někteří výrobci používají místo lepeného spoje spoj šroubový, který umožňuje výměnu poškozených flexibilních dílů. Na obrázku 4.10 je zobrazen rám Blue Print, u kterého bylo provedeno nahrazení všech hlavních čepů flexibilními prvky.



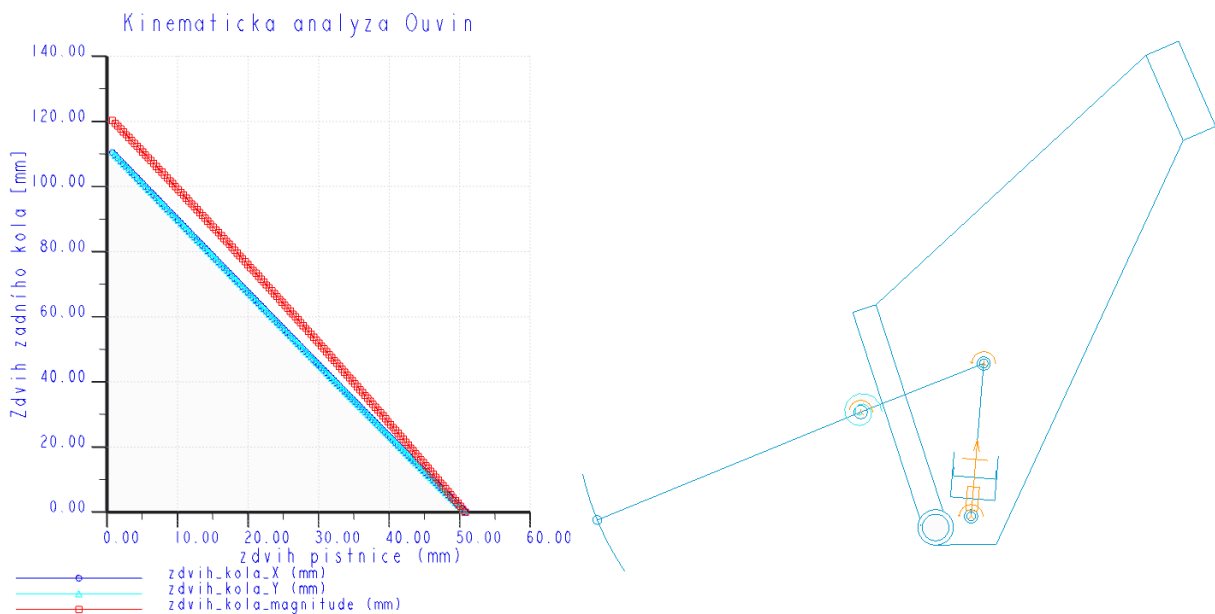
**Obrázek 4.10:** Rám Blue Print, šroubovaný softail s nahrazením vahadla titanovou planžetou [22]

## 5. Analýza karbonového rámu

Analýza karbonového rámu proběhla ve dvou rovinách, numericky pomocí různých kinematických a dynamických analýz a osobně, diskuzí.

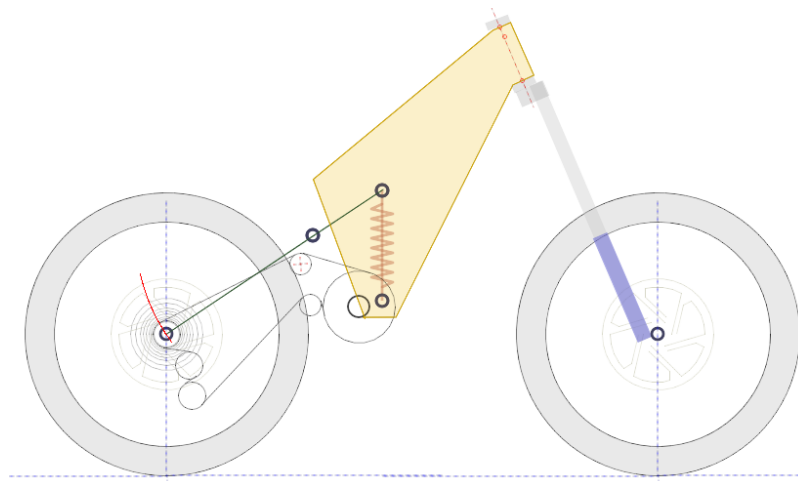
Nejprve byly prodiskutovány dlouho sledované problémy stávajícího rámu, z hlediska jízdních vlastností. Zmíněno bylo například velké natočení klik pedálů při dopadu, necitlivost chodu zadní stavby a tuhnutí zadní stavby při brždění. Jako další byl zmíněn i požadavek na možnost protočení jednorunkové vidlice pod rámem, kde u karbonového rámu dochází ke kolizi mezi spodní rámovou trubkou a horní korunkou vidlice, což má za následek poškození regulačních prvků vidlice a spodní rámové trubky.

Dále byly provedeny kinematické analýzy původního zavěšení: analýza trajektorie osy zadního kola, leverage ratio, pedal kickback, anti-squat a anti-rise. K provedení těchto analýz byl použit softwaru PTC Creo a Linkage. Linkage je software určený pro analýzu zavěšení jednostopých vozidel s primárním účelem pro analýzu MTB kol. Pro určení trajektorie osy zadního kola, byl vymodelován drátový model původního rámu v PTC Creo (obr. 5.1). Skica hlavních rozměrů karbonového rámu je uvedena v příloze, spolu se skicou navrženého rámu.



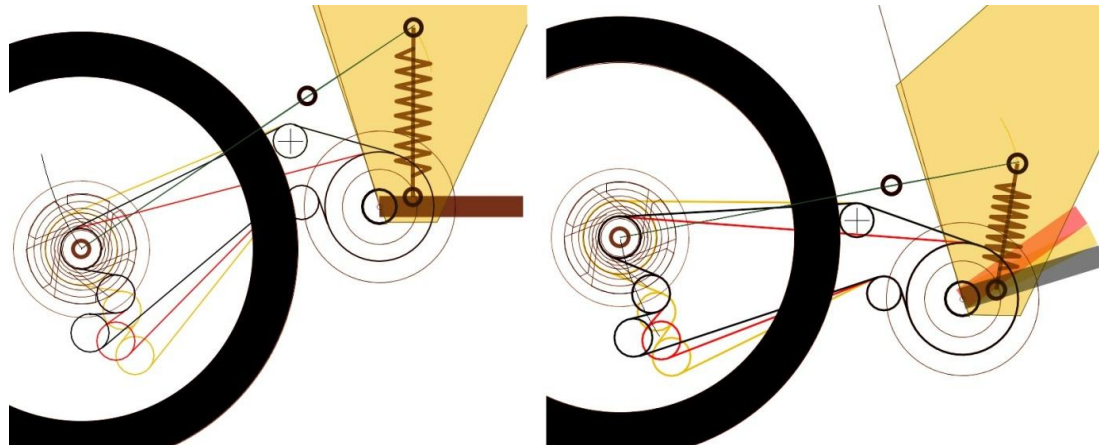
**Obrázek 5.1:** Zjednodušený drátový model karbonového rámu s vypočtenou trajektorií osy zadního kola. Na grafu je zobrazeno měření složek X a Y pohybu osy zadního kola (překrývající se modrá a tyrkysová) a celková délka trajektorie (červená)

Přenesení geometrie do softwaru Linkage pro určení vlastností prodiskutovaných v kapitole 4 je zobrazeno na obr.5.2. Parametry tlumiče a vidlice byly nastaveny dle kapitoly 6.



**Obrázek 5.2:** Přenesení geometrie do softwaru Linkage

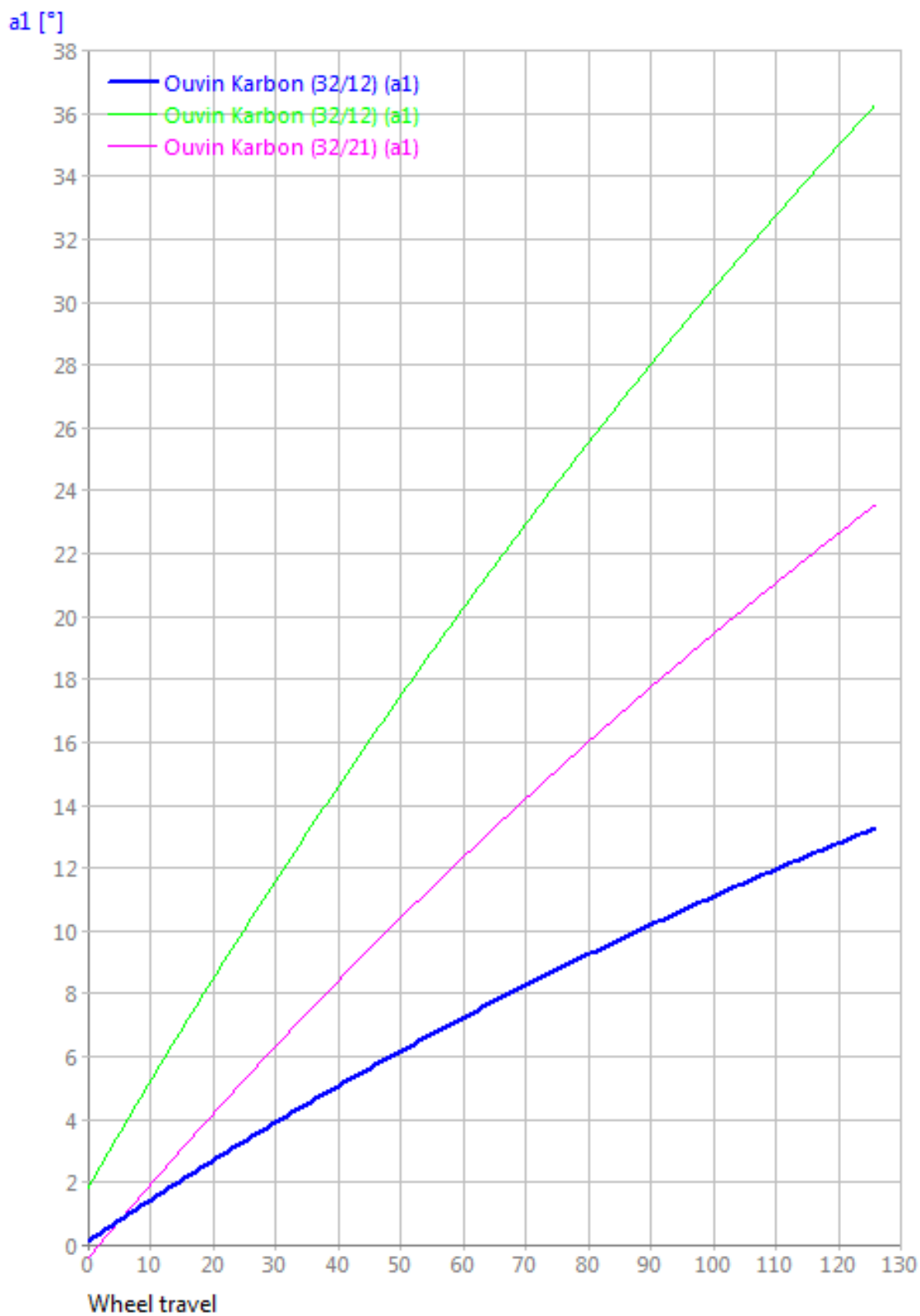
Analýza zavěšení karbonového rámu, pokračovala zjištěním natočení kliky pohonu s pedálem během komprese zavěšení. Maximální dosažená velikost natočení kliky pohonu závisí na kinematice zavěšení, aktuálním převodu, typu a poloze napínáků řetězu. S napínáním řetězu souvisí i typ přehazovačky, délka raménka přehazovačky nebo počet článků řetězu. Tyto závislosti jsou přehledně zobrazeny na obrázku 5.3 a 5.4, kde jsou vidět tři konfigurace. Na obrázku 5.3 je červeně zobrazena konfigurace bez horní napínací kladky s převodem 32/12, černě jsou zobrazeny obě napínací kladky s převodem 32/12, žlutě jsou zobrazeny obě napínací kladky s převodem 32/21.



**Obrázek 5.3:** Grafické zobrazení třech konfigurací pohonu s natočením kliky (PK)

Obrázek 5.4 zobrazuje dosažené hodnoty natočení, jako funkci zdvihu zadního kola. Modře je zobrazena závislost s oběma napínacími kladkami při převodu 32/12, kde bylo dosaženo maximálního natočení 13.3°. Fialově je pak stejná konfigurace, tentokrát při převodu 32/21 s maximálním natočením 23.5° a zeleně je pak konfigurace bez horní napínací kladky při převodu 32/12 s maximálním natočením až 36.3°. Původní rám obsahuje horní napínací kladku v poloze dle obrázku 5.2. Maximální natočení kliky pohonu může tak být u původního rámu až 23.5°, dle počtu zubů zařazeného zadního pastorku. Další vlastnosti zavěšení původního rámu jsou představeny v kapitole 8.

Pedal-kickback at 0mm front travel  
(32/12)



*Obrázek 5.4: Zobrazení závislosti natočení kliky pohonu na zdvihu zadního kola, pro tři různé konfigurace a dva typy převodu karbonového rámu*

## 6. Návrh Al rámu

Kapitola 6 se zabývá návrhem alternativního rámu ke karbonovému, který je představen v předchozích kapitolách. Navržená konstrukce je označena jako „Al rám“, dle použitého typu materiálu. Geometrie Al rámu byla pro získání lepších jízdních vlastností v pozdější fázi práce dodatečně upravena. Výsledný návrh je označen jako „Al rám upraveno“.

Pro návrh byly použity již zakoupené původní komponenty. Komponenty jsou standardem v MTB s výjimkou 20" ráfků a plášťů, které jsou původně určené pro koloběžky. Ráfky jsou zapletené na nábojích určených pro downhill, rozteč náboje zadního kola je 135mm s 10 mm pevnou osou. Tyto rozměry se obecně označují jako připojovací. O dalších připojovacích rozměrech rámu hovoří kapitola 6.3.

### 6.1. Přední vidlice

Použitá vidlice v karbonovém rámu je standardní MTB vidlice Fox Float o zdvihu 140 mm. Označení Float znamená přítomnost vzduchové komory, vidlice je primárně určená pro disciplínu Trail, All Mountain. Může mít 9 mm pevnou osu, pro zvýšení tuhosti a dodává se s krčky 1 1/8" rovný Al nebo 1.5" zúžený Al (optimální). Parametry vidlice pro simulace jsou: tuhost 10 N/mm a tlumení 1 N\*mm/s. Vidlice je spolu se znázorněním některých základních rozměrů zobrazena na následujícím obrázku.



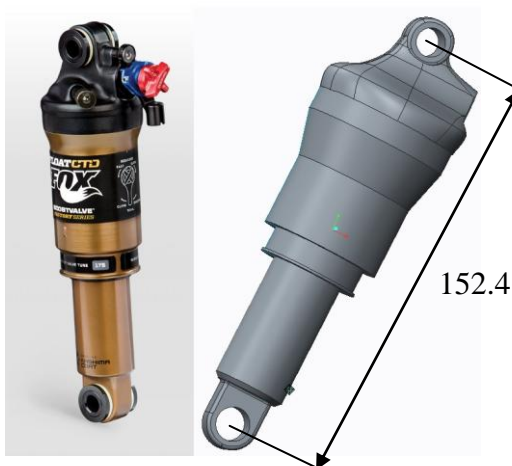
**Obrázek 6.1:** Fox 32 Float 26, 140 mm s orientačními rozměry [23]

## 6.2. Zadní tlumič

Kritéria pro výběr tlumiče jsou: dobře nastavitelné vlastnosti tlumiče (viz příloha 3), co možná nejmenší rozměry a co možná nejmenší hmotnost tlumiče. Uvedená kritéria splňují například tlumiče značky Fox, řada Float. Fox Float je plynokapalinový tlumič, který využívá vzduch jako pružinu, tlumící médium je zde olej (obr.6.2). Tento typ tlumiče byl již použit u karbonového rámu. Parametry konkrétních typů tlumičů této řady ukazuje tabulka 3.

**Tabulka 3:** Parametry dostupných vzduchových tlumičů Fox Float [24]

FLOAT Sag Table					
Common shock lengths		Shock travel		Recommended sag	
inches	millimeters	inches	millimeters	inches	millimeters
5.500	139.7	1.00	25.4	.25	6.4
6.000	152.4	1.25	31.8	.31	7.9
6.500	165.1	1.50	38.1	.38	9.5
7.250	184.2	1.75	44.4	.44	11.1
7.875	200.0	2.00	50.8	.50	12.7



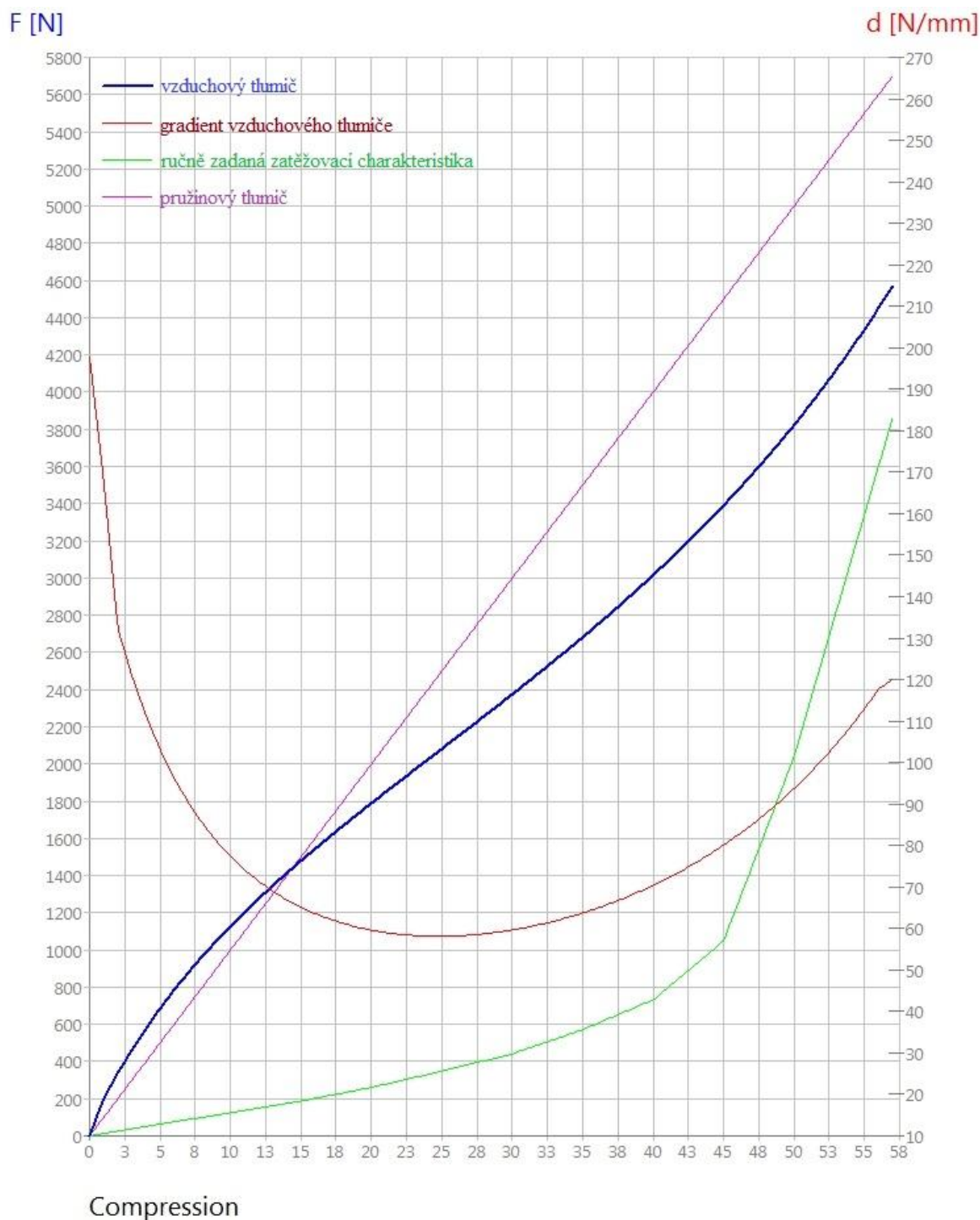
**Obrázek 6.2:** Fox Float CTD a zjednodušený CAD model [24]

Koeficient tlumení tlumiče je přibližně 5 N\*mm/s a tuhost přibližně 100 N/mm. Hodnoty tuhosti a tlumení vychází z měření podobných komponentů určených pro toto použití. [25]

Tlumič v karbonovém rámu má základní rozteč 200 mm se zdvihem 50.8 mm. Tlumič použitý v návrhu má rozteč 152.4 mm a zdvih pak dle tabulky 3 je 31.8 mm, je to druhý nejmenší MTB tlumič této řady. Hmotnost vzduchového tlumiče pro rozteč 165.1 mm je kolem 208 g.

Nejčastěji užitým typem tlumiče pro rámy kol kde je vyžadován vyšší zdvih a citlivé zavěšení zadního kola je pružinový s ocelovou nebo titanovou pružinou. Nevýhodou pružinového tlumiče je vyšší hmotnost a větší rozměry také vlivem expanzní nádobky. Tuhost pružinového tlumiče lze regulovat pouze výměnou pružiny, tuhost plynokapalinového tlumiče se reguluje tlakem vzduchu. Rozdílem mezi oběma typy tlumičů je také jiná zatěžovací charakteristika. Zatímco pro tlumič s ocelovou pružinou se uplatňuje spíše lineární tvar zatěžovací charakteristiky, pro vzduchový je to většinou charakteristika progresivní. (obrázek 6.3)





**Obrázek 6.3:** Charakteristiky tří typů tlumičů v softwaru Linkage, modře přednastavený vzduchový tlumič, zeleně vzduchový tlumič s ručně zadanou progresivní charakteristikou změřeného tlumiče Fox Float RP23, fialově lineární pružinový tlumič

V softwaru Linkage lze nastavit některé geometrické a tlakové parametry předvoleného tlumiče, nebo je možné vložit přímo naměřenou zatěžovací charakteristiku. V příloze je zobrazen řez použitého tlumiče s detailním popisem všech těchto parametrů. Mimo tlumiče Fox Float lze použít například vzduchový tlumič Rock Shox Monarch, který se vyrábí ve stejné rozteči.

Uložení tlumiče v návrhu počítá s pětidílným kluzným pouzdrům o šířce 39.88 mm a vnitřním průměru 10 mm. Jedná se o novější systém uchycení ok tlumičů do rámu. Nabízí snížení tření až o polovinu, v porovnání s původním systémem a umožňuje tlumiči reagovat rychleji na všechny pohyby zadní stavby kola. Systém je vybaven těsnícími okroužky a přírubovým dvoudílným pouzdrům pro zabránění vniknutí nečistot. Uvádí se až 10x větší trvanlivost systému než bylo doposud pravidlem. Schematický obrázek kluzného pouzdra je zobrazen v příloze. [26]

### **6.3. Připojovací rozměry rámu**

Připojovací rozměry komponentů jsou dány mezinárodními normami. Potřebné údaje jsou k dispozici v technických manuálech výrobců.

Mezi připojovací rozměry patří typ a průměr šlapacího středu, typ náboje zadního kola, průměry sedlové trubky, vnější průměry konců hlavové trubky pro uložení hlavového složení, typ a umístění návarku pro třmen brzdy (systém IS, systém post mount), rozteč pro uložení tlumiče a rozměry patky včetně velikosti závitů pro montáž přehazovačky.

Některé normy a doporučení pro uchycení komponentů jízdního kola, které byly použity při konstrukci rámu, jsou zobrazeny v příloze.

### **6.4. Materiál**

Dnešní rámy jízdních kol, pokud nejsou z kompozitu, jsou většinou vyrobeny ze dvou druhů slitin hliníku. A to ze slitiny EN AW 6061 T6 nebo EN AW 7020 T6 popřípadě EN AW 7005 T6, což je obdoba slitiny s označením 7020, s nepatrně jiným chemickým složením.

Porovnání mechanických vlastností obou slitin je na obrázku 6.4, kde je zobrazen výťah z normy ČSN EN 754 - 2. Slitina 7020 má vyšší mez kluzu a mez pevnosti. Výhody této slitiny netkví však pouze v mechanických vlastnostech, ale v následném tepelném zpracování po svaření. Při svařování dochází k tepelnému zásahu do materiálu trubek a materiál tak částečně ztrácí své mechanické vlastnosti. Slitina 7020 nabývá původních mechanických hodnot po svaření přirozeným stárnutím. Přirozené stárnutí je proces vytvrzování. Přibližně po 7 dnech od svaření nabude slitina 7020 T6 zpět až 90 % svých mechanických vlastností, zbylých 10 % nabude při teplotě okolí do 2 až 3 týdnů. Slitina 6061 T6 nabývá původních mechanických hodnot po svaření umělým stárnutím. Svařenou konstrukci je nutné nechat uměle zestárnout předepsaným ohřevem, např. 170 °C až 180 °C po dobu 7-8 hodin. Tímto procesem dojde k vytvrzení materiálu a k dosažení požadovaných mechanických vlastností. Proces umělého stárnutí je energeticky i časově náročný, komplikuje případné opravy rámu a je také nutné vyrobít přípravek, aby se rám v peci nezkroutil. [27]

Pro návrh Al rámu prozatím nebyla vybrána slitina hliníku konkrétní jakosti, předběžný návrh však prozatím počítá se slitinou EN AW-7020. Alternativou, kvůli špatné dostupnosti slitiny 7020 by mohla být slitina s označením EN AW-7003, která má dle tabulek

velmi dobrou svařitelnost a její mechanické vlastnosti jsou přibližně na úrovni slitiny EN AW-7020. EN AW-7003 je i s popisem vlastností uvedena například v katalogu společnosti ALFUN.

ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA  
ICS 77.150.10

Červen 1999

Hliník a slitiny hliníku – Tyče a trubky  
tažené za studena –  
Část 2: Mechanické vlastnosti

ČSN  
EN 754-2  
42 4085

Tabulka 29 - Slitina EN AW-7020 [Al Zn4,5Mg1]

Tažené trubky							
Stav	Rozměry mm $e^{3)}$	$R_m$ MPa		$R_{p0,2}$ MPa		A %	$A_{50\text{ mm}}$ %
		min.	max.	min.	max.		
T6 <sup>4)</sup>	≤ 20	350	-	280	-	10	8

Tabulka 24 - Slitina EN AW-6061 [Al Mg1SiCu]

Tažené trubky							
Stav	Rozměry mm $e^{3)}$	$R_m$ MPa		$R_{p0,2}$ MPa		A %	$A_{50\text{ mm}}$ %
		min.	max.	min.	max.		
O, H111	≤ 20	-	150	-	110	16	14
T4 <sup>4)</sup>	≤ 20	205	-	110	-	16	14
T6 <sup>4)</sup>	≤ 20	290	-	240	-	10	8

Obrázek 6.4: Výťah z technické normy ČSN EN 754-2 [27]

## 6.5. Prostor rámu

Prostor rámu je omezen několika parametry. Ze shora musí mít cyklista prostor pro pohodlnou změnu těžiště a celkově nesmí být rám moc vysoký, aby mohl cyklista pohodlně dosáhnout na zem. Ze spodu je rám omezen obálkou rotačního pohybu korunky přední vidlice (obrázek 6.1). Dále je nutné brát ohled na výšku šlapacího středu. Kvůli 20" kolům by bylo dobré zachovat jeho výšku dle původního návrhu. Vnitřní prostor rámu je omezen obálkou pohybu tlumiče. Také je tu požadavek snadné a levné výroby, která omezuje rám na použití standardních profilů. Obecná snaha návrhu rámu, je zachování co nejvíce základních rozměrů rámu dle skici karbonového rámu a přitom se vyvarovat všech zmíněných špatných vlastností původního zavěšení.

Z obrázku 1.1. je zřejmé, že pro systém zadní stavby karbonového rámu byl maximálně využit prostor pro tlumič mezi horní a spodní rámovou trubkou. Možnosti konstrukce rámu při použití karbonu umožnily použít jeden z největších dostupných MTB tlumičů a tím dosáhnout relativně velkého zdvihu zadního kola. Při použití běžně dostupných

profilů téměř nelze tímto směrem karbonový rám překonat. Alternativou je technologie hydroforming, případně jednotlivě lisovat části rámu a svar pak vést po obvodu (obr.6.5.). Obě technologie jsou však příliš nákladné pro výrobu pouze jednoho kusu.



**Obrázek 6.5:** *Specialized Demo 8 2007, detail:obvodový svar horní části rámu [28]*

Požadavky na rám jsou odpovídající disciplíně freeride. Tedy dosáhnout maximálního možného zdvihu s odpovídajícími jízdními vlastnostmi, přičemž bylo nutné použít menší tlumič. Dále navrhnout polohu čepů vahadel s ohledem na snadnou a finančně nenákladnou výrobu celého rámu. Shrnutí těch nejdůležitějších kritérií zobrazuje tabulka 4.

**Tabulka 4:** *Návrhová kritéria konceptu rámu kola*

Kritérium	Podmínka
Anti-squat	Kolem 60 % pro hodnotu SAG
Pedal kickback	Alespoň o 1/2 nižší než u karbonového rámu.
Zdvih zadního kola	Alespoň 100 mm.
Anti-rise	Zavěšení nesmí jít při brždění významně do komprese ani do extenze.
Wheel Rate (Forces)	Rostoucí, ideálně progresivní charakter.

Základní geometrie byla určena pomocí obou již uvedených softwarů. Nejprve byla celá záležitost v měřítku naskicována v prostředí PTC Creo, kvůli určení polohy a poloměrů ohybů spodní a horní rámové trubky. Také byly předběžně stanoveny průměry všech trubek a jeklů, díky čemuž bylo možno rozhodnout o možných polohách čepů, poloze tlumiče a výběru typu zavěšení.

Po průzkumu aktuálního trhu s celoodpruženými koly odpovídající kategorie a zhodnocením všech požadavků, bylo zvoleno zavěšení typu ABP, které má patentována firma Trek Bicycle Corporation.

## 6.6. Konstrukční a technologické řešení

Kapitola 6.6 ukazuje konkrétní konstrukční řešení a některé jeho úpravy. Původní návrh například počítal s ložisky 6x12x24 pro všechny čepy s domečky otevřenými směrem do rámu. Toto řešení bylo nakonec pro některé čepy změněno na otočení domečků a výměnu některých ložisek za 7x17x30 pro zvýšení tuhosti. Změny parametrů geometrie Al rámu oproti karbonovému jsou uvedeny v kapitole 7. Hmotnost výsledného návrhu Al rámu je rozepsána v následující tabulce.

*Tabulka 5: Hmotnosti navrženého Al rámu*

DÍL	MATERIÁL	HMOTNOST [kg]
Rámový trojúhelník	EN AW 7020T6	1
Těhlice	EN AW 7020T6	0.35
Spodní vahadlo	EN AW 7020T6	0.6
Horní vahadlo (2x)	EN AW 7020T6	0.215
Tlumič	-	0.208
Spojovací materiál	-	0.548
Ložiska	-	0.124
Celková hmotnost	-	3.26

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, konstrukce se musí skládat z profilů o standardních rozměrech. Z tohoto důvodu byly všechny profily vybrány z katalogu standardní nabídky. Návrh počítá s výrobou pouze jednoho kusu a s ohledem na tento fakt je i sestavena výrobní dokumentace. Některé součásti a konstrukční prvky budou vyrobeny přímo dle CAD dat. Přesnost vyrobených součástí bude z velké míry ovlivněna přesností a typem konstrukce svařovacích přípravků, jejichž řešení není součástí této práce. Některé další díly počítají při výrobě s technologií vypalování laserem, řezání vodním paprskem dle šablon nebo s použitím drátořezu. Díky tomuto kroku bylo možné navrhnout v podstatě libovolný obrys součástí za relativně dobré náklady. Nevýhodou technologie řezání vodním paprskem je špatná kolmost řezu (řez je kónický), kvůli které bude pravděpodobně nutné dodat větší přídatky na obrábění a následně provést z ekonomických a estetických důvodů další opracování. Tyto plochy však nejsou funkční a tak je jakost a kolmost povrchů až druhořadou záležitostí. Technologie drátořezu umožňuje vyříznutí dílu dle šablony s velice dobrou přesností, kolmostí řezu a celkovou jakostí povrchu, Ra až 0.8. Nevýhodou této technologie je její cena. Vypalovací šablony některých součástí jsou vloženy v příloze.

Zajímavým dílem rámu je spodní vahadlo. Svařenec tvoří dva jekly a šest „výpalků“. Prostřední část tvoří dva plechy, které jsou po vypálení obrysu ohnuté pod úhlem 35°. Ostatní součásti již konceptem nijak zvlášť nevybočují z obvyklé konstrukce kusově vyráběných rámu jízdních kol tohoto určení. Výjimku tvoří horní vahadla, která byla vyrobena technologií 3D tisku. Návrh a výroba těchto součástí je popsána v druhé části této práce. Na obrázku 6.6 je zobrazen návrh konstrukce rámu s konvenčně vyrobenými horními vahadly.

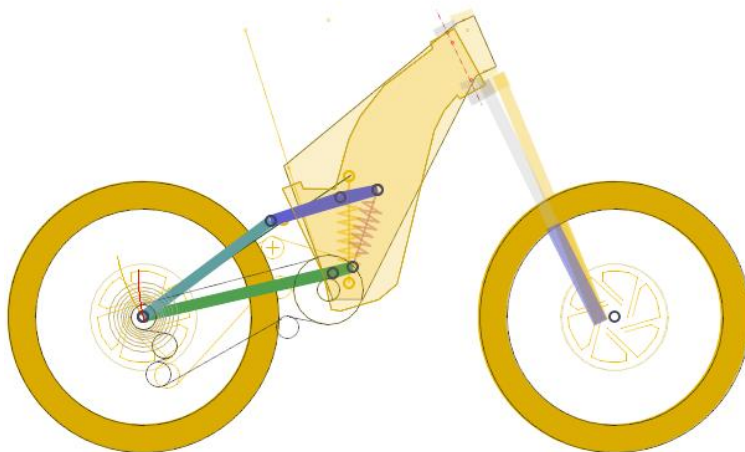
V této kapitole je zobrazena pouze konečná vizualizace, samotná konstrukce je detailněji rozkreslena ve výrobních výkresech. Výrobní výkresy a kusovník jsou vloženy v příloze. CAD model vrcholové sestavy je k dispozici na přiloženém CD.



*Obrázek 6.6: Vizualizace konečného návrhu konstrukce*

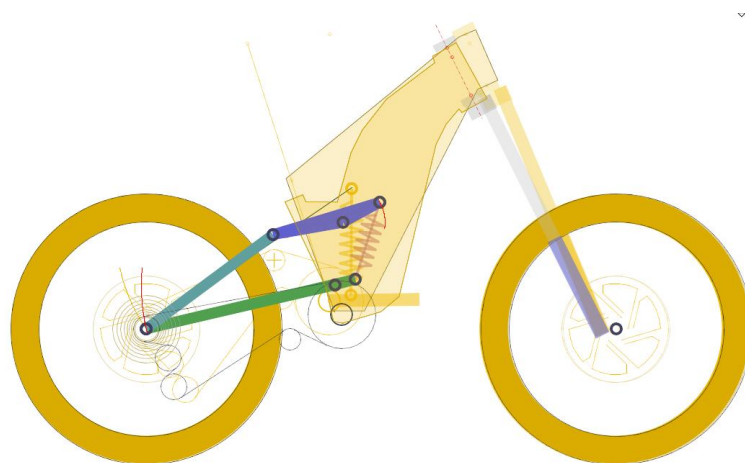
## 7. Analýza Al rámu

Podobně jako v kapitole 5, byla geometrie Al rámu pro získání vlastností zavěšení přenesena do prostředí Linkage (obr.7.1). Tato kapitola porovnává vlastnosti karbonového rámu s výslednou upravenou a původní verzí Al rámu.



**Obrázek 7.1:** Porovnání geometrie původního návrhu Al rámu s karbonovým rámem

Na obrázku 7.2 je zobrazeno porovnání upraveného návrhu Al rámu s karbonovým rámem. Z obrázků je vidět odlišná poloha šlapacího středu a odlišná poloha čepu horního vahadla. Důvody pro tyto změny jsou uvedeny na konci této kapitoly, spolu se srovnáním dosažených charakteristik i s běžně dostupnými sériově vyráběnými rámy.



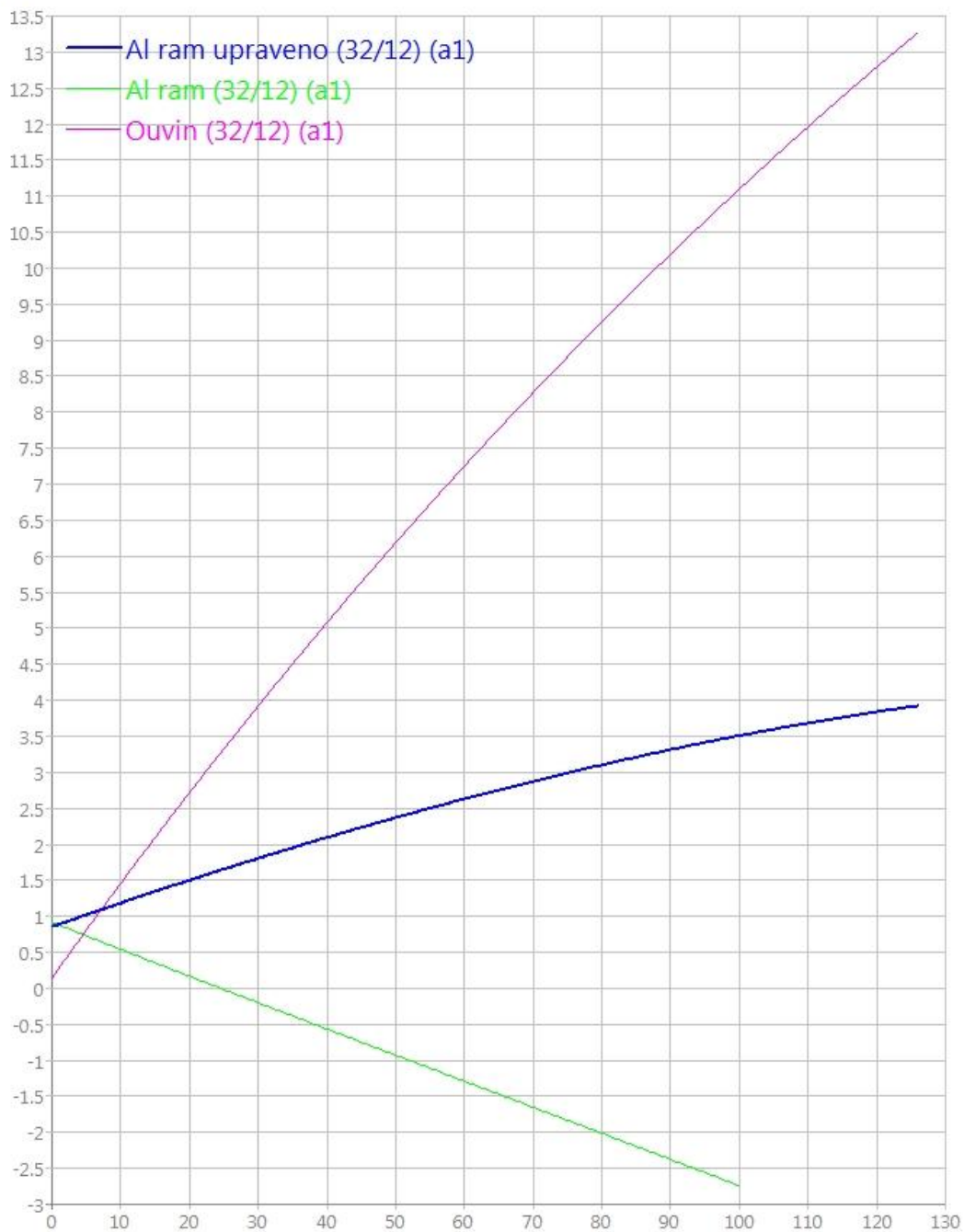
**Obrázek 7.2:** Porovnání geometrie karbonového a upraveného Al rámu

Další úprava se týkala hlavového úhlu. Hlavový úhel Al rámu byl snížen z  $67^\circ$  na hodnotu sériově vyráběného rámu Trek Session 9.9, která je  $63.6^\circ$ . Snížení bylo provedeno kvůli lepší jízdě vlastností. Parametry úhlu a délky sedlové trubky s rozvorem kol zůstaly zachovány.

### Pedal-kickback at 0mm front travel (32/12)

Al ram upraveno

a1 [°]

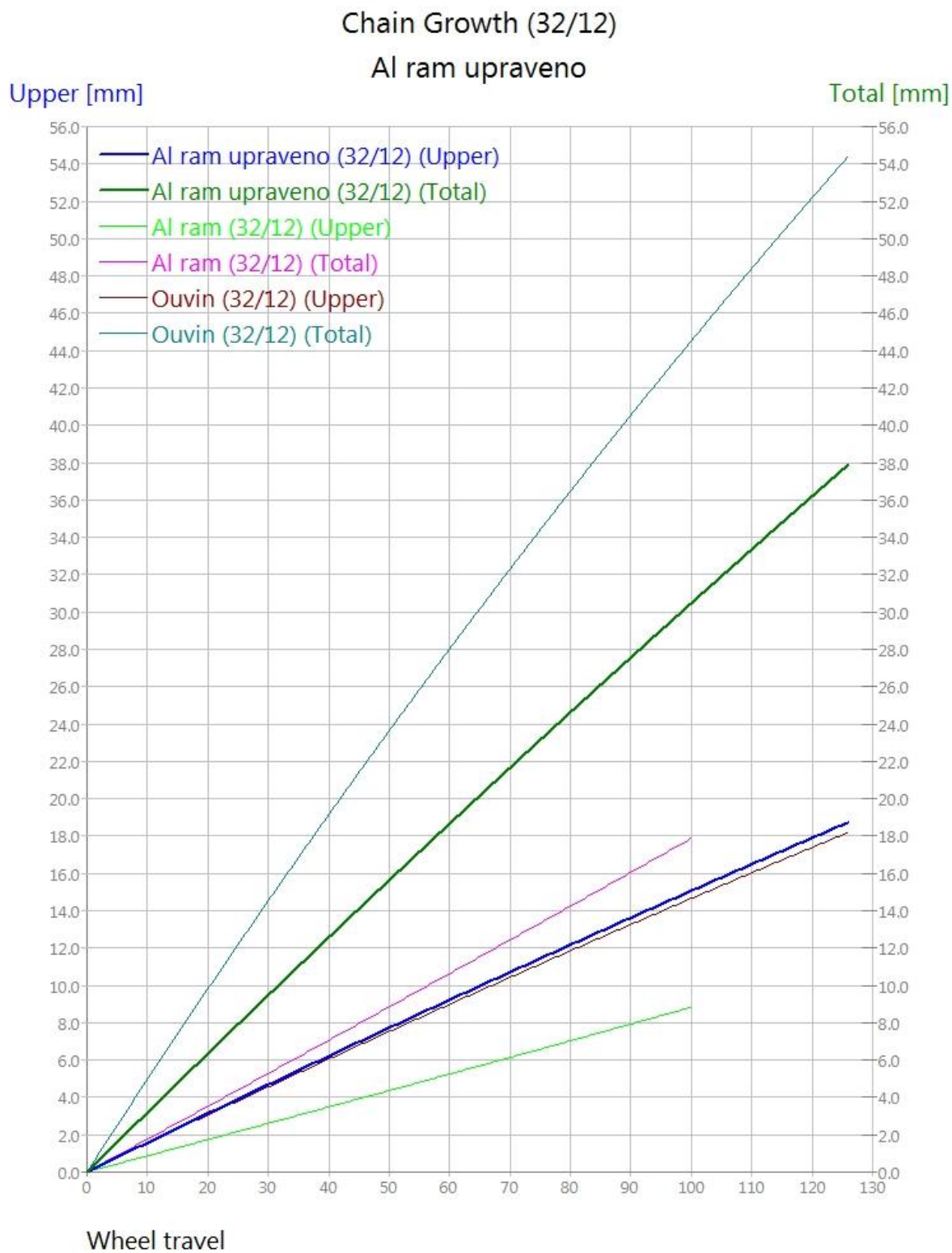


Wheel travel

[www.bikechecker.com](http://www.bikechecker.com)

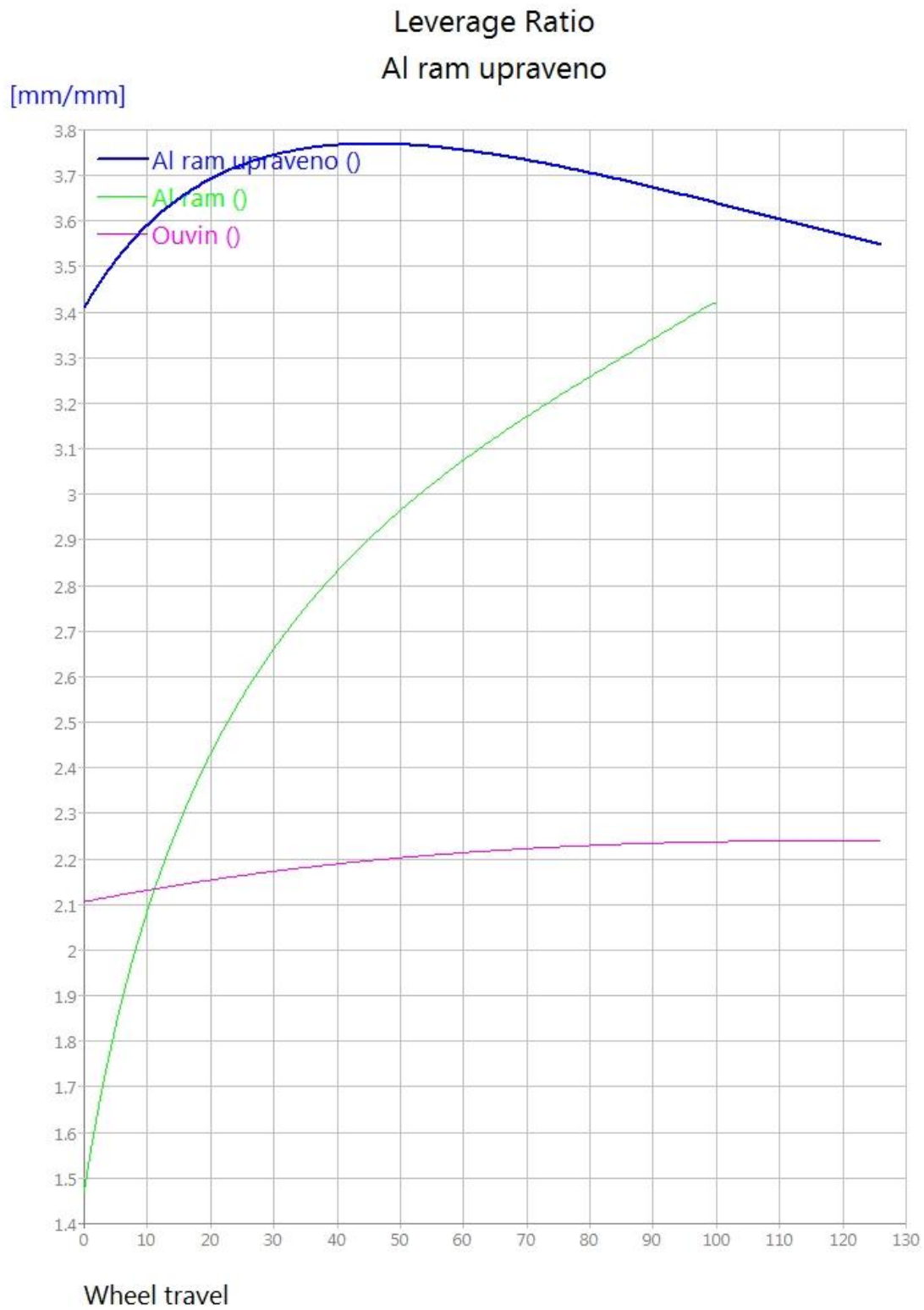
**Obrázek 7.3:** Diagramy natočení klik pohonu během zdvihu zadního kola





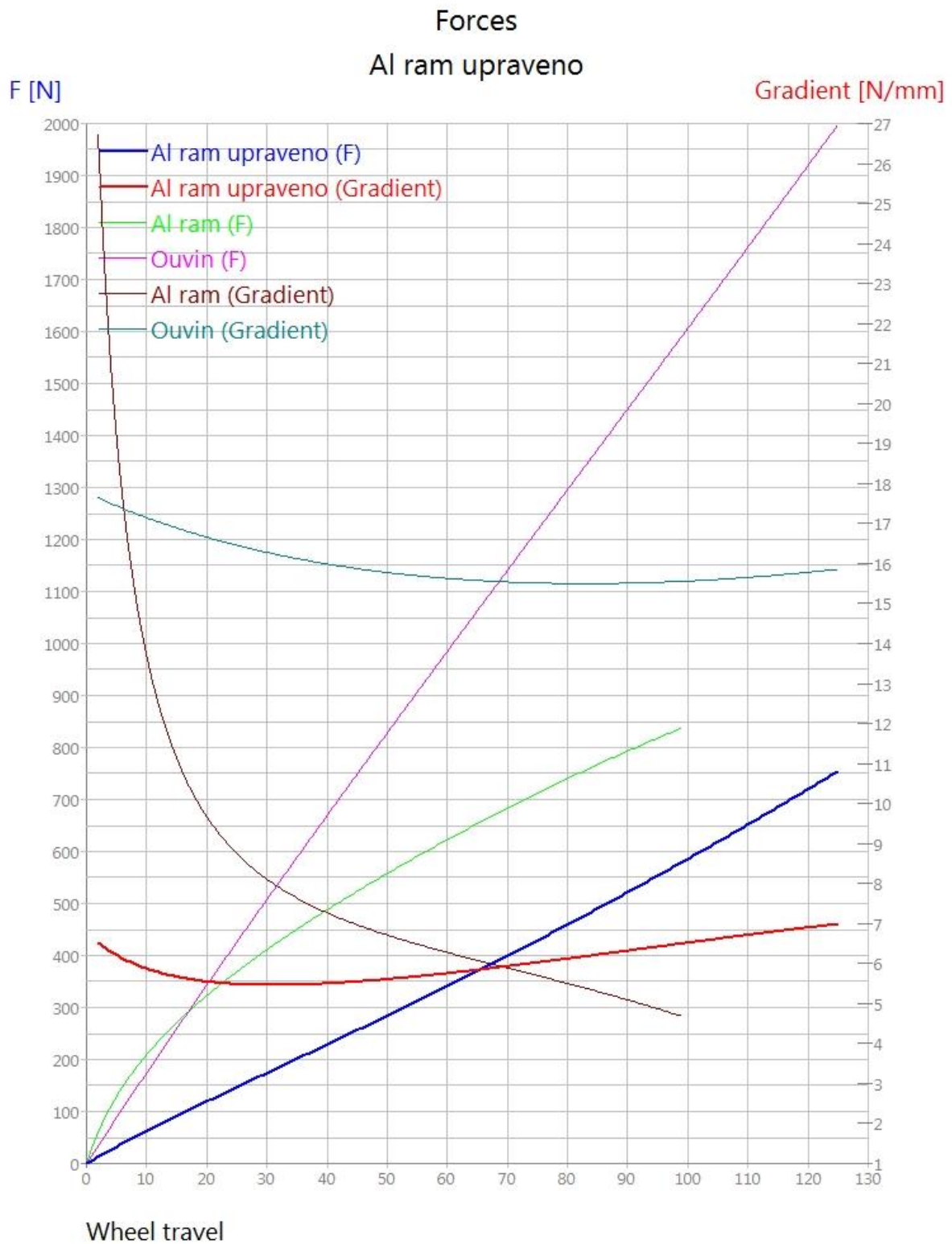
[www.bikechecker.com](http://www.bikechecker.com)

**Obrázek 7.4:** Diagram přírůstku řetězu v závislosti na zdvihu zadního kola, horní větev řetězu je označena jako „upper“, celkové prodloužení pak jako „total“

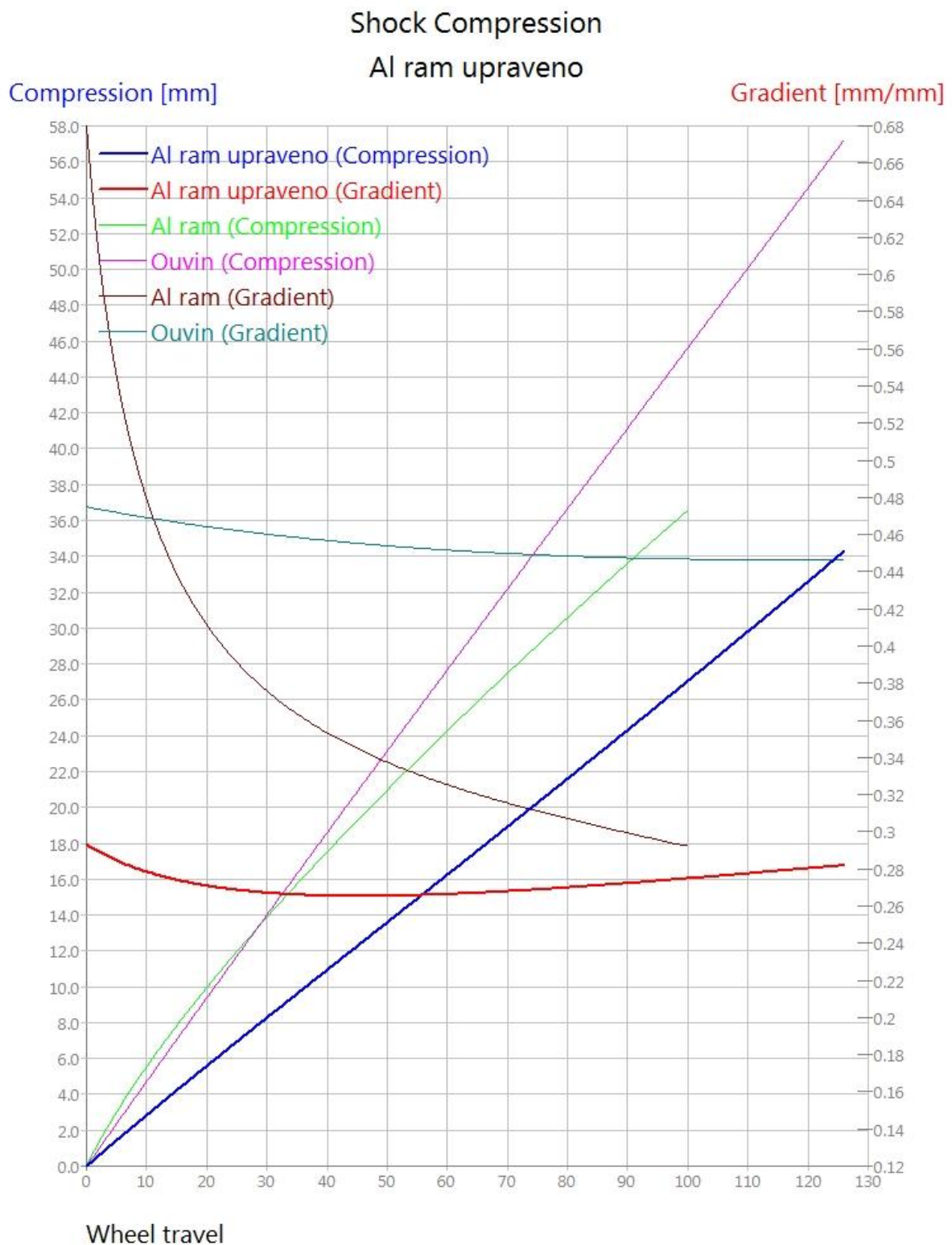


[www.bikechecker.com](http://www.bikechecker.com)

**Obrázek 7.5:** Diagram leverage ratio

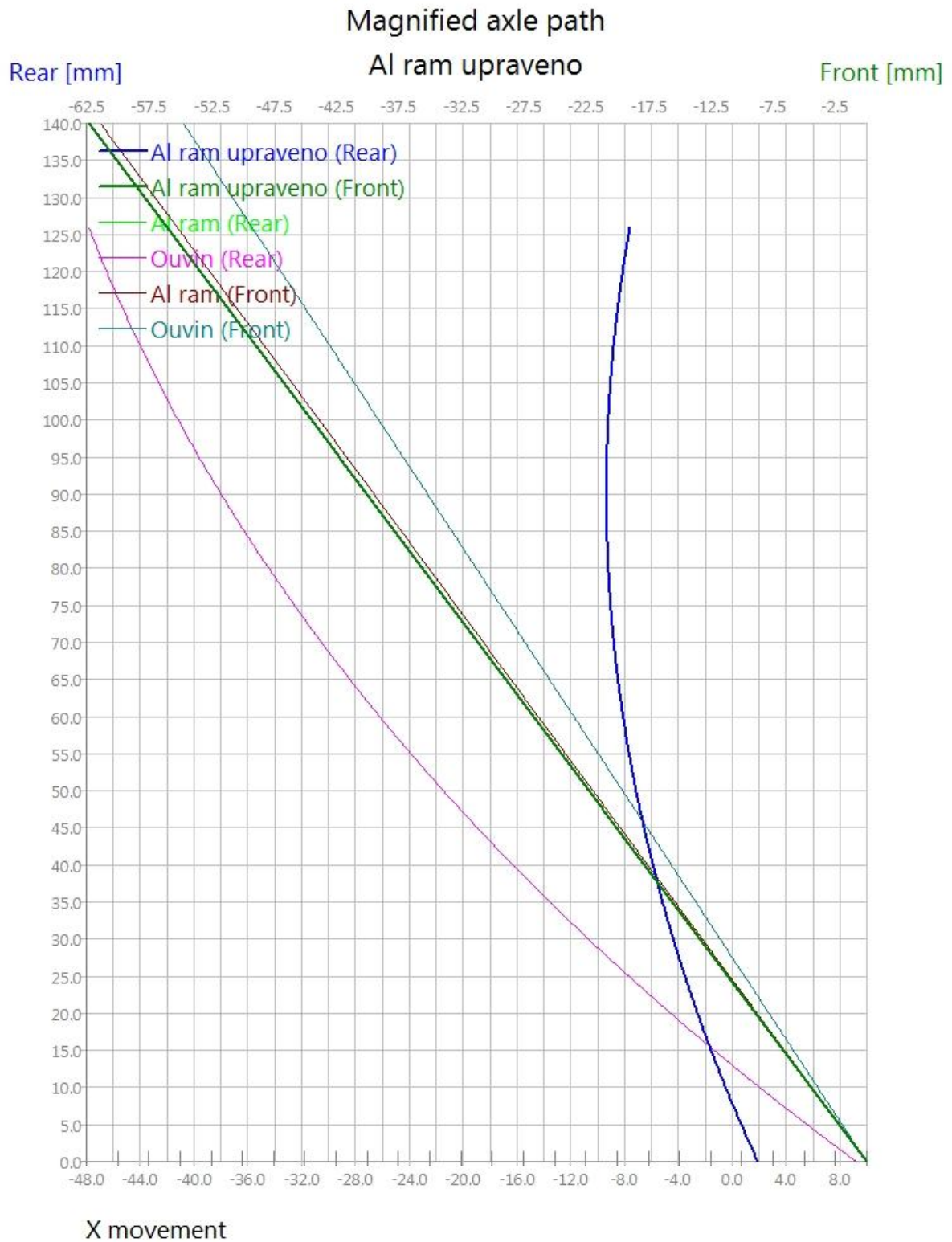


**Obrázek 7.6:** Diagram průběhu síly ve vertikálním směru působící na zadní kolo



[www.bikechecker.com](http://www.bikechecker.com)

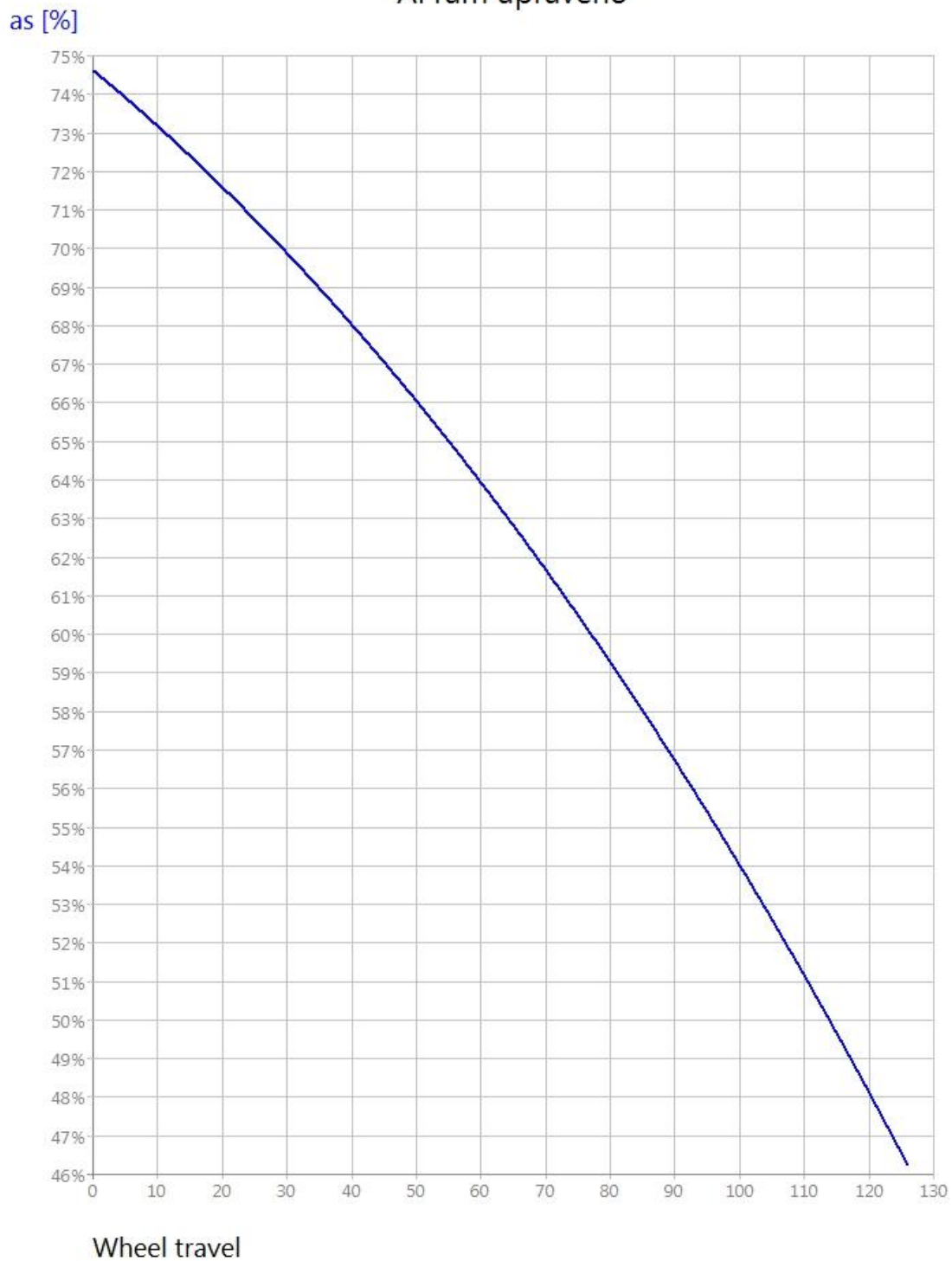
**Obrázek 7.7:** Diagram závislosti zdvihu zadního kola na kompresi tlumiče



www.bikechecker.com

**Obrázek 7.8:** Zobrazení průběhu velikostí vertikálních složek předního „front“ i zadního „rear“ kola

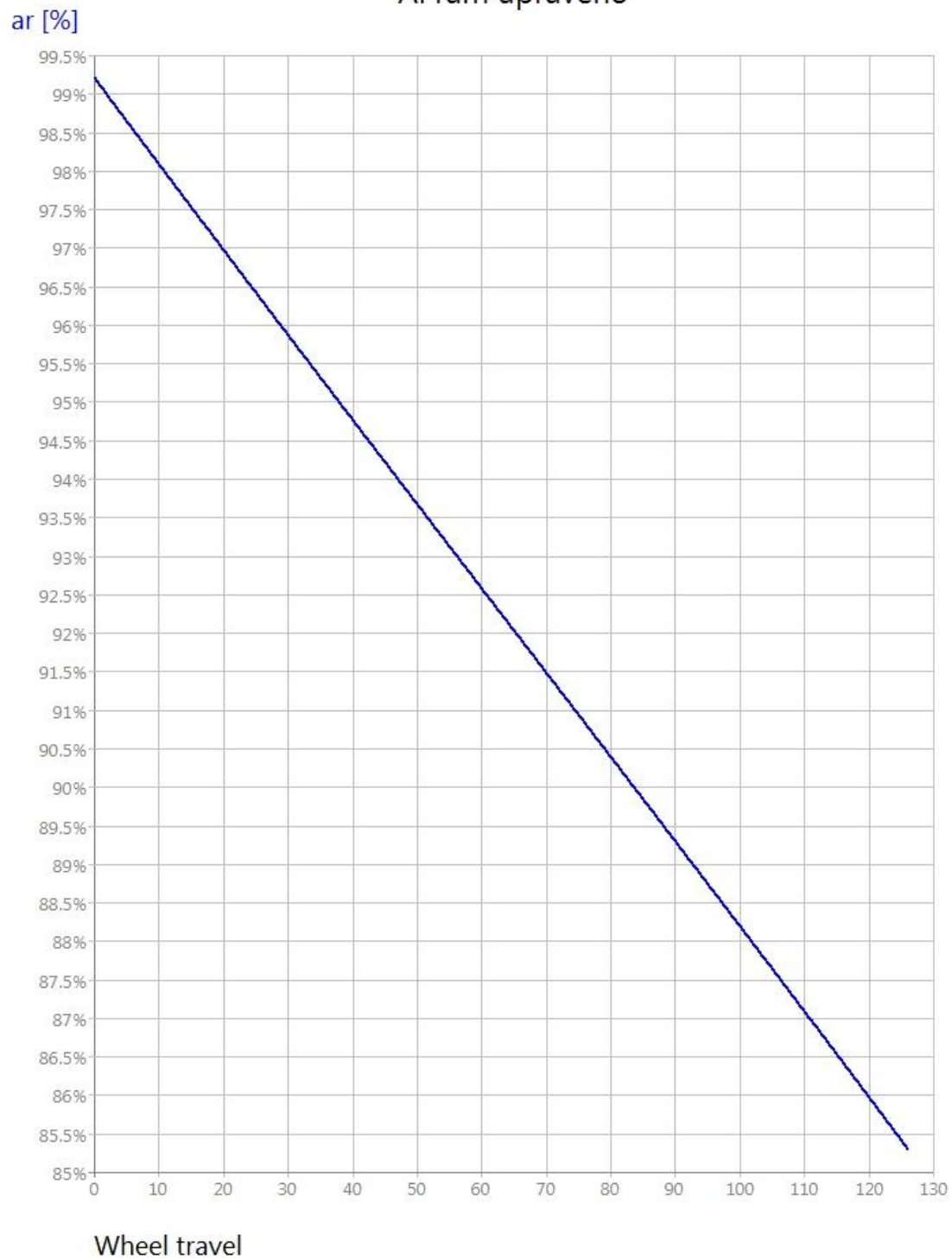
Anti-squat (32/12)  
Al ram upraveno



[www.bikechecker.com](http://www.bikechecker.com)

*Obrázek 7.9: Diagram funkce anti-squat upraveného Al rámu*

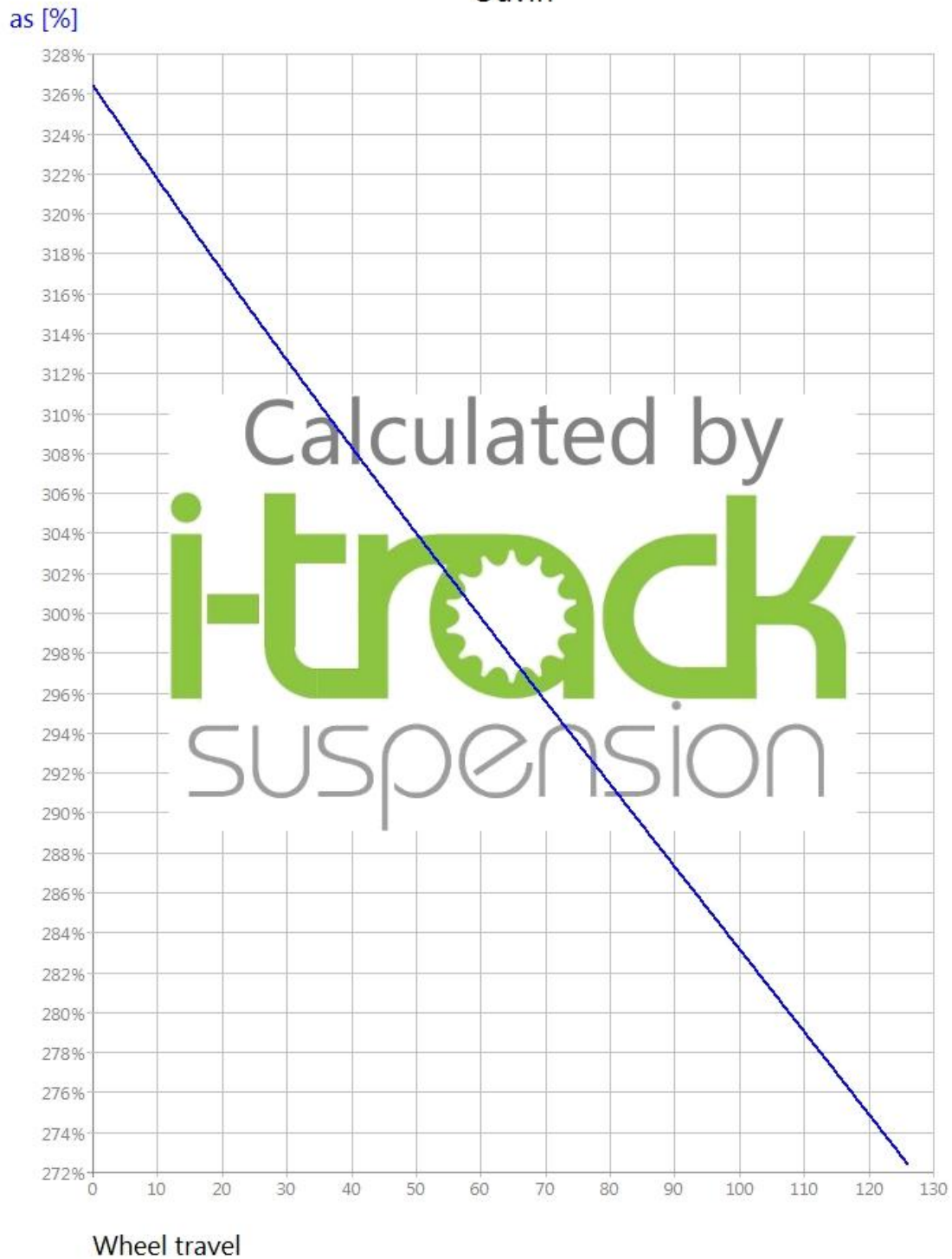
Anti-rise (32/12)  
Al ram upraveno



[www.bikechecker.com](http://www.bikechecker.com)

*Obrázek 7.10: Diagram anti-rise upraveného Al rámu*

Anti-squat (32/12)  
Ouvin

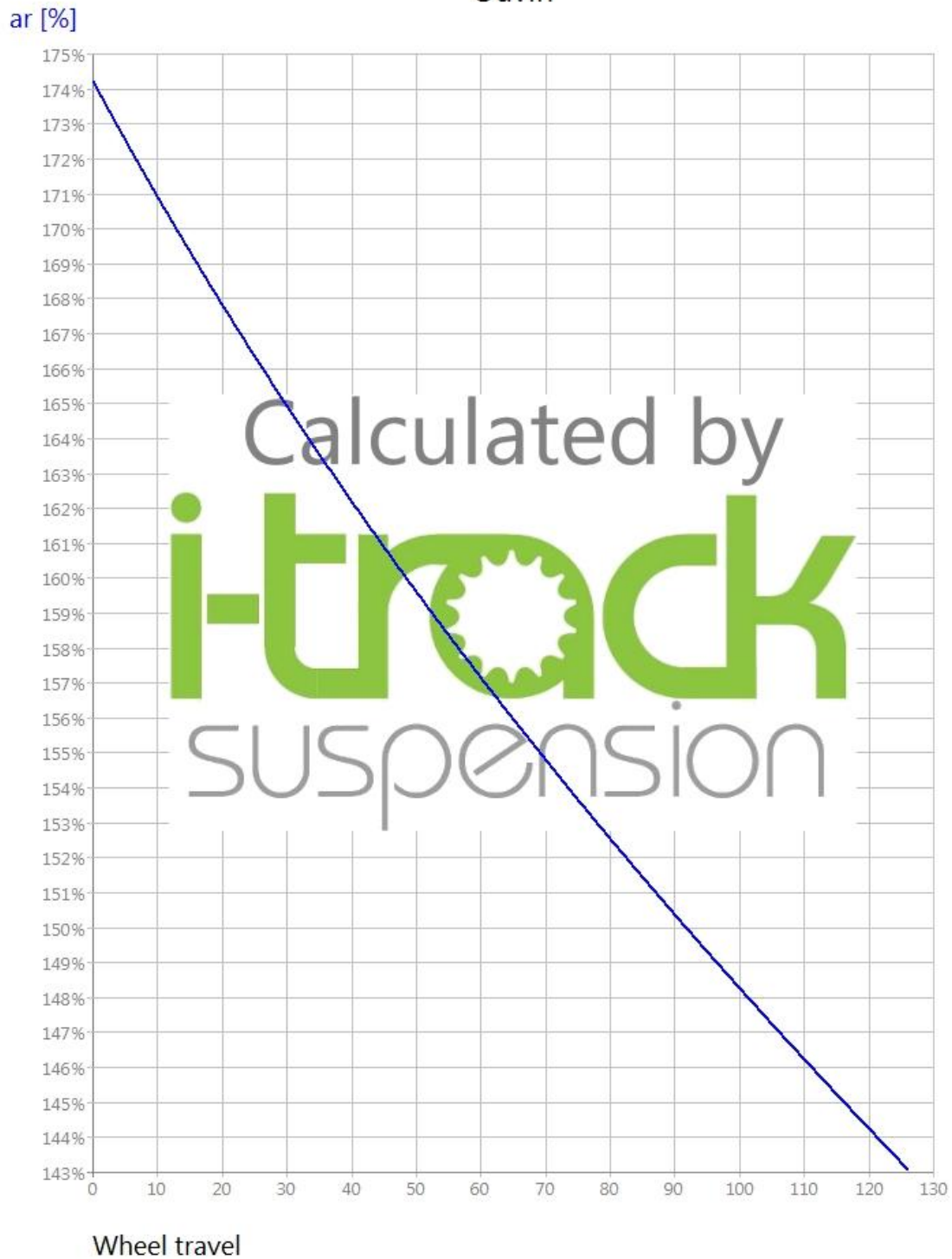


[www.bikechecker.com](http://www.bikechecker.com)

*Obrázek 7.11: Anti-squat karbonového rámu*



Anti-rise (32/12)  
Ouvin



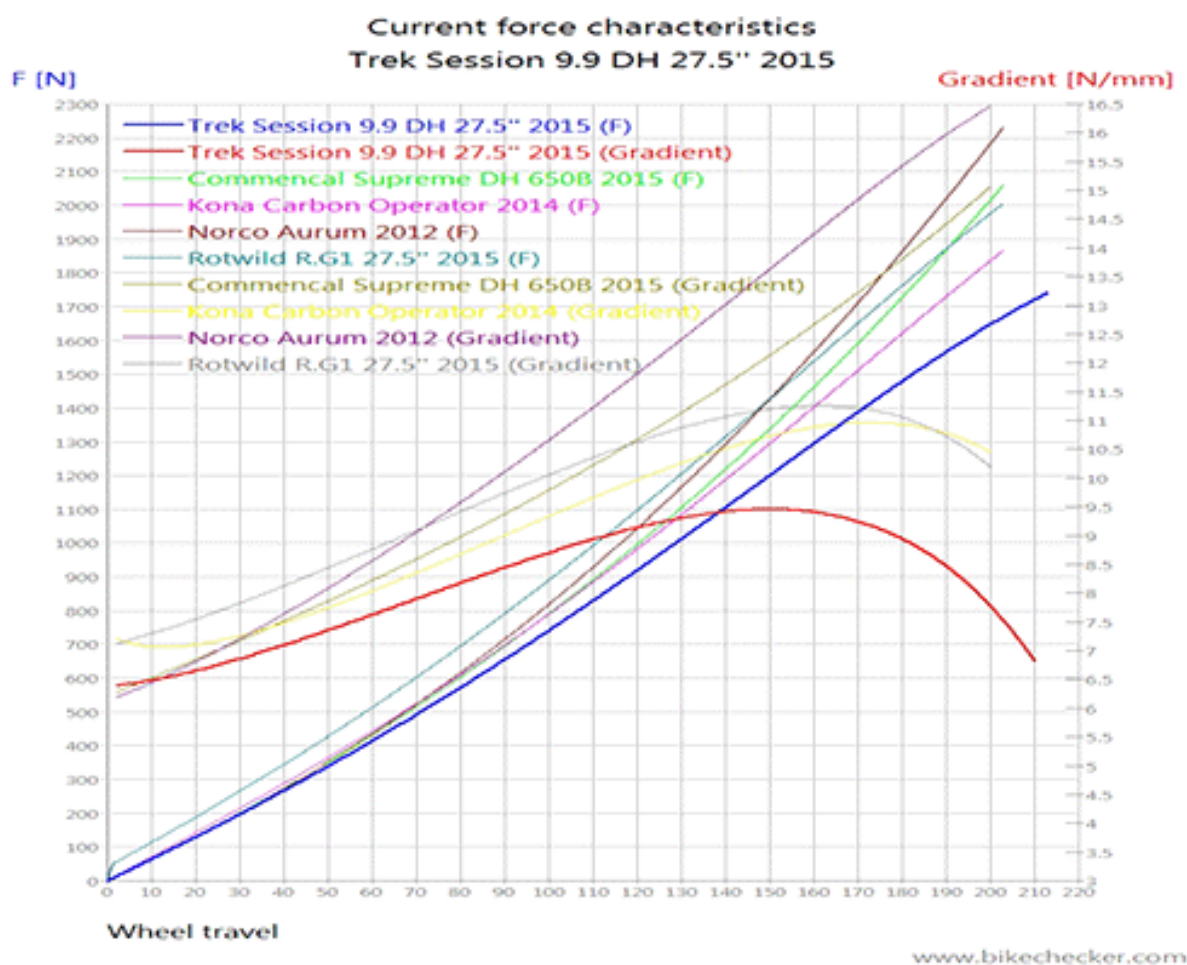
[www.bikechecker.com](http://www.bikechecker.com)

**Obrázek 7.12:** Anti-rise karbonového rámu

## 7.1. Zhodnocení dosažených charakteristik

### Diagram Leverage Ratio a Forces (obr. 7.5, 7.6):

Charakter mechanismu ukazuje tvar Leverage Ratio. Karbonový rám má LR téměř konstantní po celý rozsah zdvihu. Hodnoty LR jsou ale poměrně nízko, což má za následek vyšší hodnotu síly v zadním kole pro dosažení konečného zdvihu. Zavěšení se tak může při normální tuhosti tlumiče jevit jako necitlivé, zvláště v tomto případě, kde má cyklista poměrně malou hmotnost. V diagramu Forces dosahuje karbonový rám hodnoty až 2000 N, pro daný pružinový tlumič o tuhosti 78 N/mm (450 lbs/in). Tato hodnota odpovídá silovým poměrům pro cyklisty o hmotnosti dospělého člověka, jak ukazuje následující diagram několika sériových rámu, kde byla použita stejná tuhost pružiny.



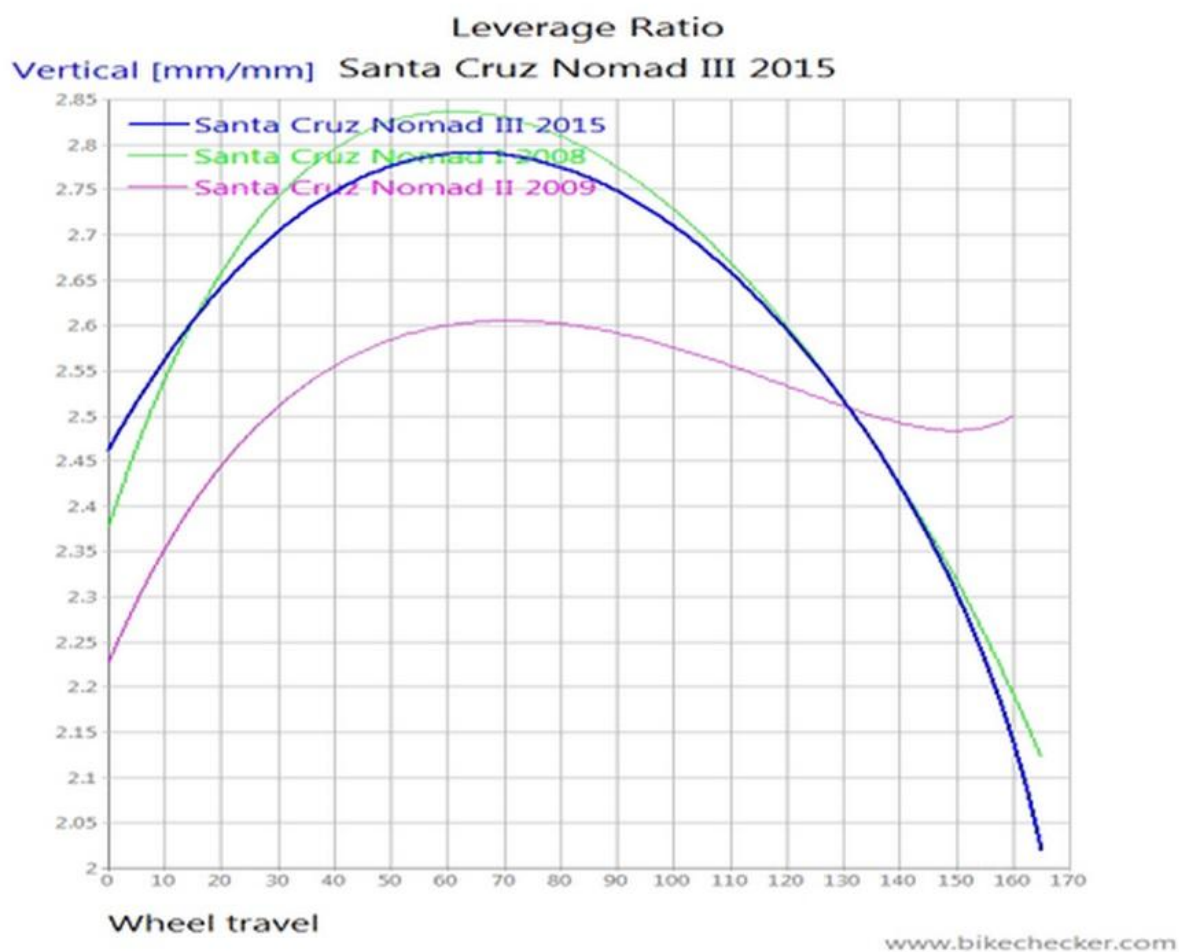
**Obrázek 7.13:** Orientační diagram síly zadního kola při kompresi [29]

LR u původního návrhu Al rámu má rostoucí průběh. Ideální charakteristika Leverage Ratio je klesající funkce. Kvůli nevýhodnému průběhu LR, tak byla provedena změna polohy čepu horního vahadla. Tato změna vyústila v celkově vyšší hodnoty LR, díky kterým se pak křivka v diagramu Forces při stejné tuhosti tlumiče pohybuje ve výhodnější oblasti nižších hodnot, než je tomu u karbonového rámu. LR má také výhodnější průběh. Nově dosažený průběh je v počátku zdvihu, který nepřekračuje sag hodnotu, rostoucí a naznačuje pokles síly

nutné k dosažení zdvihové hodnoty. Asi od třetiny zdvihu zadního kola, ale funkce klesá a se zdvihem tak roste síla nutná k jeho dosažení.

Zlepšení průběhu funkce LR je dobře patrné také na křivkách gradientu v diagramu Forces. Kde gradient upravené geometrie zavěšení od čtvrtiny zdvihu zadního kola roste. Z matematické definice gradient vyjadřuje rychlost změny nebo směr růstu veličiny. Rostoucí funkce gradientu indikuje právě rostoucí trend silových přírůstků během zdvihu.

Tvar průběhu LR na upraveném návrhu Al rámu je obdobný jako u některých rámu Yeti nebo rámu využívajících zavěšení typu VPP, například Santa Cruz Nomad (obr.7.14), Tallboy, Blur atp. [29]



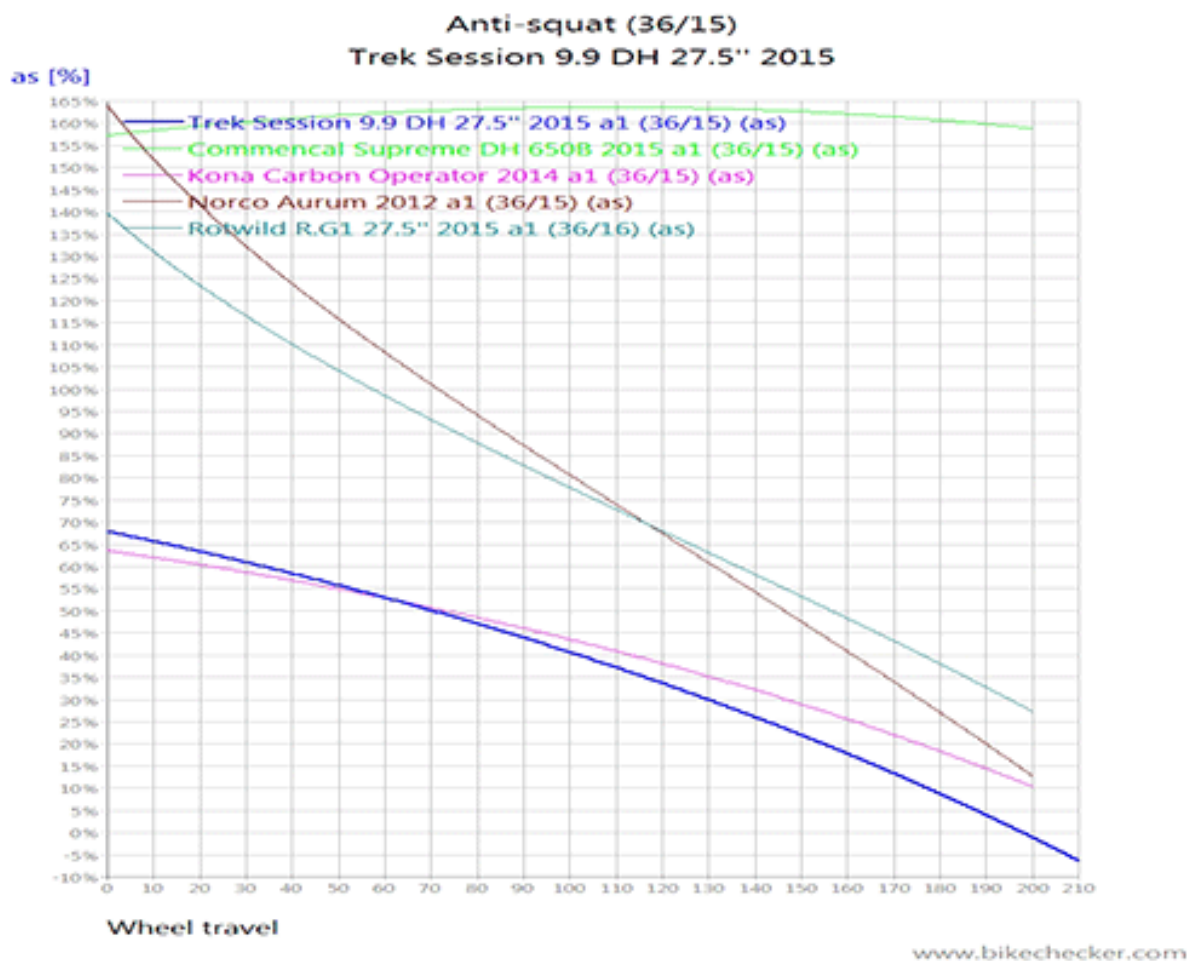
**Obrázek 7.14:** Funkce LR sériově vyráběných rámu značky Santa Cruz [29]

Díky znalosti průběhu funkce LR, je pak možné nastavit tlumič tak aby výsledný průběh Wheel Force měl žádoucí tvar (viz příloha 3).

## Anti-squat :

Při stejné výšce šlapacího středu jako na karbonovém rámu docházelo v zavěšení Al rámu k nežádoucímu jevu. Objevila se charakteristika anti-squat, posunutá do záporných hodnot. Záporné hodnoty anti-squat se označují jako pro-squat. Pro-squat je vlastnost, která při šlapání vynucuje kompresi zavěšení, což je nežádoucí. [11]

Posunutí šlapacího středu dle obrázku 7.2 způsobilo posunutí celé charakteristiky AS do kladných hodnot (obr.7.9), velice podobných sériovému rámu Trek Session 9.9 2015, který jak uvádí výrobce má zavěšení nezávislé na šlapání (obr.7.15).



**Obrázek 7.15:** Průběh AS několika sériově vyráběných rámu [29]

Výhoda níže položeného šlapacího středu je také v lepší ovladatelnosti celého kola, nevýhodou je pak možná častější kolize pedálu nebo kliky při šlapání s nerovnostmi povrchu. S pomocí vyšších hodnot AS by k této kolizi docházet nemělo. Pokud by přece jen docházelo k omezení šlapání vlivem níže položeného šlapacího středu, pak je možné použít o něco kratší MTB kliky. Kliky se vyrábějí i ve velmi krátkých délkách, například Answer Mini jsou vyráběny v odstupňované řadě po 5 mm, od délky 125 mm.

## **Anti-rise:**

Diagram anti-rise karbonového rámu ukazuje tendenci komprese zavěšení při brzdění (obr.7.12). Průběh AR upraveného Al rámu ukazuje vyvážené zavěšení po celou délku zdvihu zadního kola (obr.7.10).

## **Pedal-kickback a celkový zdvih zadního kola (obr.7.3, 7.7):**

Hodnota natočení kliky upraveného Al rámu v průběhu zdvihu, při daném převodu, klesla téměř o čtyřnásobek vůči karbonovému rámu a o polovinu vůči sériovému rámu Trek Session 9.9. z roku 2012. [29]

Al rám sice používá o čtyři řady kratší tlumič, zdvih zadního kola se ale vyrovná karbonovému rámu, dle diagramu magnified axle path má trajektorie také daleko menší horizontální složku. Zdvih zadního kola konečného návrhu Al rámu je 126 mm. Zdvih Al rámu před provedenými úpravami byl 100 mm.

## **8. Zatěžovací zkoušky**

Zatěžovací zkoušky pro horská jízdní kola jsou dány normami. Normy jsou rozděleny dle užití na rámy horských kol a pro závodní účely. V této práci jsou provedeny některé obdobné zkoušky popsané v normě ČSN EN ISO 4210-6:2014. Zkoušky jsou provedeny metodou konečných prvků a uvažují určitá zjednodušení, která jsou popsána v následujících kapitolách.

Obecná zatížení, která působí na rám kola při jízdě, můžeme rozdělit na zatížení statická a dynamická. Statická zatížení uvažujeme za předpokladu jízdy po dokonale rovné ploše, konstantní rychlostí a nehybné polohy cyklisty. Jsou způsobena tíhou jezdce, rámu a jeho komponentů nebo i brzdových účinků.

Metodika určování dynamického zatížení se opírá o současné znalosti z antropometrie a biomechaniky se zaměřením na jízdu na kole průměrně stavěného dospělého člověka. Stavba těla je důležitá pro stanovení hmotností jednotlivých částí těla a těžiště cyklisty, setrvačných hmot a tuhostí končetin. Matematický model postavy člověka je pak soustavou pružin, tlumičů a hmot. Provedení dynamická simulace tohoto typu je již nad rámec této práce. Proto je zde dle [25] využito dynamického koeficientu o velikosti  $k_{dyn} = 3$ , kterým se pro získání ekvivalentního dynamického zatížení vynásobí tíha cyklisty. Takto získané zatížení se pak rozloží na konstrukci rámu kola dle uvažovaného zatěžovacího stavu.

K provedení simulací dynamiky bylo použito prostředí Creo Mechanism, kde je možné systém tuhých těles představující rám kola zatížit vnějšími silami a následně změřit reakce například v místech čepů zadní stavby nebo uložení přední vidlice.

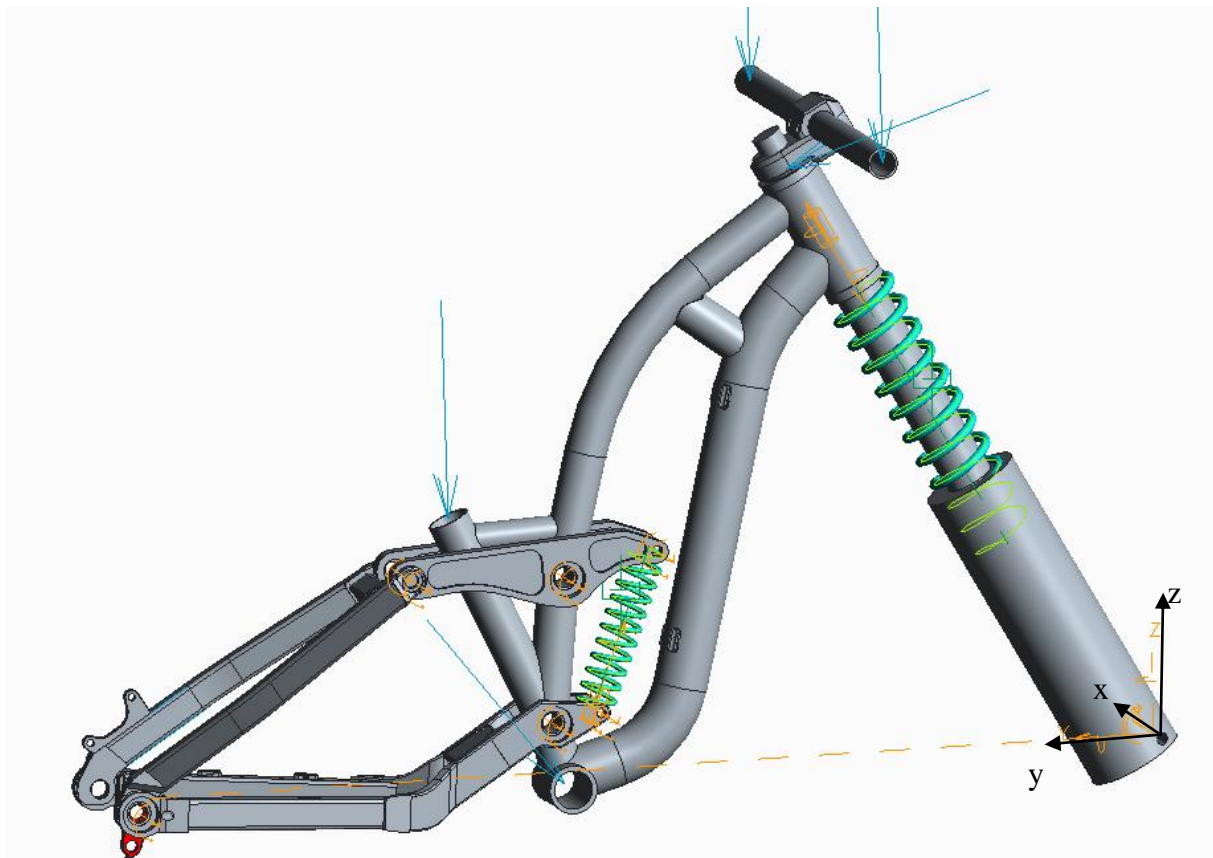
### **Pro bližší zkoumání pevnosti a životnosti rámu byly navrženy tyto zatěžující stavy:**

- jízda v sedě a ve stoje [25]
- zatížení s dynamickým koeficientem při dopadu na obě kola [25]
- zatížení s dynamickým koeficientem při dopadu na zadní kolo [25]
- zatížení při brzdění přední a zadní brzdou
- test předního nárazu s ohledem k ČSN EN ISO 4210-6:2014 (norma-kapitola 4.1)
- únavový test s ohledem k ČSN EN ISO 4210-6:2014 (norma-kapitola 4.4)

V této kapitole jsou provedena měření zatížení při jízdě v sedě, ve stoje a pak obě zatížení obsahující dynamický koeficient. Jsou změřeny reakce ve všech místech uložení a tím je určen nejhorší teoretický případ zatížení. Pro ukázkou jsou v této práci uvedena měření reakčních sil pouze v čepech pravého horního vahadla. Tímto způsobem byly také získány vstupní hodnoty pro výpočet optimalizované topologie horního vahadla.

Pro dynamickou analýzu byl model upraven dle obrázku 8.1. Podložky, čepy, šrouby a ostatní díly byly smazány. CAD model byl doplněn o kinematické vazby typu PIN ve všech místech uložení čepů. V místě vnějšího a vnitřního kluzáku tlumiče a vidlice byla použita cylindrická vazba. Poloha osy předního kola byla fixována s volnou rotací kolem osy  $x$ . Osa zadního kola byla zavazbena obecnou vazbou, umožňující posuv pouze ve směru osy  $y$ , s volnou rotací v rovině  $yz$ . Modelu je tak umožněn pouze obecný rovinný pohyb. Dále byl model doplněn o zatížení a do výpočtu byla také zahrnuta gravitační síla.

Výstupem provedených simulací je také zjištění, že komprese daného návrhu nedosáhla pro použitou tuhost tlumiče dorazu, tím byla částečně ověřena poloha křivky LR a správnost návrhu zavěšení.



**Obrázek.8.1:** *Upravený CAD model s prvky modulu Mechanism (tlumiče, pružiny, vazby)*

## 8.1. Impact test

Test je proveden s ohledem k ČSN EN ISO 4210-6:2014, která popisuje zátěžové zkoušky a bezpečnostní požadavky pro rámy jízdních kol. Použité hmotnosti a další parametry zátěžových zkoušek jsou rozděleny dle určení rámu kola na: městská, trekinkgová, horská s hmotností cyklisty 80 kg, závodní a dorostenecká s hmotností cyklisty 40 kg. Dle hmotnosti je pro zkoušky upraveného Al rámu určena poslední zmíněná skupina, jsou však uvažovány určité idealizace vzhledem k možnostem realizace výpočtu metodou konečných prvků. Popis testu je znázorněn na obrázku 8.2. Zjednodušení zde spočívá v určení dopadové síly. Přesný výpočet zahrnuje koeficienty restituce, tlumení materiálu, tvary ploch a hmotnosti obou předmětů nebo i plastickou deformaci vzniklou nárazem. Tyto hodnoty lze přesně zjistit pouze experimentálně, což je ale nad rámec této práce.

Tuhost rámu byla odhadnuta výpočtem MKP dle vzorce (4), kde byl celý rám podobně jako na obrázku 8.2 zatížen silou  $F$  a byla určena výchylka  $x$ . Dále byla dle (5) určena potenciální energie tělesa 3. Vztah (6) představuje stlačení pružiny o tuhosti  $k$ , při akumulaci potenciální energie. Dopadová síla (8) se pro těleso 3 vypočítá z rovnosti potenciální energie a dráhy po kterou je tato energie absorbována (7).

$$k = \frac{F}{x} = 724.6 \text{ N/mm} \quad (4)$$

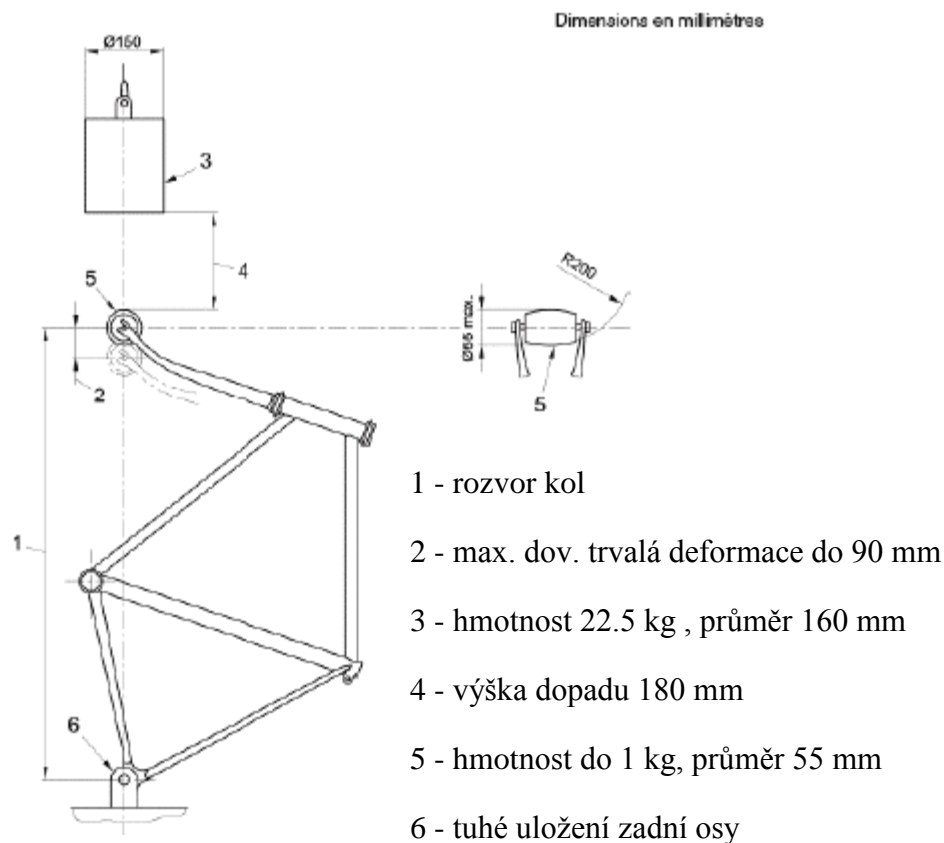
$$E_p = m * g * h = 22.5 * 9.81 * 0.212 = 46.79 \text{ J} \quad (5)$$

$$y = \sqrt{\frac{2E_p}{k}} = 0.011 \text{ m} \quad (6)$$

$$W = E_p \quad (7)$$

$$F = \frac{m * g * h}{y} = \frac{22.5 * 9.81 * 0.18}{0.011} = 3611 \text{ N} \quad (8)$$

Výsledná síla dopadu předmětu 3 o hmotnosti 22.5 kg je vypočtena na 3611 N. Simulace MKP rámu zatíženého touto silou je v kapitole 9.



**Obrázek 8.2:** Impact test dle ČSN EN ISO 4210-6:2014 [30]

## 8.2. Zatížení rámu při jízdě v sedě

Simulace jízdy v sedě předpokládá konstantní rychlost, bez šlapání po dokonale rovné podložce. Veškerá hmotnost cyklisty je soustředěná na sedadlo ve směru kolmo k zemi, rozložení hmotnosti cyklisty do řídítek a šlapacího středu je zanedbáno. Síla působící na sedlo má velikost 500 N. Maximální hodnota reakcí byla simulací zjištěna v prostředním čepu vahadla a měla hodnotu 1200 N (viz příloha 4).

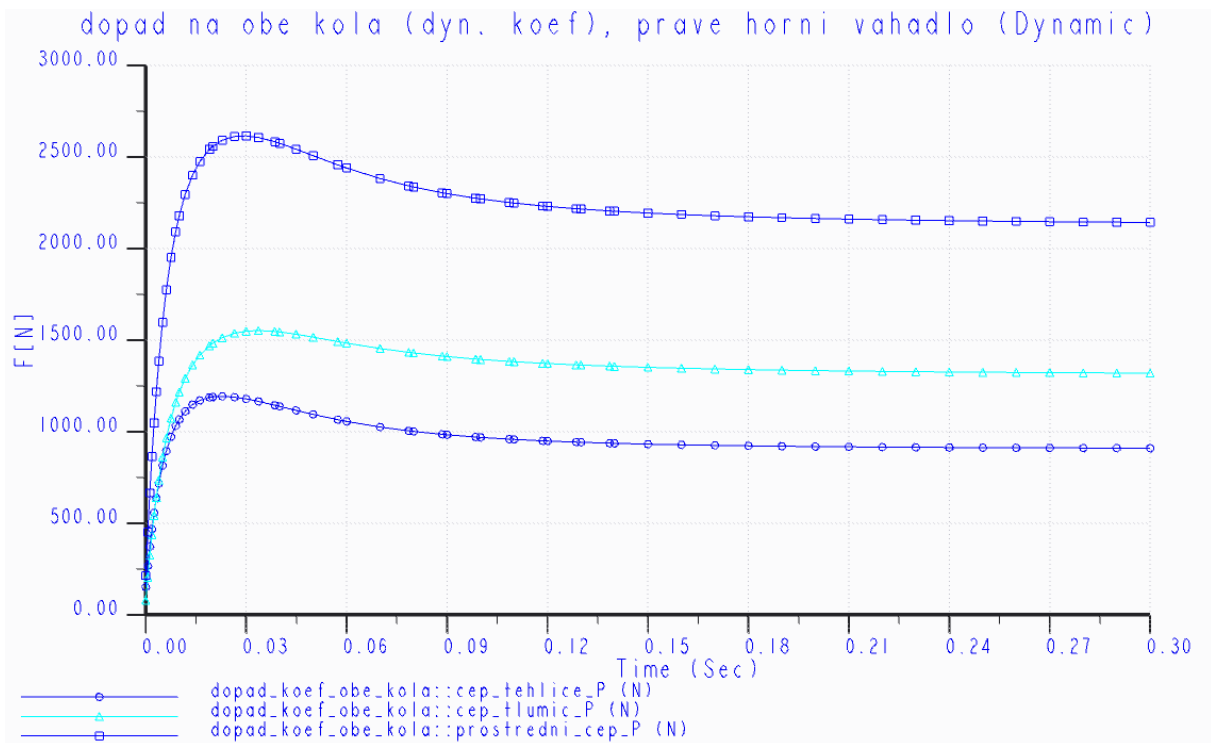
## 8.3. Zatížení rámu při jízdě ve stoje

Tato část simuluje jízdu ve stoje, konstantní rychlostí, bez šlapání po dokonale rovné podložce. Zatížení zde tvoří hmotnost cyklisty. Veškerá hmotnost je soustředěna do šlapacího středu ve vertikálním směru. Krut vlivem nesymetrického rozložení hmotnosti (poloha pedálů) je zanedbán. Maximální hodnota reakcí byla simulací vypočtena v prostředním čepu vahadla s hodnotou 1100 N (viz příloha 4).

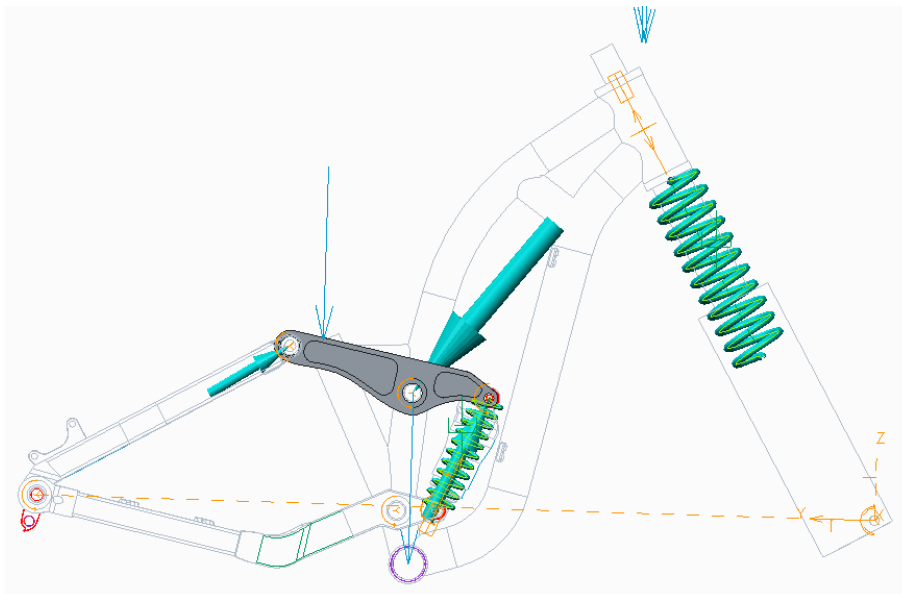


## 8.4. Zatížení s využitím dyn. koef. při dopadu na obě kola

Byla provedena simulace dopadu na obě kola s využitím dynamického koeficientu o velikosti 3. Tíha cyklisty (50 kg) byla vynásobena tímto koeficientem a rozložena v poměru 2/3 do šlapacího středu a 1/3 na řídítka. Obě zatížení působí vůči zemi kolmo dolů. Hodnoty reakcí jsou zobrazeny na obrázku 8.3. a 8.4.



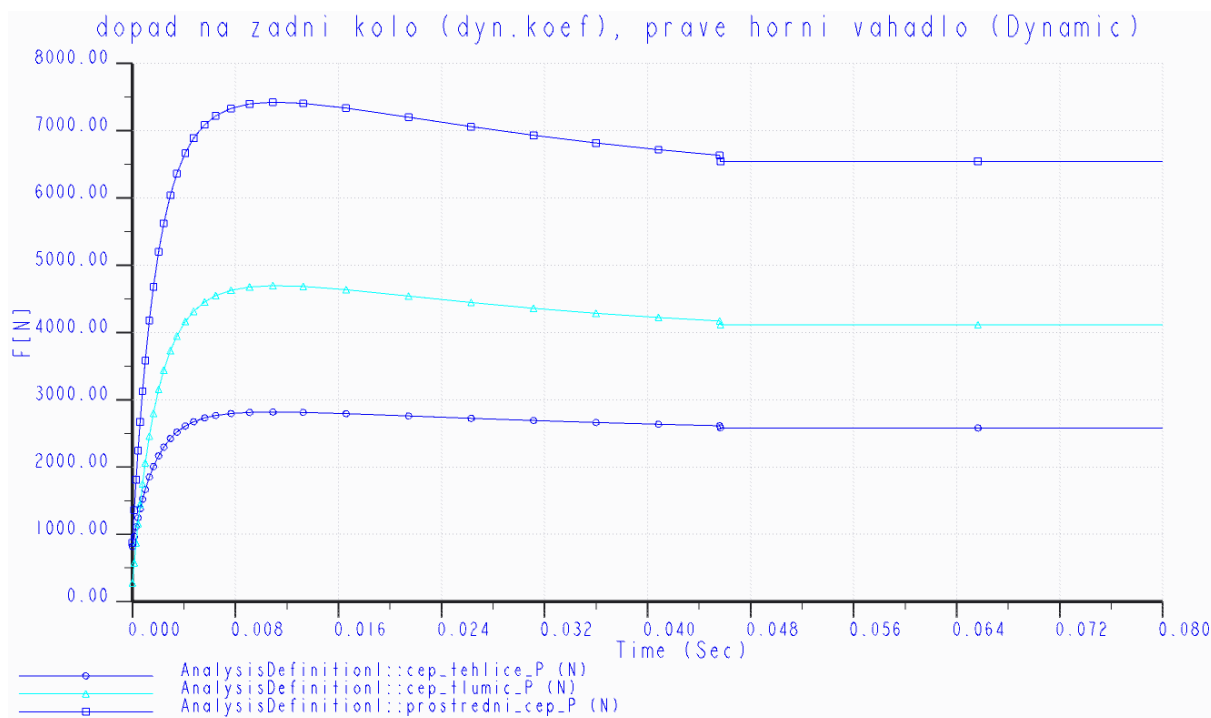
**Obrázek 8.3:** Absolutní hodnoty reakčních sil v čepích horního vahadla při dopadu na obě kola s použitím dyn. koef.



**Obrázek 8.4:** Zatížení při dopadu na obě kola s použitím dyn. koef., zobrazení směrových vektorů reakcí v horním vahadle

## 8.5. Zatížení rámu při dopadu na zadní kolo

Tento stav idealizuje situaci, kdy cyklista dopadá na zadní kolo. Pro hodnotu zatížení je určující hmotnost cyklisty a velikost dynamického koeficientu. Rám kola je pevně zavazben, síla působí na osu zadního kola kolmo nahoru vůči zemi, její velikost je 1500 N. Hodnoty reakcí jsou zobrazeny na obrázku 8.5.



**Obrázek 8.5:** Absolutní hodnoty reakčních sil v čepích horního vahadla při dopadu na zadní kolo s použitím dyn. koef.

## 8.6. Zatížení při brždění

Vzhledem k charakteru zatížení, který tvoří impact test nebylo provedeno určování brzdných účinků přední brzdy. Úchyt třmene zadní brzdy je obdobné konstrukce jako u rámu Trek Session, proto není součástí této práce určování brzdných účinků zadní brzdy ani napěťová analýza při tomto zatížení.

## 8.7. Vlastní frekvence

Vlastní frekvence je důležitou vlastností všech strojních součástí, rámu jízdních kol nevyjímaje. Je však důležitá spíše u těch rámu, kde se předpokládá stálá frekvence šlapání jako je tomu například u silničních jízdních kol. Tento předpoklad zde neplatí, také je ze všech naměřených diagramů zřejmé, že se jedná o přetlumený systém, z těchto důvodů nebyla provedena modální analýza.

## 9. Deformačně napěťová analýza

Analýza metodou konečných prvků byla během vývoje rámu prováděna několikrát. S výhodou bylo využito možnosti modulu mechanism „use in structure“. Use in structure je funkce, která umožňuje reakce zjištěné v dynamických analýzách snadno přenést do modulu Creo Simulate. Čímž usnadňuje optimalizaci a kontrolu návrhu jednotlivých dílů. Reakce je možné importovat v různých kombinacích. Nejčastější se nazývá single max. load, která vyhledá určitý časový okamžik z dané dynamické simulace, kdy je kombinace všech zaznamenaných sil nejvyšší. Díky propojení obou modulů je možná rychlá pevnostní kontrola a případná optimalizace jednotlivých součástí. Tato metodika byla uplatněna zejména při kontrole návrhů horního vahadla a těhlice. Řešení těchto samostatných úloh jsou popsány v kapitole 9.1. Další podkapitoly, ale obsahují i kontrolní výpočet celé sestavy. Která byla zjednodušená díky symetričnosti konstrukce. Použití symetrie značně snížilo výpočetní čas. Snížení výpočtového času má několik důvodů:

- 1) Menší počet konečných prvků sítě.
- 2) Menší počet kontaktů.
- 3) Menší prostor pro chybu v definování úlohy a rychlejší editace úlohy.

Před samotným vložením dílu do modulu Simulate, bylo nutné pro přesnější výsledek model upravit. Svařované díly byly přemodelovány v jedno tělo, doplněny o zaoblení a zbaveny některých „kosmetických prvků“, jako například drážka pro patku přehazovačky.

Simulací bylo celkem provedeno několik desítek. V této práci jsou však uvedeny pouze některé kontrolní výsledky již konečné, upravené verze daného dílu.

Použitá síť se pro všechny výpočty skládá z tetra elementů až s šestým řádem polynomu. Řešič pro výpočet používá p-metodu. Pro výpočty byla použita metoda multi pass adaptive s podmínkou konvergence pro deformační energii a napětí Von Mises do 10%.

Posouzení únosnosti rámu kola je provedeno porovnáním vypočtených hodnot maximálního redukovaného napětí Von Mises, vůči smluvní mezi kluzu materiálu dané součásti. Rámový trojúhelník, horní vahadlo, spodní vahadlo a těhlice jsou navrhovány pro materiál EN AW 7020, který má smluvní mez kluzu až 280 MPa. Čepy, pouzdra a šrouby jsou navrženy z materiálu 42CrMo4 (ČSN 15 142) s mezí kluzu až 750 MPa.

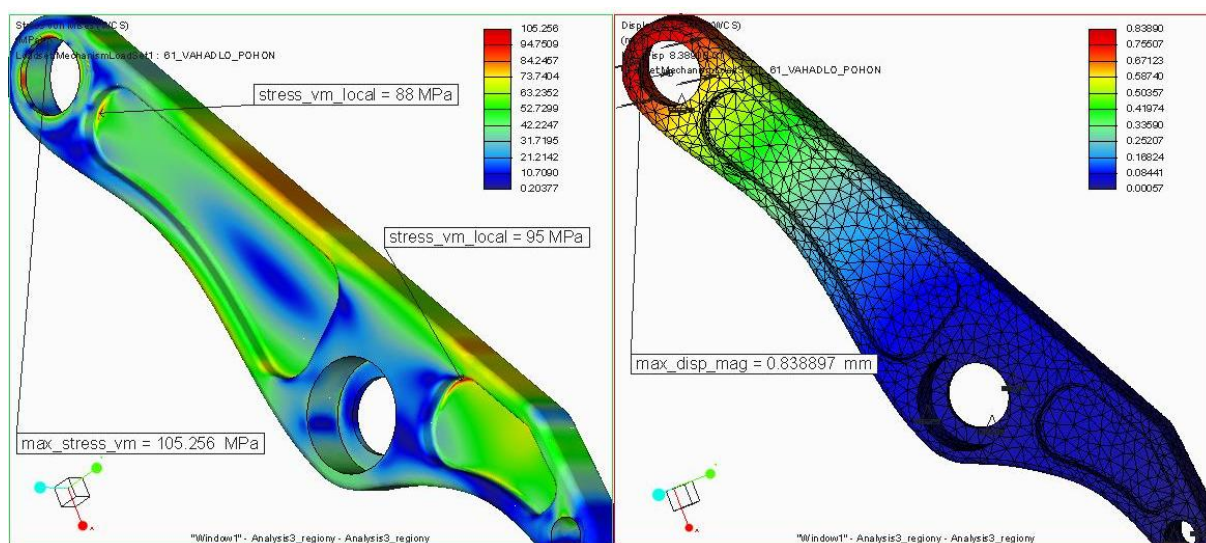
Úlohy byly sestaveny s ohledem k normě ČSN EN ISO 4210-6:2014. Mechanismus byl uveden do polohy při daném zatížení a tlumič byl nahrazen tuhým spojením obou konců vahadel funkcí „rigid link“. Funkce rigid link umožňuje pohyb obou čepů v prostoru, ale neumožňuje vzájemný pohyb mezi čepy. Přední vidlice byla nahrazena zjednodušeným modelem s daleko větší tuhostí. Nahrazení zamčeného tlumiče a přední vidlice tímto způsobem je doporučeno v udané normě.

## 9.1. Dopad na zadní kolo

V této kapitole je proveden výpočet celé sestavy rámu s ukázkou přesnějšího výpočtu dvou dílů zadní stavby tak, jak probíhala jejich kontrola během návrhu. Hodnoty zatěžujících sil těchto dílů byly převzaty z dynamické simulace dopadu na zadní kolo. Ukázka přesnějšího výpočtu dvou dílů zadní stavby je uvedena pouze při tomto typu zatížení. Důvodem jsou nejvyšší hodnoty reakcí v čepích zadní stavby právě při tomto zatížení.

### Horní vahadlo:

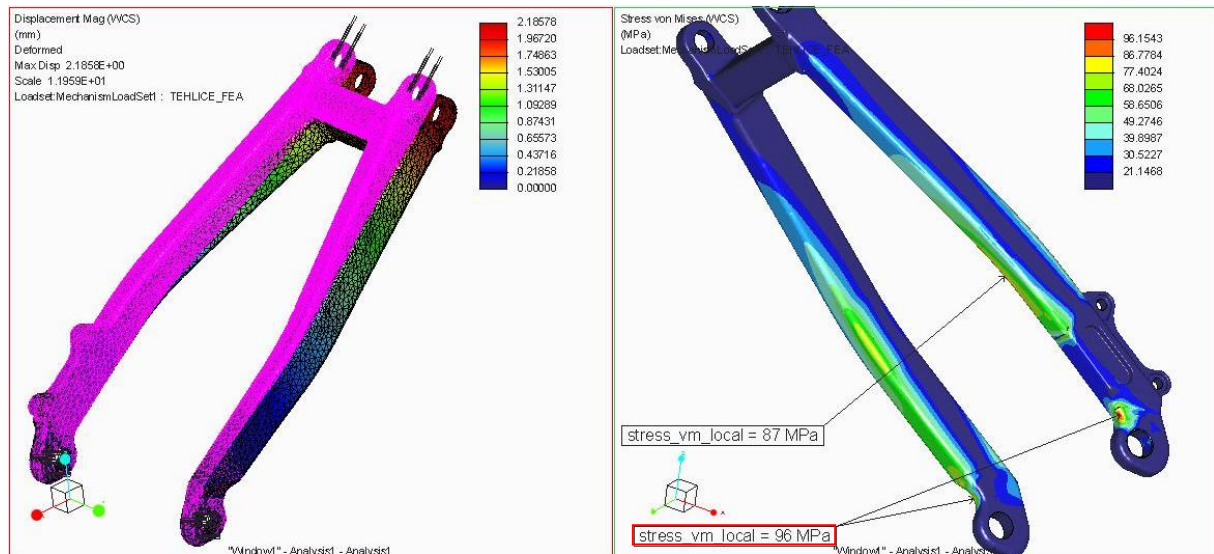
Vahadlo má cylindrické vazby v prostředním čepu a v místě šroubu pro tlumič. Cylindrická vazba v tomto případě umožňuje pouze rotaci kolem vlastní osy. Dále byla několikrát použita rovinná vazba, která zde představuje zamezení vybočení vahadla, vlivem šroubových spojů k rámu nebo těhlici. Síť byla také upravena oproti výpočtu celé sestavy zjemněním pro celý díl. Byla stanovena maximální velikosti elementu 5 mm pro přesnější výpočet. Modelu vahadla byla přidána zaoblení a některé ostré hrany byly z výpočtu vyloučeny. Maximální dosažená hodnota redukovaného napětí Von Mises byla 105 MPa v místě opěrné stěny ložiska. Druhá nejvyšší hodnota, 95 MPa byla vypočtena v rohu odlehčení mezi prostředním čepem a dírou pro šroub tlumiče (obrázek 9.1). Obě hodnoty nedosahují ani poloviny smluvní meze kluzu hliníkové slitiny.



**Obrázek 9.1:** MKP analýza horního vahadla při dopadu na zadní kolo, zobrazení napětí Von Mises, průběhů posunutí a sítě KP

## Těhlice:

Těhlice je nasunuta na osu zadního kola, po vnějších stranách kola je pohyb fixován matkami a po vnitřních stranách se těhlice opírá o náboj zadního kola. Z tohoto důvodu byla i podobně zavezována zamezením pohybu v místě uložení osy zadního kola. Byly vytvořeny kruhové plochy (plošné regiony) pro rovinnou vazbu v místech, kde je těhlice opřena o náboj a spodní vahadlo. Síť KP byla zjemněna stejným způsobem jako pro samostatný výpočet horního vahadla. Maximální hodnoty napětí Von Mises dosahovaly dovolených hodnot, pod 100 MPa. (obrázek 9.2)

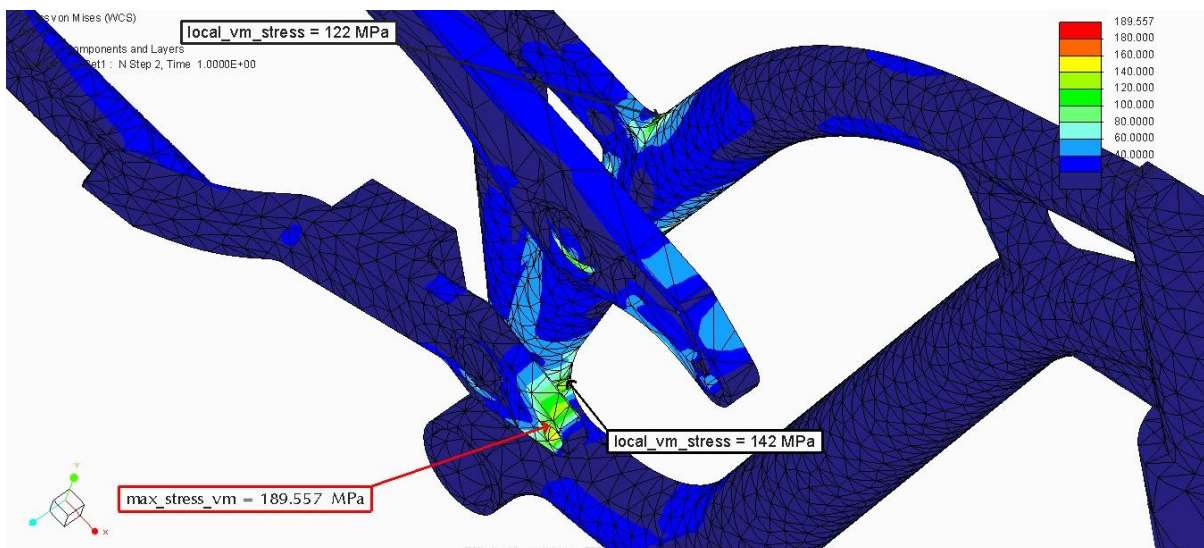


**Obrázek 9.2:** MKP analýza těhlice při dopadu na zadní kolo, zobrazení napětí Von Mises, průběhů posunutí [mm] a síť KP, obr. v levé části také zobrazuje zdeformovaný vs. nezdeformovaný stav (fialová)

## Sestava rámu:

Rám byl zatížen vertikální silou v ose zadního kola o velikosti 1500 N. Model byl pak vzhledem k použití symetrie zatížen silou o hodnotě 750 N. Šlapací střed byl uložen na cylindrickou vazbu s povolenou rotací a zamezením osového pohybu. Osa předního kola byla pevně vetknuta.

Ložiska byla zjednodušena na vnitřní a vnější kroužek, mezi nimiž byl definován kontakt se zanedbatelnou hodnotou tření. Vnější kroužek ložiska je vazbou bonded pevně připojen k vahadlu, vnitřní kroužek je stejným způsobem připojen k čepům. Osa zadního kola na které jsou nasunutá pouzdra je vazbou bonded připojena k vnitřnímu kroužku zadního ložiska a k těhlici. Vnější kroužek zadního ložiska je pevně připojen ke spodnímu vahadlu. Horní část těhlice je obdobně připojena přes čep a ložisko k hornímu vahadlu. Geometrie osy zadního kola a pouzdro ložisek bylo pro zkrácení výpočtového času spojeno v jedno tělo. Přední vidlice je vazbou bonded spojena s rámem. Vazba bonded generuje síť KP tak, že hranice geometrických těles má společné uzly. Mezi všechny sousedící a rovnoběžné plochy, které se o sebe opírají byla vložena vazba kontakt, která využila omezení plošnými regiony obdobně jako rovinné vazby například u samostatné úlohy kontrolního výpočtu těhlice.

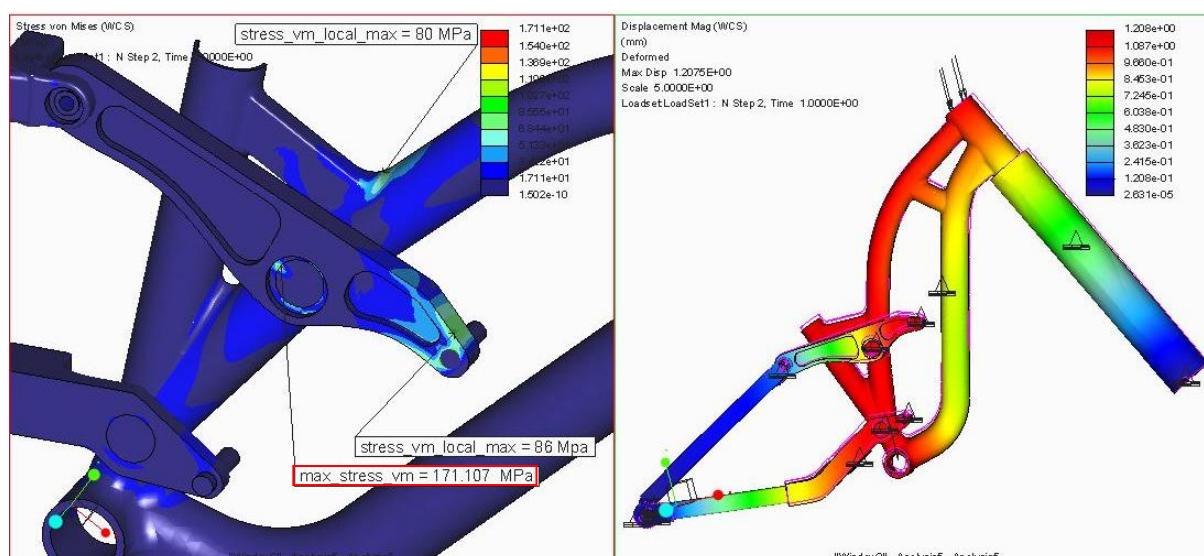


**Obrázek 9.3:** Dopad na zadní kolo, zobrazení průběhu napětí Von Mises a sítě KP

Obrázek 9.3 zobrazuje vypočtené průběhy napětí Von Mises a použitou konečně prvkovou síť. Nejvyšší vypočtené napětí je v místě čepu tlumiče spodního vahadla a dosahuje hodnoty 189.5 MPa. Dále jsou popiskou zvýrazněna dvě další místa s vyšší koncentrací redukovaného napětí. Vypočtené napětí však v žádném místě konstrukce nepřekročí mez kluzu materiálu.

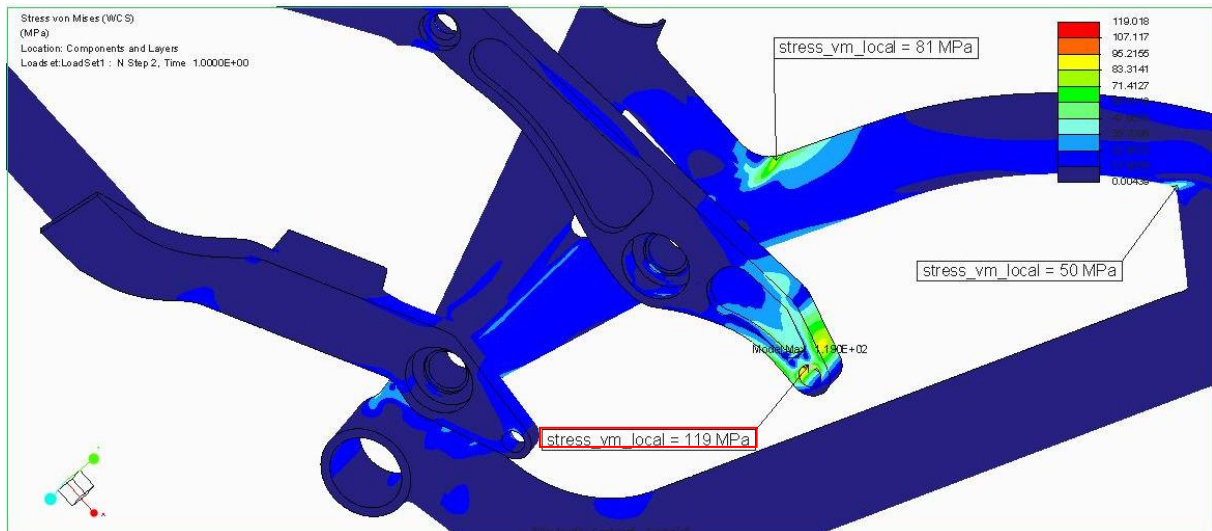
## 9.2. Dopad na obě kola s dynamickým koeficientem

Pro provedení výpočtu bylo uvažované zatížení dáno tíhou cyklisty (500 N) vynásobená dynamickým koeficientem  $k_{dyn} = 3$ . Zatížení bylo rozloženo v poměru 2/3 pro šlapací střed a 1/3 pro hlavové složení. Rám byl uložen na podpory za osy kol, zadní osa je pevně vetknuta, přední osa má povolenou rotaci kolem své osy.



**Obrázek 9.4:** Dopad na obě kola s použitím dynamického koeficientu, zobrazení napětí Von Mises a průběhu posunutí s max. hodnotou 1.208 mm

Výsledky výpočtu vyšly také příznivě, hodnoty redukovaného napětí Von Mises v žádném místě nepřekročily hranici meze kluzu. Vypočtené napětí nedosáhlo ani poloviny meze kluzu použitých materiálů. Nejvyšší napětí je v místě kontaktu ložiska čepu horního vahadla a má hodnotu 171 MPa (obrázek 9.4). Obrázek 9.5 představuje stejný výpočet, zobrazení průběhu napětí je zde omezeno pouze na hlavní součásti rámu, pro lepší čitelnost výsledků.



**Obrázek 9.5:** Dopad na obě kola s použitím dynamického koeficientu, zobrazení napětí Von Mises. Zobrazení pouze hlavních dílů rámu, bez spojovacího materiálu

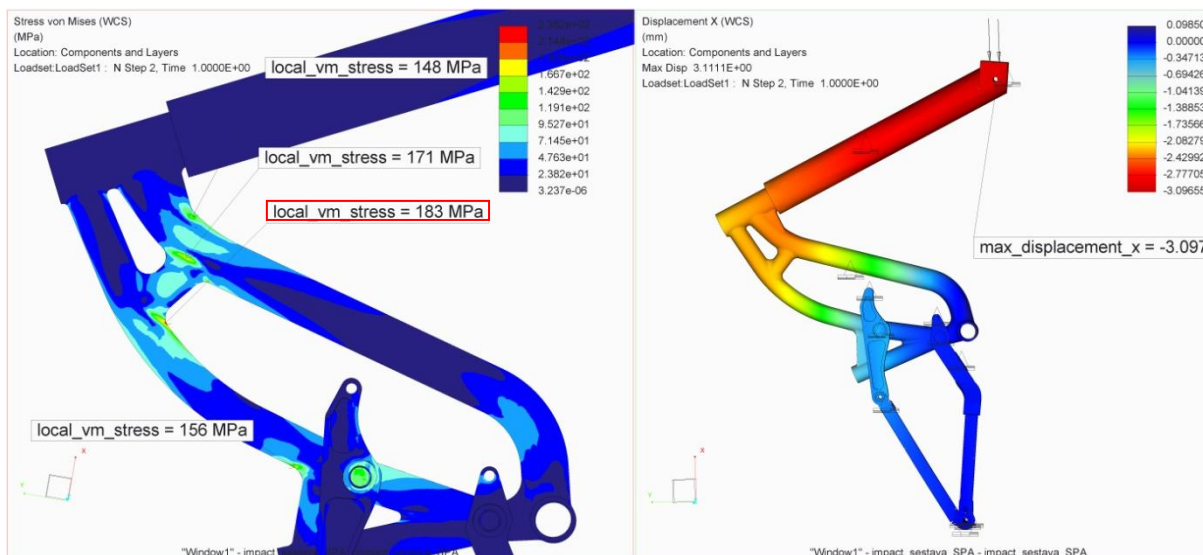
### 9.3. Impact test

Tato zkouška byla provedena s ohledem na ČSN EN ISO 4210-6:2014 s idealizací popsanými v kapitole 8.1. tak aby ji bylo možné provést metodou konečných prvků na virtuálním modelu. Mechanismus zadní stavby byl uveden do konfigurace zatížení jízdy v sedě. Čepy tlumiče byly také zavazbeny tuhým spojením. Zadní osa rámu byla uložena pevně. Přední vidlice má rovinnou vazbu na spodní ploše tak, aby byl umožněn pohyb ve směru zatížení. Zatěžující síla působí na spodní část vidlice a má velikost 3611 N.

Kritéria pro absolvování této zkoušky jsou: žádná viditelná trhlina po nárazu a trvalá deformace rozvoru kol nesmí být větší než 90 mm.

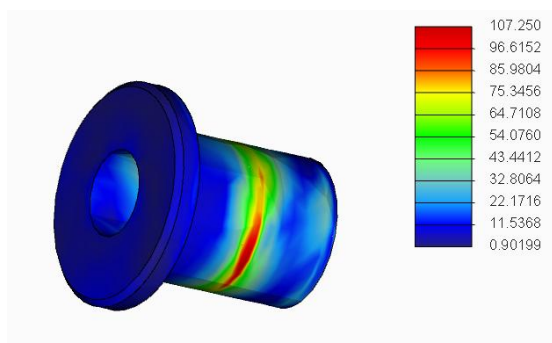
Kritérium viditelné trhliny by mělo být posuzováno dosažením hranice meze pevnosti materiálu. Pro tuto práci je však jako kritérium brána smluvní mez kluzu (280 MPa) a to zejména kvůli charakteru užití rámu a tím vyšší bezpečnosti. Smluvní mez kluzu je srovnávána s velikostí redukovaného napětí Von Mises.

Bylo provedeno několik typů výpočtů. Na obrázku 9.6 je zobrazeno řešení výpočtu celé sestavy s hrubší sítí. Je zobrazen průběh napětí a posunutí. Průběh posunutí ukazuje maximální hodnotu pouze 3.09 mm, která vyhovuje požadavkům normy. Maximální hodnota napětí v konstrukci rámu je 183 MPa.



**Obrázek 9.6:** Impact test, průběhy napětí Von Mises a posunutí ve směru zatížení [mm]

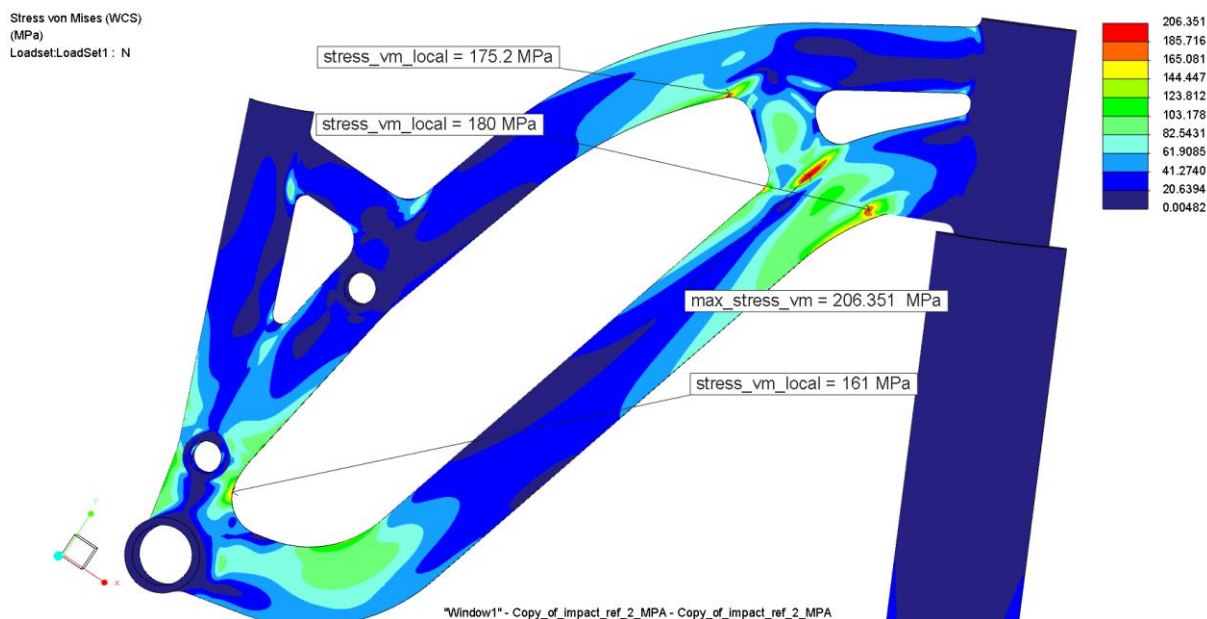
Největší napěťová špička však vyšla v kontaktu čepu rámu a ložiska. Špička byla i přes hrubou síť „pouze“ 230 MPa. Kontaktní napětí v ložiskách nebo hlavních čepích nejsou účelem těchto výpočtů, pro jejich posouzení by bylo nutné zvýšit ve všech čepích počet KP nebo výpočty provádět samostatně. Takové lokální navýšení je mimo výpočetní výkon použitých PC, výpočet končil chybou ohlašující nedostatek virtuální paměti. Pro ukázkou je na následujícím obrázku zobrazen dutý čep při zatížení dané impact testem. Čep na obrázku 9.7 spojuje horní vahadlo a těhlici. Napětí Von Mises čepu je s hodnotou 107 MPa v dovolených hodnotách. Mez kluzu materiálu čepu je 750 MPa.



**Obrázek 9.7:** Čep spojující horní vahadlo a těhlici, zobrazení napětí Von Mises [MPa]

Pro porovnání byl proveden další výpočet (obrázek 9.8), obdobný předchozímu (obrázek 9.6). Výpočtový model obsahuje stejné zatížení, tentokrát se ale výpočetní model skládá pouze z rámu a vidlice. Rám má pevnou vazbu za vnitřní plochu šlapacího středu. Přední vidlice je zavazbena stejným způsobem jako v předchozím případě s volným posuvem ve směru zatížení. Síť KP rámu byla lokálně zjemněna v nejzatíženějších místech dle předchozího výpočtu. Řešení přibližně odpovídá předchozímu výpočtu. Maximální napětí Von Mises dosahuje dovolených hodnot 206.351 MPa.



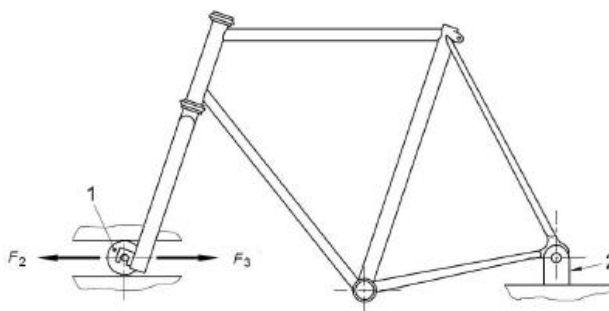


**Obrázek 9.8:** Impact test, zobrazení průběhů napětí Von Mises rámového trojúhelníku

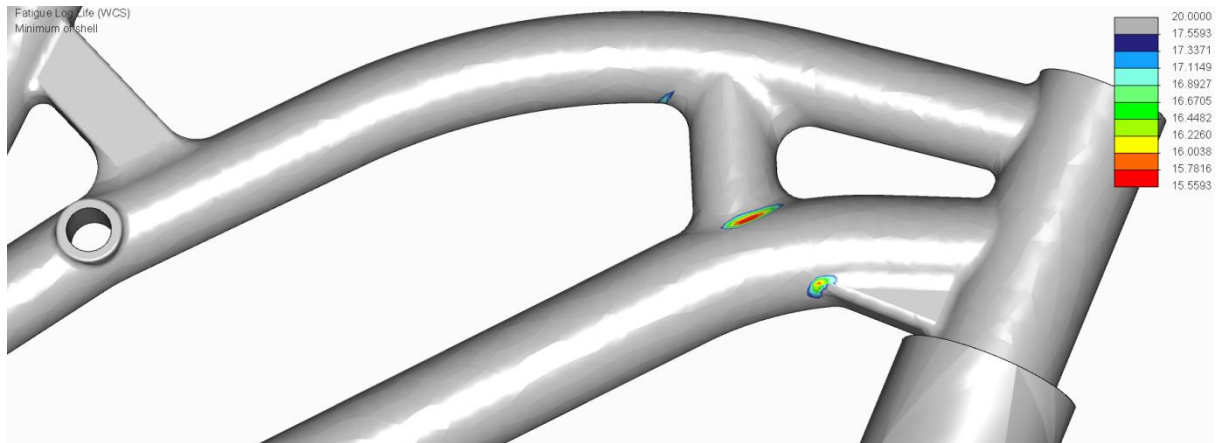
## 9.4. Únavový test

Únavový test byl proveden s ohledem na ČSN EN ISO 4210-6:2014. Software Creo Simulate však pro stanovení únavové životnosti neumožňuje výpočet kontaktních úloh. Úloha tak byla změněna na řešení pouze rámového trojúhelníku. Počáteční podmínky byly zadány stejně jako v řešení na konci kapitoly 9.3 (obrázek 9.8). S tím rozdílem, že zatěžující síla byla nyní střídavá s amplitudou 450 N, dle normy (obrázek 9.9). Počet cyklů testu byl dle normy stanoven na 100 000.

Bicycle type	City and trekking bicycles	Young adult bicycles	Mountain bicycles	Racing bicycles
Forward force, $F_2$ N	450	450	1 200	600
Rearward force, $F_3$ N	450	450	600	600
Test cycles, $C_1$	100 000	100 000	50 000	100 000



**Obrázek 9.9:** Únavový test s horizontální silou ČSN EN ISO 4210-6:2014 [30]



**Obrázek 9.10:** Únavový test, zobrazení počtu cyklů do porušení v log. souřadnicích

Pro tento test byly zadány parametry pevnostně horšího materiálu EN AW 6061, mez kluzu byla snížena z 280 MPa na 240 MPa a mez pevnosti na 290 MPa. Výpočet únavy umožňuje i odhad bezpečnosti. Minimální vypočtená bezpečnost má hodnotu 9,8. Bezpečnost je zde brána jako koeficient zatížení, použité zatížení by tedy muselo být vynásobeno 9,8x aby došlo ke statickému porušení. Vypočtená bezpečnost odpovídá statickému impact testu. Na obrázku 9.10 je řešení únavového testu. Na modelu jsou v log. souřadnicích zobrazeny izoplochy počtu cyklů při kterých dojde k poruše. Nejnižší počet cyklů je pod vzpěrou mezi spodní a horní rámovou trubkou, ten však s hodnotou  $3.62e15$  naprosto vyhovuje stanoveným požadavkům.

Norma obsahuje i další únavové a rázové testy, tyto ale nebyly posouzeny jako kritické pro návrh rámu nebo byly nahrazeny výpočty s dynamickým koeficientem. Vzhledem dosaženým pevnostním výsledkům nebyly další testy provedeny.

## 10. Posouzení vhodnosti použití technologie 3D tisku

Tato kapitola pojednává o dnešním uplatnění technologie 3D tisku. Kapitola 10.1 je úvodem k terminologii, historii a nejužívanějších principech aditivní výroby. Podkapitola 10.2 představuje zařízení KSA, na kterém proběhl tisk speciální odlehčené konstrukce horního vahadla. Pro popis aplikace v průmyslu byla vybrána společnost General Electric, kde se technologie hojně užívá například pro výrobu nejdůležitějších součástí tryskových motorů velkých dopravních letadel a současně probíhá další významný výzkum z pohledu kombinace slitin kovů. Závěr kapitoly představuje první celoodpružený rám jízdního kola vyrobený na 3D tiskárně.

### 10.1. Terminologie

**Additive Manufacturing (AM)** je výrobní proces, kde jsou součásti vyrobeny ze surového materiálu, nejčastěji v podobě prášku, kapaliny nebo taveniny. Součást nevzniká odběrem materiálu, ale naopak jeho nanášením po vrstvách. [31]

**3D Printing (3DP)** odkazuje na specifickou technologii, kde se využívá prášku a pojiva ve formě lepidla, které je do lože s práškem vstříknuto tiskovou hlavou podobnou inkoustové tiskárně. Mix prášku a pojiva ale nemůže dosáhnout stejných materiálových vlastností jako u ostatních technologií AM. 3DP je ideální technologií pro uživatele, kteří hledají nízkonákladová AM řešení pro projekty, kde se nevyžaduje vysoká přesnost nebo odolnost součástí. I když 3DP odkazuje na tuto specifickou technologii, je nyní termín také používán jako synonymum pro AM. [31]

**Rapid Prototyping (RP)** odkazuje na jakýkoli výrobní proces, který k výrobě součástí používá CAD data. Ačkoliv je starší termín „rapid prototyping“ stále široce používán i dnes, rozvoj průmyslu směřuje spíše k „direct digital manufacturing“, přímé digitální výrobě. 3DP byl z počátku využíván právě k RP, i když původním účelem této technologie bylo nahrazení zdlouhavého a nákladného procesu výroby forem pro nízko sériové výrobky. [31]

**STL (STereoLithography)** je formát vstupních dat modelu určeného pro 3DP a RP. Je to také výstupní formát 3D skenování. STL soubor popisuje pouze plochy modelu tvořené trojúhelníkovou sítí. Kvalita sítě určuje přesnost a minimální velikost přeneseného detailu CAD modelu. STL soubor nepopisuje barvu, textury ani jiné další atributy CAD modelu.

**Selective Laser Sintering (SLS)** je moderní výrobní technologie, která byla vyvinuta v devadesátých letech dvacátého století na Strojní fakultě Texaské Univerzity v Austinu (UTME).

Pojem „sintering“ odkazuje na proces, kde jsou objekty tvořeny z prášků za pomoci mechanismu atomární difuze. Ačkoliv se mechanismus atomární difuze vyskytuje v každém materiálu při teplotě nad absolutní nulou, proces lze významně urychlit za vyšších teplot, proto sintering zahrnuje předehřátí prášku a použití laseru, nejedná se však o natavování. Sintering je odlišný od natavování v tom, že v materiálu během procesu sintrování nikdy nedojde k fázové přeměně.

Ačkoliv je tento fakt důležitý z vědeckého hlediska, SLS dokáže pracovat i s natavováním. Co doopravdy rozhoduje o použitém přístupu je typ materiálu. Dřívější stroje používaly amorfni látku akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Technicky řečeno, amorfni látky nemají bod tání. Dle definice totiž tání zahrnuje změnu fáze z tuhé na kapalnou. Amorfni látky jsou vlastně spíše nadměrně podchlazené viskózní kapaliny a proto jsou již v kapalném stavu. Na rozdíl od látek krystalických a semikrystalických, které mají určitou diskretní teplotu tání/tuhnutí, látky amorfni jsou při ohřívání pouze kontinuálně méně pevné a více roztavené až kapalné. Amorfni látky nakonec při dalším ohřívání získají vlastnosti, podle kterých je možné látku uvažovat jako kapalnou. Tento bod je znám jako teplota skelného přechodu. [31]

Protože první SLS stroje byly používány pouze s ABS, byl pojem „sintering“ používán jako technicky nejpřesnější popis. Původní SLS patent je tak popsán s ohledem na tehdejší používání ABS. Ačkoliv se postupem času začaly používat i látky krystalické a semikrystalické, jako nylon a kovy, které tají během procesu SLS. Byl název „selective laser sintering“ již zaveden a dále používán i přes technicky špatné označení. Nyní je termínem „SLS“ označováno jakékoli použití usměrněného paprsku energie k selektivnímu sintrování nebo tavení určitých oblastí lože s práškem za účelem stavby objektu ve vrstvách. Původní patent UTME obsahuje oba druhy technologie, sintrování a tavení. [31]

Jedním z největších problémů, který do dnes přetrvává u konvenčního způsobu výroby je použití a výroba forem. Pro velkosériové výrobky je investice do forem nejčastěji nejlevnější a nejefektivnější způsob výroby. Stále je zde ale vysoké procento vysoce důležitých a nízko sériových součástí, pro které představuje použití forem nesčetné množství problémů. Nejlepším příkladem pro tento případ je letecký průmysl, který tvoří jeden z největších trhů pro technologie aditivního způsobu výroby. Problémy s formami v leteckém průmyslu se týkají hlavně velkých komerčních letadel, která se skládají z miliónů dílů a pro které je nutné formy skladovat, transportovat a pečlivě kontrolovat. Formy mohou s časem korodovat, proto musejí být velice pečlivě uskladněny, udržovány a musí na nich být neustále prováděna kontrola odlitého dílu s jeho původním návrhem. Konkrétní příklady součástí vyráběné v leteckém průmyslu jsou popsány v následující kapitole. S technologií SLS může jeden počítač zastat práci až stovky forem a eliminovat všechny náklady spojené s jejich uskladněním, převozem a korozi. Všechna data potřebná k výrobě dílu mohou být uložena na jednom místě s virtuální nekonečnou životností. [31]

Existují také technologie známé jako DMLS nebo SLM. Obě technologie jsou principem téměř identické s technologií SLS. Rozdíl spočívá například v dopravě materiálu do a po pracovním prostoru. Důvodem rozdílných názvů a s nimi spojených odchylek je, ale hlavně patentová odlišnost od SLS. [31]

**Fused Deposition Modeling (FDM)** bylo vynalezeno a patentováno v devadesátých letech dvacátého století Scottem Crumpem, který později založil společnost Stratasys. S technologií FDM je objekt vytvořen po vrstvách extrudováním taveného termoplastu. Materiál začíná tuhnut téměř okamžitě po vytlačení z trysky. FDM je jedna z levnějších metod 3D tisku. Většina FDM tiskáren tiskne s ABS (Lego) nebo s PLA (kyselina polymléčná).

Termín „Fused Deposition Modeling“ a jeho zkratka „FDM“ jsou registrované ochranné známky společnosti Stratasys. [31]

Velice známý a často skloňovaný v terminologii 3D tiskáren polymerů je termín RepRap. RepRap je otevřený (open source) projekt 3D tiskárny, který používá obdobný proces jako FDM a nazývá se „Fused Filament Fabrication“ (FFF). U FFF je materiál taven z tzv. tiskové struny, která je namotána na cívce. [32] [31]

## 10.2. SLM 280 HL

Selective Laser Melting (SLM) je technologie aditivní výroby. Principem je technologie SLM obdobná se SLS - Selective Laser Sintering nebo DLMS - Direct Laser Metal Sintering. Hlavním rozdílem mezi těmito technologiemi je vždy úplné protavení materiálu u technologie SLM. Proces SLM produkuje homogenní kovové součásti s nulovou pórovitostí. Katedra výrobních systémů a automatizace má k dispozici zařízení SLM 280 HL od společnosti SLM solutions GmbH. (obrázek 10.1)

Parametry 3D tiskárny jsou popsány v následující tabulce. Zařízení SLM 280 HL je schopné používat mnoho druhů tiskových materiálů: nástrojová ocel, nereozová ocel, kobalt chromová slitina, niklové slitiny, slitiny titanu, čistý titan, slitiny hliníku. [33]



**Obrázek 10.1:** SLM 280 HL [33] a pracovní prostor v počáteční fázi tisku vahadla

**Tabulka 6:** Parametry SLM 280 HL [33]

Stavěcí komora (pracovní prostor)	280 x 280 x 350	Spotřeba inertního plynu	Ar/N <sub>2</sub> , 2.5 l/min
Výkon a typ laseru	400/1000 W, YLR-Faser-Laser	Hmotnost	~ 1000 kg
Tloušťka vrstvy	20μm - 75μm / 100μm	Rozměry	1800 x 2400 x 1000
Minimální tloušťka stěny	150 / 1000 μm	Rychlost stavby	20 ccm/h 35 ccm/h
Tvorba podpurných struktur	ANO	Post-processing	pískování

### 10.3. Konkrétní aplikace - letecký průmysl

Společnost General Electric provádí radikální změnu ve výrobě. Letecká divize GE, největší dodavatel tryskových motorů na světě se připravuje na výrobu palivových trysek pro nové letecké motory. Trysky tentokrát nebudou odlévány a svařovány, ale tisknuty laserem, technologií známou jako additive manufacturing. Jak již bylo naznačeno v předchozím textu, AM je průmyslová verze 3D tisku, která se již používá k výrobě některých jiných speciálních předmětů. Touto technologií se vyrábí například medicínské implantáty nebo se používá k výrobě plastových prototypů pro strojní inženýry nebo designéry. Rozhodnutí pro masovou výrobu ocelové součásti s kritickou důležitostí, pro použití v tisících proudových motorech je pro technologii 3D tisku značný milník. Trysky budou použity v proudových motorech LEAP CFM, které budou vhodnou volbou například pro Airbus A320 nebo Boeing 737. V těchto letadlech by motory měly být k vidění koncem roku 2015. Motory nabídnou o 15% nižší spotřebu, nízkou nízkou cyklovou údržbu a řadu dalších výhod. Pro splnění poptávky po motorech muselo GE každoročně vyrobit 25 000 trysek, po dobu tří let. [34]

Výroba trysek aditivním procesem byla vybrána kvůli vyšší úspoře materiálu než konvenčními technologiemi. Nižší spotřeba materiálu značně snižuje výrobní náklady. Nižší hmotnost součásti také přináší významné úspory paliva letadla. Výroba trysky konvenčními technologiemi vyžaduje svařování okolo dvaceti menších dílů, což je velice namáhavý proces, který obsahuje vysoké procento odpadu. Namísto komplikované a nevýhodné konvenční výroby je tak součást vyrobena z prášku slitiny CoCr technologií 3D tisku. [35]

LEAP CFM není jediný tryskový motor vyvíjený s použitím technologie 3D tisku. GE momentálně vyvíjí proudový motor GE9X pro nový Boeing 777X. GE9X bude největší proudový motor jaký byl kdy postaven (obrázek 10.2). Revoluční jsou nízkotlaké lopatky motoru, které jsou vyrobeny metodou 3D tisku z prášku TiAl. Lopatky jsou až o 50% lehčí než tradiční odlévané z niklových slitin a mohou ušetřit až 20% hmotnosti celé nízkotlaké části motoru. Výrobní doba lopatek, 72 hodin je srovnatelná s dobou výroby při odlévání. I přes relativně vysokou cenu materiálu se jejich použití díky úspoře hmotnosti a spotřebě paliva více než vyplácí. Výroba Boeingu 777X je naplánována na rok 2017. První dodávka motorů GE9X je naplánována pro rok 2020. [36] [37]

První součást vyrobená metodou 3D tisku určená pro motory komerčních letadel byla vyrobena společností GE a dne 14.dubna 2015 byla certifikována Federální leteckou správou USA (FAA). Jedná se o jednu z největších změn týkající se proudových motorů. Součást slouží jako uložení tlakového senzoru T25 uvnitř proudového motoru na vstupu vysokotlaké části (obrázek 10.2). GE Aviation nyní pracuje ve spolupráci se společností Boeing na výměně této součásti ve více než 400 motorech GE90. [38]



**Obrázek 10.2:** Palivová tryska, uložení tlakového senzoru a proudový motor GE9X [36] [38]

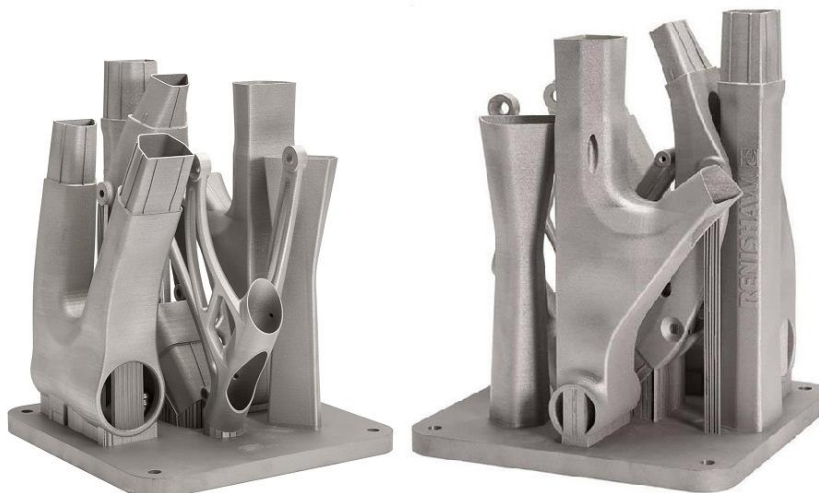
GE Aviation není jedinou divizí, kde se využívá tato technologie. Další divize GE, jako například Power&Water, která vyrábí velké plynové a větrné turbíny již identifikovala součásti vhodné pro aditivní technologii výroby. A například GE Healthcare vyvinula metodu k tisku převodníku drahých keramických sond používaných v sonografických přístrojích. [34]

Postupné opouštění konvenčních výrobních technik, jako odlévání a obrábění, dává product designerům společnosti GE obrovskou flexibilitu v jejich návrzích. Aditivní výrobní stroje pracují přímo s CAD daty a umožňují výrobu úplně nových tvarů bez ohledu na výrobní omezení konvenčních strojů. [34]

Aditivní výroba nezvyšuje flexibilitu pouze návrhu struktury a tvaru součástí, tedy celkového rozložení materiálu. Inženýři GE Aviation hledají způsob, jak použít více druhů slitin v jednom dílu. Jedná se především o slitiny titanu, hliníku a nikl-chromu. Lopatka motoru nebo turbíny by tak mohla být vyrobena z různých materiálů. Konec lopatky by například byl navržen na pevnost, zatímco zbytek těla lopatky na tepelnou odolnost. Aditivní výroba by tak umožnila přizpůsobení materiálových vlastností způsobem, který například pro odlévání není možný. [34]

## 10.4. Konkrétní aplikace - cyklistika

První vytisknutý rám jízdního kola vznikl ve Velké Británii v roce 2014 spoluprací mezi britským výrobcem 3D tiskáren Renishaw a výrobcí jízdních kol Empire Cycles. Empire Cycles navrhli horské kolo s ohledem na výrobu touto technologií z titanové slitiny Ti6Al7Nb. Slitina má smluvní mez kluzu  $R_{p0,2} = 905$  MPa a mez pevnosti  $R_m = 1020$  MPa. Rám kola je velice pevný, lehký a nese označení MX6-R. Tisknuté součásti rámu jsou na obrázku 10.3. [39]



**Obrázek 10.3:** Vytištěné titanové díly rámu Empire Cycles [39]

Empire Cycles nenavrhli pro tyto potřeby úplně nový rám, ale použili jejich stávající rám MX6-EVO. MX6-EVO je vyroben ze slitiny hliníku EN AW 6082T6. Jedná se o ručně vyráběný rám konvenční výrobou na CNC strojích a odléváním. Rám je kompatibilní s 26" i 27.5" koly, má odpruženou zadní stavbu, usazenou na jednom centrálním čepu se zdvihem zadního kola 150 mm. Zadní vahadlo je odlévané a má minimální tloušťku stěny 2,5 mm. Rám je určen pro přední vidlici se zdvihem 160 mm. Hlavový úhel je 66.5° a hlavová trubka je u horní rámové trubky zúžená pro větší tuhost. Rám obsahuje i standardní úchyt ISCG pro napínák řetězu. MX6-EVO je určen pro styl jízdy s označením enduro. [40]

Konstruktéři Empire Cycles tak provedli vlastně optimalizaci hmotnosti a tuhosti rámu MX6-EVO právě s ohledem na možnosti 3D tisku a s tím souvisejících nástrojů, jako je například optimalizace topologie. Optimalizace topologie byla použita na podpěry sedlové trubky, které jsou šroubované k horní rámové trubce (obrázek 11.17). Při porovnání obou rámu bylo dosaženo úspory hmotnosti 33.3 % ve prospěch titanového rámu. Úspora hmotnosti u sedlové trubky, byla díky optimalizaci topologie až 44.4 %. Rám byl s takto navrhnutou sedlovou trubkou podroben testům dle EN 14766, kde je uchycen za osy obou kol na vodorovné podložce a cyklicky zatěžován horizontální silou o velikosti 1200 N. Rám musí toto zatížení vydržet po dobu 50 000 cyklů. Trhlina nebyla objevena ani po trojnásobku uvedeného počtu cyklů. Porovnání obou typů rámu je na obrázku 10.4. Cena za prototyp MX6-R je prozatím až £20 000. Za tuto cenu je však na současném trhu dostupná spousta lehčích a levnějších MTB rámu, které jsou vyrobeny z uhlíkových vláken. Na tuto otázku odpověděl ředitel Empire Cycles, Chris Williams takto:

*„The durability of carbon fibre can't compare to a metal bike, they are great for road bikes, but when you start chucking yourself down a mountain you risk damaging the frame. I over-engineer my bikes to ensure there are no warranty claims“.* [39]



Jeho odpověď lze velmi volně přeložit jako vyzdvižení pevnosti a odolnosti kovových rámu a jejich výhody zejména pro horská kola, kde jsou pády někdy i denní záležitostí. I přes vysokou cenu titanového rámu se tak společnost Empire Cycles bude i nadále věnovat konstrukci rámu horských kol vyrobených technologií 3D tisku.



$m_{\text{Alrámu}} = 2.1 \text{ kg}$



$m_{\text{Tirámu}} = 1.4 \text{ kg}$



*Obrázek 10.4: Rámy horských kol Empire Cycles [39] [40]*

## 11. Optimalizace strojních součástí

Kvůli vysokému výpočtovému času musely být výpočty optimalizace prováděny souběžně s vývojem konstrukce Al rámu, proto je ukázka v této kapitole z počátku provedena na původním tvaru horního vahadla. Kapitola začíná krátkým připomenutím funkce dílu a jeho zatížení. Dále následuje ukázka použitých optimalizačních nástrojů s již konkrétními výsledky a jejich zhodnocením. V poslední části této kapitoly je proveden nový návrh již finálního vahadla.

### 11.1. Vahadlo

Vahadlo je součást mechanismu zadní stavby. Je uloženo na kuličkových ložiskách. Ložiska uprostřed vahadla jsou uložena na čepu, který je průchozí horní rámovou trubkou. V pravé části vahadla je na pevnostním šroubu uložen tlumič, v levé části jsou nalisována ložiska, která přes další čep spojují vahadlo se zbytkem mechanismu (obrázek 11.2). Materiál odlehčeného vahadla v těchto výpočtech je ocel z důvodů plánované výroby na 3D tiskárně katedry výrobního systému a automatizace v době kdy byl tento materiál v tiskárně pro další výrobu. Hmotnost návrhu vahadla, určeného pro konvenční výrobu ze slitiny hliníku EN AW 7020 je 221 g.

### 11.2. Zatížení vahadla

Zatížení vahadla a jeho průběh byl stanoven z dynamické simulace dle kapitoly 8. Výsledné zatížení, které se skládá ze tří reakcí v místech uložení ložisek, bylo rozděleno do tří skupin. V každé skupině je v tomto případě na jedno místo zatížení aplikována reakce a zbylá dvě jsou pevně vetknuta. Výsledné zatížení je tak dáno superpozicí těchto tří dílčích skupin.

Úloha optimalizace pak tedy nepočítá opakovaně pouze jednu úlohu MKP ale tři, popřípadě i více. Do řešení byla pro zvýšení příčné tuhosti doplněna odhadem i boční síla o hodnotě 100 N, jako čtvrtá skupina zatížení. Boční síla byla aplikována na plošný region v místě dotyku vahadla a těhlice.

### 11.3. Odlehčení součástí

Snížení hmotnosti původní verze vahadla bylo provedeno standardními CAD nástroji, bez použití optimalizačních výpočtů. Hmotnost takto odlehčeného, ocelového dílu je 438 g. Průběhy napětí nejsou optimální a oproti dalším metodám jsou vůči dosažené hmotnosti neúměrně vysoké a vzhledem k cyklickému namáhání pravděpodobně i na hranici meze únavy v určitých místech odlehčení (odhad, únavová studie nebyla provedena).



**Obrázek 11.1:** Návrh odlehčení a průběhy napětí Von Mises s maximální hodnotou 182 MPa

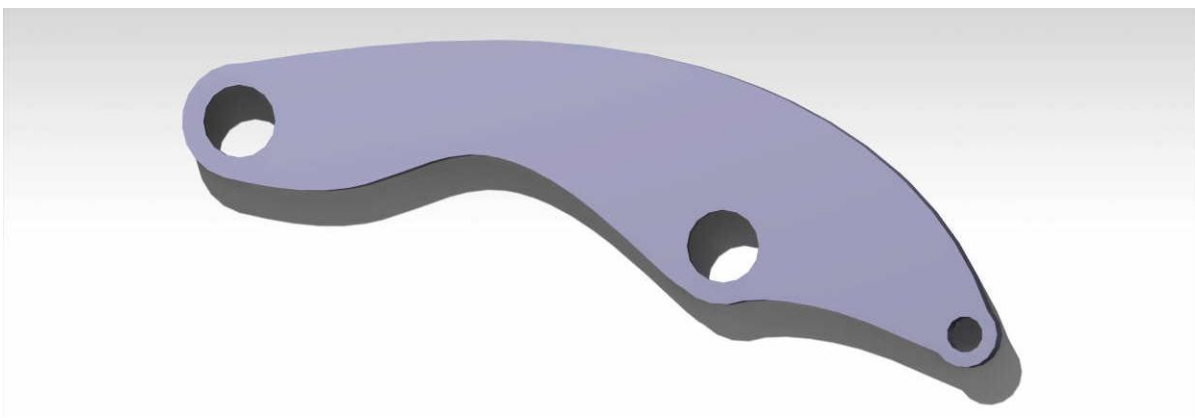
#### 11.4. Optimalizace tvaru obrysu vahadla

Výpočet byl proveden v PTC CREO 2.0. Byla provedena Optimization/Feasibility analýza. Vstupem pro analýzu je nadefinovaná úloha MKP dle kapitoly 9, požadavkem je minimální hodnota napětí s horní hranicí napětí Von Mises 50 MPa, minimální hodnota posunutí s horní hranicí pod 0.07 mm a minimální hodnota hmotnosti. Hodnota maximálního posunutí původního dílu byla 0.067 mm.

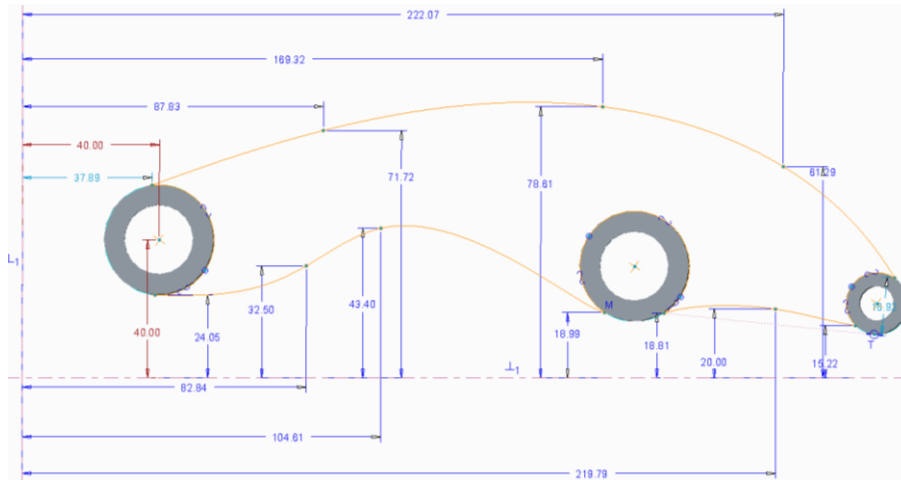
V optimalizační analýze rozlišujeme zpravidla tři typy parametrů: objective function, design constrains a design variables (viz následující kapitola). [41] Kde pro tuto úlohu platí:

Objective function:	minimalizace hodnot posunutí
Design Constrains:	max. hodnota napětí Von Mises max. hodnota posunutí , max. hmotnost = 0.7 kg
Design Variables:	poloha řídících bodů B-Spline křivek (obrázek 11.3)

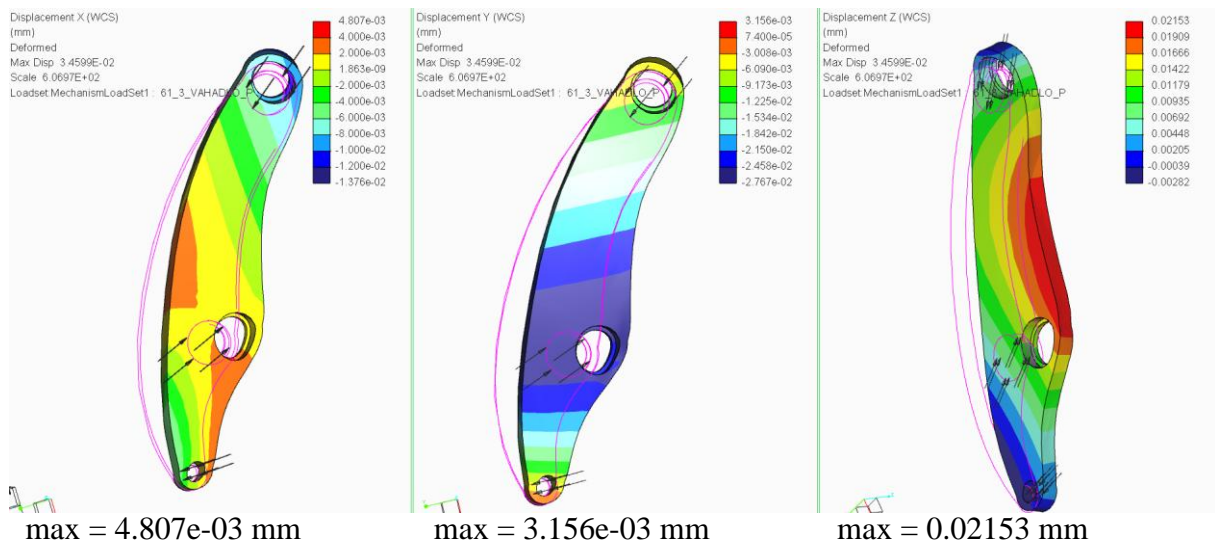
Vypočtený obrys je na obrázku 11.2 a 11.3. Hmotnost po optimalizaci je 0.684 kg. Hmotnost před optimalizací je 0.638 kg. Nárůst tuhosti vlivem optimalizace tvaru je přibližně o jeden řád ve všech směrech, zobrazeno na obrázcích 11.4 a 11.5.



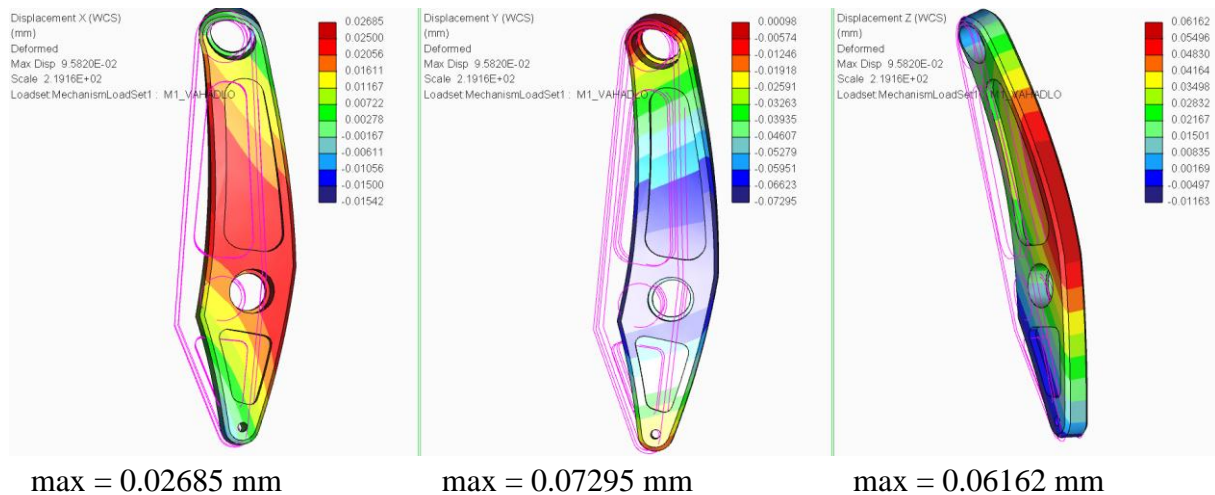
**Obrázek 11.2:** Optimalizace obrysu pomocí spline křivek



**Obrázek 11.3:** Zobrazení B-Spline křivek a kontrolních bodů (modře)



**Obrázek 11.4:** Zobrazení posunutí ve všech třech směrech, deformace je zobrazena s 10% zvětšením optimalizovaného návrhu

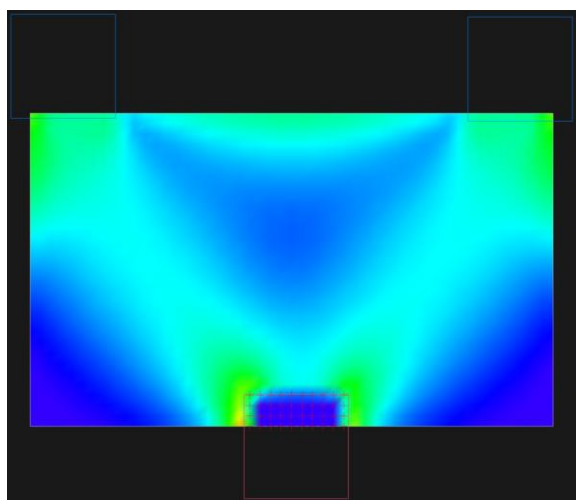


**Obrázek 11.5:** Zobrazení posunutí ve všech třech směrech, deformace je zobrazena s 10% zvětšením původního návrhu

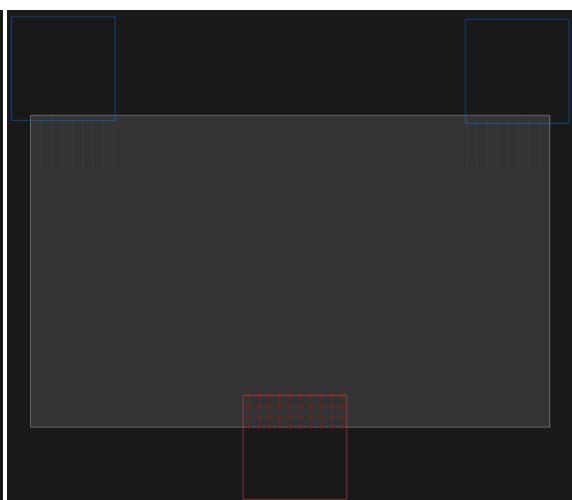
## 11.5. Optimalizace topologie

Optimalizace topologie (OT) je výkonná metoda strukturální optimalizace, která kombinuje výsledky numerických metod. Obvykle se jedná o metodu konečných prvků s optimalizačním algoritmem, kde typ úlohy je najít optimální rozdělení nebo rozložení materiálu uvnitř přesně specifikované oblasti (domény). Při návrhu topologie tak rozhodujeme které body v oblasti budou materiál a které budou prázdné. [42]

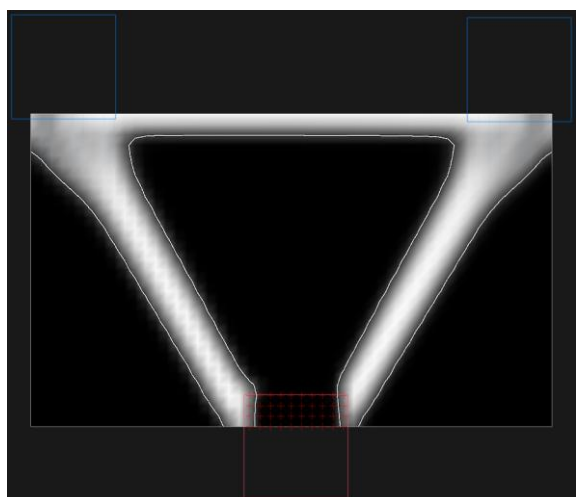
Ilustrace metody OT pomocí výukového softwaru TOPOSTRUCT je zobrazena na obr. 11.6 až 11.8. Na obr. 11.10 je blokové schéma optimalizační procedury a na obr. 11.11 její princip.



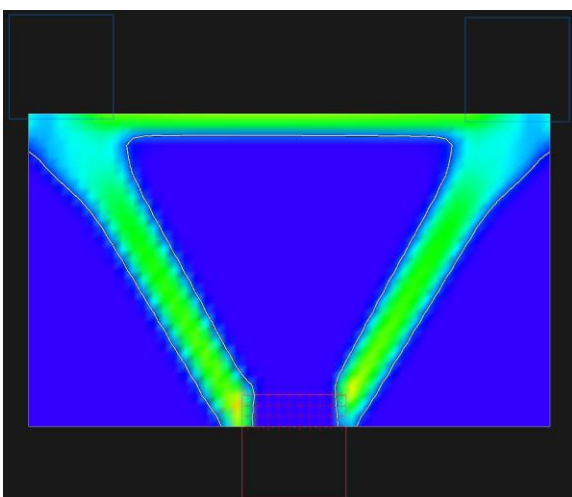
**Obrázek 11.6:** Analyza MKP dané oblasti, červeně - podpora, modře vertikální zatížení



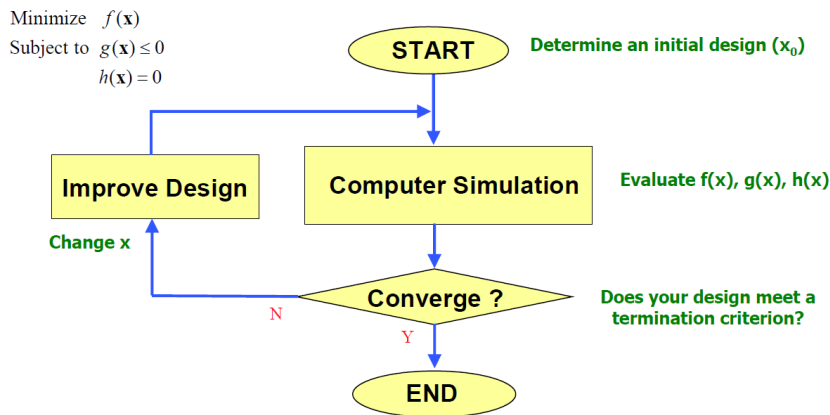
**Obrázek 11.7:** 2D oblast určená k OT



**Obrázek 11.9:** OT - 18 iterací



**Obrázek 11.8:** OT - průběh napětí

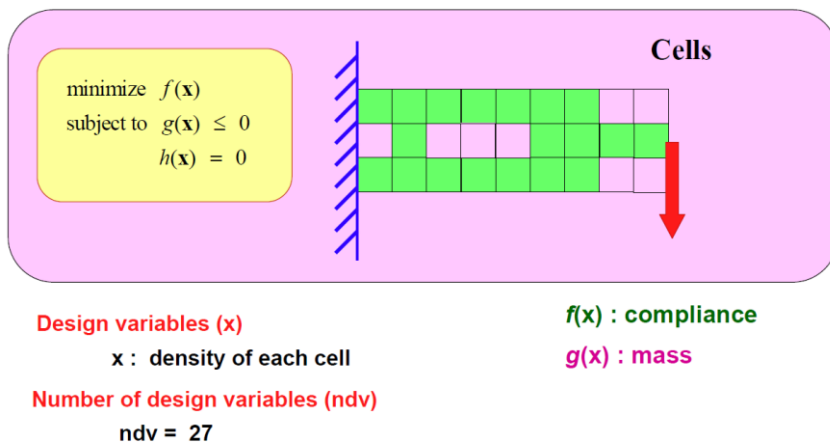


**Obrázek 11.10:** Blokové schéma optimalizační procedury [41]

OT se principiálně neliší od optimalizace tvaru součástí. Jsou zde v zásadě stejné tři typy parametrů: objective function, design constrains, design variables. [41] Kde pro úlohu na obr. 11.11 platí:

Objective function $f(x)$ :	poddajnost
Design Constrains $g(x), h(x)$ :	hmotnost, napětí
Design Variables $(x)$ :	hustota konečně prvkové sítě

Tzv. návrhová proměnná je v tomto případě každý prvek sítě MKP. Příklad na obrázku 11.11 má tak těchto proměnných 27. V literatuře [41] dále dělí design constrains na dva typy:  $h(x) = 0$  (equality constrains) a  $g(x) \leq 0$  (inequality constrains).



**Obrázek 11.11:** Princip optimalizace topologie [41]

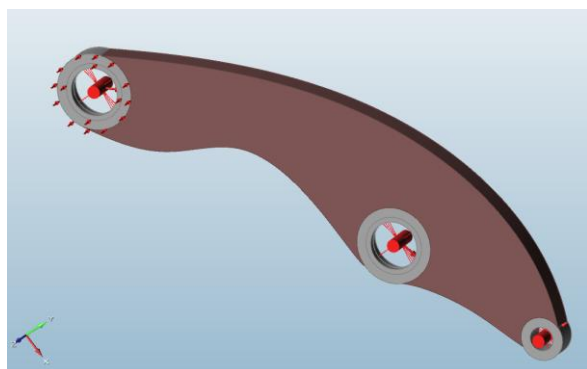
Po krátkém teoretickém úvodu můžeme nyní v dalších kapitolách přejít k OT samotné součásti, pro kterou byly použity dva softwary: CAESS ProTopCI a ALTAIR solidThinking Inspire 2014.

## 11.6. OT pomocí Altair solidThinking Inspire

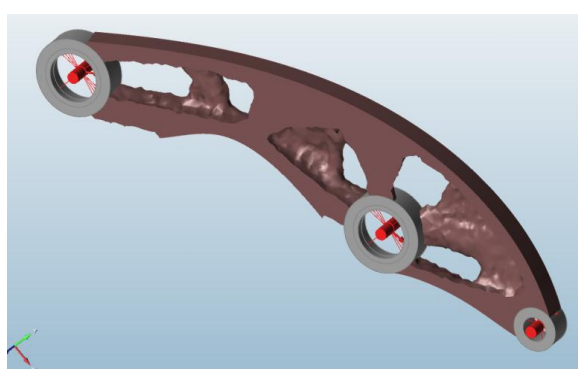
Celkem bylo provedeno několik výpočtů, které se liší v definované oblasti návrhu, počtu konečných prvků a způsobu zatížení. Materiál vahadla je ocel AISI 304. Inspire nabízí dva typy OT, minimalizace hmotnosti s koeficientem bezpečnosti a maximální tuhost s cíleným objemem (%). Pro oba přístupy je zde i nastavení týkající se oblasti vlastní frekvence.

Parametr vlastní frekvence a OT má dnes uplatnění například v tuhých rámech velkých hydraulických lisů. Kde je snaha při konstrukci rámu minimalizovat hmotnost a upravit její rozložení tak, aby byl materiál při zatížení co nejvíce využit. U velkých hydraulických lisů se kromě OT také využívá také optimalizace polohy dělení a velikosti spojovacích šroubů, dělení traverz, tloušťky žebrování atd. [43]

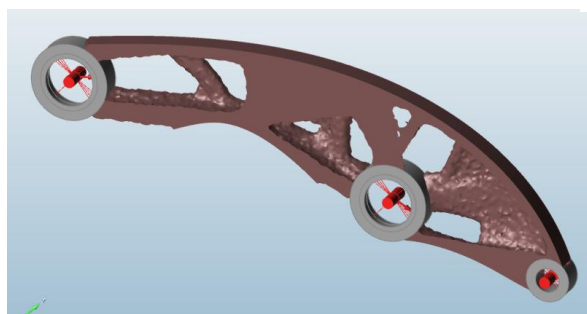
V této práci jsou z důvodu kratšího výpočtového času výsledky pouze s přístupem maximální tuhosti pro daný objem. Zatížení součásti je dle kapitoly 11.2. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, v OT rozlišujeme dva typy oblastí, návrhová - hnědá a nenávrhová - šedá.



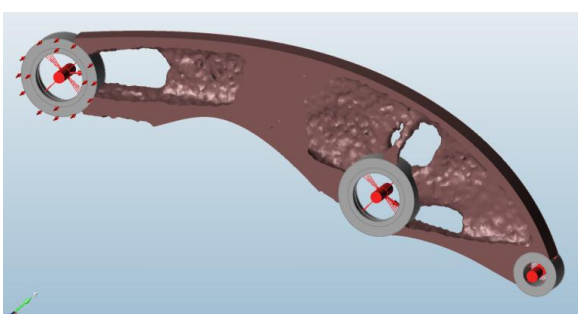
**Obrázek 11.13:** Návrhová oblast importována z výpočtu opt. tvaru,  $m=0.684$  kg



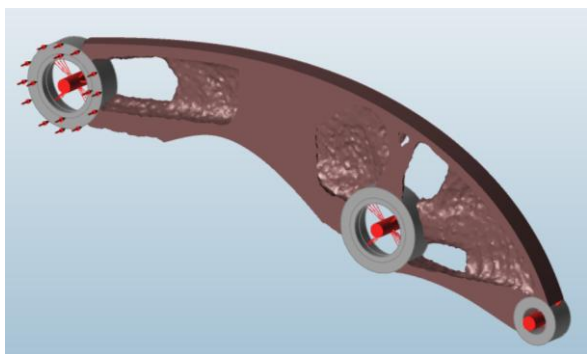
**Obrázek 11.12:** OT maximální tuhost při 45 % max.hmotnosti s průměrnou velikostí 1 prvku cca 2.05mm,  $m=0.401$  kg



**Obrázek 11.15:** Maximální tuhost při 40% max. hmotnosti s průměrnou velikostí 1 prvku cca 1.66 mm,  $m=0.344$  kg



**Obrázek 11.14:** Maximální tuhost při 40 % max. hmotnosti s průměrnou velikostí 1 prvku cca 2.05 mm,  $m=0.366$  kg, přidána boční síla  $F=100$  N



**Obrázek 11.16:** Maximální tuhost při 40 % max. hmotnosti s průměrnou velikostí 1 prvku cca 1.33 mm,  $m=0.359$  kg, přidána boční síla  $F=100N$

Software Inspire umožňuje snadné sestavení úlohy MKP a snadné provedení procedury optimalizace. Nemá však základní funkce. Například síťování CAD modelu probíhá automaticky a uživatel ho může ovlivnit pouze nastavením velikosti elementu. Síť nelze zobrazit. Dále chybí zobrazení průběhu konvergence a další hlubší nastavení řešiče a použitých numerických metod.

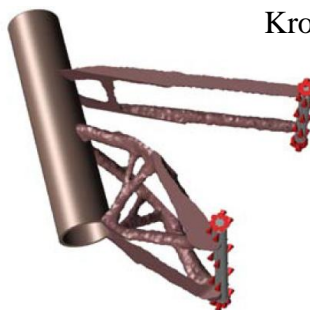
Absence těchto funkcí odpovídá použití tohoto programu. Program má za úkol rychle navrhnout vhodné rozložení materiálu, další práce je pak na konstruktérovy, který návrh exportuje do CAD softwaru, kde má možnost předělat neoptimalizovanou součást do podoby optimalizované součásti a dále ji upravovat. Na obrázku 11.17 je takovýto postup zobrazen po krocích. Krok 1 ukazuje původní CAD model ze slitiny hliníku, navržený pro odlévání. Krok 2 představuje výsledek optimalizace topologie. Krok 3 je přepracovaný CAD model a na kroku 4 je vyfotografován přepracovaný díl vyrobený technologií 3D tisku ze slitiny titanu Ti6Al7Nb.

Krok 1.

$m_{Al} = 360$  g



Krok 2.



Krok 3.



Krok 4.

$m_{Ti} = 200$  g



**Obrázek 11.17:** Postup při optimalizaci topologie, sedlová trubka rámu Empire Cycles, vyrobená 3D tiskem ze slitiny Ti [39]



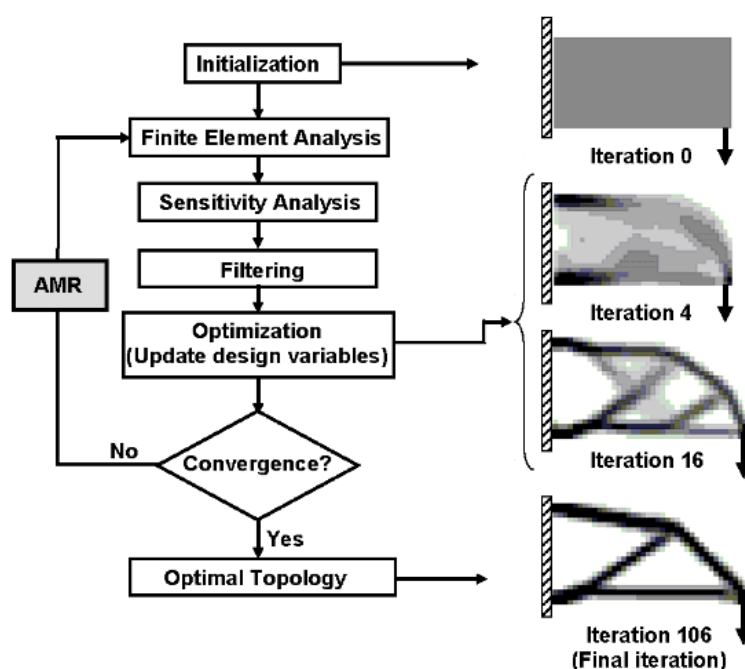
## 11.7. OT pomocí CAESS ProTOpCI a PTC CREO 2.0

ProTOpCI funguje jako modul pro PTC Creo 2.0 Simulate, existuje však i samostatná verze. Výhodou tohoto softwaru je, že síť spolu s celou úlohou MKP (zatížení, OP) se odesílá z prostředí Simulate, lze tak využít veškerých nástrojů na síťování, kterými Creo disponuje, tzn. využití i různých hustot sítě pro různé oblasti a významně tak krátit výpočtový čas.



**Obrázek 11.18:** Síť MKP optimalizovaného dílu,  $m=0.104\text{kg}$ , díl je bez přídavků na obrábění a opěrných stěn ložisek, kvůli menšímu počtu prvků, pro urychlení výpočtu

Z obrázku 11.18 je zřejmý rozdíl v hustotě sítě návrhové a nenávrhové oblasti. Síť v nenávrhové oblasti nesmí být příliš hrubá, při vyhlazování pak vznikají v modelu díry. Problémem je, že řešená oblast je pro řešič spojitá - nasítována v celku, nehledě na návrhovou nebo nenávrhovou oblast, počty uzlů na hranicích těchto dvou oblastí tedy musí být stejné, což po OT vede k „hrbolaté“ struktuře právě na těchto hranicích. Tento problém řeší použití metody Adaptive Mesh Refinement (AMR). AMR je relativně nový trend v OT, jedná se o využití tzv. adaptivního algoritmu pro tvorbu sítě MKP. Řešič během výpočtu sám mění lokální hustotu sítě. Princip metody ilustruje následující blokové schéma.



**Obrázek 11.19:** Blokové schéma OT s Adaptive Mesh Refinement [42]

V OT jsou pro dosažení přesného řešení úlohy většinou počítány na pevně daných sítích o velmi vysokém počtu prvků s konstantní hustotou prvků. S prázdnými podoblastmi (díry nebo oblast kde neprobíhá přenos zatížení) řešené oblasti je efektivnější tyto reprezentovat s menším počtem větších prvků, naproti tomu povrch oblasti je nutné reprezentovat větším počtem menších prvků. Cílem AMR je získání přesného řešení s daleko menšími výpočetními náklady. Toho je dosaženo redukcí celkového počtu konečných prvků sítě pouze na oblasti kde jsou nezbytně nutné. Vysoce přesné řešení optimalizačního problému bez použití AMR může obsahovat tak vysoké množství prvků, že je nedosažitelné. Metodu AMR ProTopCI ani Inspire neobsahují. [42]

Během výpočtu v ProTopCI lze přímo sledovat operace které řešič provádí, průběh OT je po snímcích zobrazován ve 3D v grafickém prostředí ProTOpCI, ze sítě MKP jsou postupně odebírány prvky. Software také nabízí oproti předchozímu relativně širokou paletu nástrojů pro vyhlazení ploch modelu. Díky vyhlazovacím nástrojům, jemné síti a možnému použití 3D tiskárny je teoreticky možná okamžitá výroba bez nutnosti přemodelování.

ProTopCI nabízí nejen optimalizaci topologie ale i úpravu modelu pomocí tzv. mřížových funkcí (obrázek 11.20) nebo pomocí přidání dutin (shell) do předem vyznačeného objemu v modelu. Rozdělení oblastí musí být provedeno již v prostředí Creo Simulate.



**Obrázek 11.20:** Mřížová funkce, typ hexagon

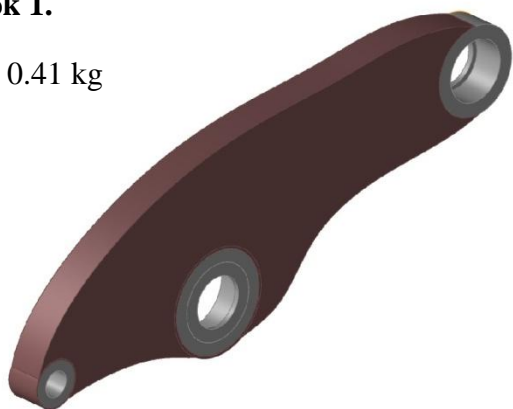
## 11.8. OT vahadla finálního návrhu Al rámu

OT konečného návrhu vahadla Al rámu byla provedena s pomocí Altair solidThinking Inspire. Úloha MKP byla sestavena s hodnotami reakcí z dynamické simulace, je využit princip superpozice pro tři zatěžující stavy. Vždy je aplikována pouze jedna reakce. Na zbylá dvě zatěžující místa jsou aplikovány cylindrické vazby s volnou rotací. Návrhovou oblast tvoří obrys optimalizovaný na úlohu dle kapitoly 9.1. Výpočet optimalizace obrysu byl proveden v Creu, dle kapitoly 11.4. Cílem optimalizace topologie bylo získat maximální možnou tuhost při hmotnosti okolo 25 % návrhové oblasti. Materiál použitý pro výpočty je slitina hliníku EN AW 6061 s hustotou  $2710 \text{ kg/m}^3$ .

Na obrázku 11.21 je zobrazen postup při OT této součásti. V první kroku byl optimalizovaný tvar obrysu součásti z Crea přenesen do prostředí Altair Inspire, kde byla vyznačena návrhová oblast. Byly zadány okrajové podmínky, dané zatížení a byl spuštěn výpočet OT. V kroku 2 je zobrazena vypočtená struktura.

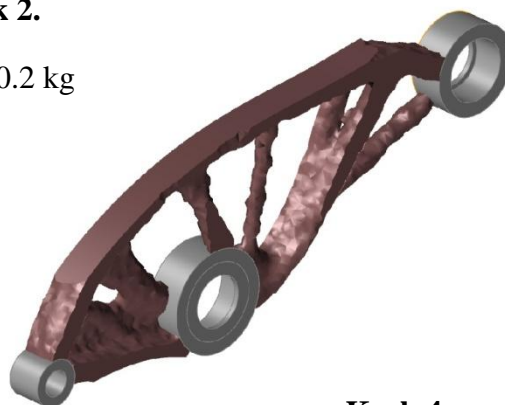
### Krok 1.

$m = 0.41 \text{ kg}$



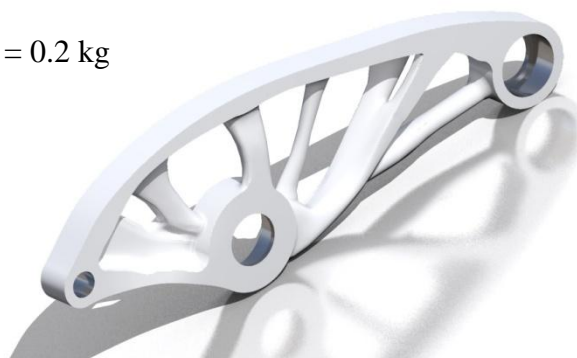
### Krok 2.

$m = 0.2 \text{ kg}$



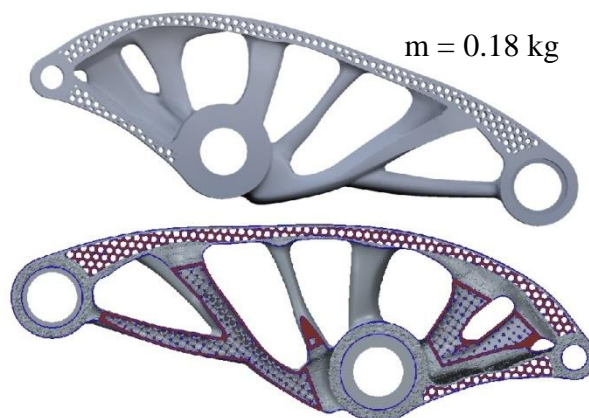
### Krok 3.

$m = 0.2 \text{ kg}$



### Krok 4.

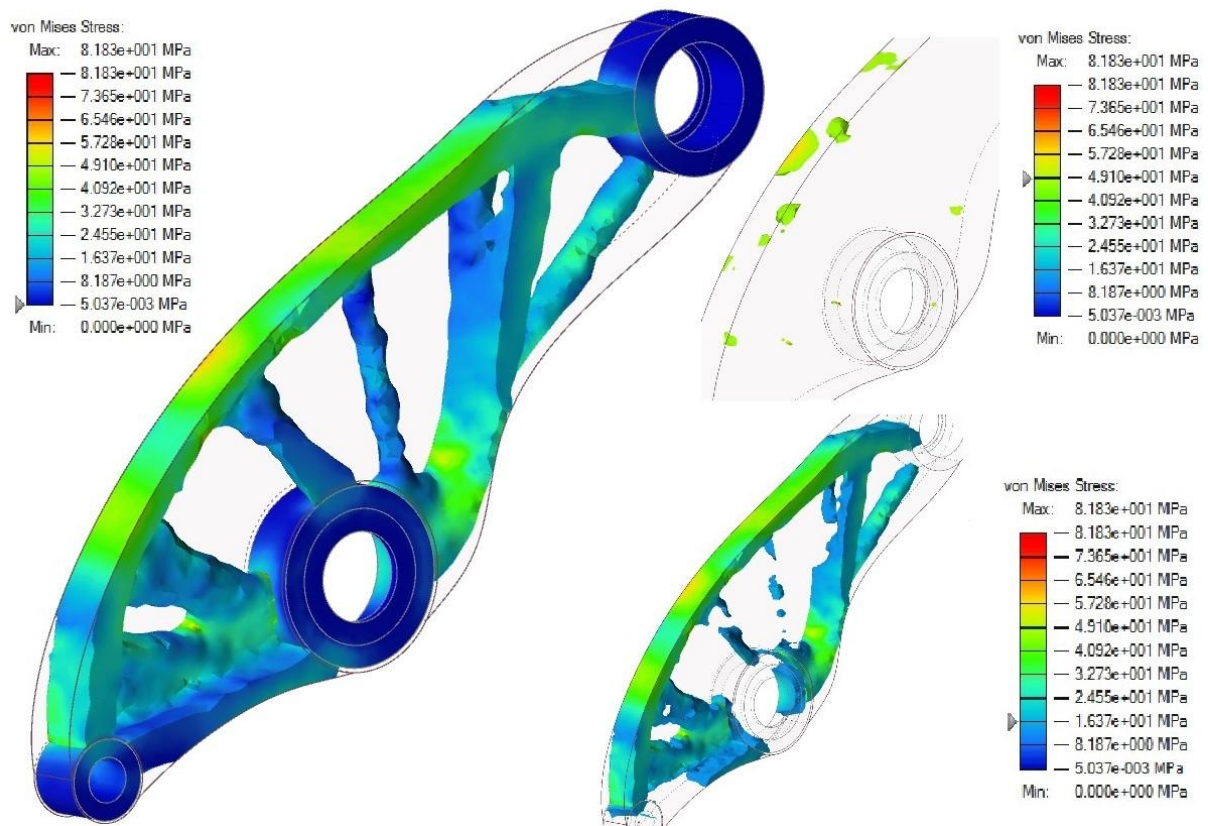
$m = 0.18 \text{ kg}$



*Obrázek 11.21: Postup při OT s využitím 3D tisku*

V softwaru Altair byla provedena i napěťová kontrola optimalizované struktury. Nejvyšší hodnoty napětí jsou okolo  $81 \text{ MPa}$  a to pouze v několika uzlech. Tyto špičky jsou pravděpodobně způsobeny nedostatečně jemnou sítí. Síť byla nastavena na  $0.5 \text{ mm}$  pro minimální délku hrany prvku,  $1.5 \text{ mm}$  pro průměrnou délku hrany prvku.

Rozložení napětí Von Mises je zřejmé z obrázku 11.22, kde v jeho pravé části jsou ze zobrazení vyjmuty řešení nejprve pod 16 MPa (spodní) a poté pod 49 MPa (horní).



**Obrázek 11.22:** Průběhy napětí vypočtené struktury

Díky relativně nízkým hodnotám napětí bylo provedeno další odlehčení, tentokrát v softwarech ProTOpCI a Creo. Nejprve bylo nutné s pomocí vypočtené struktury přemodelovat stávající CAD model. Provedení této operace je zobrazeno v kroku 3. Po přemodelování byly v prostředí Simulate v modelu vytvořeny tři objemové regiony, kterým byla přidělena různá materiálová označení. První objemový region označuje celou součást, druhý region označuje oblast vytvoření hexagonové struktury a třetí region označuje oblast vytvoření dutin s mřížovou strukturou. Po vytvoření těchto oblastí je model přesunut do prostředí ProTOpCI, kde je přes jednoduchý skript napsán program pro úpravu modelu, dle kroku 4. Kódová označení dostupných a použitých typů struktur jsou zobrazeny na obrázku 11.23.

## Použitý skript:

```

* Material regions information
*
* {Id=1; Name=soucast; Code=1}
* {Id=2; Name=hexagon; Code=1}
* {Id=3; Name=shell; Code=1}
*
* Default: Full solid structure
(normal mode)
*
Set.Gen.RegionMatList = *
Set.Gen.IniTopParValue = 0.001
Cmd.CreateSolid
*
* Lattice region
*
Set.Gen.RegionMatList = 2
Set.Lat.TypeCode = 202
Set.Lat.Origin = 0,0,0
Set.Lat.CellSize = 2
Set.Lat.CellScale = 1,1,1
Set.Lat.Rotation = 0,0,0
Set.Lat.ThicknessMin = 1
Set.Lat.ThicknessMax = 1.5
Cmd.CreateLattice
*

```

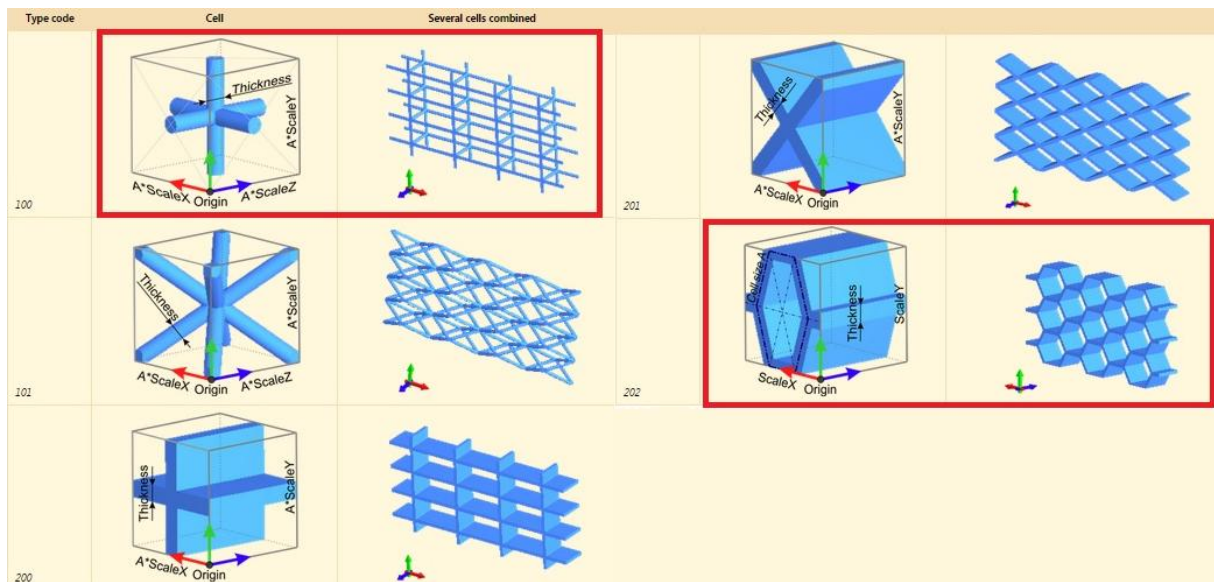
```

* Lattice region
*
Set.Gen.RegionMatList = 1.
Set.Lat.TypeCode = 100
Set.Lat.Origin = 0,0,0
Set.Lat.CellSize = 3
Set.Lat.CellScale = 1,1,1
Set.Lat.Rotation = 0,0,0
Set.Lat.ThicknessMin = 0.9
Set.Lat.ThicknessMax = 1.5
Cmd.CreateLattice

* Shell region
*
Set.Gen.RegionMatList = 1
Set.Shell.ThicknessMin = 1.5
Set.Shell.ThicknessMax = 2
Cmd.CreateShell
*

```

## Dostupné typy mřížových struktur:

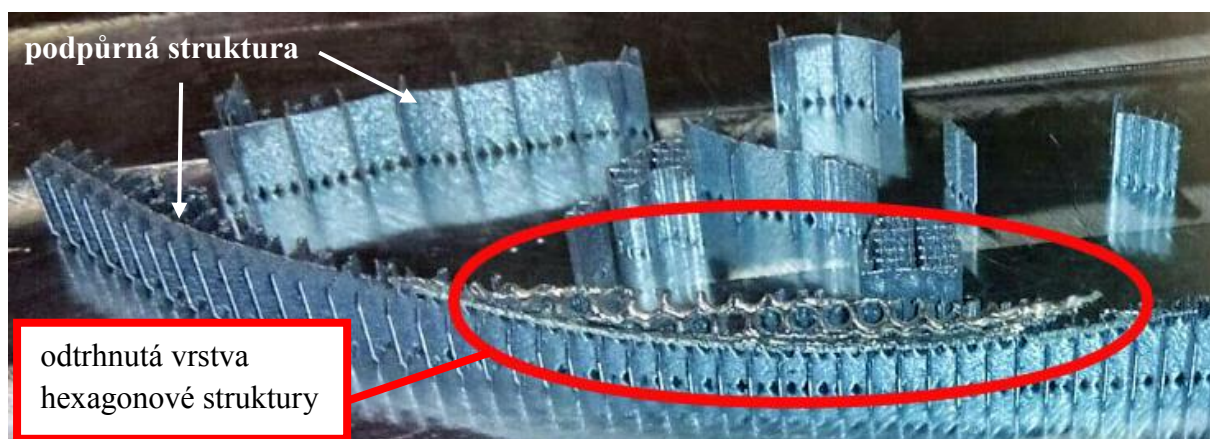


**Obrázek 11.23:** Dostupné typy mřížových struktur a jejich kódová označení, červeně jsou zvýrazněné použité struktury [44]

## 11.9. Výroba konečného návrhu vahadla

Výroba součásti byla provedena na 3D tiskárně katedry výrobních systémů a automatizace SLM 280 HL. Použitý materiál je AlSi12, který má mez pevnosti  $R_m = 409$  MPa a smluvní mez kluzu  $R_{p0,2} = 211$  MPa. [45] Po vytvrzení vzorku pro tahovou zkoušku, byla však naměřena vyšší hodnota smluvní meze kluzu,  $R_{p0,2} = 280$  MPa. Tisk proběhl v ochranné atmosféře inertního plynu.

Výrobní stroj a princip je popsán v kapitole 10. Před spuštěním operace je nutné CAD model převést do formátu STL a upravit v softwaru 3D tiskárny. Byly přidány přídatky na obrábění a bylo zvoleno umístění podpor. Umístění podpor je důležitým faktorem při výrobě aditivní technologií, díl totiž postupně chladne a tepelnou dilatací vzniká vnitřní pnutí. Vznik vnitřního pnutí a jeho důsledky (deformace) mohou být důvodem pro přerušení výroby, jelikož výroba vzniká postupným nanášením dalších vrstev. Součást leží na podporách, které jsou nataveny k vyjímatelné ocelové desce s vysokou jakostí povrchu. Při prvním pokusu se výroba nezdařila právě kvůli nedostatečnému množství podpor a součást se již v počáteční fázi zdeformovala. (obrázek 11.24)



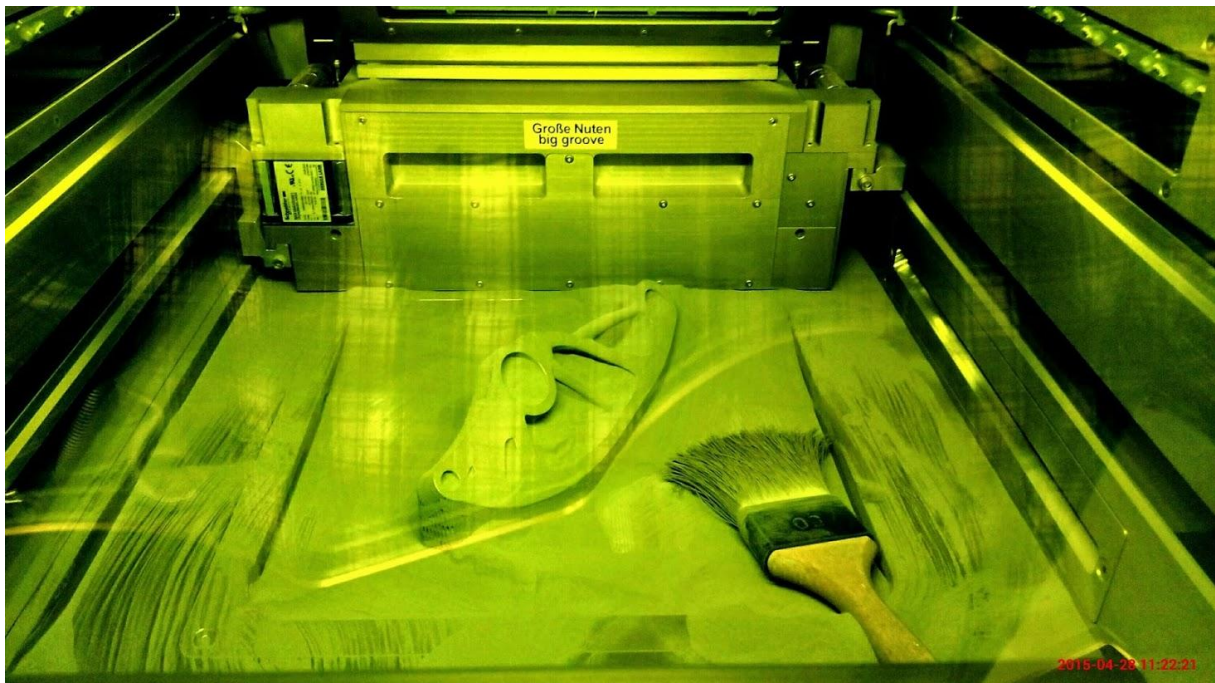
**Obrázek 11.24:** Původní umístění podpor na vnějších plochách, detail ukazuje odtrženou první vrstvu vahadla od podpor vlivem vnitřního pnutí, díl byl pozicován v horizontální poloze

Kvůli nekvalitní STL síti došlo navíc i k poničení hexagonové struktury již v modelu, proto byla z dílu vyjmuta.

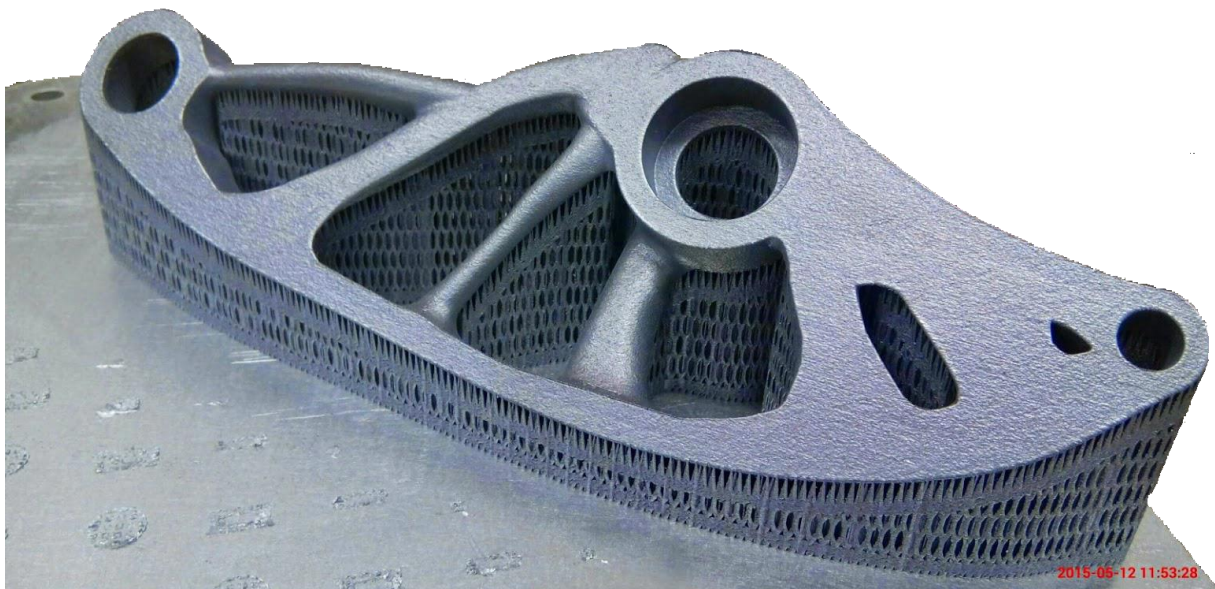
Po ukončení procesu 3D tisku byla součást úplně ponořena v loži se zbytkovým práškem. Pro vyjmutí součásti z pracovního prostoru 3D tiskárny musí být zbytkový materiál za pomoci štětce přesunut do zásobníku, za postupného vysouvání desky se součástí (obrázek 11.25). Zbytkový materiál lze po přesetí vestavěným filtračním zařízením znovu použít.

Po vyjmutí vychladnutého dílu z pracovního prostoru a důkladné inspekci, byla součást i s ocelovou deskou vložena do pece na tepelné zpracování (obrázek 11.26). Tepelné zpracování se provádí v popouštěcí peci o teplotě  $200^{\circ}\text{C}$ , po dobu 7 hodin. Tím byl vyvolán umělý, urychlený proces stárnutí. Díl byl zbaven vnitřního pnutí a vytvrzen na lepší mechanické vlastnosti. Poté byla z desky dlátem odsekána podpurná struktura a díl byl opískován. Další úpravy povrchu probíhaly ručně pilníkem a smirkovými papíry s různou

hrubostí. V tomto stavu (spodní vahadlo) je součást zobrazena na obrázku 11.27. Díry pro ložiska budou před montáží dodatečně vystruženy na průměr 30 a 24 mm H7 a součást bude lakována, kvůli ochraně proti korozi.



*Obrázek 11.25: Náhled do pracovního prostoru SLM 280 HL po ukončení procesu výroby, během očišťování součásti a přesouvání zbytkového prášku do zásobníku*



*Obrázek 11.26: Očištěná součást s podpůrnou geometrií po vyjmutí z pracovního prostoru*



*Obrázek 11.27: Vyrobená horní vahadla, spodní vahadlo po ručním opracování, vrchní pouze po pískování*

## **12. Zhodnocení návrhu součásti metodou OT a její výroby**

Optimalizace topologie horního vahadla původní konstrukce Al rámu byla provedena ve dvou softwarech, Caess ProTOpCI a Altair Inspire. ProTOpCI v propojení s modulem Creo Simulate nabízí daleko větší kontrolu nad výpočtem a jeho výsledkem. Výpočet a i samotné připravení úlohy MKP včetně upravení modelu pro ProTOpCI, je ale časově velice náročné. Naopak, výpočet optimalizace topologie v Altair Inspire, pro cílený objem okolo 40 %, byl daleko rychlejší záležitostí. Nedostatek kontroly nad síťováním CAD modelu Inspire dohání rychlostí výpočtu a sestavení úlohy MKP. V Inspire lze v rámci hodin získat i několik různých řešení s odlišným zatížením, odlišným cíleným objemem, použitým materiálem atp. Mezi vypočtenými strukturami lze v prostředí Inspire i díky malému počtu KP snadno přepínat a vypočtené struktury zkontrolovat metodou MKP. V ProTOpCI bylo obtížné importovanou síť kvůli vysokému počtu KP i řádně zkontrolovat. Strukturu vypočtenou v ProTOpCI by nebylo možné na použitém PC kvůli nedostatečnému výpočetnímu výkonu ani přemodelovat.

Nejpřesnější a nejlepší výsledky byly dosaženy se softwarem ProTOpCI, kde se podařilo najít řešení s hmotností původního návrhu vahadla 0,1 kg, při napětí Von Mises  $< 30$  MPa. Výpočet takto malého objemu se v Inspire nezdařil. Pro dosažení konvergentního řešení musely být základní rozměry konečného prvku velice sníženy a výpočet končil kvůli nedostatku výpočetního výkonu nebo i nedostatku volného místa na HDD.



Jak ukázaly odlišnosti vypočtených struktur (kapitola 11.6), OT je metoda vysoce citlivá na okrajové podmínky a zatížení. Při nesprávně interpretovaném zatížení, nebo i při zanedbání jeho některých složek může snadno dojít k poddimenzování v určitém směru nebo i k úplně špatnému řešení.

Na obrázku 12.1 je zobrazena další demonstrace vlivu OP, kde v první variantě jsou oba spodní rohy vetknuty (levá část obrázku) a v druhé variantě je jeden vetknut a druhý podepřen pouze ve svislém směru. [43]

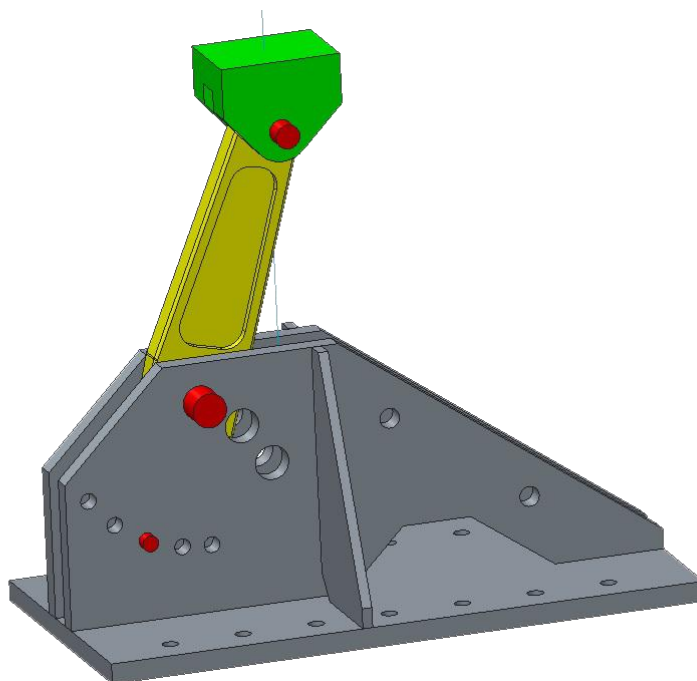


**Obrázek 12.1:** Demonstrace vlivu OP, červená - výsledný tvar, modrá - odebraný materiál [43]

Ve všech případech OT bylo uvažováno pouze maximální zatížení, stanovené z dynamické simulace. Je otázka, jaká by byla podoba součásti po zavedení další skupiny zatížení, například z jízdy v sedě. Toto zatížení je sice menší v absolutní hodnotě, je však častější a působí v odlišných úhlech. Pro validní OT tohoto typu součásti je vhodné použít větší množství zátěžových stavů, což nadále zvyšuje časovou náročnost nejen samotného výpočtu, ale i sestavení úlohy. OT se tak spíše hodí pro součásti, u kterých se příliš nemění směr zatížení.

Po vypočtení optimalizované struktury mohlo být díky způsobu výrobní technologie provedeno další odlehčení použitím vnitřních, tzv. mřížových struktur. Do optimalizovaného tvaru byly vytvořeny dutiny, do kterých byla vložena mřížová struktura a po obvodu vahadla byla také vytvořena hexagonová struktura, která ale musela být z návrhu nakonec vyjmuta, z důvodů uvedených v kapitole 11.9. Konečný návrh vahadla s dutinami, bez vnitřní a obvodové struktury byl zkontrolován metodou MKP. Bylo dosaženo obdobných výsledků jako v případě, který je na obrázku 11.22, kde byla minimální hodnota bezpečnosti stanovena na hodnotu 5.5 pro EN AW 6061 se smluvní mezí kluzu 240 MPa. Bezpečnost a struktura je vypočtena pro stav zatížení dopadu na zadní kolo s dynamickým koeficientem o velikosti 3. Vyrobený díl, ale navíc obsahuje výztužnou vnitřní strukturu a je zhotoven z materiálu s lepšími mechanickými vlastnostmi. Skutečnou únosnost dílu tak ukáže až jeho fyzické testování.

Pro laboratorní testy vypočtených struktur byl navržen přípravek, který se skládá ze tří svařených plechů a dvou bočních žeber (obrázek 12.2). Přípravek byl navržen tak, aby umožnil měnit polohu upnutí vahadla a tím i směr zatížení v několika úhlech, které odpovídají například jízdě v sedě, ve stoje nebo při dopadu na zadní kolo. Laboratorní testy, ale vzhledem k rozsahu diplomové práce nebyly provedeny. S ohledem na konstrukci přípravku a tedy provedení laboratorních testů, byl i změněn způsob zatížení pro OT konečného návrhu vahadla (viz kapitola 11.8), oproti úloze OT pro původní návrh vahadla.



**Obrázek 12.2:** CAD model návrhu přípravku pro laboratorní zatěžování, zeleně - zjednodušený model upínacích čelistí zatěžovacího stroje

Součást v podobě konečného návrhu, bez hexagonové struktury byla vyrobena na 3D tiskárně KSA. Hmotnost vyrobené součásti je 160 g a zahrnuje i zbývající materiál, který je stále obsažen v dutinách součásti. Zbývající materiál má podobu nespečeného prášku a pro jeho vysypání by bylo nutné součást na několika místech navrtat. Celkové porovnání dosažených hmotností veškerých návrhů horního vahadla zobrazuje následující tabulka.

**Tabulka 7:** Porovnání dosažených hmotností různých návrhů konstrukce horního vahadla

Vahadlo	Materiál	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnost [g]
Prvotní návrh (konvenční výroba)	slitina hliníku	2710.2	221
Prvotní návrh CAD odlehčení	ocel	7827.08	438
Prvotní návrh opt. tvaru	ocel	7827.08	684
Prvotní návrh OT Inspire	ocel	7827.08	344
Prvotní návrh OT ProTOpCI	ocel	7827.08	104
Konečný návrh (konvenční výroba)	slitina hliníku	2710.2	215
Vyroběný konečný návrh (3D tisk)	prášek AlSi12	neuveďeno	160

## 13. Závěr

Tato práce obsahuje konstrukční návrh rámu jízdního kola. Návrh byl proveden s ohledem na specifikace zadavatele. Mezi které patří například možnost protočení přední vidlice pod rámem, větší citlivost a vyváženost zadního zavěšení z pohledu jízdních vlastností a nižší hodnoty natočení kliky pohonu vlivem komprese zavěšení. Další důležitou vlastností návrhu je použití standardních profilů a jednoduchých konstrukčních prvků, které nepřesahují možnosti konvenční výroby.

Hlavním konstrukčním úkolem nebyl návrh nového způsobu zavěšení, ale použití jednoho z osvědčených a jeho aplikace do návrhu rámu kola s takto malými a speciálními rozměry. Klíčové bylo zachování jízdních vlastností aplikovaného zavěšení, které udává jeho výrobce. Nebyla opomenuta a prodiskutována ani estetická stránka různých konceptů zavěšení. Důležitým parametrem byla také aplikovatelnost konceptu vzhledem ke speciálním rozměrům rámu kola. Navržený rám tak po důkladném průzkumu trhu využívá konceptu zavěšení typu ABP, na který vlastní patent společnost Trek.

Vlastnosti zavěšení byly po jeho začlenění do konstrukce porovnány i s ostatními sériově vyráběnými rámy. Po detailním rozboru, porovnání a zhodnocení všech vlastností (kapitola 5.1), lze konstatovat následující. Navržený rám má dle výsledků analýz vlastností zavěšení obdobné jako dnešní sériově vyráběné špičkové rámy a v tomto směru bylo oproti původnímu karbonovému rámu dosaženo podstatného zlepšení. Výsledky analýz karbonového rámu potvrzují kritiku jízdních vlastností, které byly vysloveny zadavatelem během společných diskuzí.

Kde zcela jistě nedošlo ke zlepšení navrženého rámu je jeho hmotnost. Kvůli nestandardním malým rozměrům nebylo možné použít například relativně dobře dostupné zužované trubky, které se prodávají i jako stavebnice celých rámu a jsou vhodné i pro obdobnou konstrukci. Rám však musí mít velikost odpovídající dospělému člověku, protože není možné takto předvyrobené zužované trubky libovolně zkracovat. Musely tak být použity trubky standardních katalogových rozměrů. Pro udržení nízké ceny výroby a tedy krátkých strojních časů CNC, jsou i ostatní díly jednodušší konstrukce, většinou bez tvarově složitých odlehčení. Při výrobě se počítá s využitím technologie vypalování laserem nebo drátořezu, dle finančních možností, díky čemuž mohly být navrženy tvarově složitější obrysy součástí. Například domečky ložisek a pouzder těhlice a spodního vahadla, obě horní vahadla nebo prostřední část spodního vahadla, který se skládá ze dvou vypálených a ohnutých plechů.

Technologie hydroforming, tlakové lití či použití lisovacích matic jako je tomu u běžných, sériově vyráběných rámu, nelze v otázce hmotnosti tímto způsobem konstrukce příliš konkurovat. Pro kusovou výrobu má dobré předpoklady i použití uhlíkových vláken. Jedním z požadavků zadavatele, ale bylo použití hliníkových slitin. Jednou z možností, jak nadále snížit hmotnost pro malosériové výrobky, je použití technologie 3D tisku, čímž se zabývá druhá část této práce, v které byla touto technologií vyrobená horní vahadla lehké a optimalizované konstrukce.

Jedním z úkolů zadání diplomové práce je i posouzení vhodnosti použití technologie 3D tisku a to konkrétně technologie SLM pro součásti tohoto typu, tedy součásti vyžadující větší míru bezpečnosti, jejichž porucha může vést až ke zranění. Práce rozebírá vznik této technologie a krátce zdůvodňuje velice aktuální použití u výroby kritických součástí proudových motorů dopravních letadel společnosti General Electric a Boeing. Rešeršní část navazuje úspěšným aplikováním aditivní technologie výroby na rekonstrukci odlehčené verze stávající konstrukce rámu jízdního kola společnosti Empire Cycles. Práce dále pokračuje ukázkou dalších výhod výroby touto technologií, která nespočívá pouze v téměř nulovém odpadním materiálu a celkově téměř bezproblémovou výrobou velice tvarových a pevných součástí. Do budoucna se u této technologie ukazuje i možnost použití více druhů slitin pro jednu součást.

Jednu z těchto výhod aditivní technologie výroby a sice možnost použití optimalizace topologie, diplomová práce demonstruje na dvou konstrukčních verzích horního vahadla navrženého rámu. OT a tvaru obrysu vahadla byly v této práci použity za účelem vytvoření rychlého, spolehlivého a lehkého návrhu. Byla tak navíc navržena metodika, díky které je možné poměrně rychle stanovit konstrukční návrh součástí obdobné konstrukce. Takto navržený díl byl vyroben na 3D tiskárně katedry výrobních systémů a automatizace, s výslednou úsporou hmotnosti 25.58 %. Spolehlivost návrhu však v této práci není potvrzena a bude předmětem dalšího zkoumání. Jak již ale bylo řečeno v kapitole 10, kde byly představeny konkrétní aplikace této technologie, je 3D tisk na vzestupu a s ním i nástroje optimalizace rozložení materiálu s ohledem na zatížení. A to i přes stále aktuální „konzervativní“ přístup k takto navrženým a vyrobeným součástem.

## Reference

- [1] Michal Červený, Jaroslav Kulhavý, „Jaroslav Kulhavý - oficiální stránky,“ [Online]. Available: zdroj: <http://jaroslavkulhavy.cz/kola/>. [Přístup získán 25 2 2015].
- [2] Richard Cunningham, pinkbike.com, „pinkbike,“ 1 4 2013. [Online]. Available: <http://www.pinkbike.com/news/Santa-Cruz-Bronson-650B-Enduro-Racer-in-Carbon-and-Aluminum.html>. [Přístup získán 25 2 2015].
- [3] J. Coffey, „Pinkbike.com, Red Bull Rampage 2012,“ 2 10 2012. [Online]. Available: <http://www.pinkbike.com/news/Red-Bull-Rampage-2012-120.html>. [Přístup získán 25 2 2015].
- [4] Santa Cruz Bicycles, „Santa Cruz Bicycles,“ [Online]. Available: <http://www.santacruz bicycles.com/es/es/node/521>. [Přístup získán 25 2 2015].
- [5] Pinkbike.com, „Pinkbike.com, Bike frame geometry,“ 10 2 2009. [Online]. Available: <http://www.pinkbike.com/news/bike-frame-geometry-2009.html>. [Přístup získán 25 2 2015].
- [6] Bikechecker, „Linkage software manual - Terms,“ [Online]. Available: <http://www.bikechecker.com/linkagedoc/terms.htm>. [Přístup získán 13 2 2015].
- [7] i-track suspension, „i-track suspension,“ [Online]. Available: <http://www.i-tracksuspension.com/suspensiontheory.html#antirise>. [Přístup získán 3 2 2015].
- [8] P. Bureš, „mtbs.cz,“ Cycling media s.r.o., 29 8 2008. [Online]. Available: [http://mtbs.cz/clanek/kona\\_stinky\\_2009\\_preview/kategorie/preview](http://mtbs.cz/clanek/kona_stinky_2009_preview/kategorie/preview). [Přístup získán 3 3 2015].
- [9] Trek Bicycle Corporation, „Trek Bikes,“ Trek Bicycle Corporation, [Online]. Available: <http://www.trek bikes.com/us/en/bikes/mountain/gravity/session/>. [Přístup získán 4 3 2015].
- [10] Pinkbike.com, „Pinkbike.com, Tomac Magnum 204 Lawwill with Fox DHX 5.0 Remote,“ [Online]. Available: <http://www.pinkbike.com/photo/5683363/>. [Přístup získán 4 3 2015].
- [11] T. Foale, Motorcycle Handling and Chassis Design: The Art and Science, Tony Foale Designs, 2006.
- [12] F, Matty, „Suspension Linkage Kinematics: The Basics Of Anti-Squat And Pedal Kickback,“ 14 11 2014. [Online]. Available: <http://www.ridingfeelsgood.com/suspension-linkage-kinematics-basics-anti-squat-pedal-kickback/>. [Přístup získán 4 3 2015].

- [13] Orange Mountain Bikes, „Orange Mountain Bikes,“ [Online]. Available: [http://www.orangebikes.co.uk/archive/2012/224-evo\\_frame/](http://www.orangebikes.co.uk/archive/2012/224-evo_frame/). [Přístup získán 4 3 2015].
- [14] S. Young, „Bike radar,“ Immediate Media Company Limited, 9 Listopad 2010. [Online]. Available: <http://www.bikeradar.com/gear/article/buyers-guide-to-mountain-bike-suspension-part-1-28367/>. [Přístup získán 5 3 2015].
- [15] Bikemag, „Bikemag, Kona Stinky,“ [Online]. Available: <http://bikemag.hu/shopping-guide/kona-stinky-deluxe-vaz>. [Přístup získán 4 3 2015].
- [16] M. Farley, „Interview: Mountain bike designer Tony Ellsworth,“ 2 5 2009. [Online]. Available: <http://www.bikeradar.com/gear/article/interview-mountain-bike-designer-tony-ellsworth-21290/>. [Přístup získán 6 3 2016].
- [17] Joe Graney, SCB Engineering, „Santa Cruz Bicycles, Instantaneous Center Migration,“ 14 8 2012. [Online]. Available: <http://www.santacruz bicycles.com/en/us/news/346>. [Přístup získán 5 4 2015].
- [18] Ellsworth Bikes, „Ellsworth Bikes, Instant Center Tracking,“ [Online]. Available: <http://50.62.71.54/flash/2009-ICT/2009-ICT.php>. [Přístup získán 23 4 2015].
- [19] Lapierre, „Lapierre, FPS2, Intelligent Suspension,“ [Online]. Available: <http://www.lapierre-bikes.co.uk/lapierre-technologies/fps2-intelligent-suspension>. [Přístup získán 1 5 2015].
- [20] Pivot Cycles, „Pivot Cycles, dw-link suspension,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.pivotcycles.com/technology/dw-link-suspension/>. [Přístup získán 1 5 2015].
- [21] Š. Hájíček, „<http://www.bikeandride.cz/>,“ 26 2 2015. [Online]. Available: <http://www.bikeandride.cz/2015/02/dw-link-detailni-rozbor-systemu-odpruzeni/>. [Přístup získán 1 5 2015].
- [22] Yoan Technologies, „Yoan Technologies, Blue Print Frames,“ 2005. [Online]. Available: <http://www.yoan.com.tw/2006/2005catalog.pdf>. [Přístup získán 10 3 2015].
- [23] Fox, „ridefox, fork 32 float 26,“ [Online]. Available: <http://www.ridefox.com/help.php?m=bike&id=28>. [Přístup získán 15 2 2015].
- [24] Fox, „Fox Float Shox,“ [Online]. Available: <http://www.ridefox.com/2016/filter.php?m=bike&t=shocks>. [Přístup získán 19 10 2014].
- [25] M. Jelínek, „Návrh rámu horského kola a jeho deformačně napěťová analýza pomocí MKP,“ VUT, Fakulta Strojního Inženýrství, Ústav Konstruování, Brno, 2008.

- [26] T. Gladiš, „Mtbs.cz,“ 18 8 2012. [Online]. Available: <http://mtbs.cz/clanek/fox-2013-co-je-noveho/kategorie/tech-news>. [Přístup získán 22 10 2015].
- [27] Duratec, „Duratec,“ Duratec s.r.o., [Online]. Available: <http://www.duratec.cz/cs/techinfo/pouzivane-materialy/hlinikova-slitina-7020t6/>. [Přístup získán 1 9 2014].
- [28] Specialized, „Specialized, Specialized Demo 8 2007 archive,“ 2007. [Online]. Available: [www.specialized.com](http://www.specialized.com). [Přístup získán 22 10 2014].
- [29] A. Osuna, „Linkage Design,“ 2015. [Online]. Available: <http://linkagedesign.blogspot.cz/>. [Přístup získán 18 4 2015].
- [30] Zen Composites, „zencomposites, ISO 4210-6:2014,“ 2008. [Online]. Available: <http://zencomposites.com/afnor.pdf>. [Přístup získán 2 4 2015].
- [31] Dept of Mechanical Engineering and Faculty Innovation Center© , „The University of Texas at Austin,“ 30 5 2007-2013 . [Online]. Available: [http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712\\_sls\\_history.php#x3dp2](http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712_sls_history.php#x3dp2). [Přístup získán 26 4 2014].
- [32] RepRap, open source, „RepRap,“ 15 2 2015. [Online]. Available: <http://reprap.org/>. [Přístup získán 24 4 2015].
- [33] SLM Solutions GmbH, „SLM® 280 HL,“ 2014. [Online]. Available: [http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-280\\_en](http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-280_en). [Přístup získán 30 4 2015].
- [34] CFM Aero Engines, „CFM Aero Engines,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.cfmaeroengines.com/engines/leap>. [Přístup získán 23 4 2015].
- [35] M. LaMonica, „MIT Technology Review,“ 23 4 2013. [Online]. Available: <http://www.technologyreview.com/featuredstory/513716/additive-manufacturing/>. [Přístup získán 23 4 2015].
- [36] General Electric, „GE Aviation GE9X,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.geaviation.com/newengine/>. [Přístup získán 23 4 2015].
- [37] S. Trimble, „Flight Global,“ 6 8 2014. [Online]. Available: <http://www.flightglobal.com/news/articles/analysis-ge-ponders-3d-printing-for-ge9x-turbine-blade-401898/>. [Přístup získán 24 4 2015].
- [38] GE Reports, „GE Reports,“ 14 4 2015. [Online]. Available: <http://www.gereports.com/post/116402870270/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly>. [Přístup získán 2015 4 24].

- [39] Renishaw, „First metal 3D printed bicycle frame manufactured by Renishaw for Empire Cycles,“ 4 2 2014. [Online]. Available: <http://www.renishaw.com/en/first-metal-3d-printed-bicycle-frame-manufactured-by-renishaw-for-empire-cycles--24154>. [Přístup získán 24 4 2015].
- [40] Empire-Cycles LTD, „Empire-Cycles, MX6 Evo,“ [Online]. Available: <http://empire-cycles.com/product.php?xProd=42>. [Přístup získán 24 4 2015].
- [41] Prof. Oliver de Weck, Dr. Il Yong Kim, „Design Optimization - structural design optimization,“ MIT, January 23, 2004.
- [42] Eric De Sturler, Glaucio H. Paulino, Shun Wang, „Topology optimization with adaptive mesh refinement,“ May 2008.
- [43] Ing. Václav Kubec, Ph.D., doc. Ing. Milan Čechura, CSc., „Současné konstrukční možnosti při návrzích rámu velkých hydraulických lisů,“ Kód článku: 101124 Vyšlo v MM : 2010 / 11, 18.11.2010 v rubrice Trendy / Tváření, Strana 20, <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-konstrukcni-moznosti-pri-navrzich-ramu-velkych-hydraulickych-lisu.html>, 2010.
- [44] Caess, „Caess ProTOp Help documentation,“ Caess, 2014.
- [45] SLM® solutions GmbH, „Discover the variety of SLM® Materials,“ [Online]. Available: [http://stage.slm-solutions.com/index.php?index\\_en](http://stage.slm-solutions.com/index.php?index_en). [Přístup získán 24 4 2015].
- [46] R. Cunningham, „pinkbike.com, Tech Tuesday - What a Negative Spring is and Why it Makes the Coil-Spring Nearly Obsolete,“ 22 5 2012. [Online]. Available: <http://www.pinkbike.com/news/Tech-Tuesday-negative-spring-air-shocks-2012.html>. [Přístup získán 9 2 2015].
- [47] Fox, „Ride Fox,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.ridefox.com/>. [Přístup získán 3 1 2015].
- [48] Rock Shox, „RockShox|SRAM,“ 2012. [Online]. Available: <https://www.sram.com/rockshox>. [Přístup získán 9 2 2015].



## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1.1:</b> Původní karbonový rám a jeho výpočtový drátový model.....	13
<b>Obrázek 1.2:</b> Jakub Ouvín .....	13
<b>Obrázek 2.1:</b> Specialized S-Works Epic Carbon 29" World Cup [1] .....	14
<b>Obrázek 2.2:</b> Enduro rám Santa Cruz Bronson - 650B Enduro Racer [2].....	15
<b>Obrázek 2.3:</b> Cam McCaul, Red Bull Rampage 2012 [3] .....	16
<b>Obrázek 2.4:</b> Santa Cruz V10 na kterém vyhrál Greg Minnaar titul mistra světa v roce 2013 [4] .....	17
<b>Obrázek 3.1:</b> Geometrie rámu s popisem základních parametrů [5] .....	17
<b>Obrázek 4.1:</b> Rám Kona Stinky 2009, kompresivní působení brzdných účinků, šipka znázorňuje směr pohybu vahadla při brždění vlivem momentu $M_B$ [8].....	20
<b>Obrázek 4.2:</b> Trek Session 9.9 s typem zavěšení ABP, znázornění extenzivního působení brzdných účinků, šipky znázorňují směry pohybu vahadel při brždění vlivem momentu $M_B$ [9] .....	21
<b>Obrázek 4.3:</b> Tomac's 204 Magnum [10].....	21
<b>Obrázek 4.4:</b> Závislost anti-squat na zdvihu pístnice tlumiče se znázorněnou sag oblastí, jedná se o rám Giant Reign s 27.5" koly [12].....	22
<b>Obrázek 4.5:</b> Rám Orange 224-DH určený pro downhill, jednočep [13] .....	23
<b>Obrázek 4.6:</b> Rám Kona Stinky a D.O.P.E. systém plovoucího třmenu zadní brzdy [15] .....	24
<b>Obrázek 4.7:</b> Ellsworth ICT, zobrazení IC s polohou nad tažnou větví řetězu [18] .....	25
<b>Obrázek 4.8:</b> Lapierre FPS2 X-Control, zobrazení třech poloh mechanismu s proloženou trajektorií pohybu bodu IC [19] .....	26
<b>Obrázek 4.9:</b> Rám Pivot Phoenix Carbon určený pro sjezd, se systémem zavěšení DW-Link [21].....	26
<b>Obrázek 4.10:</b> Rám Blue Print, šroubovaný softail s nahrazením vahadla titanovou planžetou [22].....	27
<b>Obrázek 5.1:</b> Zjednodušený drátový model karbonového rámu s vypočtenou trajektorií osy zadního kola. Na grafu je zobrazeno měření složek X a Y pohybu osy zadního kola (překrývající se modrá a tyrkysová) a celková délka trajektorie (červená) .....	28
<b>Obrázek 5.2:</b> Přenesení geometrie do softwaru Linkage .....	29
<b>Obrázek 5.3:</b> Grafické zobrazení třech konfigurací pohonu s natočením kliky (PK) .....	29
<b>Obrázek 5.4:</b> Zobrazení závislosti natočení kliky pohonu na zdvihu zadního kola, pro tři různé konfigurace a dva typy převodu karbonového rámu .....	30
<b>Obrázek 6.1:</b> Fox 32 Float 26, 140 mm s orientačními rozměry [23] .....	31
<b>Obrázek 6.2:</b> Fox Float CTD a zjednodušený CAD model [24] .....	32
<b>Obrázek 6.3:</b> Charakteristiky tří typů tlumičů v softwaru Linkage, modře přednastavený vzduchový tlumič, zeleně vzduchový tlumič s ručně zadanou progresivní charakteristikou změřeného tlumiče Fox Float RP23, fialově lineární pružinový tlumič .....	33
<b>Obrázek 6.4:</b> Výtah z technické normy ČSN EN 754-2 [27] .....	35
<b>Obrázek 6.5:</b> Specialized Demo 8 2007, detail:obvodový svar horní části rámu [28] .....	36
<b>Obrázek 6.6:</b> Vizualizace konečného návrhu konstrukce .....	38
<b>Obrázek 7.1:</b> Porovnání geometrie původního návrhu Al rámu s karbonovým rámem.....	39
<b>Obrázek 7.2:</b> Porovnání geometrie karbonového a upraveného Al rámu.....	39
<b>Obrázek 7.3:</b> Diagramy natočení klik pohonu během zdvihu zadního kola .....	40
<b>Obrázek 7.4:</b> Diagram přírůstku řetězu v závislosti na zdvihu zadního kola, horní větev řetězu je označena jako „upper“, celkové prodloužení pak jako „total“.....	41
<b>Obrázek 7.5:</b> Diagram leverage ratio.....	42
<b>Obrázek 7.6:</b> Diagram průběhu síly ve vertikálním směru působící na zadní kolo.....	43
<b>Obrázek 7.7:</b> Diagram závislosti zdvihu zadního kola na kompresi tlumiče .....	44
<b>Obrázek 7.8:</b> Zobrazení průběhu velikostí vertikálních složek předního „front“ i zadního „rear“ kola .....	45
<b>Obrázek 7.9:</b> Diagram funkce anti-squat upraveného Al rámu .....	46
<b>Obrázek 7.10:</b> Diagram anti-rise upraveného Al rámu .....	47

<b>Obrázek 7.11:</b> Anti-squat karbonového rámu.....	48
<b>Obrázek 7.12:</b> Anti-rise karbonového rámu.....	49
<b>Obrázek 7.13:</b> Orientační diagram síly zadního kola při kompresi [29] .....	50
<b>Obrázek 7.14:</b> Funkce LR sériově vyráběných rámu značky Santa Cruz [29] .....	51
<b>Obrázek 7.15:</b> Průběh AS několika sériově vyráběných rámu [29].....	52
<b>Obrázek 8.1:</b> Upravený CAD model s prvky modulu Mechanism (tlumiče, pružiny, vazby) .....	54
<b>Obrázek 8.2:</b> Impact test dle ČSN EN ISO 4210-6:2014 [30] .....	56
<b>Obrázek 8.3:</b> Absolutní hodnoty reakčních sil v čepch horního vahadla při dopadu na obě kola s použitím dyn. koef. ....	57
<b>Obrázek 8.4:</b> Zatížení při dopadu na obě kola s použitím dyn. koef., zobrazení směrových vektorů reakcí v horním vahadle .....	57
<b>Obrázek 8.5:</b> Absolutní hodnoty reakčních sil v čepch horního vahadla při dopadu na zadní kolo s použitím dyn. koef. ....	58
<b>Obrázek 9.1:</b> MKP analýza horního vahadla při dopadu na zadní kolo, zobrazení napětí Von Mises, průběhů posunutí a sítě KP .....	60
<b>Obrázek 9.2:</b> MKP analýza těhlice při dopadu na zadní kolo, zobrazení napětí Von Mises, průběhů posunutí[mm] a sítě KP, obr. v levé části také zobrazuje zdeformovaný vs. nezdeformovaný stav (fialová) .....	61
<b>Obrázek 9.3:</b> Dopad na zadní kolo, zobrazení průběhu napětí Von Mises a sítě KP .....	62
<b>Obrázek 9.4:</b> Dopad na obě kola s použitím dynamického koeficientu, zobrazení napětí Von Mises a průběhu posunutí s max. hodnotou 1.208 mm.....	62
<b>Obrázek 9.5:</b> Dopad na obě kola s použitím dynamického koeficientu, zobrazení napětí Von Mises. Zobrazení pouze hlavních dílů rámu, bez spojovacího materiálu .....	63
<b>Obrázek 9.6:</b> Impact test, průběhy napětí Von Mises a posunutí ve směru zatížení [mm].....	64
<b>Obrázek 9.7:</b> Čep spojující horní vahadlo a těhlici, zobrazení napětí Von Mises[MPa] .....	64
<b>Obrázek 9.8:</b> Impact test, zobrazení průběhů napětí Von Mises rámového trojúhelníku .....	65
<b>Obrázek 9.9:</b> Únavový test s horizontální silou ČSN EN ISO 4210-6:2014 [30] .....	65
<b>Obrázek 9.10:</b> Únavový test, zobrazení počtu cyklů do porušení v log. souřadnicích .....	66
<b>Obrázek 10.1:</b> SLM 280 HL [33] a pracovní prostor v počáteční fázi tisku vahadla .....	69
<b>Obrázek 10.2:</b> Palivová tryska, uložení tlakového senzoru a proudový motor GE9X [36] [38] .....	71
<b>Obrázek 10.3:</b> Vytisknuté titanové díly rámu Empire Cycles [39] .....	72
<b>Obrázek 10.4:</b> Rámy horských kol Empire Cycles [39] [40] .....	73
<b>Obrázek 11.1:</b> Návrh odlehčení a průběhy napětí Von Mises s maximální hodnotou 182 MPa .....	75
<b>Obrázek 11.2:</b> Optimalizace obrysu pomocí spline křivek.....	75
<b>Obrázek 11.3:</b> Zobrazení B-Spline křivek a kontrolních bodů (modře).....	76
<b>Obrázek 11.4:</b> Zobrazení posunutí ve všech třech směrech, deformace je zobrazena s 10% zvětšením optimalizovaného návrhu .....	76
<b>Obrázek 11.5:</b> Zobrazení posunutí ve všech třech směrech, deformace je zobrazena s 10% zvětšením původního návrhu .....	76
<b>Obrázek 11.6:</b> Analýza MKP dané oblasti, červeně - podpora, modře vertikální zatížení.....	77
<b>Obrázek 11.7:</b> 2D oblast určená k OT .....	77
<b>Obrázek 11.8:</b> OT - průběh napětí.....	77
<b>Obrázek 11.9:</b> OT - 18 iterací .....	77
<b>Obrázek 11.10:</b> Blokové schéma optimalizační procedury [41] .....	78
<b>Obrázek 11.11:</b> Princip optimalizace topologie [41].....	78
<b>Obrázek 11.12:</b> OT maximální tuhost při 45 % max.hmotnosti s průměrnou velikostí 1 prvku cca 2.05mm, m=0.401 kg.....	79
<b>Obrázek 11.13:</b> Návrhová oblast importována z výpočtu opt. tvaru, m=0.684 kg .....	79
<b>Obrázek 11.14:</b> Maximální tuhost při 40 % max. hmotnosti s průměrnou velikostí 1 prvku cca 2.05 mm, m=0.366 kg, přidána boční síla F=100 N .....	79

<b>Obrázek 11.15:</b> Maximální tuhost při 40% max. hmotnosti s průměrnou velikostí 1 prvku cca 1.66 mm, $m=0.344$ kg.....	79
<b>Obrázek 11.17:</b> Postup při optimalizaci topologie, sedlová trubka rámu Empire Cycles, vyrobená 3D tiskem ze slitiny Ti [39].....	80
<b>Obrázek 11.16:</b> Maximální tuhost při 40 % max. hmotnosti s průměrnou velikostí 1 prvku cca 1.33 mm, $m=0.359$ kg, přidána boční síla $F=100N$ .....	80
<b>Obrázek 11.18:</b> Síť MKP optimalizovaného dílu, $m=0.104$ kg, díl je bez přídavků na obrábění a opěrných stěn ložisek, kvůli menšímu počtu prvků, pro urychlení výpočtu.....	81
<b>Obrázek 11.19:</b> Blokové schéma OT s Adaptive Mesh Refinement [42] .....	81
<b>Obrázek 11.20:</b> Mřížová funkce, typ hexagon .....	82
<b>Obrázek 11.21:</b> Postup při OT s využitím 3D tisku .....	83
<b>Obrázek 11.22:</b> Průběhy napětí vypočtené struktury.....	84
<b>Obrázek 11.23:</b> Dostupné typy mřížových struktur a jejich kódová označení, červeně jsou zvýrazněné použité struktury [44] .....	85
<b>Obrázek 11.24:</b> Původní umístění podpor na vnějších plochách, detail ukazuje odtrženou první vrstvu vahadla od podpor vlivem vnitřního pnutí, díl byl pozicován v horizontální poloze .....	86
<b>Obrázek 11.25:</b> Náhled do pracovního prostoru SLM 280 HL po ukončení procesu výroby, během očišťování součásti a přesouvání zbytkového prášku do zásobníku .....	87
<b>Obrázek 11.26:</b> Očištěná součást s podpůrnou geometrií po vyjmutí z pracovního prostoru .....	87
<b>Obrázek 11.27:</b> Vyrobená horní vahadla, spodní vahadlo po ručním opracování, vrchní pouze po pískování.....	88
<b>Obrázek 12.1:</b> Demonstrace vlivu OP, červená - výsledný tvar, modrá - odebraný materiál [43] .....	89
<b>Obrázek 12.2:</b> CAD model návrhu přípravku pro laboratorní zatěžování, zeleně - zjednodušený model upínacích čelistí zatěžovacího stroje .....	90

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1:</b> shrnutí vlastností horských kol pro různé MTB disciplíny.....	14
<b>Tabulka 2:</b> Měření vlastností rámu Giant Reign 27.5" 2015 (pozn. převod: převodník/zadní pastorek) [12] ....	22
<b>Tabulka 3:</b> Parametry dostupných vzduchových tlumičů Fox Float [24].....	32
<b>Tabulka 4:</b> Návrhová kritéria konceptu rámu kola .....	36
<b>Tabulka 5:</b> Hmotnosti navrženého Al rámu .....	37
<b>Tabulka 6:</b> Parametry SLM 280 HL [33] .....	69
<b>Tabulka 7:</b> Porovnání dosažených hmotností různých návrhů konstrukce horního vahadla .....	90

## Seznam příloh

### Příloha 1 – připojovací rozměry

<b>Obrázek P.1.1:</b> Normalizovaná pozice brzdového kotouče vůči zadnímu náboji a tedy i vůči rámu a uchycení třmene. [zdroj: <a href="http://www.shimano.com">www.shimano.com</a> ]	1
<b>Obrázek P.1.2:</b> Doporučené rozměry umístění přehazovačky. [zdroj: <a href="http://www.shimano.com">www.shimano.com</a> ]	1
<b>Obrázek P.1.3:</b> Montážní rozměry třmene zadní brzdy dle mezinárodní normy pro rozteč 51mm, spolu s doporučenými hodnotami pro konkrétné modely brzd Shimano [zdroj: <a href="http://www.shimano.com">www.shimano.com</a> ]	2

### Příloha 2 – základní geometrie

<b>Obrázek P.2.1:</b> Skica geometrie karbonového rámu	1
<b>Obrázek P.2.2:</b> Skica geometrie Al rámu	1

### Příloha 3 – řez a příslušenství tlumiče

<b>Obrázek P.3.1:</b> Řez plynokapalinového tlumiče Fox Float RP 23 s popisem principu funkce a parametrů obsažených v softwaru Linkage pro specifikaci vlastností tlumiče [46]	1
<b>Obrázek P.3.2:</b> Pětidílné kluzné pouzdro pro tlumiče Fox [47]	2
<b>Obrázek P.3.3:</b> Tabulka pro vhodné nastavení vzduchového tlumiče Rock Shox Monarch 2011, dle průběhu funkce LR [48]	2

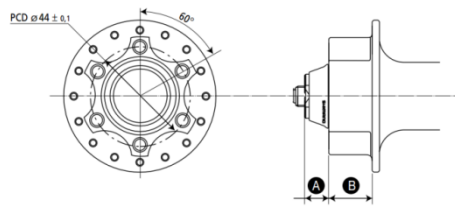
### Příloha 4 – dynamická simulace

<b>Obrázek P.4.1:</b> Abs. hodnoty reakčních sil v horním vahadle a hlavovém složení při jízdě v sedě	1
<b>Obrázek P.4.2:</b> Absolutní hodnoty reakčních sil v čepech horního vahadla při jízdě v sedě	1
<b>Obrázek P.4.3:</b> Absolutní hodnoty reakčních sil v čepech horního vahadla při jízdě ve stoje	2
<b>Obrázek P.4.4:</b> Abs. hodnoty reakčních sil v horním vahadle a hlavovém složení při jízdě ve stoje	2

### Příloha 5 – kusovník

### Příloha 6 – výkresová dokumentace

## Příloha 1 – připojovací rozměry

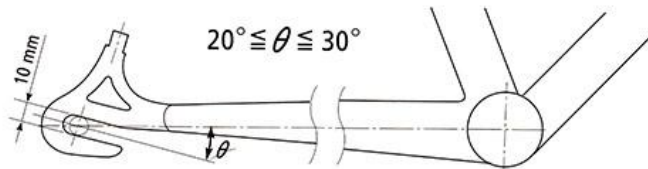


	Rozměr A	Rozměr B	
		M755	M756/M525/M475/C501
Přední	10,5 ± 0,1	15,1	15,3
Zadní	15,25 ± 0,1	16,7	16,9

**Obrázek P.1.1:** Normalizovaná pozice brzdového kotouče vůči zadnímu náboji a tedy i vůči rámu a uchycení třmene [zdroj: www.shimano.com]

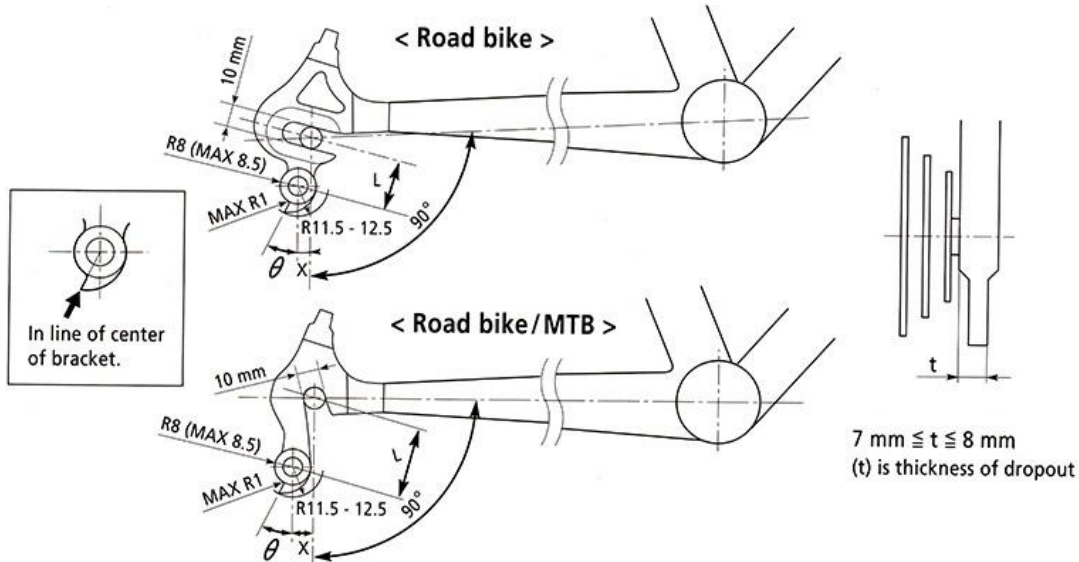
### Dropout configuration

In order to maintain optimum SIS shifting performance, set angle  $\theta$  to between 20 and 30. Dropout thickness should be between 4 mm and 5 mm.



### Integral derailleur mount

In order to maintain optimum SIS shifting performance, set angles as shown below.



Dropout type	L	X	Angle $\theta$
Road bike recommendation	24 mm	4 mm to 10 mm	30° to 35°
	26 mm	6 mm to 10 mm	30° to 35°
MTB recommendation	28 mm	6 mm to 10 mm	25° to 30°
	30 mm	7.5 mm to 10 mm	25° to 30°

Note: If a dropout that does not conform to the dimensions above is used, optimum SIS shifting performance may not be obtained.

#### Remark

For NEXAVE C810, the thickness of the opposite end must be kept to the dimension as left chart, especially for the FH-C810.

7 mm  $\leq$  t  $\leq$  8 mm

If a dropout that does not conform to the dimensions as above, Link Glide shifting performance may not be obtained.

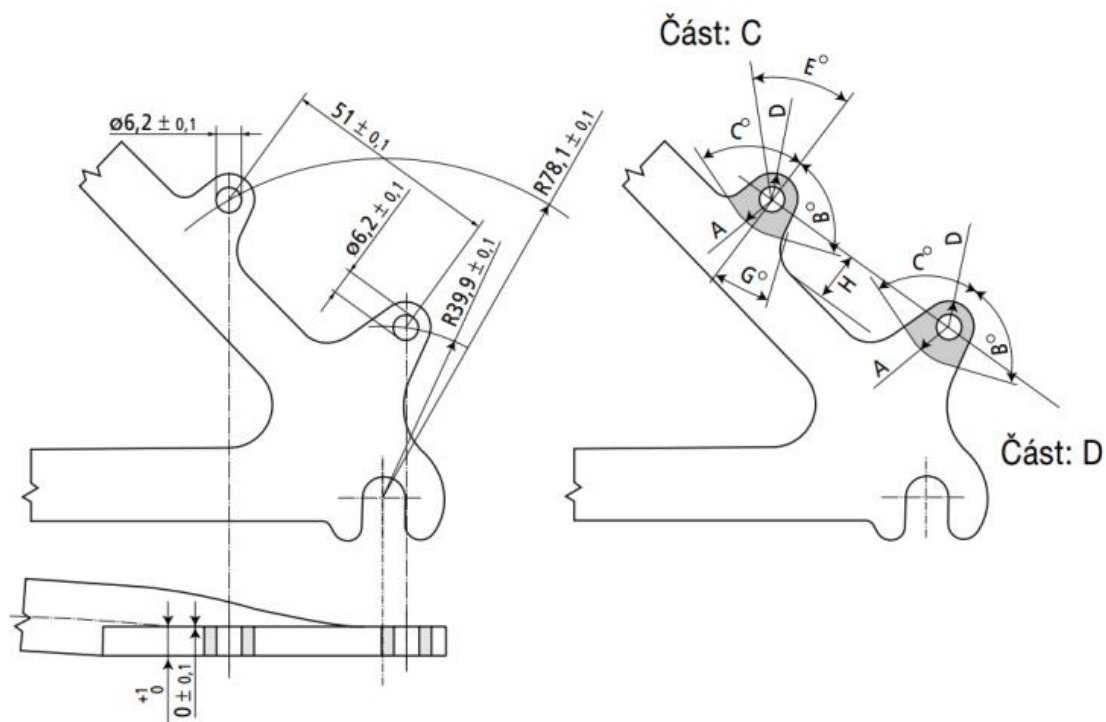
**Obrázek P.1.2:** Doporučené rozměry umístění přehazovačky [zdroj: www.shimano.com]

Část: C

	Model	Rozměr						
		A (min.)	B° (min.)	C° (min.)	D (max.)	F° (min.)	G° (max.)	H (min.)
Typ zapojení	BR-M965	6 mm	60	60	8 mm	—	—	-6,0 mm
Typ víčka	BR-M755	6 mm	60	60	—	—	—	-6,5 mm
	BR-M555	6 mm	60	30	—	—	60	-1,3 mm
	BR-M525	8 mm	—	45	8 mm	45	—	-4 mm
	BR-M515	8 mm	—	90	8 mm	10	45	-1 mm
	BR-C601			45		—	-4 mm	
	BR-M475			45		—	-4 mm	
	BR-C501			45		—	-4 mm	

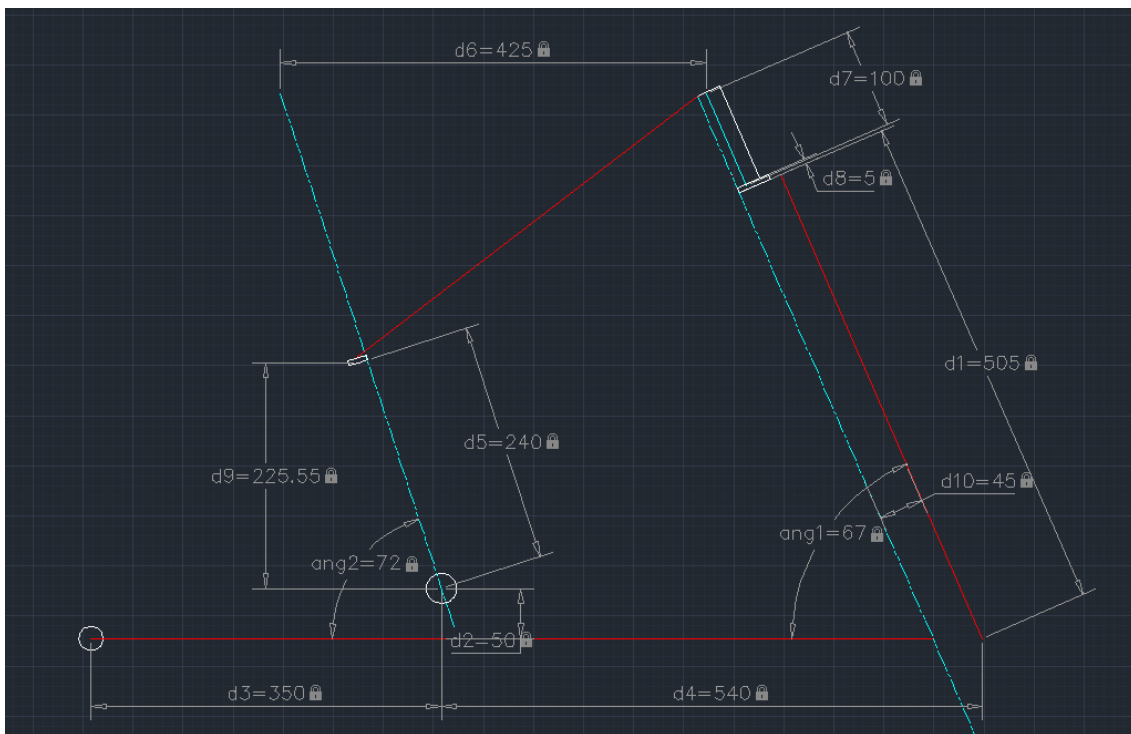
Část: D

	Model	Rozměr				
		A (min)	B° (min)	C° (min)	D (max)	H (min)
Typ zapojení	BR-M965	6 mm	60	60	(18 mm)	-6,0 mm
Typ víčka	BR-M755	6 mm	60	60	—	-6,5 mm
	BR-M555	6 mm	30	60	10 mm	-1,3 mm
	BR-M525	8 mm	—	45	8 mm	-4 mm
	BR-M515	8 mm	—	45	8 mm	-1 mm
	BR-C601					-4 mm
	BR-M475					-4 mm
	BR-C501					-4 mm



**Obrázek P.1.3:** Montážní rozměry třmene zadní brzdy dle mezinárodní normy pro rozteč 51mm, spolu s doporučenými hodnotami pro konkrétné modely brzd Shimano [zdroj: www.shimano.com]

## Příloha 2 – základní geometrie

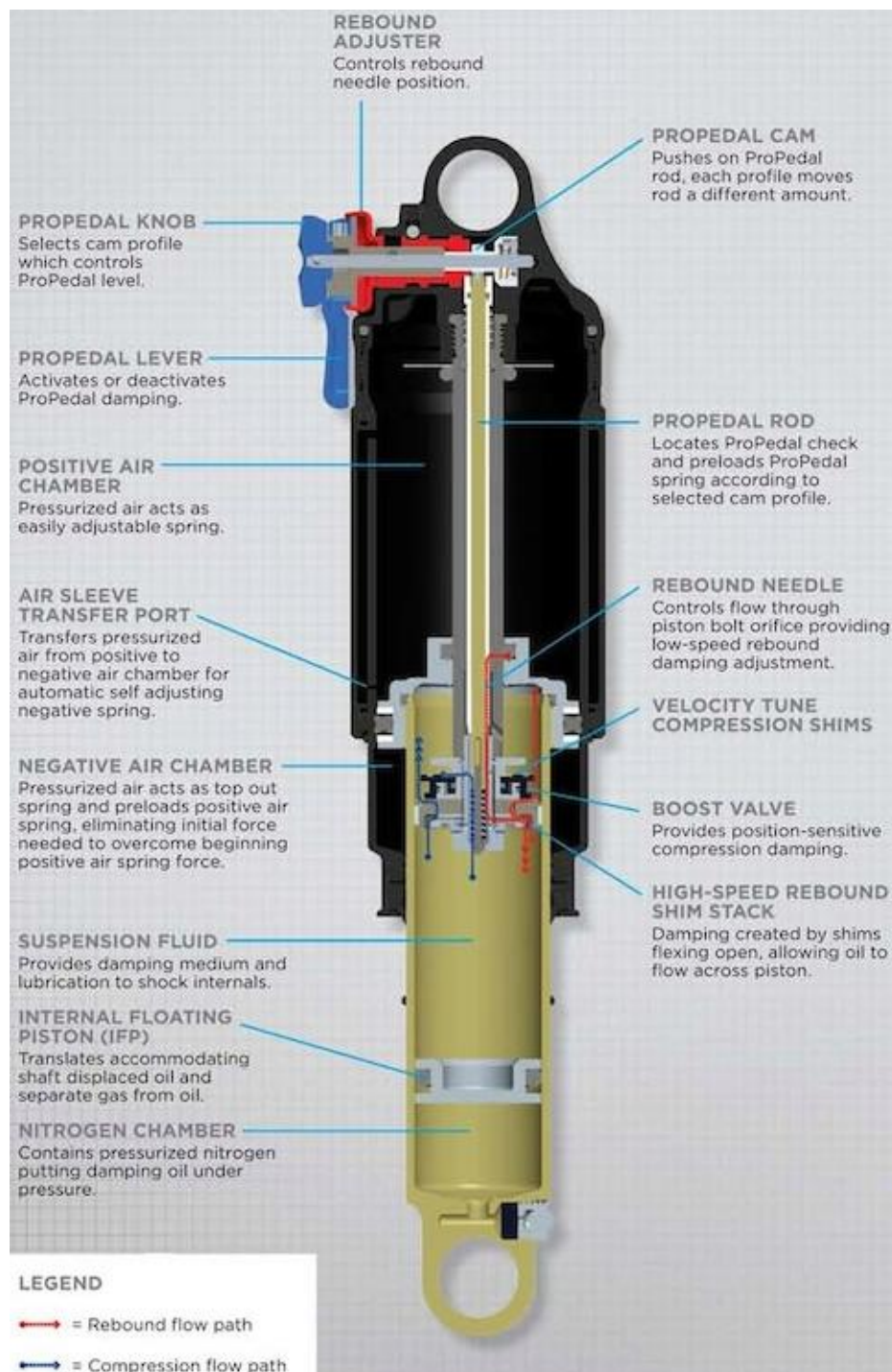


**Obrázek P.2.1:** Skica geometrie karbonového rámu



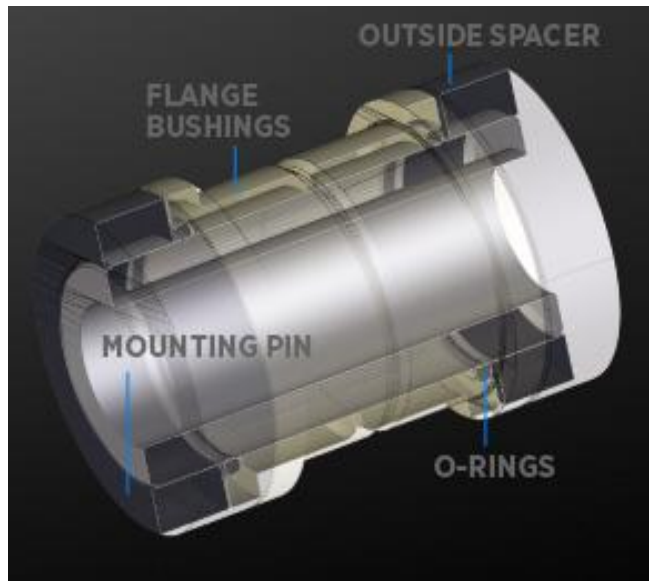
**Obrázek P.2.2:** Skica geometrie Al rámu

## Příloha 3 – řez a příslušenství tlumiče



*Obrázek P.3.1: Řez plynokapalinového tlumiče Fox Float RP 23 s popisem principu funkce a parametrů obsažených v softwaru Linkage pro specifikaci vlastností tlumiče [46]*

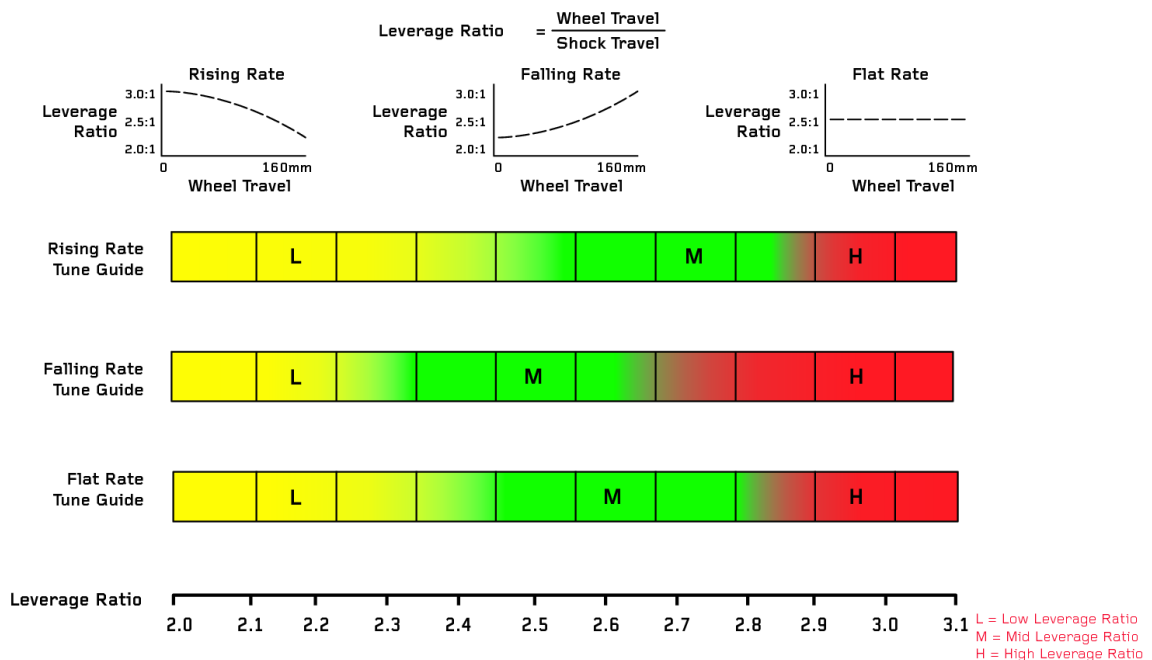




Obrázek P.3.2: Pětidílné kluzné pouzdro pro tlumiče Fox [47]

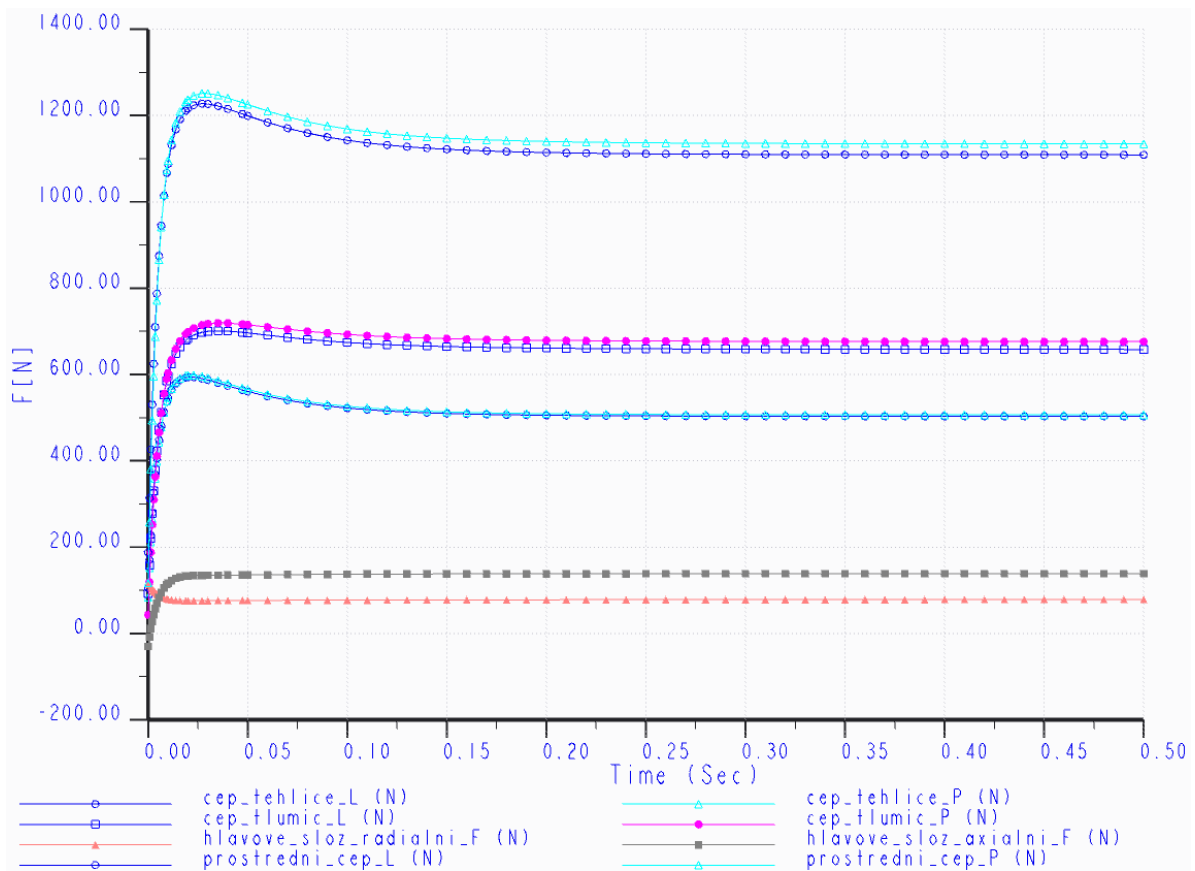
### Compression Tune Reference Chart

This guide is designed to help bicycle manufacturers determine which tune will work best with their bicycle design. The different tunes are designed to work with different bicycle leverage ratios. The letters L (Low leverage), M (Medium leverage), and H (High Leverage) refer to the overall leverage ratio of the bicycle.

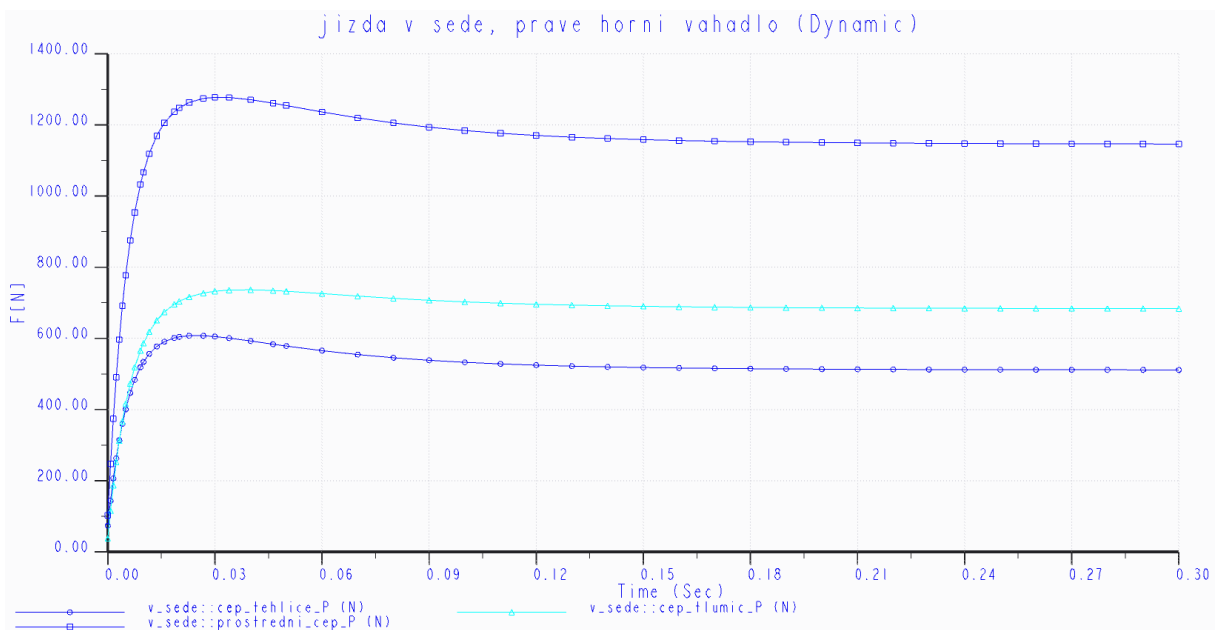


Obrázek P.3.3: Tabulka pro vhodné nastavení vzduchového tlumiče Rock Shox Monarch 2011, dle průběhu funkce LR [48]

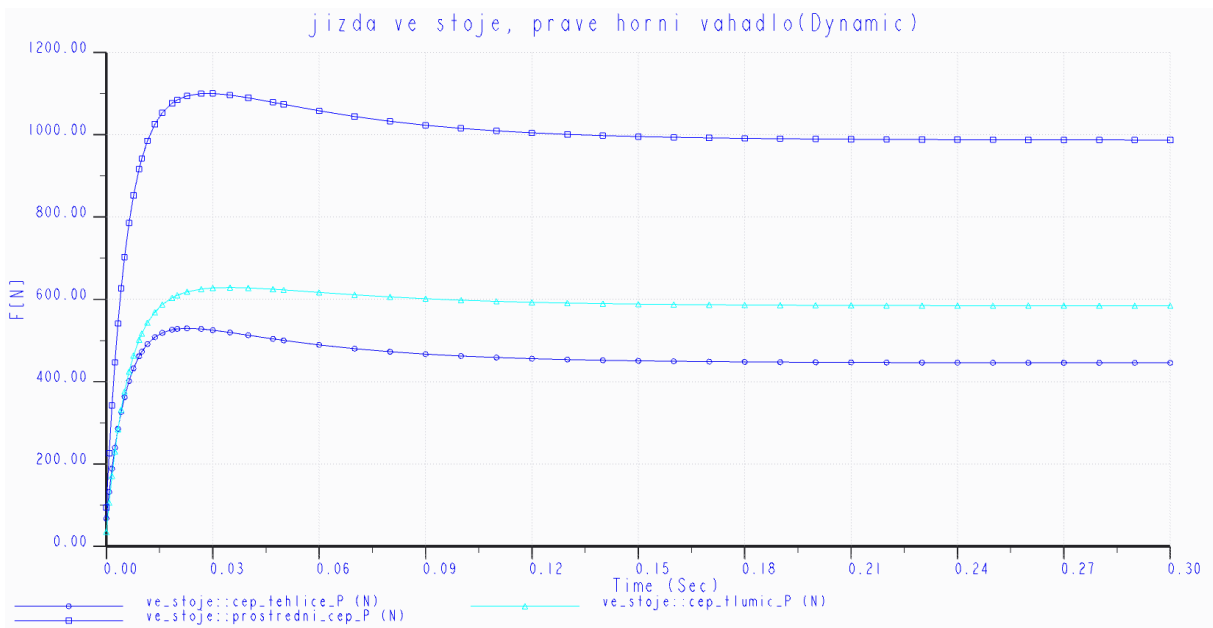
## Příloha 4 – dynamická simulace



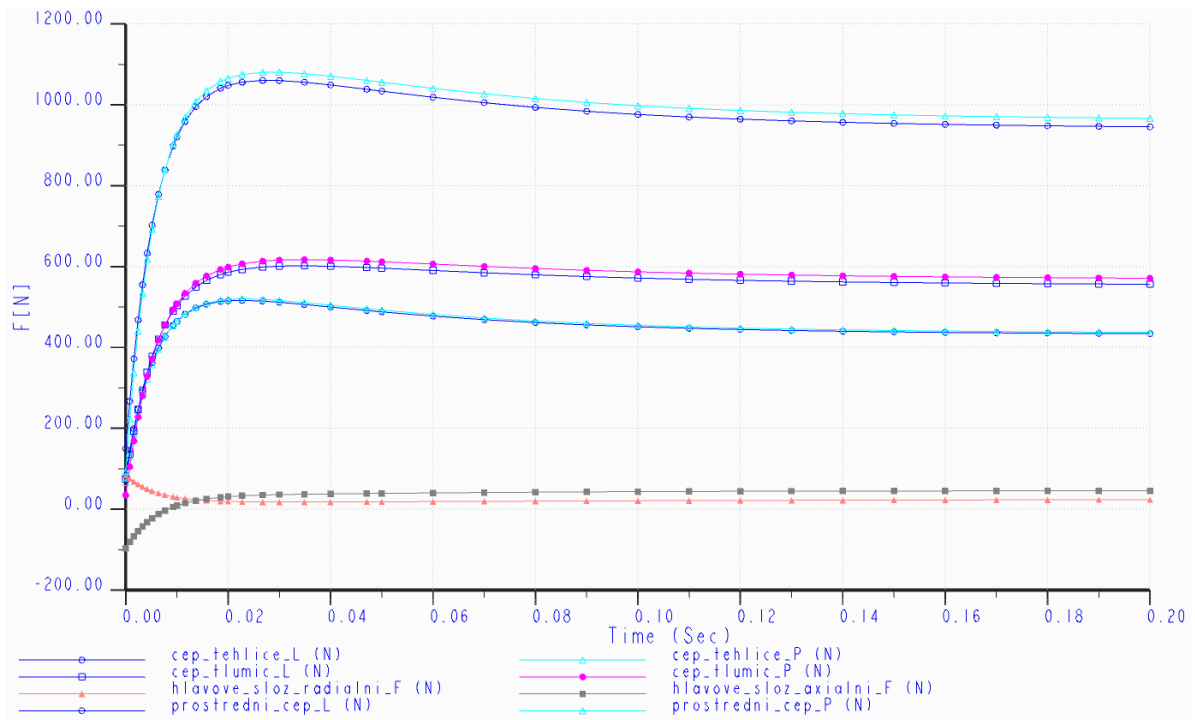
**Obrázek P.4.1:** Abs. hodnoty reakčních sil v horním vahadle a hlavovém složení při jízdě v sedě



**Obrázek P.4.2:** Absolutní hodnoty reakčních sil v čepích horního vahadla při jízdě v sedě



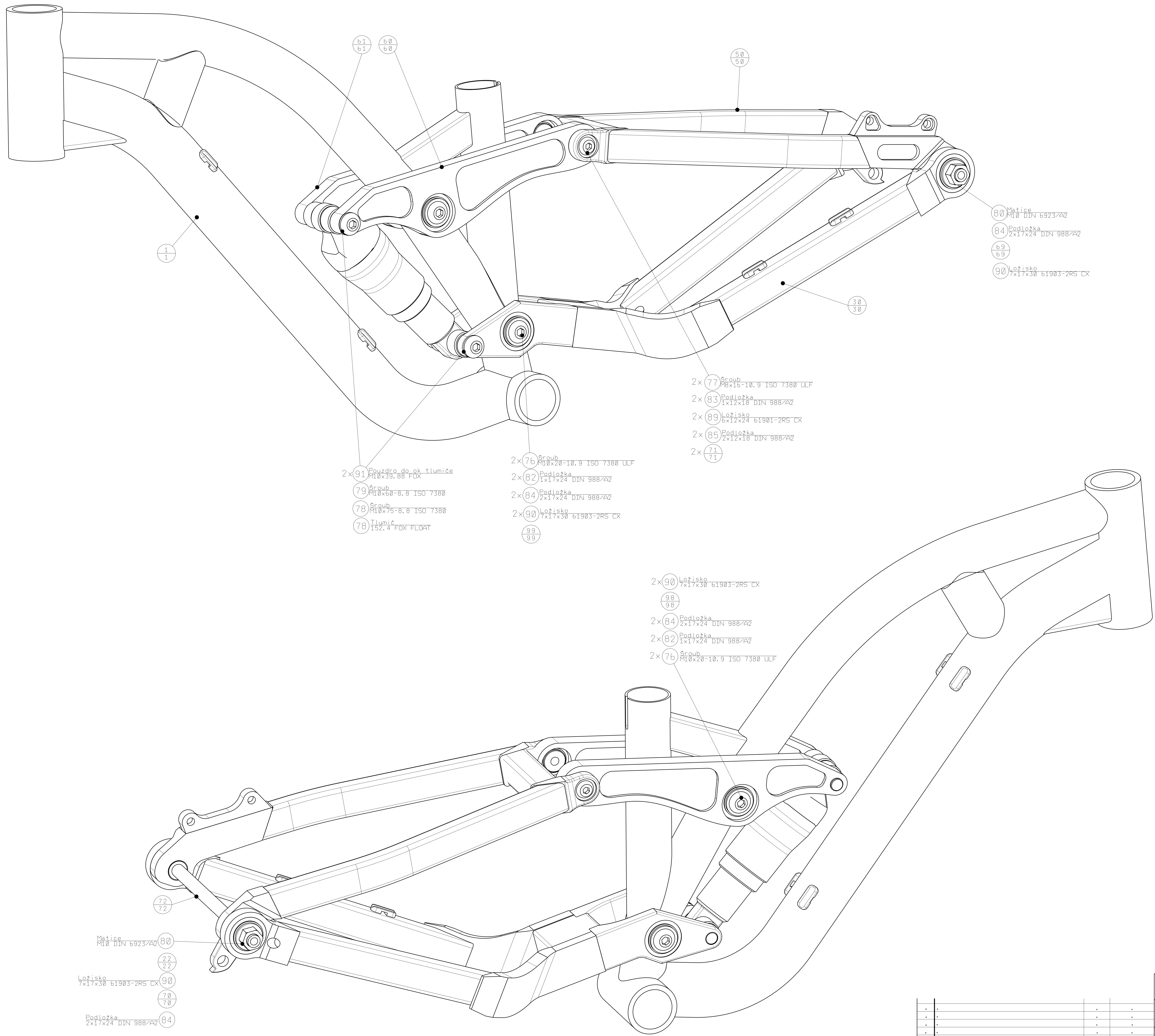
**Obrázek P.4.3:** Absolutní hodnoty reakčních sil v čepch horního vahadla při jízdě ve stoje



**Obrázek P.4.4:** Abs. hodnoty reakčních sil v horním vahadle a hlavovém složení při jízdě ve stoje



	68									
VY	69	1	Vložka (osa/brzda)	D25-26			42CrMo4	Z+N	69	
VY	70	1	Vložka (osa/pohon)	D25-26			42CrMo4	Z+N	70	
VY	71	2	Vložka (zadní vidlice/horní vahadlo)	D20-20 (M8)			42CrMo4	Z+N	71	
VY	72	1	Zadní osa	D20-205			42CrMo4	Z+N	72	
	73									
	74									
	75									
NA	76	4	Šroub	M10x20-10.9		ISO 7380 ULF				VRABEC A VRABEC
NA	77	2	Šroub	M8x16-10.9		ISO 7380 ULF				VRABEC A VRABEC
NA	78	1	Šroub	M10x75-8.8		ISO 7380				VRABEC A VRABEC
NA	79	1	Šroub	M10x60-8.8		ISO 7380				VRABEC A VRABEC
NA	80	2	Matice (rohatková s přírubou)	M10		DIN 6923/A2				AKROS.cz
	81									
NA	82	12	Podložka	1x17x24		DIN988/A2				AKROS.cz
NA	83	4	Podložka	1x12x18		DIN988/A2				AKROS.cz
NA	84	12	Podložka	2x17x24		DIN988/A2				AKROS.cz
NA	85	2	Podložka	2x12x18		DIN988/A2				AKROS.cz
	86									
	87									
	88									
NA	89	2	Ložisko	6x12x24		61901-2RS CX				Proprumysl.cz
NA	90	6	Ložisko	7x17x30		61903-2RS CX				Proprumysl.cz
NA	91	2	Pouzdro do ok tlumiče	M10x39.88	FOX					
NA	92	1	Tlumič Fox Float	152.4	FOX					
	93									
	94									
	95									
	96									
	97									
VY	98	1	Čep (horní)	D20-65 (M10)			42CrMo4	Z+N	98	
VY	99	1	Čep (spodní)	D20-65 (M10)			42CrMo4	Z+N	99	

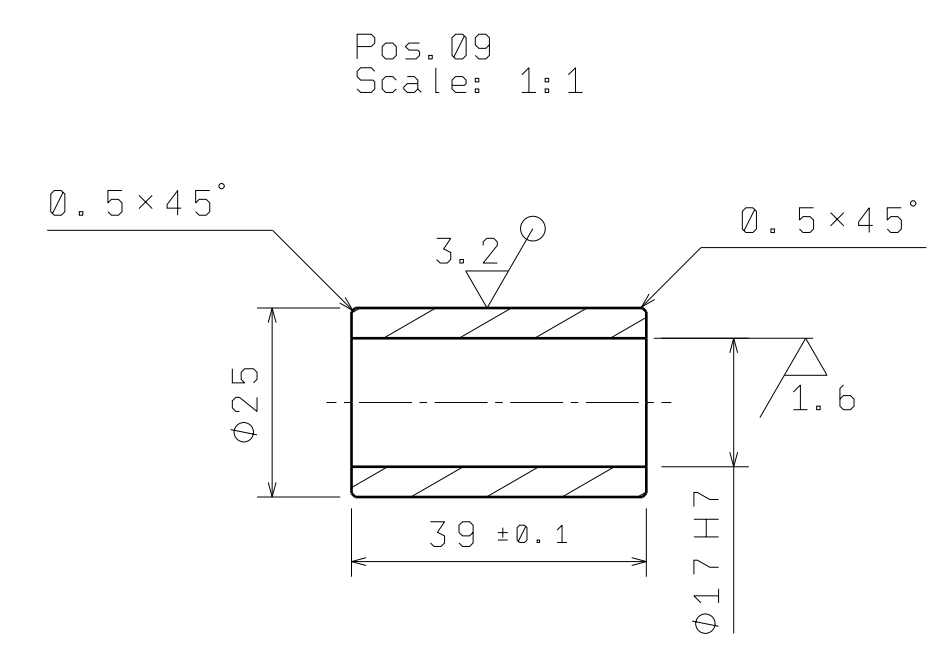
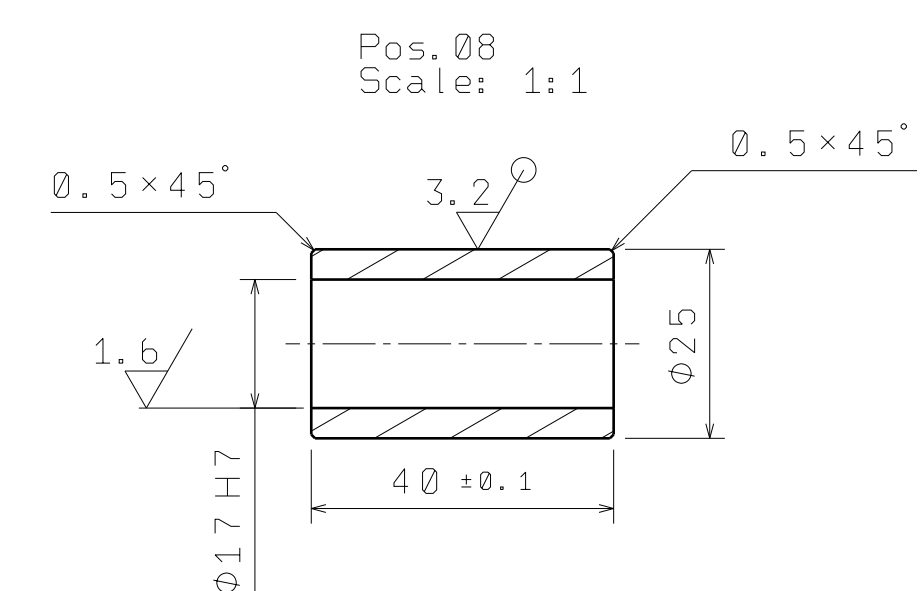
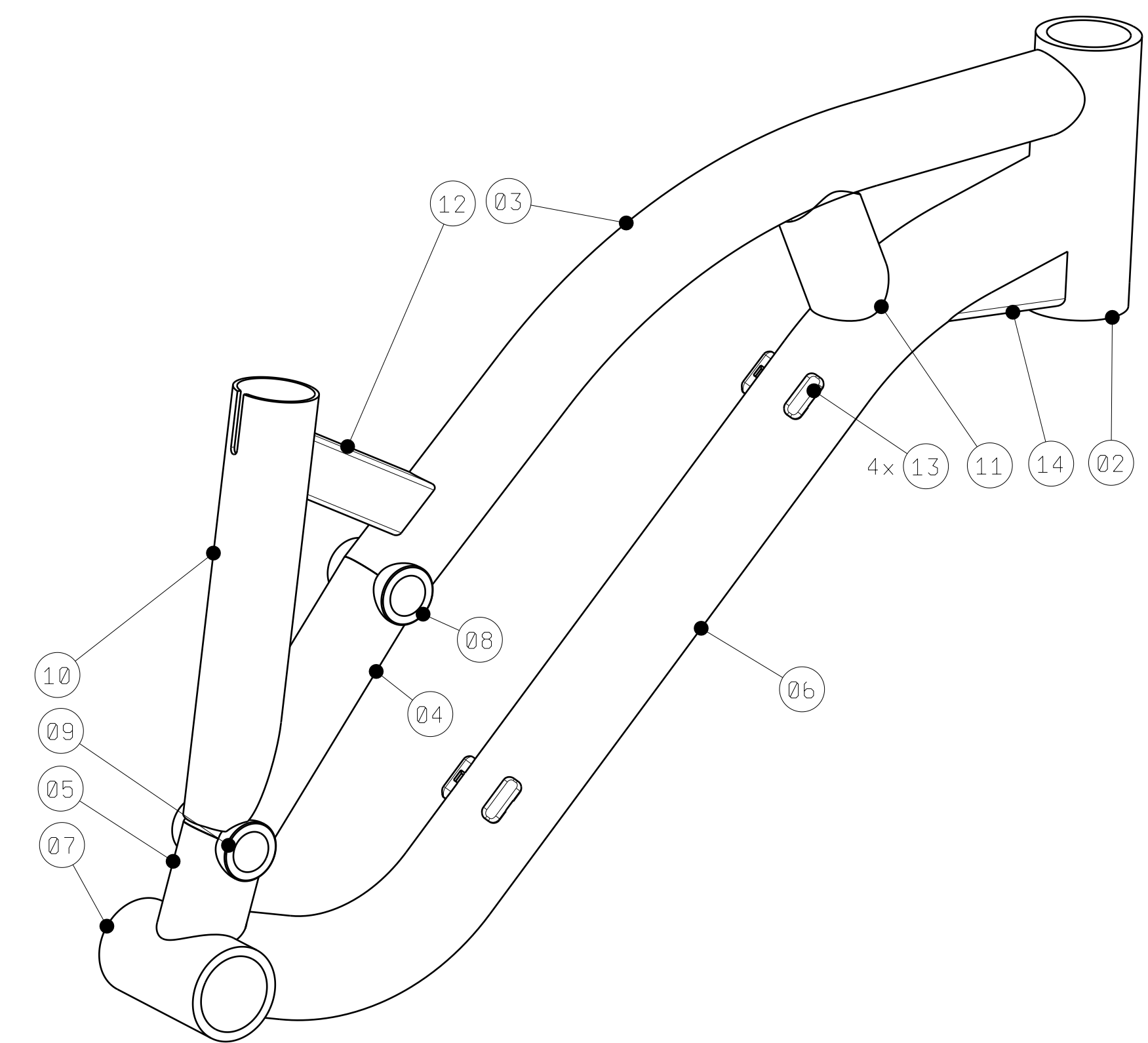
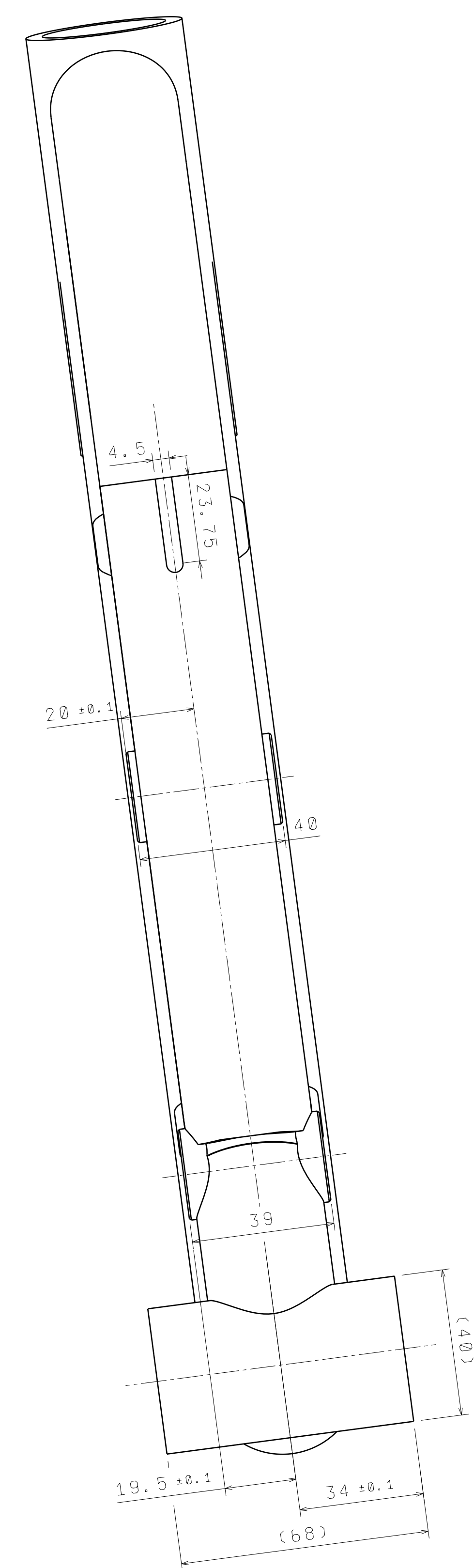
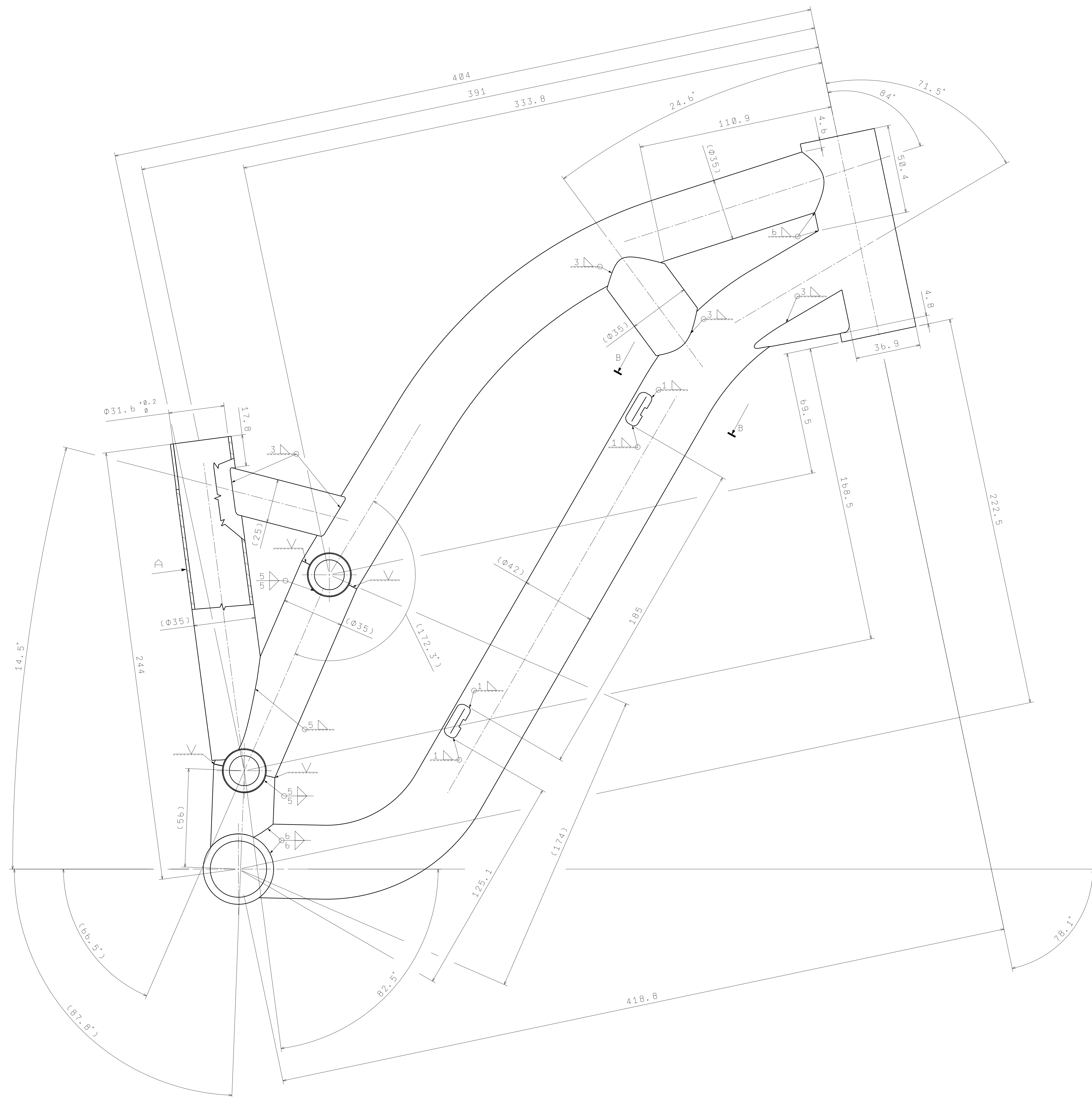


- 61 61
- 60 60
- 50 50
- 80 Matica M10 DIN 6923/A2
- 84 Podložka 2x17x24 DIN 988/A2
- 69 69
- 90 Ložisko 7x17x30 61903-2RS CX
- 30 30
- 2x 77 Šroub M8x16-10.9 ISO 7380 ULF
- 2x 83 Podložka 1x12x18 DIN 988/A2
- 2x 89 Ložisko 6x12x24 61901-2RS CX
- 2x 85 Podložka 2x12x18 DIN 988/A2
- 2x 71 71
- 2x 91 Pouzdro do ok tlumice M10x39.88 FOX
- 79 Šroub M10x60-8.8 ISO 7380
- 78 Šroub M10x75-8.8 ISO 7380
- 78 Tlumic 152.4 FOX FLOAT
- 2x 76 Šroub M10x20-10.9 ISO 7380 ULF
- 2x 82 Podložka 1x17x24 DIN 988/A2
- 2x 84 Podložka 2x17x24 DIN 988/A2
- 2x 90 Ložisko 7x17x30 61903-2RS CX
- 99 99

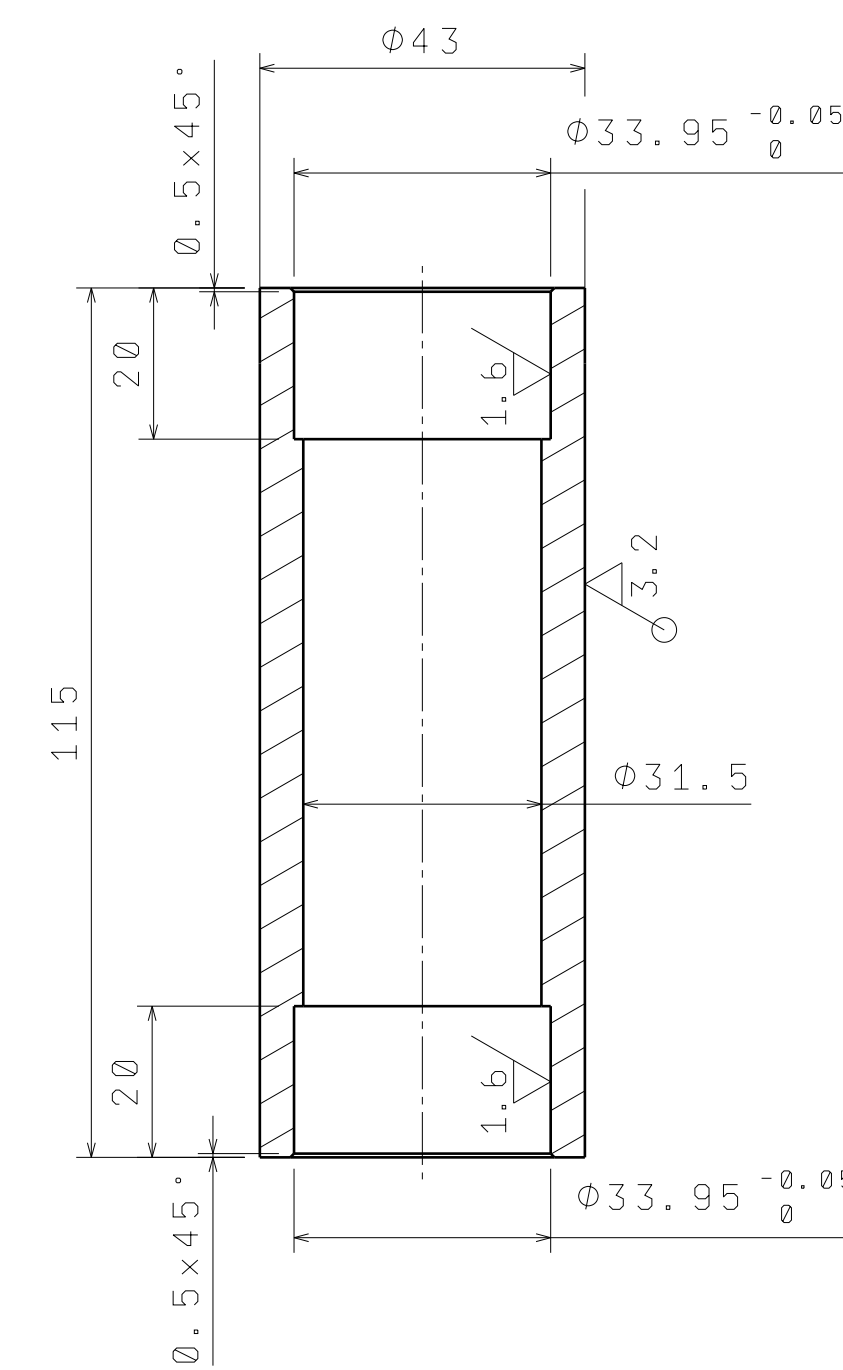
- 2x 90 Ložisko 7x17x30 61903-2RS CX
- 98 98
- 2x 84 Podložka 2x17x24 DIN 988/A2
- 2x 82 Podložka 1x17x24 DIN 988/A2
- 2x 76 Šroub M10x20-10.9 ISO 7380 ULF

- 72 72
- 80 Matica M10 DIN 6923/A2
- 22 22
- 90 Ložisko 7x17x30 61903-2RS CX
- 70 70
- 84 Podložka 2x17x24 DIN 988/A2

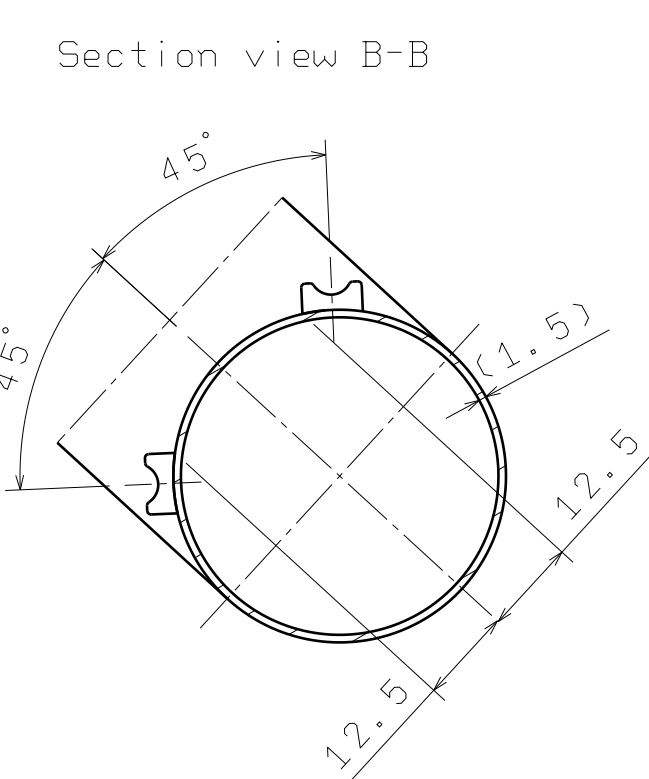
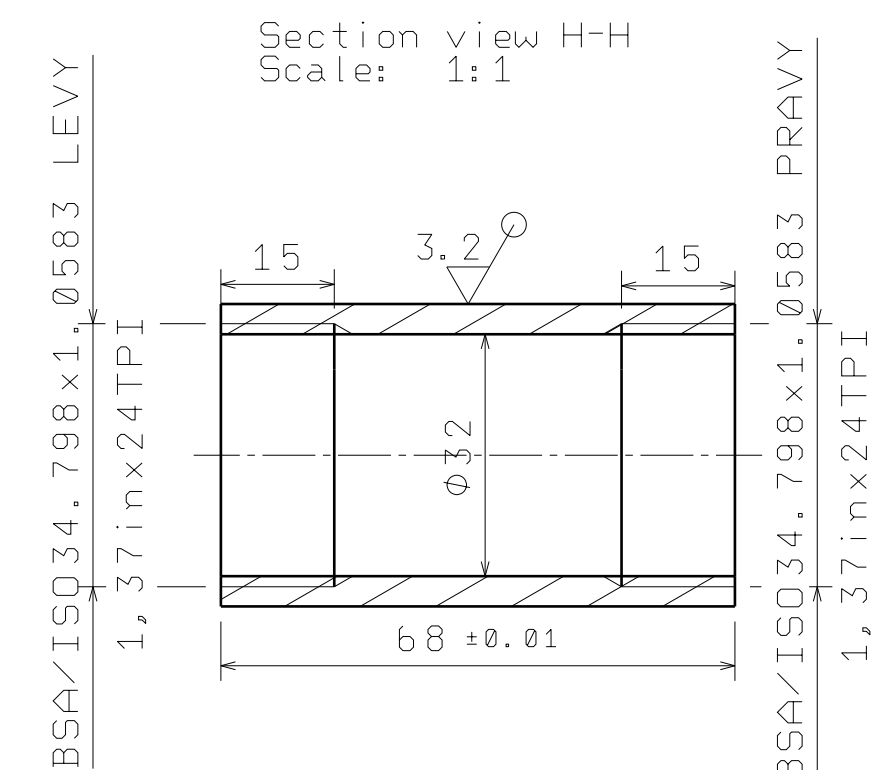
scale	2015	date	department	name	tolerance	
1:1	11.05.	FS-KSA	CADEK	Pos. 00	Version 5	
assembly description	Ram kola					
for project	Ram kola - DP - CADEK					
sheet	0 - KSA - VS - 00 - 00					
modification	description					
date	name					
datum	jmeno					
00	A0					11.05.15



Pos. 02  
Scale: 1:1



Pos. 07  
Scale: 1:1



Kvalita svaru dle CSN EN ISO 5817 Trida B  
Presnost pro svarovani dle ISO 13920-AE  
Vizualni kontrola svaru dle CSN EN 970

INDEX		MODIFICATION DESCRIPTION		DATE		NAME	
NO.	REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHK.	DATE	BY
01	1	EN AW 7020T6	S.BOW			0.4	

RAMOVY TROJUHELNÍK							
INDEX	REV.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHK.	DATE	BY
01	1	EN AW 7020T6	S.BOW			0.4	

Clearance tolerances		rozmerové tolerance	
Pin and fitting borings ±0.05	1.6/	2015	11.05.
kolikove a prazne diry ±0.05	6.3/	FS - KSA	CADEK
Thread and through borings ±0.2		FS - KSA	CADEK
závitové a průchozí diry ±0.2			

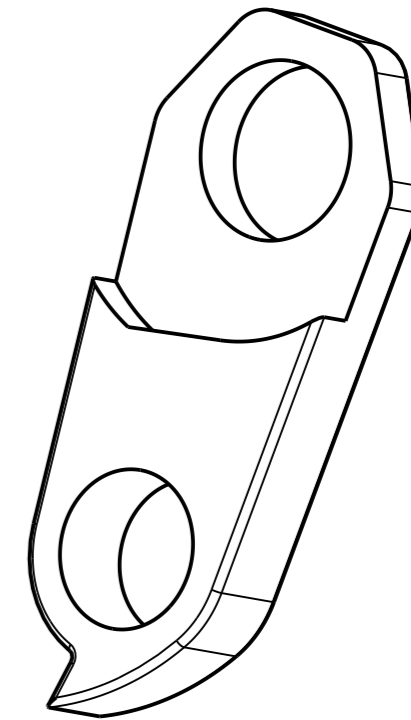
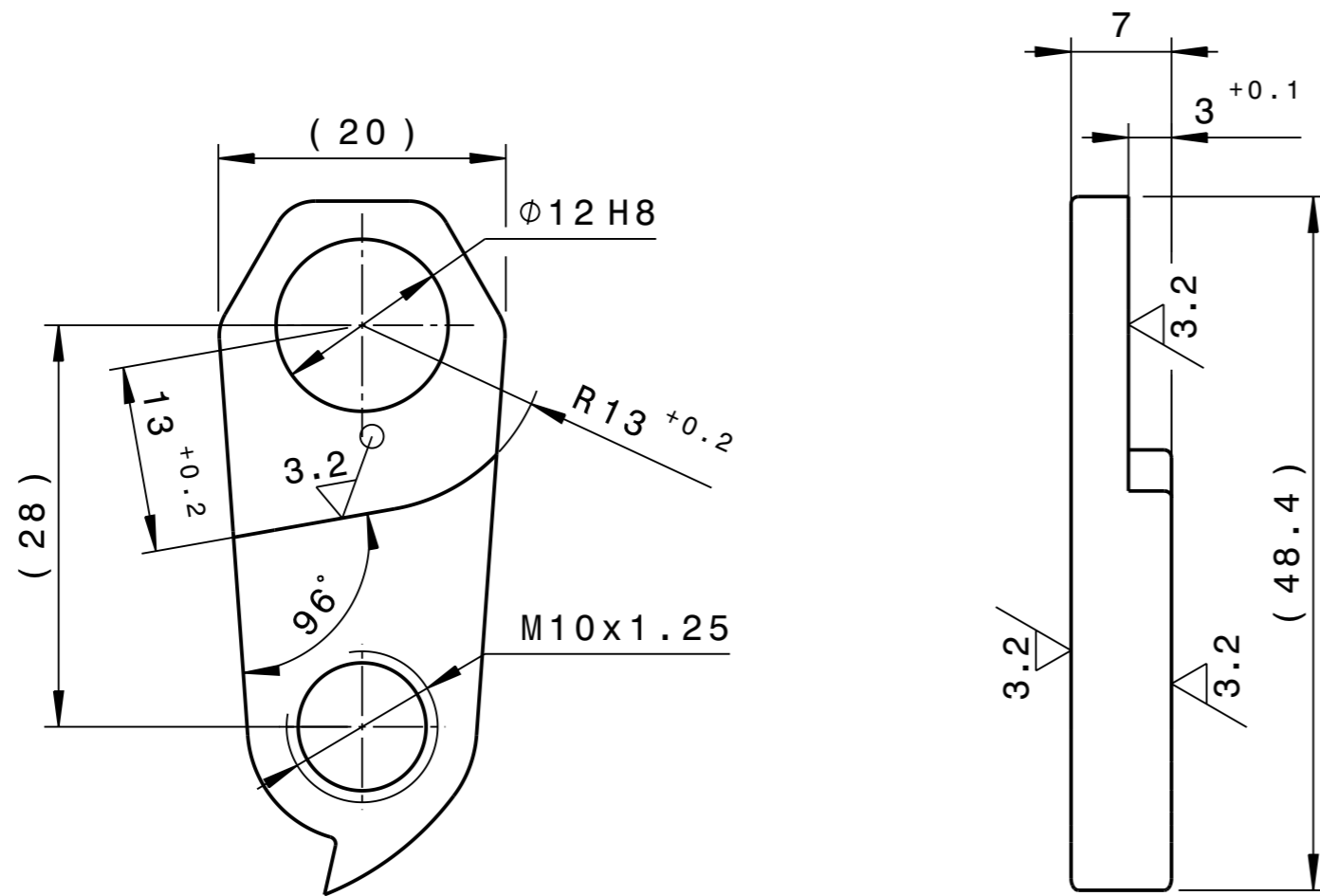
  

assembly description:		component list:	
Ram kola		Ram kola	
for project:		for project:	
Ram kola - DP - CADEK		Ram kola - DP - CADEK	

TUL		O - KSA - VS - 00 - 01		01		AO		11.05.15	
TUL		O - KSA - VS - 00 - 01		01		AO		11.05.15	

Vypalek  
Vypalovací sablona  
Srazit hrany  
Kvalita svaru dle CSN EN ISO 5817 Trida B  
Presnost pro svarovani dle ISO 13920-AE  
Vizualni kontrola svaru dle CSN EN 970  
Kolikové a lícované dírky ±0.05, Ra 1.6  
Závitové a průchozí dírky ±0.2, Ra 6.3  
Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH



Spasovat s pozicí 50 a 70

sharp edges removed  
hrany srazeny

Clearance tolerances  
rozměrové tolerance

Pin and fitting borings ±0.05  
kolíkové a přesné díry ±0.05 1.6

Thread and through borings ±0.2  
závitové a průchozí díry ±0.2 6.3

Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring

Vaechny tolerované rozměry a  
lícování podléhají kontrole

Výpalek  
Vypalovací šablona

Srazit hrany

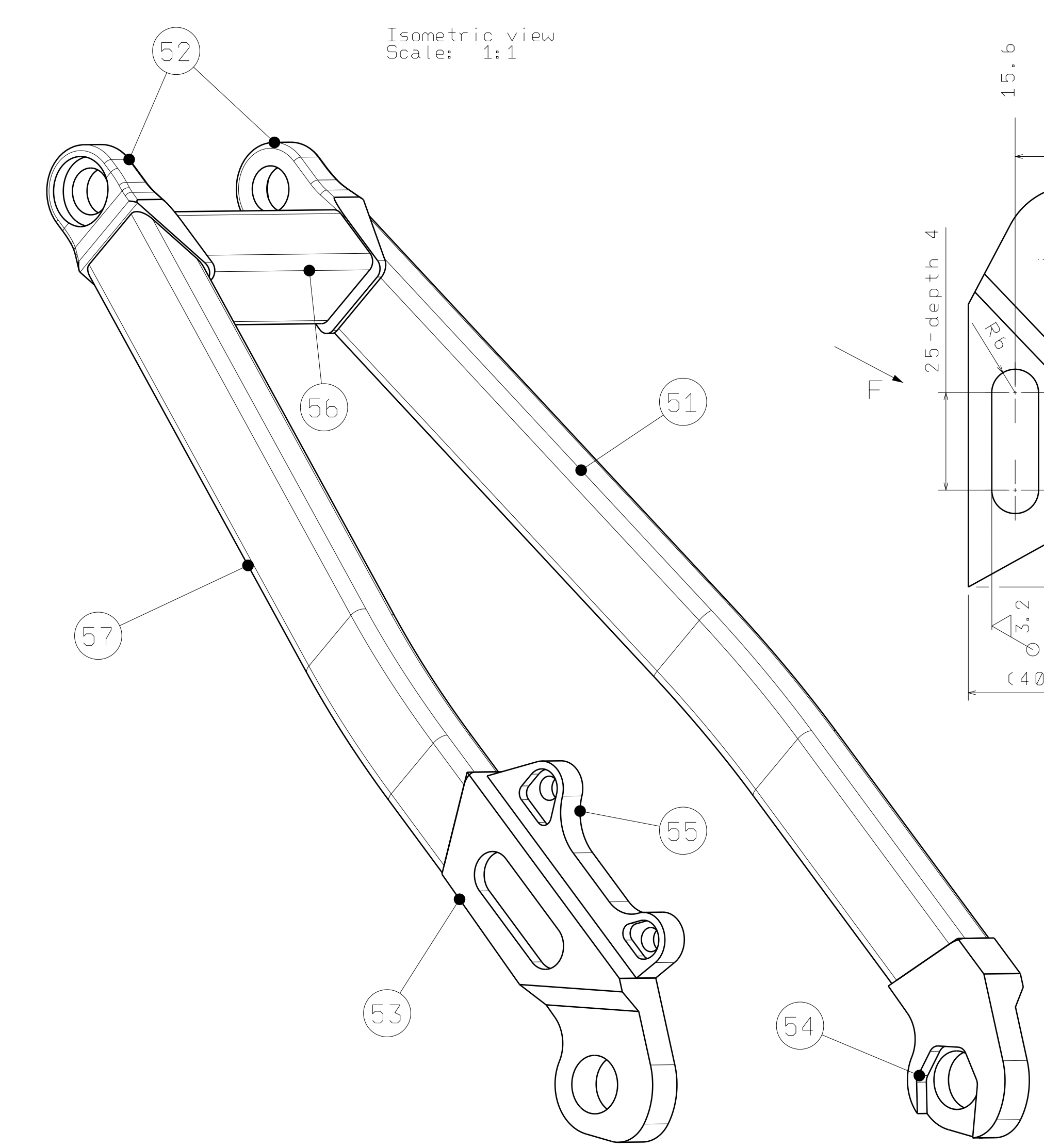
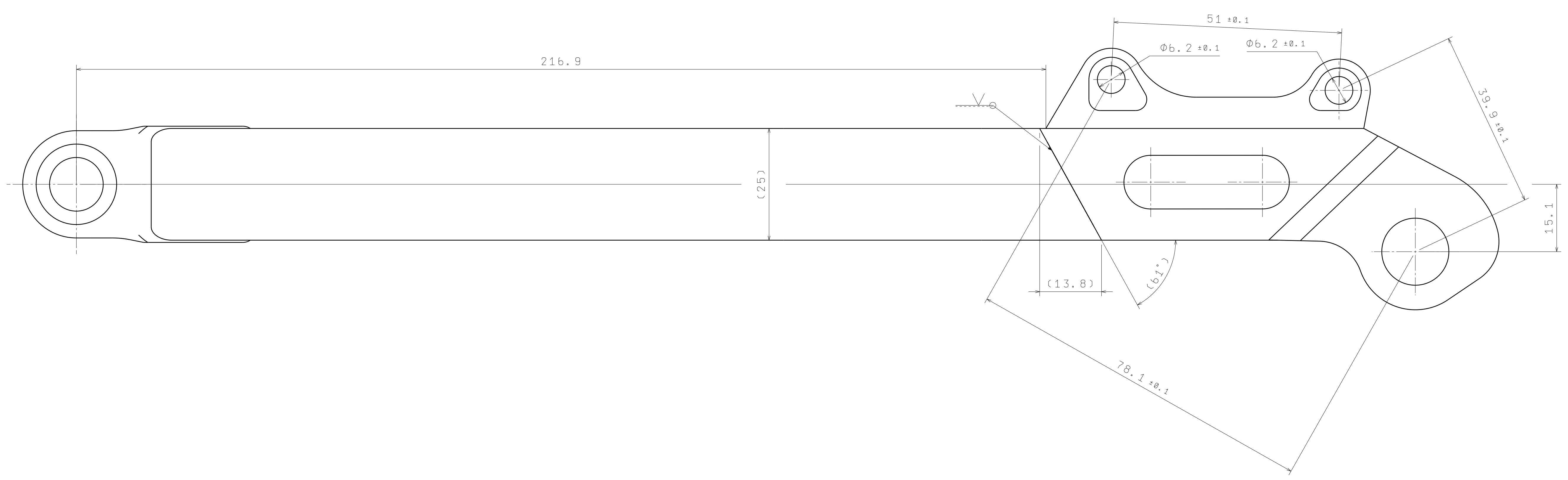
Kolíkové a lícované díry ±0.05, Ra 1.6  
Závitové a průchozí díry ±0.2, Ra 6.3

Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH

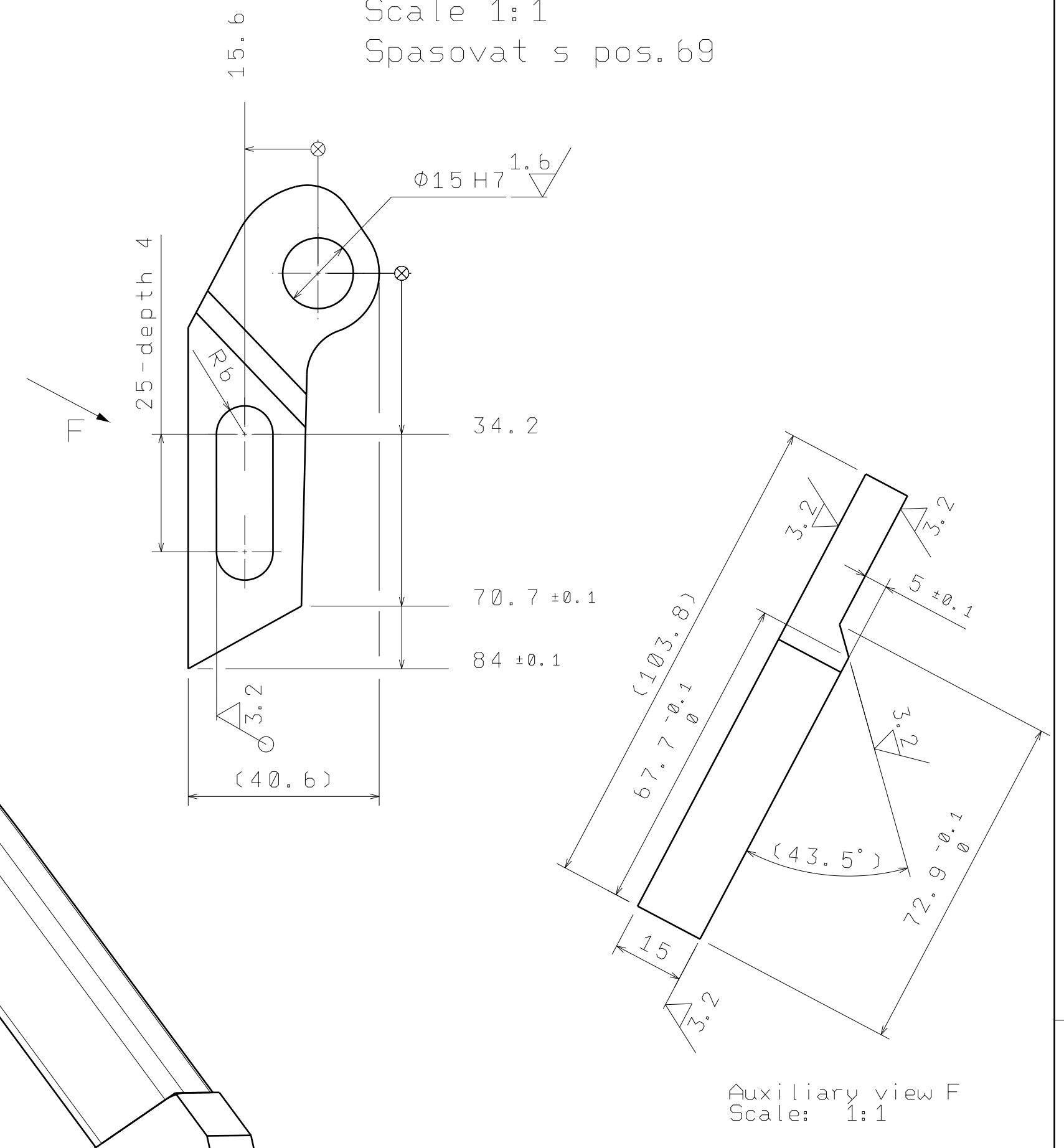
Pos. poz.	numer. kusu	material material	clear dimension rozměr nacistó	hardened kaleno	case-hardened povrchově kaleno	hardness penetr.: hloubka prokalení	tempered zúslachtěno	nitridovan	HRC:	0,4	58±2	ISO 1302 raw 2	ra0	ra0.1	ra0.4	ra1.6	ra6.3	ra0.1	ra0.4	ra1.6	ra6.3										
22	1	11500	10x26x55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	58±2				<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>										
scale meritko	page-No. list c.	drawing-No. vykres c.	designation označení	Patka																											
2:1	-	-	-	scale meritko	2015	date datum	department katedra	name jmeno	tolerance ISO 8015 general tolerance ISO 2768-mH	Tolerance ISO 8015 vseobecna tolerance ISO 2768-mH												CATIA Version 5									
assembly designation oznaceni sestavy				Ram kola				contents / obsah																							
for project pro projekt				Ram kola - DP - CADEK				Pos. 22																							
drawing-No. vykres c.				3 - KSA - VS - 00 - 22				page-No. list c.				22				size formát				A3				drawing update: revize z:				11.05.15			
TUL																															



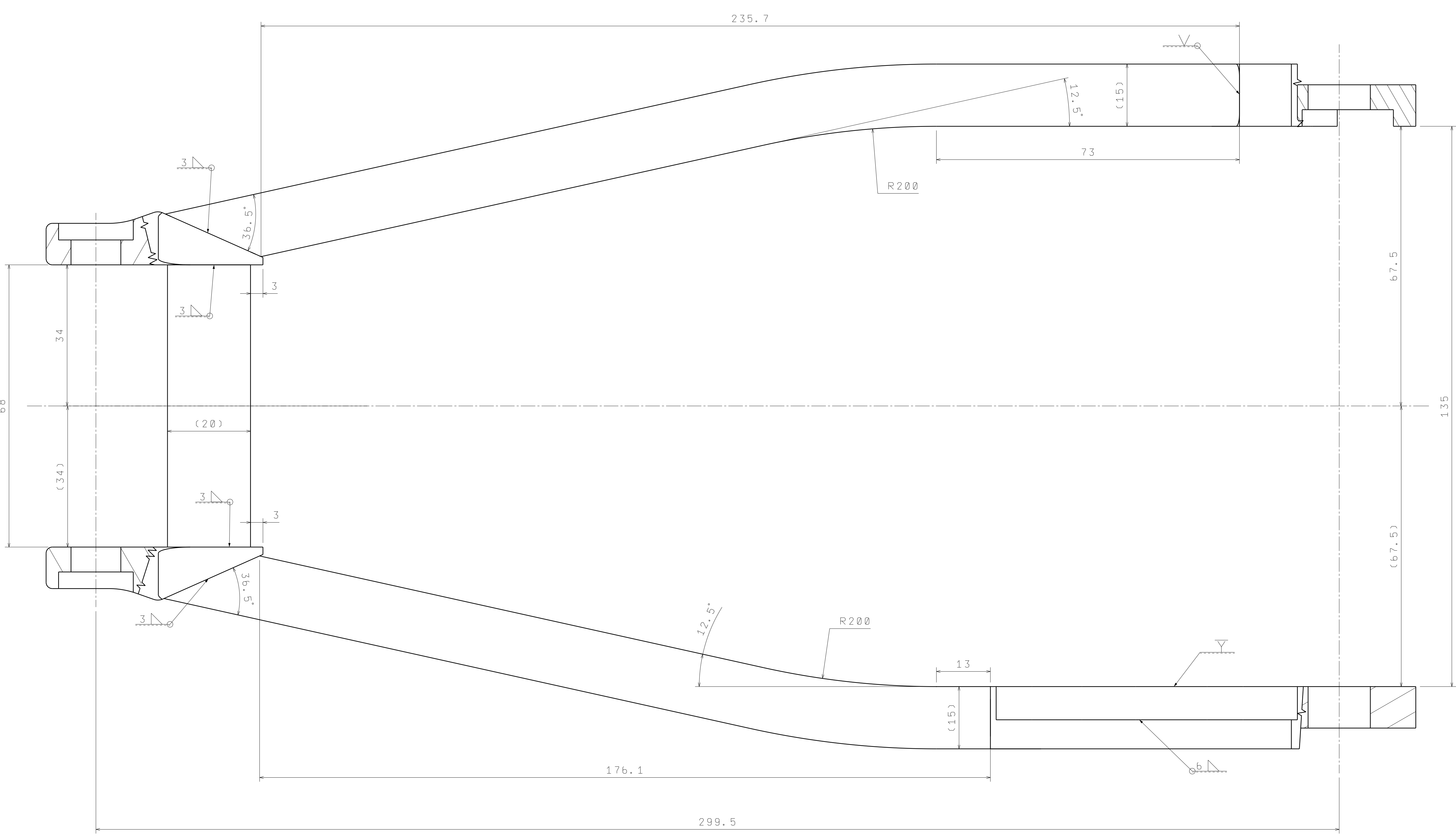




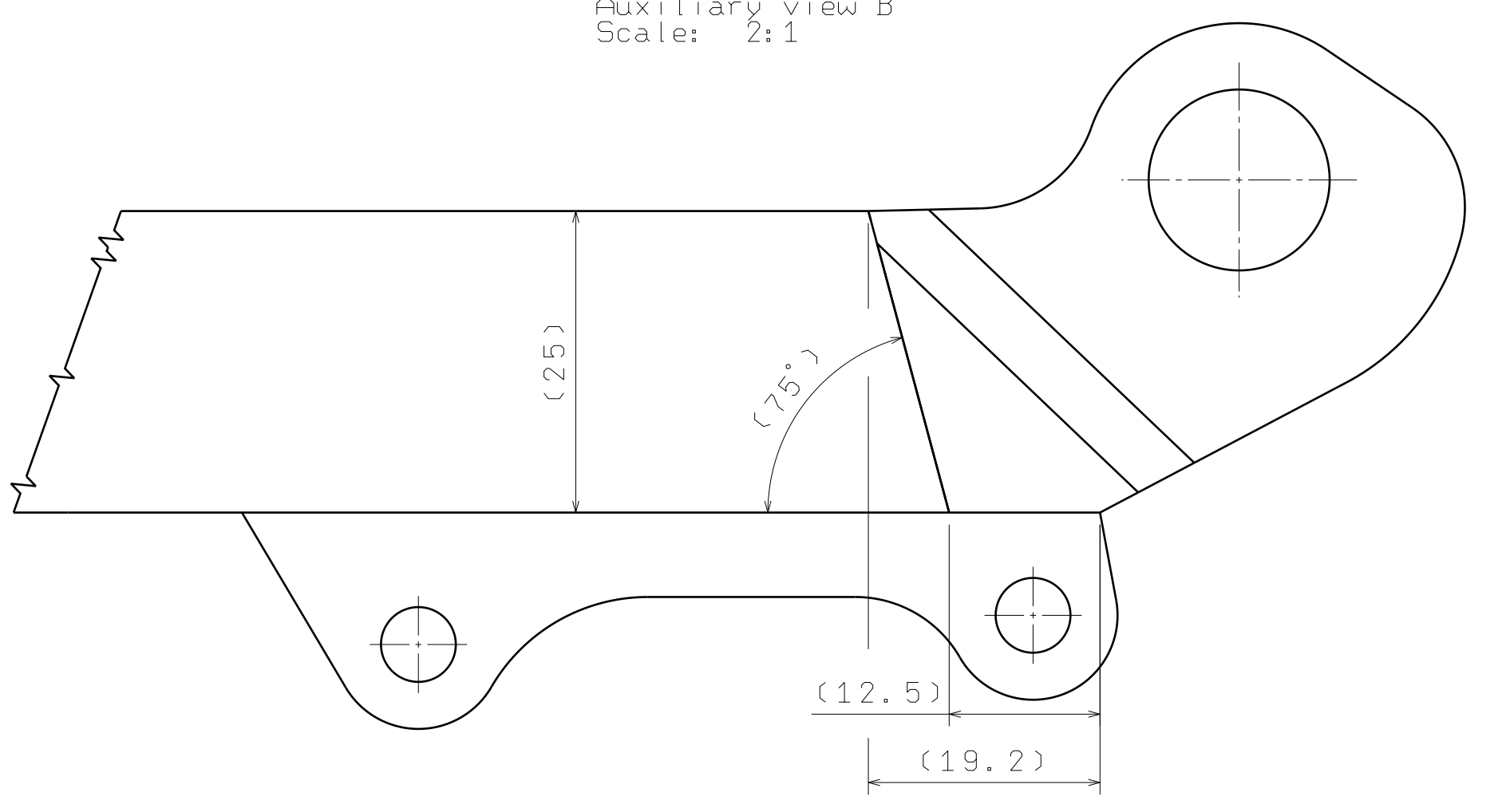
Pos. 53  
Scale 1:1  
Spasovat s pos. 69



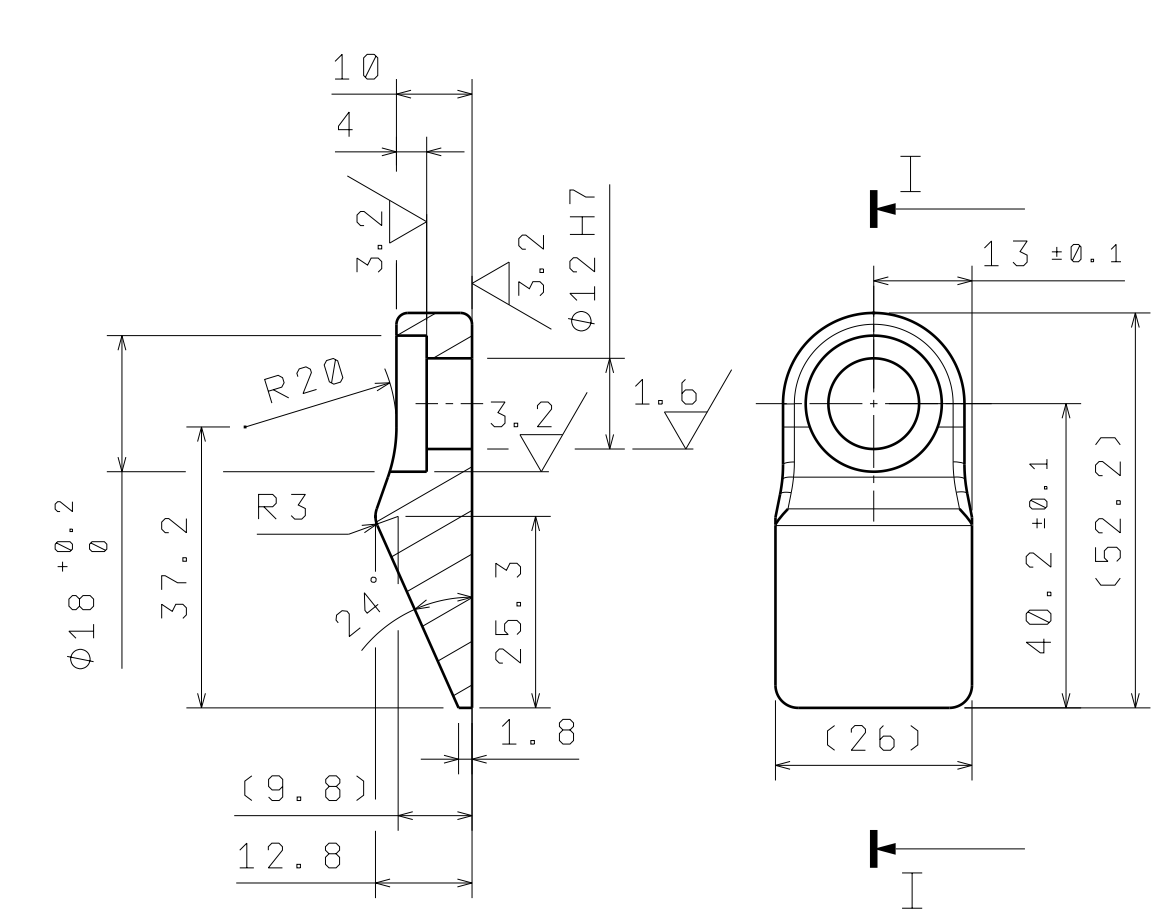
Auxiliary view F  
Scale: 1:1



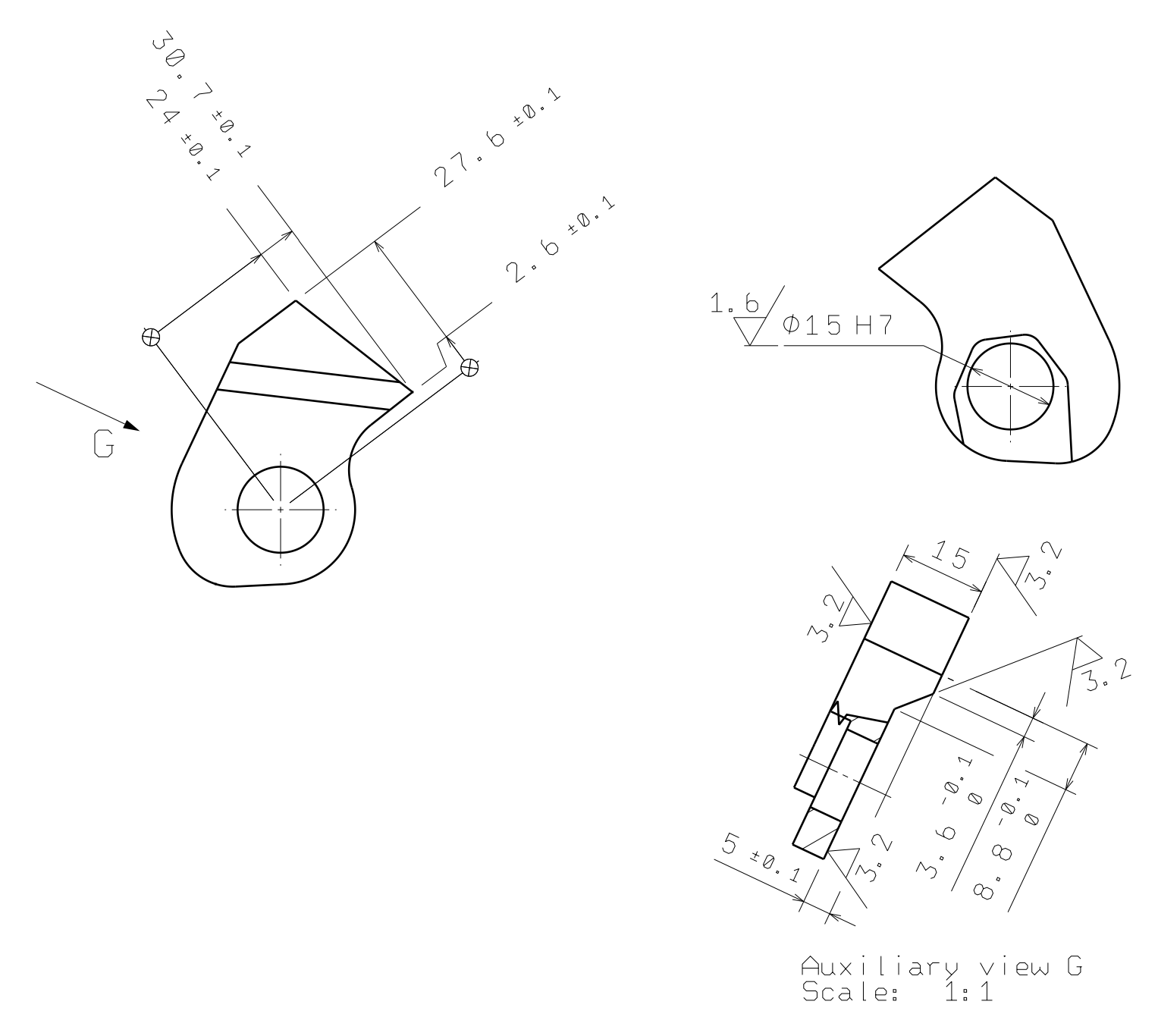
Auxiliary view B  
Scale: 2:1



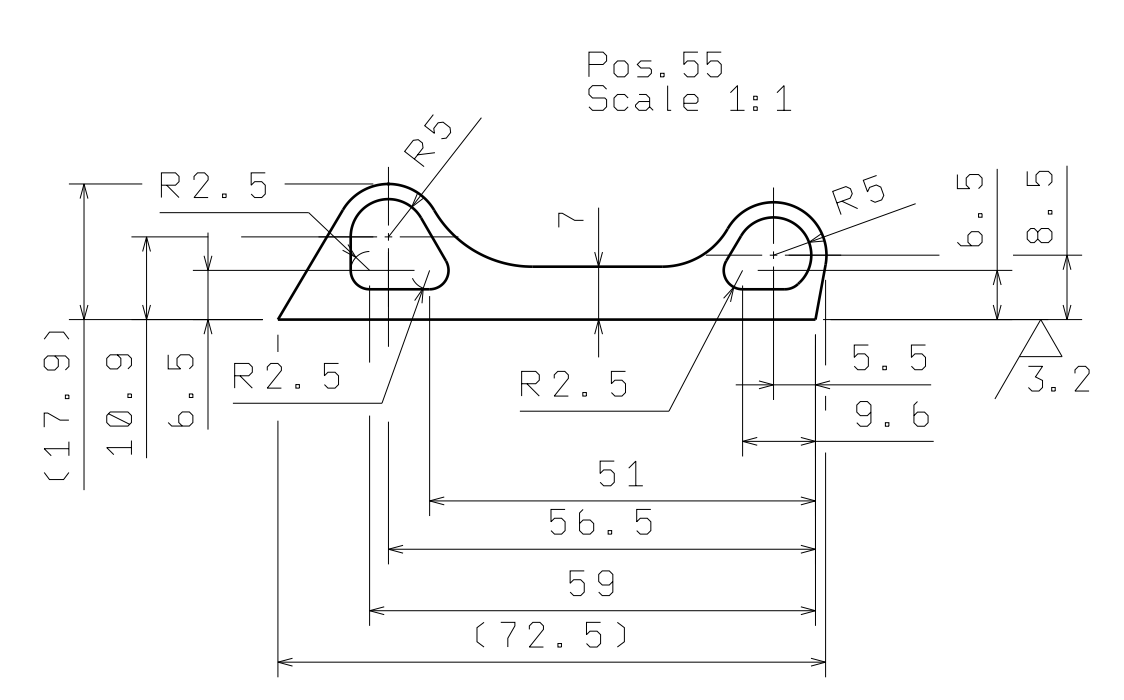
Pos. 52  
Scale 1:1  
Spasovat s pozici 71



Section view I-I  
Scale: 1:1

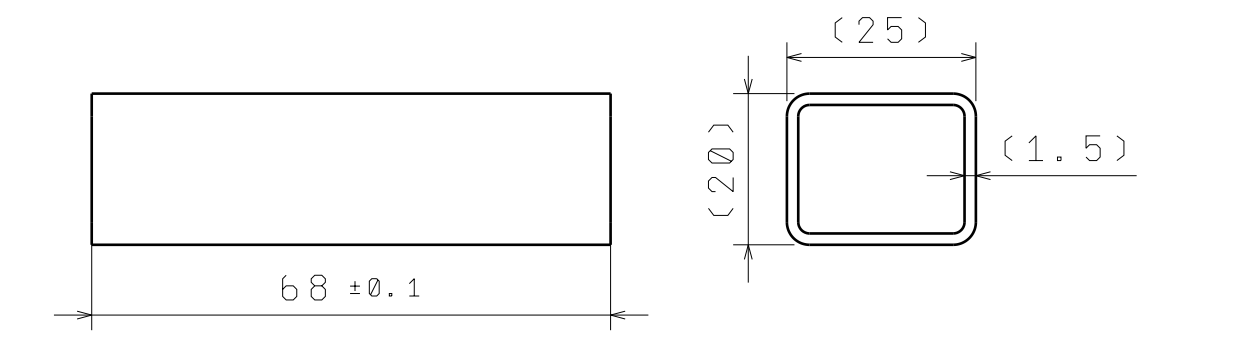


Auxiliary view G  
Scale: 1:1



Pos. 55  
Scale 1:1

Pos. 56  
Scale 1:1



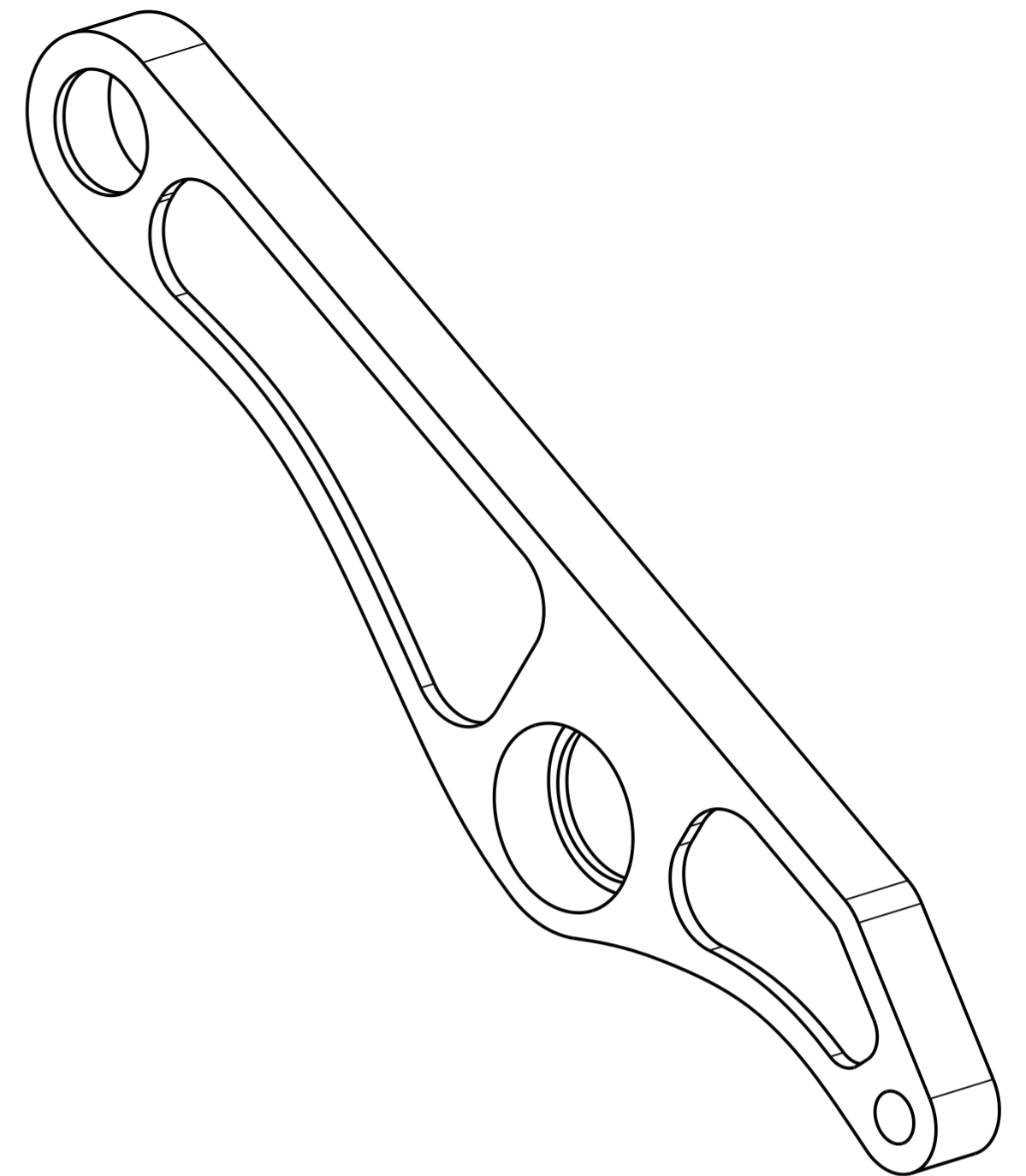
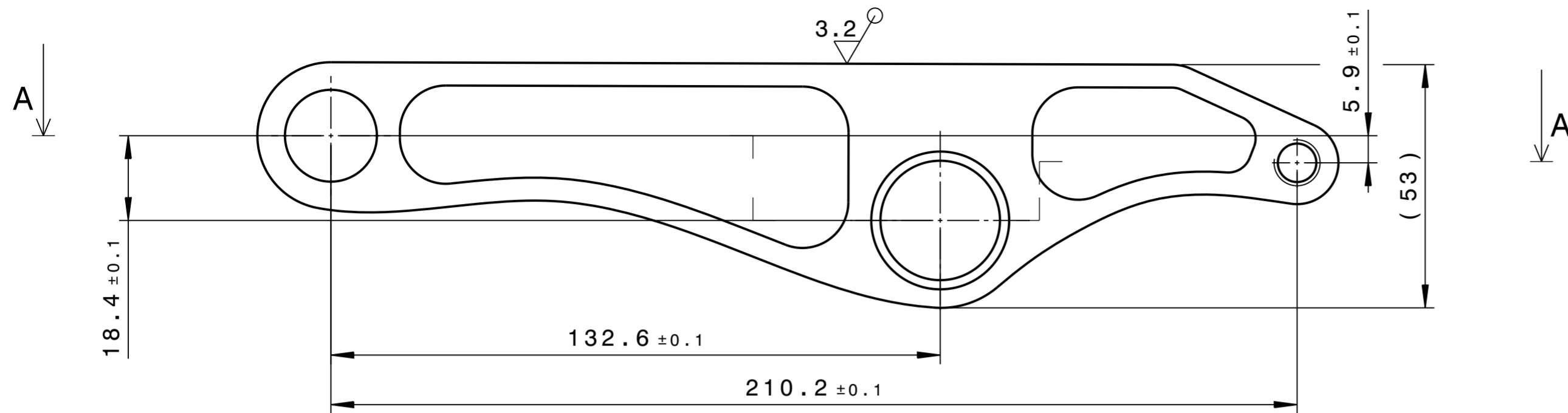
Pos. 52, 53 a 54, hrany zaobleny R=1.5 mm  
Pos. 55, hrany zaobleny R=1 mm  
Spasovat s pozici 22, 30, 89, 69, 70 a 71

Kvalita svaru dle CSN EN ISO 5817 Trida B  
Presnost pro svarovani dle ISO 13920-AE  
Vizualni kontrola svaru dle CSN EN 970

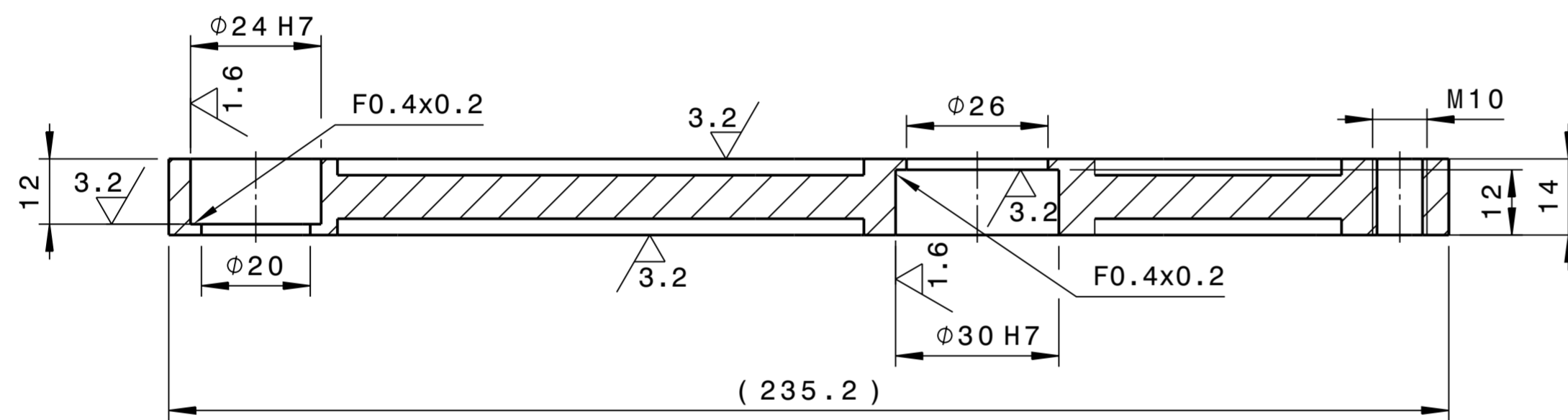
Výpalek  
Vypalovací šablona  
Pos. 52, 53 a 54, zaoblit hrany R=1.5 mm  
Pos. 55, hrany zaobleny R=1 mm  
Kvalita svaru dle CSN EN ISO 5817 Trida B  
Presnost pro svarovani ISO 13920-AE  
Vizualni kontrola svaru CSN EN 970  
Kolíkové a líčované díry ±0.05, Ra 1.6  
Závítové a průchozí díry ±0.2, Ra 6.3  
Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH

a = dle vykresu		INDEX		MODIFICATION DESCRIPTION		DATE		NAME	
NO.	DATE	DESCRIPTION	BY	DATE	BY	DATE	BY	DATE	BY
50	11.05.2015	sharp edges removed zaoblit hrany R=1.5mm	S.BOW	11.05.2015	S.BOW	11.05.2015	S.BOW	11.05.2015	S.BOW
<p><b>Clearance tolerances</b> rozmerove tolerance</p> <p>Pin and fitting borings ±0.05 kolikove a prasne díry ±0.05</p> <p>Thread and through borings ±0.2 zavítové a průchozí díry ±0.2</p> <p>Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring</p> <p>Shedky tolerované rozměry a líčované podléhají kontrole</p>									
Scale: 2:1		Tehlice		2015		FS-KSA		CADEK	
assembly description: Ram kola		drawing No. 0-KSA-VS-00-50		sheet 50		format A0		drawing update: 11.05.15	
for project: Ram kola - DP - CADEK		TUL		0-KSA-VS-00-50		50		A0	





Section view A-A



Spasovat s pozicí 89 a 90  
 Vaechny díry souose k pozici 60  
 Frézování tvarových ploch dle CAD modelu

Výpalek  
 Vypalovací šablona

Srazit hrany

Kolíkové a lícované díry  $\pm 0.05$ , Ra 1.6  
 Závítové a průchozí díry  $\pm 0.2$ , Ra 6.3

Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH

sharp edges removed  
 hrany srazeny

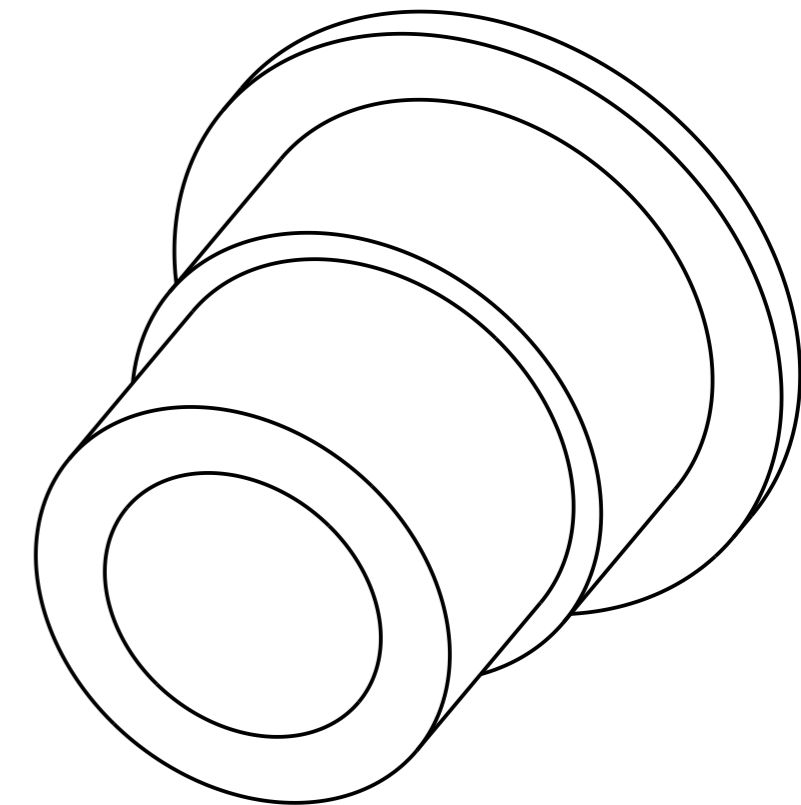
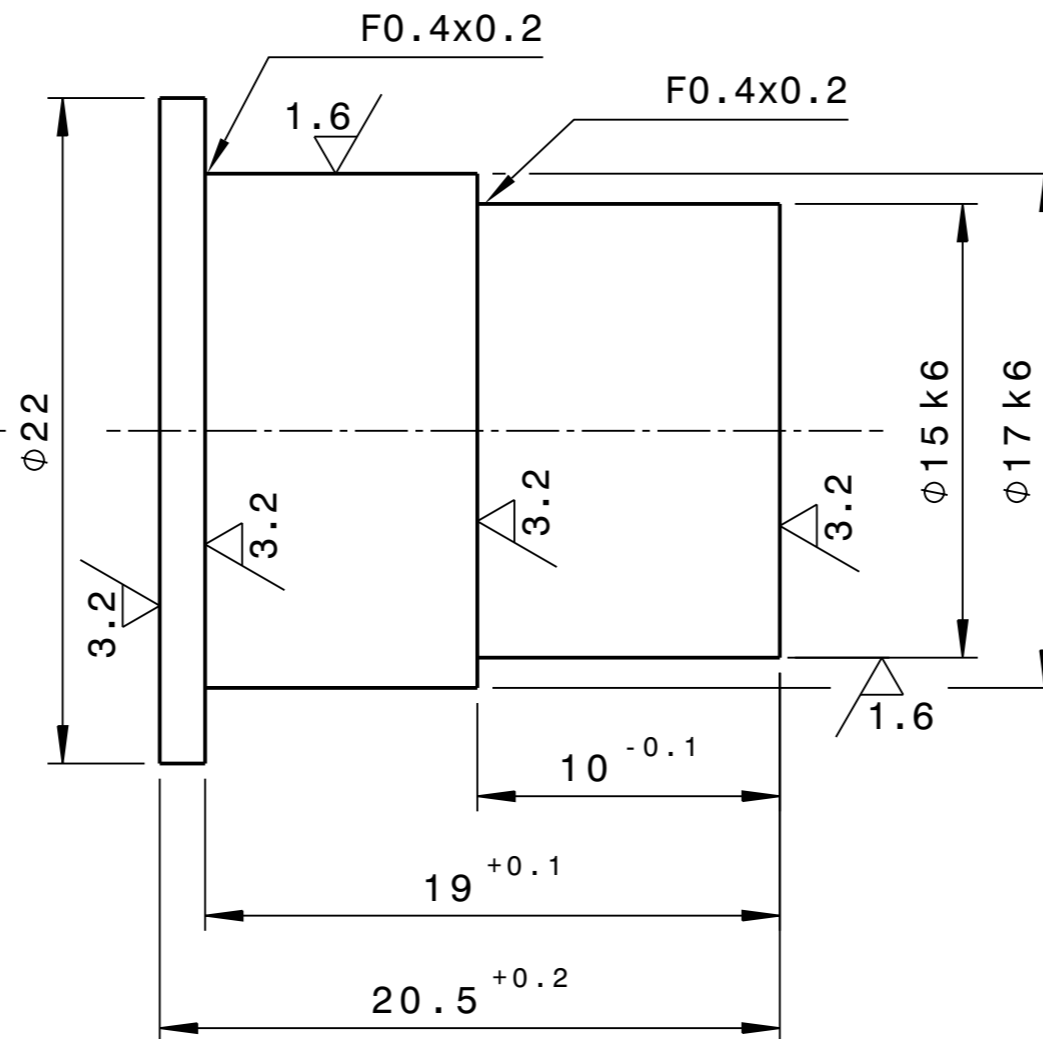
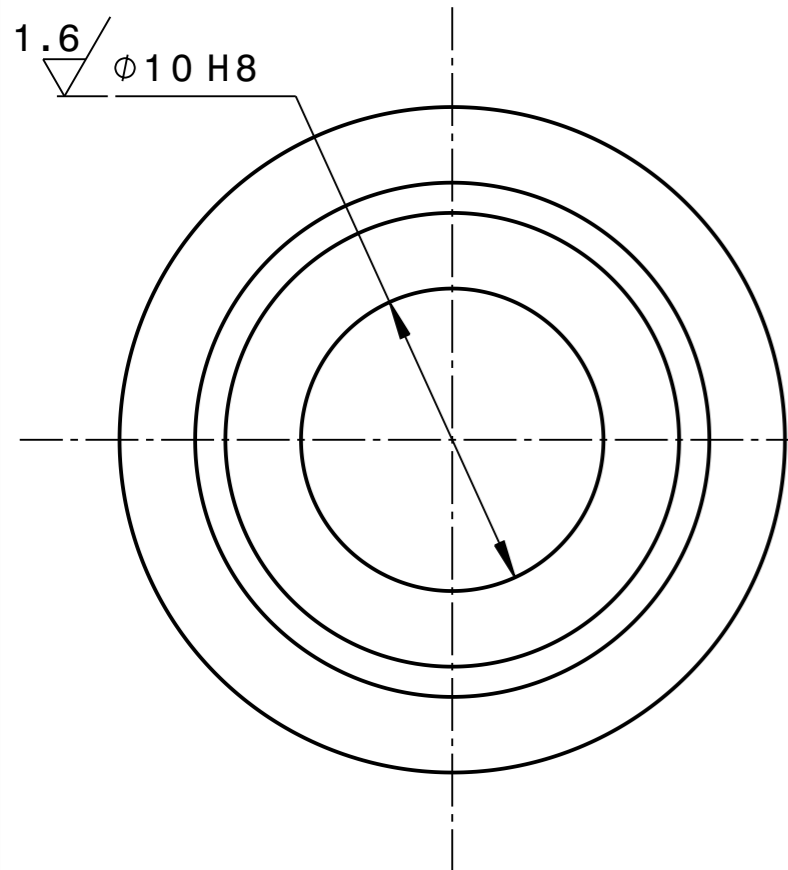
Clearance tolerances  
 rozmerové tolerance

Pin and fitting borings $\pm 0.05$ kolikove a presne díry $\pm 0.05$	1.6/
Thread and through borings $\pm 0.2$ zavitove a pruchozí díry $\pm 0.2$	6.3/
Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring	
Vaechny tolerované rozměry a lícování podléhají kontrole	

Pos. 61	number 1	material EN AW 7020T6	clear dimension 15x53x236	hardened kaleno	case-hardened pozrtove kaleno	hardness penet.: 0,4	nitridovan	HRC: 58±2	rough =Rah	fine =Raf
scale 1:1	page-No. -	drawing-No. -	designations Horní vahadlo (pohon)	ISO 2768-mH	ISO 8015	ISO 2768-mH	ISO 8015	ISO 2768-mH	ISO 2768-mH	ISO 2768-mH
assembly designation Ram kola			contents / obsah Pos. 61			for project Ram kola - DP - CADEK			drawing update: revize z:	
TUL			drawing-No. 2-KSA-VS-00-61	page-No. 61	size A2	drawing update: 11.05.15				

ISO 1302	raw 2	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50	100
ISO 1302	raw 2	1.6	3.2	6.3	12.5	25	50	100





Spasovat s pozicí 50, 72 a 90

sharp edges removed  
hrany srazeny

Clearance tolerances  
rozměrové tolerance

Pin and fitting borings  $\pm 0.05$   
kolíkové a přesné díry  $\pm 0.05$

Thread and through borings  $\pm 0.2$   
závitové a průchozí díry  $\pm 0.2$

Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring

Vaechny tolerované rozměry a lícování podléhají kontrole

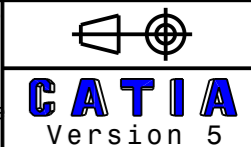
Srazit hrany

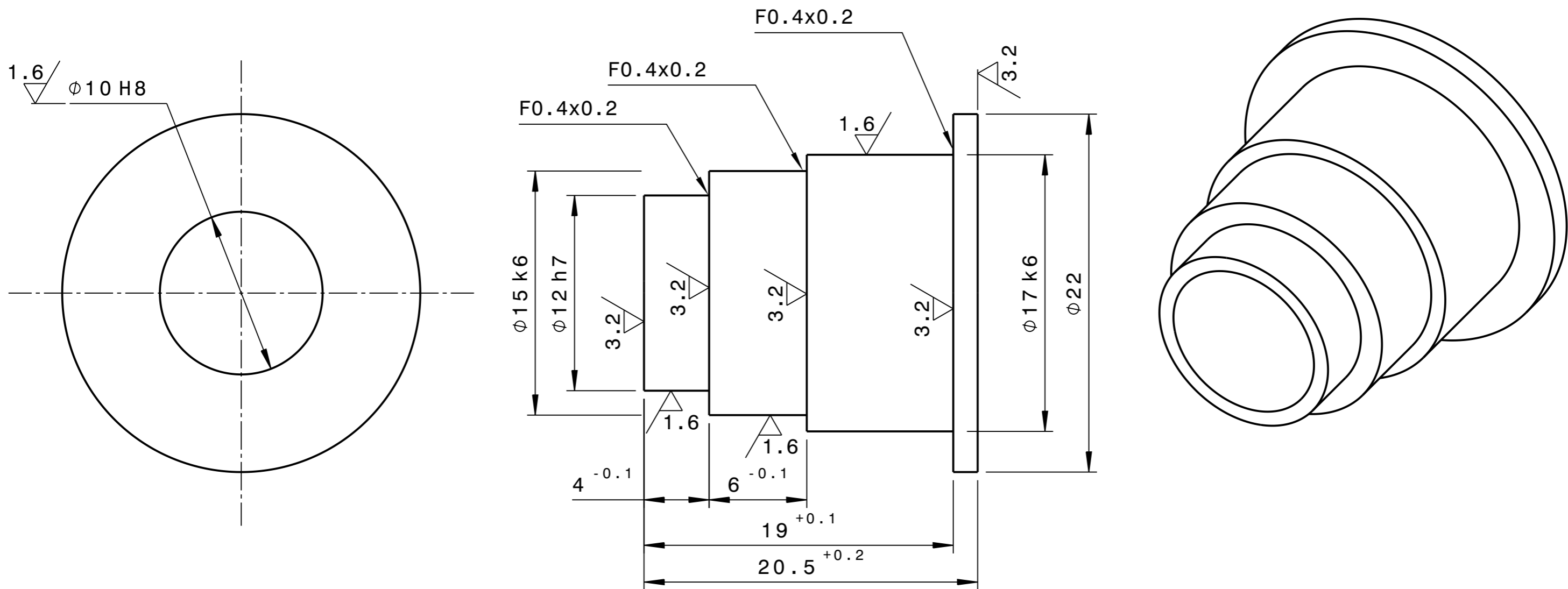
Zušlechtěno na střední hodnoty  
Nitridováno 0.4 mm - HRC  $58 \pm 2$

Kolíkové a lícované díry  $\pm 0.05$ , Ra 1.6  
Závitové a průchozí díry  $\pm 0.2$ , Ra 6.3

Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH

Pos. poz.	numer kusu	material material	clear dimension rozmer nacisto	hardened kaleno	case-hardened povrchove kaleno	hardness penetr.: hloubka prokaleni	tempered zuselechno	nitridovan	0,4	HRC: 58 $\pm$ 2	<input checked="" type="checkbox"/> =roh	<input checked="" type="checkbox"/> =raw
69	1	42CrMo4	D25-26	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/> =Ra6.3	<input type="checkbox"/>
scale meritko	page-No. list c.	drawing-No. vykres c.	designation oznaceni	Vlozka (osa/brzda)								
-	-	.										
scale meritko	2015	date datum	department katedra	name jmeno	tolerance ISO 8015 general tolerance ISO 2768-mH	Tolerance ISO 8015 vseobecna tolerance ISO 2768-mH						
4:1	sign by kreslil	11.05.	FS-KSA	CADEK	DIN ISO 1302 raw 2							
	inspect by kontrola	11.05.	FS-KSA	CADEK	<input type="checkbox"/> =Ra1.6 <input type="checkbox"/> =Ra0.4 <input type="checkbox"/> =Ra0.1							
assembly designation oznaceni sestavy					Ram kola			contents / obsah				
for project pro projekt					Ram kola - DP - CADEK			Pos. 69				
<b>TUL</b>					drawing-No. vykres c.	page-No. list c.	size formát	drawing update: revize z:				
					3-KSA-VS-00-69	69	A3	11.05.15				





Spasovat s pozicí 22, 72, 50 a 90

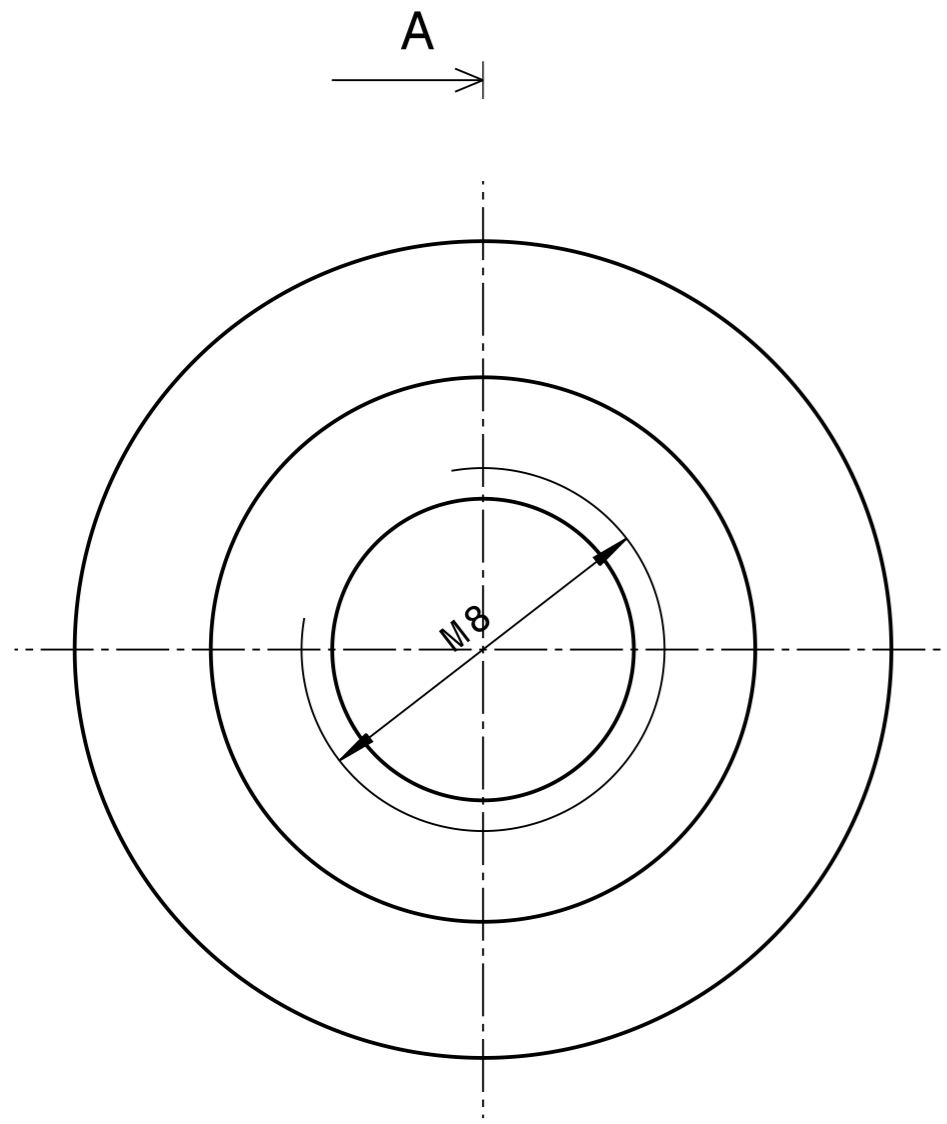
Srazit hrany  
 Zušlechťeno na střední hodnoty  
 Nitridováno 0.4 mm - HRC 58 ± 2  
 Kolíkové a lícované díry ±0.05, Ra 1.6  
 Závitové a průchozí díry ±0.2, Ra 6.3  
 Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH

sharp edges removed  
 hrany srazeny

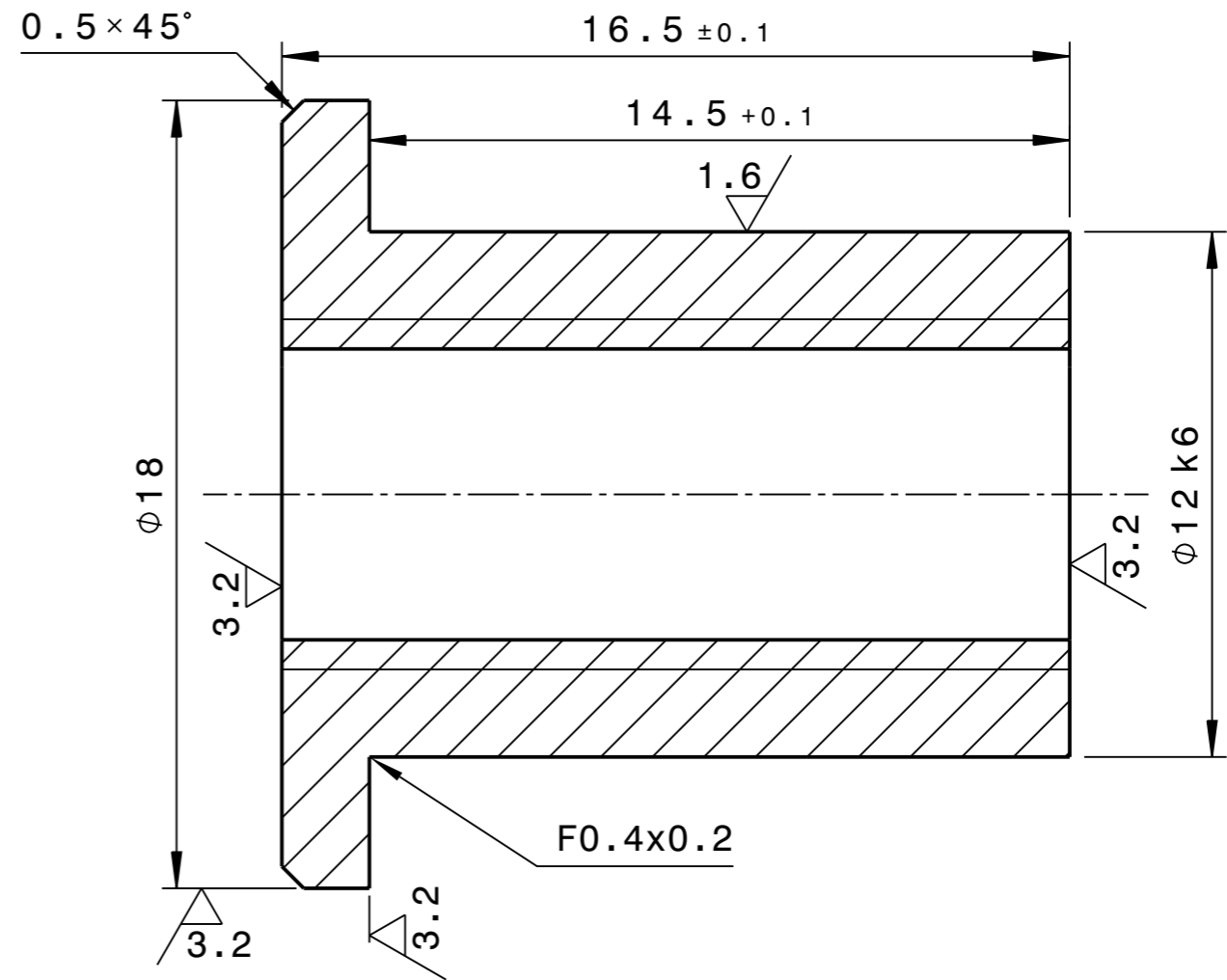
Clearance tolerances  
 rozmerové tolerance

Pin and fitting borings ±0.05 kolíkové a přesné díry ±0.05	1.6
Thread and through borings ±0.2 závitové a průchozí díry ±0.2	6.3
Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring	
Vaechny tolerované rozměry a lícování podléhají kontrole	

Pos. poz. 70	numer. kusu 1	material 42CrMo4	clear dimension D25-26	hardened kaleno <input type="checkbox"/>	case-hardened povrchově kaleno <input type="checkbox"/>	hardness penetr. 0,4	tempered zúslachtěno <input checked="" type="checkbox"/>	nitridovano <input checked="" type="checkbox"/>	HRC: 58±2	ISO 1302 raw 2	ra-oh <input checked="" type="checkbox"/>	ra-raw <input checked="" type="checkbox"/>
scale meritko -	page-No. list c. -	drawing-No. vykres c. -	designation Vložka (osa/pohon)									
scale meritko 4:1	2015	date datum 11.05.	department katedra FS-KSA	name jmeno CADEK	tolerance ISO 8015 general tolerance ISO 2768-mH	CATIA Version 5						
assembly designation oznaceni sestavy Ram kola			FS-KSA		CADEK	contents / obsah Pos. 70						
for project pro projekt Ram kola - DP - CADEK			FS-KSA		CADEK	drawing-No. vykres c. 3-KSA-VS-00-70						
TUL			drawing-No. vykres c. 3-KSA-VS-00-70		page-No. list c. 70	size formát A3	drawing update: revize z: 11.05.15					



Section view A-A



Spasovat s pozicí 50 a 89

A

sharp edges removed  
hrany srazeny

Clearance tolerances  
rozměrové tolerance

Pin and fitting borings ±0.05  
kolíkové a přesné díry ±0.05

Thread and through borings ±0.2  
závitové a průchozí díry ±0.2

Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring

Vaechny tolerované rozměry a  
lícování podléhají kontrole

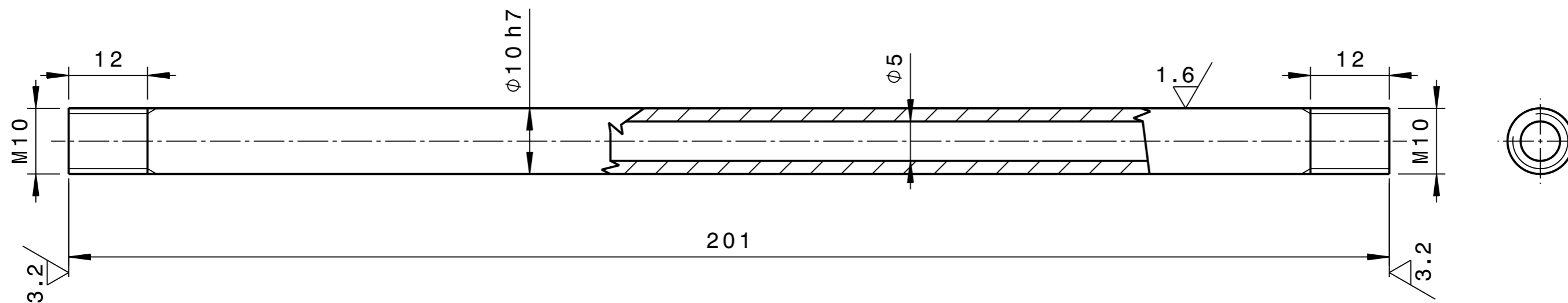
Srazit hrany

Zušlechtěno na střední hodnoty  
Nitridováno 0.4 mm - HRC 58 ± 2

Kolíkové a lícované díry ±0.05, Ra 1.6  
Závitové a průchozí díry ±0.2, Ra 6.3

Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH

Pos. poz.	numer. kusu	material material	clear dimension rozměr nacistu	hardened kaleno	case-hardened povrchově kaleno	hardness penetr.: hloubka prokalení	0,4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	HRC: 58 ± 2	<input checked="" type="checkbox"/> =roh	<input checked="" type="checkbox"/> =raw	
71	1	42CrMo4	D20-20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> =Ra6.3	<input type="checkbox"/> =Ra1.6	
scale meritko	page-No. list c.	drawing-No. vykres c.	designation označení	Vložka (z.vidlice/h.vahadlo)				DIN ISO 1302 raw 2		<input type="checkbox"/> =Ra0.4	<input type="checkbox"/> =Ra0.1		
4:1	-	-	-	scale meritko	2015	date datum	department katedra	name jmeno	tolerance ISO 8015 general tolerance ISO 2768-mH	ISO 8015 vseobecna tolerance ISO 2768-mH	 Version 5		
assembly designation oznaceni sestavy				Ram kola				contents / obsah		Pos. 71			
for project pro projekt				Ram kola - DP - CADEK									
<b>TUL</b>				drawing-No. vykres c.	3 - KSA - VS - 00 - 71			page-No. list c.	71	size formát	A3	drawing update: revize z:	11.05.15



Spasovat s pozicí 69 a 70

sharp edges removed  
hrany srazeny

Clearance tolerances  
rozměrové tolerance

Pin and fitting borings ±0.05  
kolíkové a přesné díry ±0.05

Thread and through borings ±0.2  
závitové a průchozí díry ±0.2

Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring

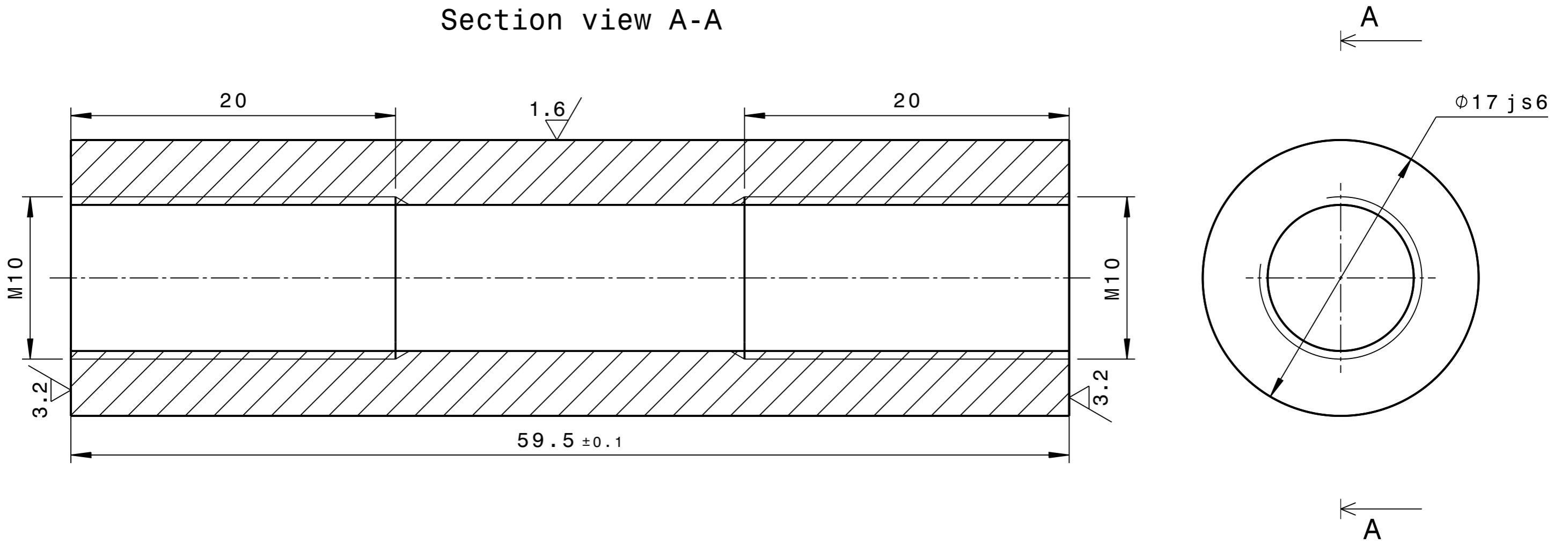
Vaechny tolerované rozměry a lícování podléhají kontrole

Srazit hrany  
Zušlechtěno na střední hodnoty  
Nitridováno 0.4 mm - HRC 58 ± 2  
Kolíkové a lícované díry ±0.05, Ra 1.6  
Závitové a průchozí díry ±0.2, Ra 6.3  
Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH

Pos. poz.	numer. kusu	material material	clear dimension rozměr nacistu	hardened kaleno	case-hardened povrchově kaleno	hardness penetr.: hloubka prokalení	tempered zúslachtěno	nitridovan	HRC:	0,4	58±2	ISO 1302 raw 2	=roh	=raw	=Ra6.3	=Ra1.6	=Ra0.4	=Ra0.1
72	1	42CrMo4	D20-205	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
scale meritko	page-No. list c.	drawing-No. vykres c.	designation označení	Zadní osa														
-	-	-	-															
scale meritko	2015	date datum	department odd.	name jmeno	tolerance ISO 8015	general tolerance ISO 2768-mH	Tolerance ISO 8015	všeobecná tolerance ISO 2768-mH	CATIA Version 5									
3:2	sign by kreslil	11.05.	FS-KSA	CADEK														
	inspect by kontrola	11.05.	FS-KSA	CADEK														
assembly designation označení sestavy				Ram kola											contents / obsah			
for project pro projekt				Ram kola - DP - CADEK											Pos. 72			
drawing-No. vykres c.				page-No. list c.				size formát		drawing update: revize z:								
TUL				3-KSA-VS-00-72				72 A3		11.05.15								



Section view A-A



Spasovat s pozicí 1(8) a 90

Srazit hrany  
 Zušlechtěno na střední hodnoty  
 Nitridováno 0.4 mm - HRC 58 ± 2  
 Kolíkové a lícované díry ±0.05, Ra 1.6  
 Závitové a průchozí díry ±0.2, Ra 6.3  
 Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH

sharp edges removed  
 hrany srazeny

Clearance tolerances  
 rozmerové tolerance

Pin and fitting borings ±0.05  
 kolíkové a přesné díry ±0.05

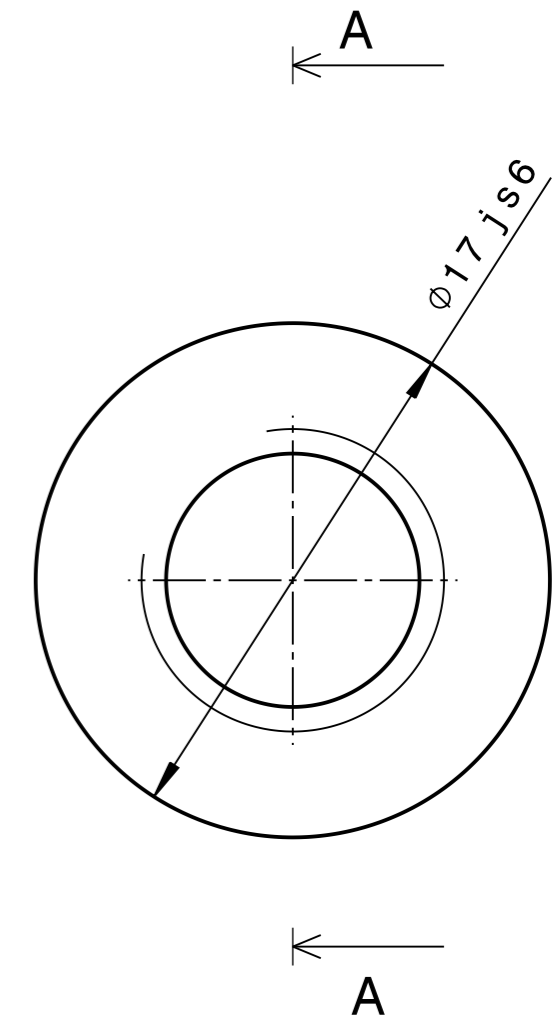
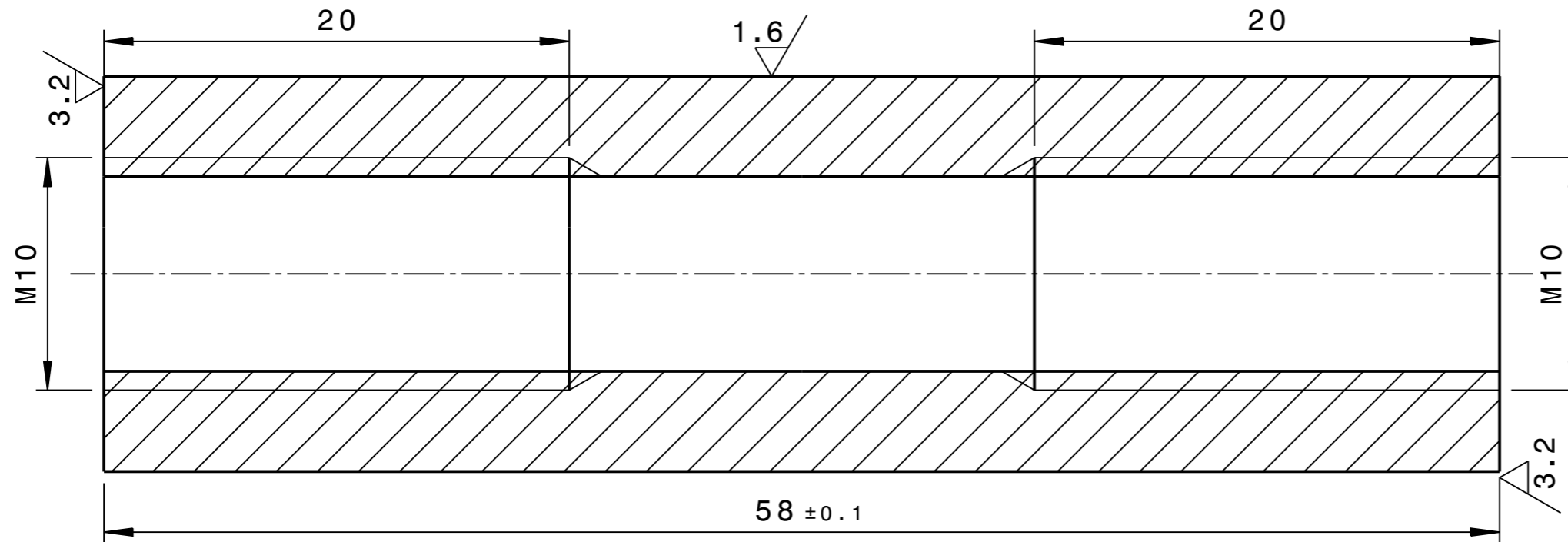
Thread and through borings ±0.2  
 závitové a průchozí díry ±0.2

Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring

Vaechny tolerované rozměry a lícování podléhají kontrole

Pos. poz. 98	numer. kusu 1	material 42CrMo4	clear dimension rozměr nacistu D20-65	hardened kaleno <input type="checkbox"/>	case-hardened povrchově kaleno <input type="checkbox"/>	hardness penetr.: hloubka prokalení 0,4	tempered zúšlechťeno <input checked="" type="checkbox"/>	nitridated nitridováno <input checked="" type="checkbox"/>	HRC: 58±2	<input checked="" type="checkbox"/> =roh <input checked="" type="checkbox"/> =rav <input type="checkbox"/> =Ra6.3 <input type="checkbox"/> =Ra1.6 <input type="checkbox"/> =Ra0.4 <input type="checkbox"/> =Ra0.1	
scale meritko -	page-No. list c. -	drawing-No. vykres c. -	designation označení Cep(horni)							DIN ISO 1302 raw 2	
scale meritko 4:1		2015	date datum 11.05.	department katedra FS-KSA	name jmeno CADEK	tolerance ISO 8015 general tolerance ISO 2768-mH					
		inspect by kontrola 11.05.	FS-KSA	CADEK	Tolerance ISO 8015 všeobecná tolerance ISO 2768-mH		contents / obsah Pos. 98				
assembly designation označení sestavy Ram kola				for project pro projekt Ram kola - DP - CADEK							
drawing-No. vykres c. 3-KSA-VS-00-98			page-No. list c. 98	size formát A3	drawing update: revize z: 11.05.15						
<b>TUL</b>											

### Section view A-A



Spasovat s pozicí 1(9) a 90

**Srazit hrany**

Zušlechtěno na střední hodnoty  
Nitridováno 0.4 mm - HRC 58 ± 2

Kolíkové a lícované díry ±0.05, Ra 1.6  
Závitové a průchozí díry ±0.2, Ra 6.3

Netolerované rozměry dle ISO 2768-mH

sharp edges removed  
hrany srazeny

**Clearance tolerances  
rozměrové tolerance**

Pin and fitting borings ±0.05 kolíkové a přesné díry ±0.05	1.6
Thread and through borings ±0.2 závitové a průchozí díry ±0.2	6.3
Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring	
Všechny tolerované rozměry a lícování podléhají kontrole	

Pos. poz. 99	numer. kusu 1	material 42CrMo4	clear dimension rozměr nacisty D20-65	hardened kaleno	case-hardened povrchově kaleno	hardness penetr.: hloubka prokalení 0,4	<input checked="" type="checkbox"/> =roh <input checked="" type="checkbox"/> =raw <input type="checkbox"/> =Ra6.3 <input type="checkbox"/> =Ra1.6 <input type="checkbox"/> =Ra0.4 <input type="checkbox"/> =Ra0.1		
scale meritko -	page-No. list c. -	drawing-No. vykres c. -	designation označení Cep (spodni)	tempered zúšlechťeno <input checked="" type="checkbox"/>	nitridated nitridováno <input checked="" type="checkbox"/>	HRC: 58 ± 2			
Pin and fitting borings ±0.05 kolíkové a přesné díry ±0.05		1.6	scale meritko 4:1	2015	date datum 11.05.	department katedra FS-KSA	name jméno CADEK	tolerance ISO 8015 general tolerance ISO 2768-mH Tolerance ISO 8015 všeobecná tolerance ISO 2768-mH	 Version 5
Thread and through borings ±0.2 závitové a průchozí díry ±0.2		6.3	assembly designation označení sestavy Ram kola		contents / obsah Pos. 99		drawing update: revize z: 11.05.15		
Tolerance dimensions and fitting borings will be checked during measuring		for project pro projekt Ram kola - DP - CADEK		drawing-No. vykres c. 3-KSA-VS-00-99		page-No. list c. 99	size formát A3		
Všechny tolerované rozměry a lícování podléhají kontrole		<b>TUL</b>							

