



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## ANALÝZA RÁMU SILNIČNÍHO KOLA

ANALYSIS OF FRAME OF ROAD BICYCLE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Dominik Šustr**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.**

**BRNO 2020**





# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Dominik Šustr**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

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

## **Analýza rámu silničního kola**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce zaměřená na deformačně napjatostní analýzu rámu silničního kola.  
Rám REPETE Reason.  
Velikost 56.

### **Cíle bakalářské práce:**

Vytvoření výpočtového MKP modelu rámu silničního kola.  
Analýza tuhosti rámu s využitím MKP.

### **Seznam doporučené literatury:**

REIMPELL, Joransen, Helmut STOLL and Jurgen BETZLER. 2001. The Automotive Chassis: Engineering Principles. 2nd Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann: Elsevier.

MORELLO, L., Lorenzo Rosti ROSSINI, Giuseppe PIA and Andrea TONOLI. 2011. The Automotive Body: Volume I: Components Design. 1. Dordrecht: Springer Netherlands.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá MKP analýzou tuhosti rámu silničního kola REPETE R2: REASON dle metodiky testování tuhosti v laboratořích EFBE. Teoretická část popisuje nejdůležitější fakta ohledně konstrukčního řešení analyzovaného rámu a historie značek, které jsou pro rám důležité. Empirická část potom shrnuje výsledky MKP analýzy, díky které jsme odhalili oblast okolo středové spojky jako nejslabší konstrukční místo rámu, které se může negativně projevit při vyšších zatíženích. Pravděpodobně také dává větší smysl orientovat průřezy trubek horizontálně.

**KLÍČOVÁ SLOVA**

Rám silničního kola, rám, cyklistika, EFBE testy, tuhost, MKP analýza

**ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with the FEM analysis of the stiffness of the REPETE R2: REASON road bike frame according to the stiffness testing methodology in EFBE laboratories. The theoretical part describes the most important facts about the design of the analyzed frame and the history of brands that are important for the frame. The empirical part then summarizes the results of the FEM analysis, thanks to which we revealed the area around the bottom bracket as the weakest structural point of the frame, which can have a negative effect at higher loads. It probably also makes more sense to orient the pipe cross-sections horizontally.

**KEYWORDS**

Road bike frame, frame, cycling, EFBE tests, stiffness, FEM analysis

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠUSTR, Dominik. *Analýza rámu silničního kola*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129705>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 48 s. Vedoucí práce Přemysl Pokorný.



**ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 3. září 2020

.....  
Dominik Šustr

**PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Přemyslu Pokornému, Ph.D za veškerou pomoc, čas, přívětivost, ochotu, trpělivost a předané znalosti při zpracování této bakalářské práce. Poradenskému centru Alfons za pomoc a podporu během studia. Robinovi z REPETE cycles a Tomášovi z ASPHALT CYCLING LAB za spolupráci, pomoc, konexe a přijetí do komunity a celé své rodině za podporu při studiu i mimo něj.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>10</b>
1.1	Formulace problému .....	10
1.2	Cíle práce .....	10
1.3	REPETE cycles .....	11
<b>2</b>	<b>Konstrukce rámu .....</b>	<b>13</b>
2.1	Columbus Tubi.....	13
2.2	Materiál modelu R2:REASON .....	14
2.3	Hlavová trubka.....	16
2.4	Dolní rámová trubka .....	17
2.5	Horní rámová trubka .....	20
2.6	Sedlová trubka.....	21
2.7	Střed .....	22
2.8	Sedlové vzpěry .....	22
2.9	Řetězové vzpěry .....	24
2.10	Patky.....	24
<b>3</b>	<b>Tuhost.....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>Test tuhosti EFBE .....</b>	<b>28</b>
4.1	Test tuhosti hlavové trubky (EFBE) .....	28
4.2	Test tuhosti středu (EFBE).....	29
<b>5</b>	<b>Pevnostní výpočet.....</b>	<b>30</b>
5.1	Popis MKP modelu .....	30
5.2	Náhrady patek rámu .....	32
5.3	Náhrada insertu ve středové spojce.....	33
5.4	Náhrada uchycení hlavové trubky.....	35
5.5	Zatěžovací stavy.....	37
<b>6</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>38</b>
6.1	Test tuhosti středu .....	38
6.1.1	Napětí .....	38
6.1.2	Deformace.....	41
6.2	Test tuhosti řízení.....	43
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>47</b>

# 1 ÚVOD

Roste poptávka po jedinečných kolech, které v sobě kombinují přístup moderního a unikátního designu a konstrukce s tzv. klasikou. Za takovou klasiku můžeme považovat ocel, která se v cyklistickém světě vyskytuje od začátku. Svůj vrchol nicméně zaznamenala v 70.-80. letech. Posléze byla postupně vytlačována hliníkem, který, jak se ukázalo, není dobrým materiálem pro tvorbu kol. V současnosti sice trhu vévodí rámy z uhlíkových vláken, nicméně ocel zažívá svoji renesanci. Tento jev nastal i díky vývoji ocele. Trubky od ikonického výrobce Columbus Tubi, ze kterých se také Repete kola vyrábí, mohou dosahovat tloušťky stěny pouhých 0,38 mm, 1250-1450 MPa mezi pevnosti a až 870-1000 MPa mezi kluzu.

V této bakalářské práci jde o vytvoření výpočtového MKP modelu a analýzu tuhosti rámu dle metodik laboratoří německého EFBE. Výsledky budou použity při vývoji nové generace rámu. Dalším eventuálním krokem je kompletní test v laboratořích v Německu a ověření odchylek našeho výpočtu a výsledků tohoto testu.

## 1.1 FORMULACE PROBLÉMU

Důvodem vzniku této práce je zjištění tuhosti současné generace rámu silničního kola REPETE R2:REASON (viz obr. 1), která poslouží jako podklad pro testování rámu laboratoří EFBE a jako podklad pro vytvoření nové generace kol.

## 1.2 CÍLE PRÁCE

- vytvořit výpočtový model rámu silničního kola REPETE R2 REASON (viz obr. 1).
- analýza tuhosti rámu s použitím MKP





*Obr. 1 REPETE R2 REASON [13]*

### 1.3 REPETE CYCLES

Firma Repete cycles je mladá česká firma, za kterou od začátku stojí strojní inženýr Robin Fišer a podnikatel a cyklista Jakub Voverka (viz obr. 2). Repete se zrodilo v roce 2012 a ze začátku mu šlo o stavbu a renovaci retro/neoretro kol. Postupně se rodila myšlenka dělat vlastní produkty a firma uvedla v roce 2015 na trh první kolo. Hned v tomto roce se umístila na prvním místě North American Handmade Bicycle Show, což umožnilo se značce zviditelnit na světovém trhu. V roce 2019 představilo Repete nové modely kol: gravel Verne a silniční R2: Reason. Za vizuálem kol stojí grafický designér Martin Kolerus. Na zmíněném R2: Reason jezdí i dráhový světový šampion Tomáš Bábek díky tomu, že jsme ho skrze Asphalt Cycling Lab, za kterým stojí Tomáš Hliva, propojili právě s Repete cycles.

Repete sází na ocel, která, jak již bylo zmíněno výše, v současné době prožívá renesanci, a to díky vlastnostem, které se od 80. let posunuly raketově dopředu. Ve světě roste poptávka po ručně vyráběných, kvalitních ocelových rámech a odběr tvoří převážně Asie, kde dle slov Robina Fišera:

„Pro mnohé tamní obchodníky a zákazníky má naše značka punc staré evropské kvality“. Repete tak podle něj nejsou pouze kola, ale i komunita a odkaz ve společnosti.

REPETE cycles pořádají přednášky (např.: podcast REPETE Talks), diskuze, vyjížďky, cyklistické akce a píše i vlastní magazín. Budoucnost značky je inovovat, růst a dynamicky reagovat, ale zároveň tak, aby zůstal punc kvality a ruční práce [12].



*Obr. 2 Robin Fišer a Jakub Voverka foto z NAHB [6]*

## 2 KONSTRUKCE RÁMU

### 2.1 COLUMBUS TUBI

Při uvádění informací o historii značky vycházíme zejména z katalogu Columbus pro rok 2018 [8].

Za trubkami pro rám R2: REASON stojí dnes již ikonický Columbus Tubi. Tuto firmu založil roku 1919 Angelo Luigi „A.L.“ Colombo v době, kdy se Evropa vzpamatovávala z První světové války. Od začátku se firma zaměřovala na výrobu trubek pro cyklistické odvětví. K jejím prvním zákazníkům patřili výrobci kol jako Edoardo Bianchi, Umberto Dei, Atala či Giovanni Maino. Díky svým vlastnostem se výrobce brzo stal dodavatel pro letecké, automobilové, nábytkářské nebo i lyžařské odvětví. Roku 1927 se zapsal do letecké historie s De Pinedo a Balbo, transatlantickými letadly postavenými právě z trubek od Angela Luigiho. Stejně trubky byly také použity pro závodní motorčky Moto Guzzi.

V roce 1930 vytvořil Angelo Luigi obchodní značku „Colombus“ se zaměřením na nábytek z chromové oceli. Po výstavě na VI. Triennale di Milano získal Angelo Luigi dodavatelský kontrakt pro EMBRU na výrobu ikonického nábytku designéra Marcela Breuera. Nejen díky tomuto spojení používali ti nejlepší architekti a designéři období racionalismu jako Figini, Pollini, Terragni, Pagano, Pucci či Faccioli právě materiál od Columbus. Columbus si za nedlouho vybudoval pozici lídra uměleckého období modernismu.

Později ve 30. letech je jméno Columbus spolu s jmény „Aelle“ a „Tenax“ použito pro speciální set trubek pro kola, vyrobené z chrom-molybdenové ocele a eliptickým průřezem noh vidlice, který je dnes standardem.

Se rčením „zvědavost je předehra k poznání“ experimentoval Angela Luigiho již před rokem 1930 v oblasti metalurgie, mechaniky a ztenčování trubek. Dokonce si designoval vlastní stroje na zužování a ztenčování trubek. Colombův syn, Gilberto, designoval šasi pro automobilové výrobce jako Lancia, Maserati a Ferrari. Jména jako Fangio „El Maestro“, Ascari a „Gigi“ Villorosi zvítězila právě na šasích od Gilberta Colomba. Profily trubek, které pochází z tohoto období, byly použity na cyklistické rámy následujících let.

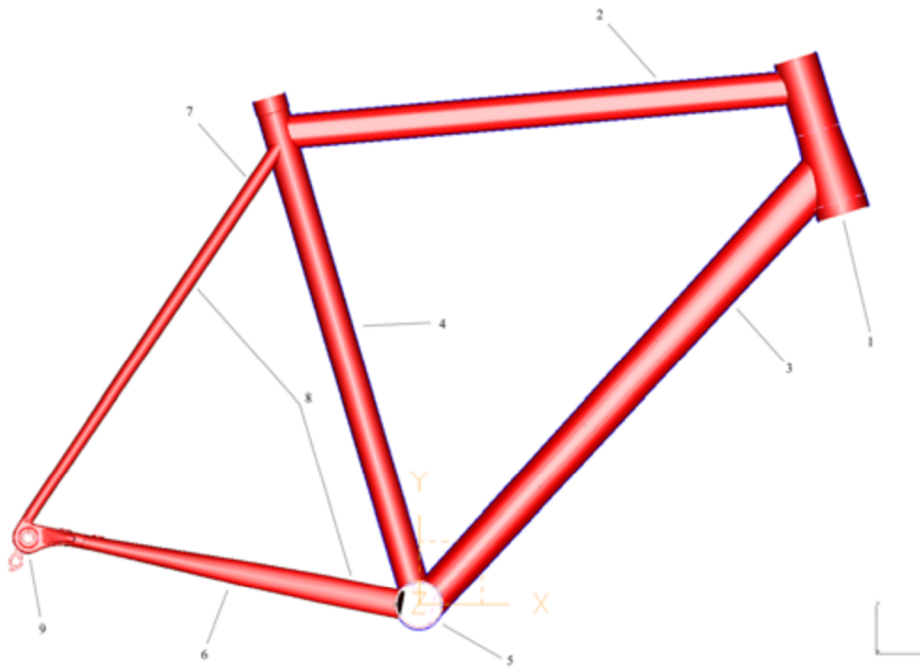
Roku 1977 opouští syn Angela Luigiho, Antonio Colombo, pozici prezidenta společnosti A.L. Colombo, aby zformoval společnost Columbus jako specialistu na výrobu čistě cyklistických rámových trubek. Zkušenosti z let minulých a neustálý vývoj předurčovali společnost stát se lídrem světového trhu. V této éře vznikají také ikonické sety trubek jako aerodynamické „Air“, oversized „Max“, nebo ultralehké trubky určené ke zdolání dráhového hodinového rekordu pro legendy jako jsou Coppi, Anquetil, Baldini, Rivière, Bracke, Ritter, Merckx, Moser či Oersted. Pro představu Merckxův stroj od Colnaga vážil v té době pouhých 5,5 kg. Mezi další cyklistické legendy využívající materiál od Colombusu byly Gimondi, Hinault, Argentin, Lemond či Roche.

V současné době si Columbus díky svému vývoji patentových řešení, slitin a kompozitních komponent upevnil svojí pozici ve světě.

## 2.2 MATERIÁL MODELU R2:REASON

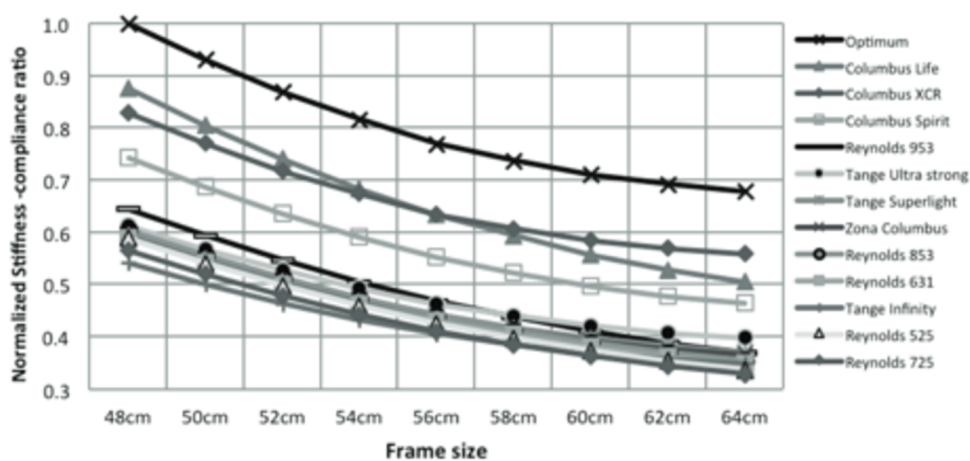
Hlavová trubka (1 na obr. č. 3), horní rámová trubka (2) a dolní rámová trubka (3) patří do rodiny trubek Spirit HSS. Řetězové vzpěry (6) jsou z rodiny trubek Life. Sedlové vzpěry (7) a sedlová trubka (4) jsou z rodiny trubek Zona. Poslední dvě zmiňované trubky primárně využívají materiál 25CrMo4, na tomto rámu jsou však včetně středové spojky (5) a můstků (8) vyrobeny ze slitiny niobia. Patky jsou odlévané z nerezové oceli. Jejich mechanické vlastnosti jsou pro výpočet natolik nepodstatné, že je vynecháváme.

Slitina niobia, tedy slitina manganu, chromu, niklu, molybdenu a niobu má vynikající mechanické vlastnosti  $UTS=1300$  MPa,  $Y_s=920$  MPa,  $A_{p5} >14$  %. Jedná se o speciálně navrženou slitinu. Tato ocel ve srovnání s jinými standardními ocelmi vyniká právě díky použití niobia, které ve slitině funguje jako činidlo podporující precipitační vytvrzení a redukci zrn [8].



Obr. 3 Model rámu R2:Reason

Na obrázku č. 4 z článku Covilla [2] je vidět porovnání různých setů trubek – tedy různých geometrií průřezů, slitin oceli a velikostí rámu v závislosti na normalizované tuhosti (laterální výchylka podělená vertikální výchylkou a velikosti rámu). Je možné vidět porovnání setů Life a Spirit s konkurenčními sety trubek.



Obr. 4 Porovnání normalizovaného poměru tuhosti a poddajnosti s různými velikostmi rámu, které používají různé sety trubek [2]

## 2.3 HLAVOVÁ TRUBKA

Hlavová trubka (obr. 5) z rodiny Columbus Spirit HSS je trubka kruhové průřezu s konstantní tloušťkou 1 mm. Na koncích trubek jsou připájeny tvrdým pájením vložky pro ložiska hlavového řízení, kdy horní a spodní má standardizované rozměry pro integrované hlavové složení 42 mm x 45 ° a 52 mm x 45 °. Integrované hlavové složení přináší výhodu čistějšího designu. Oproti klasickému hlavovému složení zde není téměř žádný přesah nad hlavovou trubkou a je zde větší možnost nastavit posed při stejné délce krku vidlice. Tato trubka je zužovaná od spodního profilu k hornímu (je kónická). Kónické hlavové trubky jsou jedním z trendů, který se nyní objevuje na poli rámu ve výkonnostní cyklistice. Podle autora Al-rabeh [5], který porovnával kónickou a nekónickou hlavovou trubku, je 21,5% nárůst v torzní tuhosti kónické hlavové trubky oproti nekónické. Další výhodou je lepší napojení horní a spodní rámové trubky. Spodní rámová trubka je oproti horní rámové trubce rozměrově větší jak v horizontálním, tak i vertikálním směru a přechod je tak díky kónické hlavové trubce plynulejší. Díky vykrojení všech spojovaných trubek, tvoří trubky v místě spoje tvarový zámek, který zlepšuje pevnost rámu.

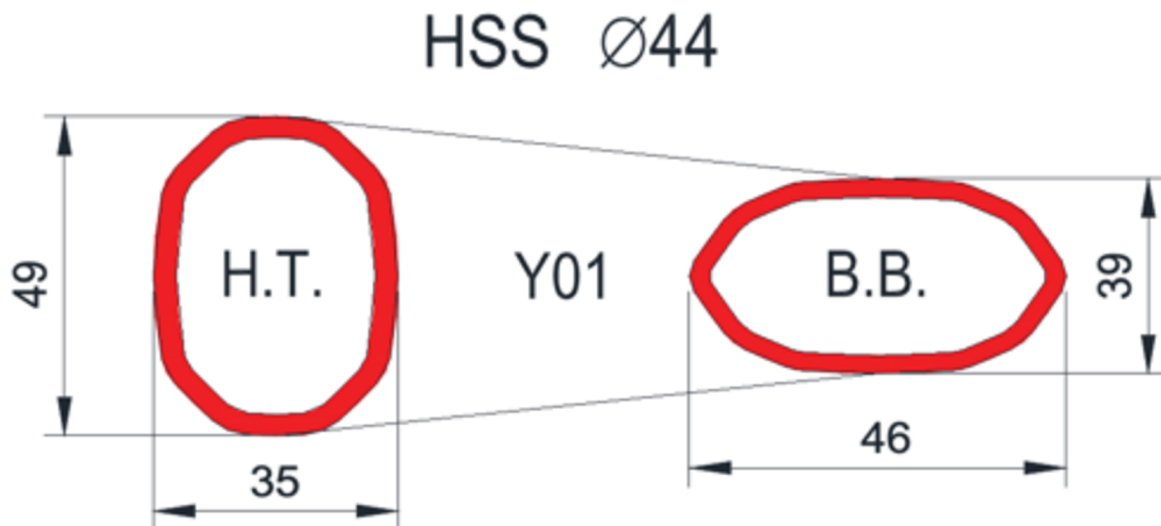


*Obr. 5 Detail na hlavovou trubku [13]*



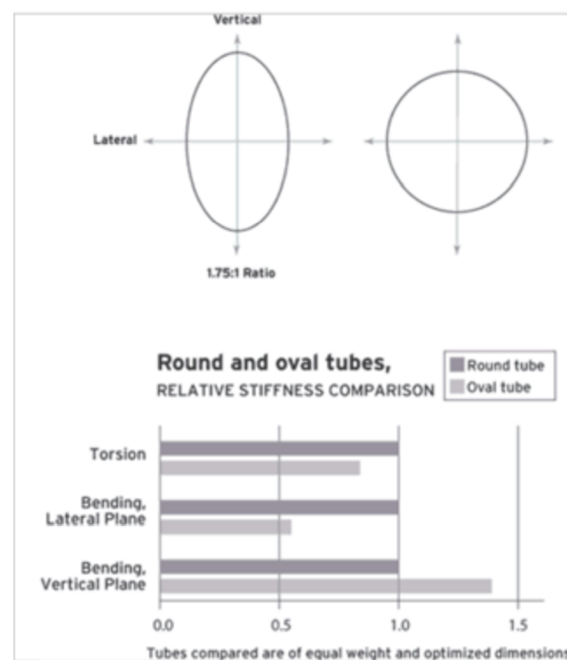
## 2.4 DOLNÍ RÁMOVÁ TRUBKA

Dolní rámová trubka je taktéž z rodiny trubek Columbus Spirit HSS. Její průřez je u hlavové trubky vertikálně zploštělá elipsa, která se postupně mění na horizontálně zploštělou elipsu u středové spojky rámu (viz obr. 6).



Obr. 6 Tvary průřezů spodní rámové trubky [8]

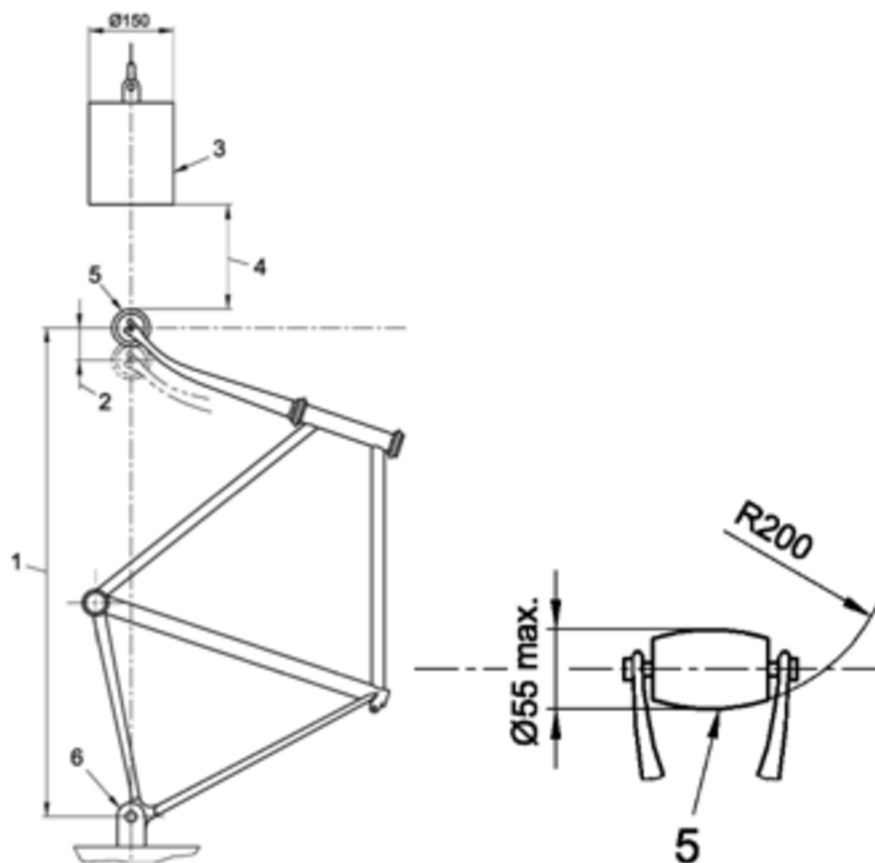
Přibližný vliv těchto tvarů na tuhost trubek v závislosti na namáhání je popsán na obr. 7.



Obr. 7 Vliv tvaru průřezu na tuhosti [14]

Z hlediska namáhání je diskutabilní, jak tyto průřezové profily skutečně orientovat. Příkladem vezmeme v potaz dvě modelová zatížení – zatížení předním nárazem a zatížení šlapáním z boku.

V prvním případě je dle normy EN 14781:2005 simulován náraz do přední vidlice kola jezdce vážícího 80 kg, jedoucího rychlostí 12,5 km/h (viz obr. 8) a tuhostí středu dle EFBE (viz obr. 19). Orientovat spodní rámovou trubku ve tvaru vertikálně zploštělé elipsy má v tomto případě určité opodstatnění, vzhledem k tomu že konstrukce předního „trojúhelníku“ není vlastně trojúhelník, tedy horní rámová a spodní rámová trubka se na hlavové trubce nepotkávají v jednom styčnicku. Náraz tak půjde částečně přes ohybové tuhosti trubek.



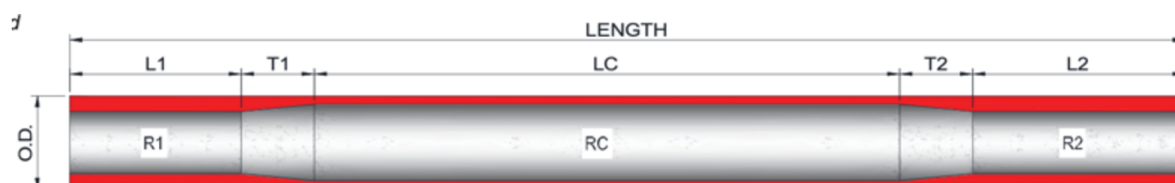
Obr. 8 Test nárazu dle EN 14781:2005 [4]

V tomto případě přibližné hodnoty napětí při testování nárazu (náraz je zjednodušen a nahrazen silou, rám je zatížen staticky) vychází podle Víta [15] pouze na cca 110-130 MPa (v závislosti na druhu rámu). Pravděpodobněji je však podstatnější druhé zmíněné zatížení, do boku šlapáním (test EFBE).



S tímto uvážením by dávalo větší smysl mít průřez ve tvaru horizontálně zploštělé elipsy na obou koncích s tím, že u hlavové trubky by byl poměrově větší a více zakulacený vzhledem k torznímu namáhání. Toto zlepšení by ale pravděpodobně mělo za následek zhoršení aerodynamických vlastností daného místa a bylo by tedy nutné řádně zvážit klady a zápory daných řešení. Nicméně současné řešení je vzhledem k orientaci profilů vesměs dobré.

Spodní rámová trubka (obr. 9) je ztenčována, na krajích je tloušťka stěny 0,6 mm (R1) a na délce 40 mm (T1, T2) se ztenčuje na tloušťku 0,45 mm (RC), která je na délce 410 mm (LC). Hodnoty L1, L2 nikde záměrně neudáváme, jsou závislé na velikosti rámu a obchodním tajemstvím firmy REPETE cycles.



Obr. 9 Výkres spodní rámové trubky [8]

Co se týče ztenčování trubek, Covill [3] tvrdí:

*„Butted tubes can provide a highly effective means to decrease mass whilst producing a disproportionately small change in stress although there was no advantage in terms of stiffness and the total strain energy in this study. Conversely, decreasing the wall thickness to LMC (0.5 mm) produced a disproportionately large increase in stress at the tube ends, with similar increases to MMC (0.8 mm) producing a disproportionately small decrease in stress. While only a single butting profile has been considered in this study, our approach could now be applied to a wide range of parametric combinations of butting wall thicknesses, tube diameters and steel strengths to support bicycle designers in the selection of individual tubes to tune the stiffness and strength behaviour of frames.“*

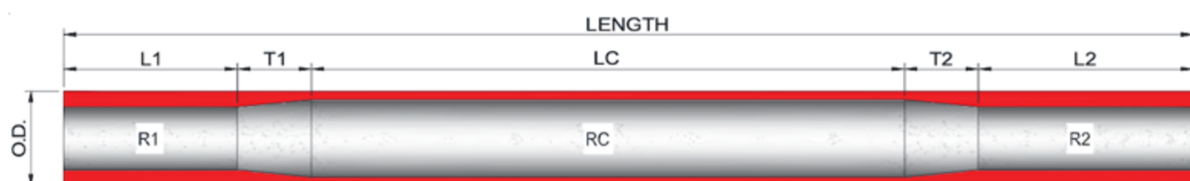
## 2.5 HORNÍ RÁMOVÁ TRUBKA

Horní rámová trubka je stejně jako dolní rámová trubka z rodiny trubek Columbus Spirit HSS. Její průřez je konstantní po celé délce a má přibližně tvar vertikálně zploštělé elipsy tak, jak je vidět na obrázku 10.



Obr. 10 Průřez horní rámovou trubkou [8]

Horní rámová trubka (obr. 11) je taktéž ztenčována, kdy na krajích je tloušťka stěny 0,6 mm (R1) a na délce 40 mm (T1, T2) se ztenčuje na 0,40 mm (RC), která je na délce 370 mm (LC).



Obr. 11 Výkres dolní rámové trubky [8]

Společně s dolní rámovou trubkou je horní rámová trubka zodpovědná za odolnost rámu vůči torznímu namáhání. Podobně jako u dolní rámové trubky je pravděpodobně z hlediska namáhání nepotřebné mít tento profil orientován vertikálně.

## 2.6 SEDLOVÁ TRUBKA

Sedlová trubka (obr. 12) je z rodiny trubek Zona. Je kruhového průřezu (O.D.1=32,7 mm, O.D.2=33,5 mm) a ztenčována, kdy na kraji u středové spojky je tloušťka stěny 0,7 mm (R1), u sedlové objímky 0,9 mm (R2). Na délce 40 mm (T1, T2) se ztenčuje na hodnotu 0,5 mm (RC), která je na délce 145 mm (LC). Vzhledem k namáhání této trubky dává smysl mít větší tloušťky stěn. Trubka je primárně namáhána vahou jezdce, ohybem od šlapání a osovou silou od sedlových vzpěr.



Obr. 12 Výkres sedlové trubky [8]

## 2.7 STŘED

Na rámu je použita středová spojka zvětšeného průměru T47 (obr. 13), která společně v kombinaci s over-sized trubkami tvoří tužší spoj, jenž opět přispívá k lepšímu přenosu výkonu jezdce na silnici (REPETE cycles, n.d.). Tloušťka stěny je na krajích 2,4 mm a po 13 mm délky se ztenčuje na 1,5 mm. Oproti domnělému faktu, že má pressfit přesnější uložení v rámu, přináší použití závitového středu M47x1 výhody, jako je delší životnost středu, snadnější údržba a reálně i přesnější uložení, které vede k nižšímu tření ve středu. Nevýhoda závitového středu je vyšší váha, která se pohybuje v řádech desítek gramů, a vyšší výrobní náklady. Celé toto řešení umožňuje použít integrované vedení brzdového bowdenu a lanek řazení. Lanka řazení prochází skrz průchodku, která je tisknuta na 3D tiskárně z materiálu Nylon PA12 [13].

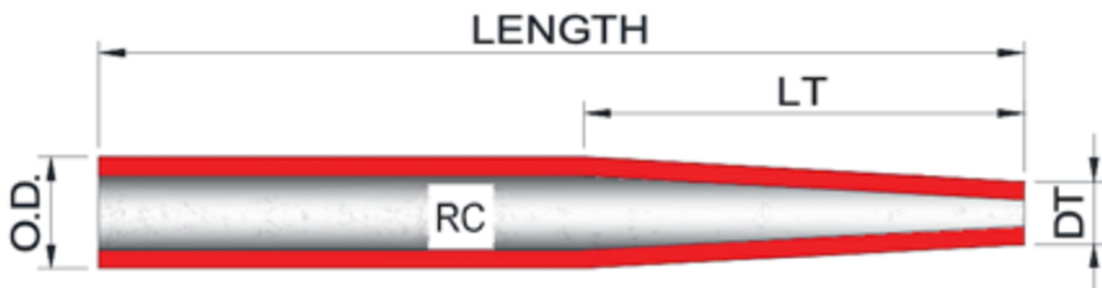


*Obr. 13 Detail na středovou spojku [13]*

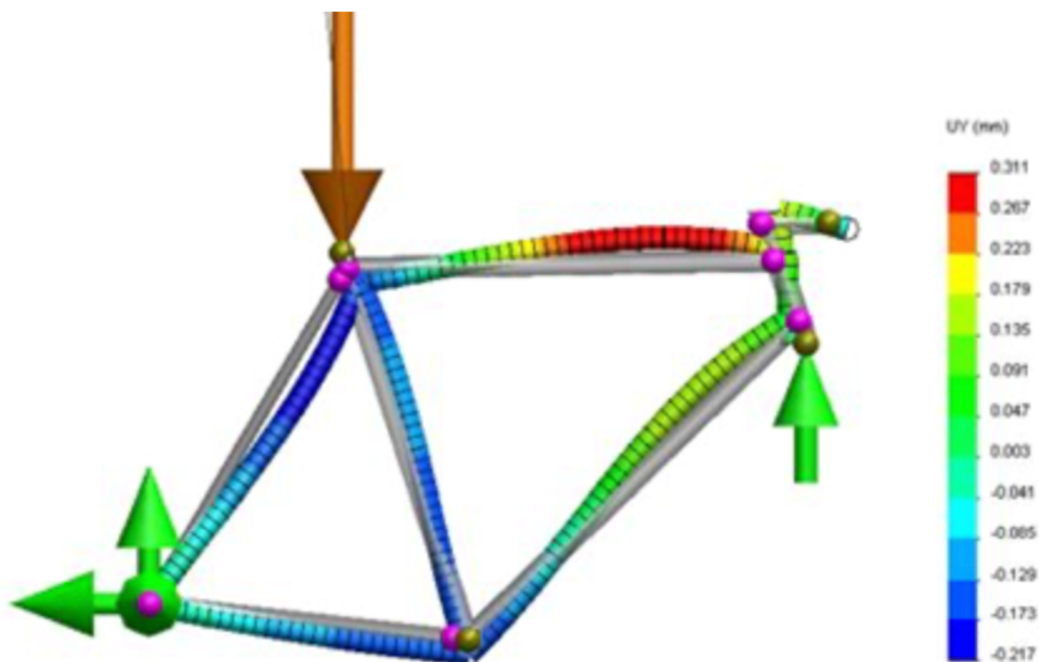
## 2.8 SEDLOVÉ VZPĚRY

Sedlové vzpěry jsou z rodiny trubek Zona. Jsou kruhového průřezu a jejich vnější průměr začíná u patek rámu na 12.5 mm (DT) stěny a postupně se na 300 mm (LT) délky rozšiřuje na vnější průměr

16 mm (O.D.) při konstantní 0,7mm (RC) tloušťce stěny trubky tak, jak je vidět na obrázku 14. Tyto trubky jsou také ohýbané tak, jak je vidět na obrázku patek (obr. 16). Jejich kruhový průřez je z hlediska torzního zatížení optimální. Trubky jsou oproti ostatním trubkám poměrově subtilnější, což umožňuje zadnímu kolu při případném nárazu ve vertikálním směru v malé míře uhnout (viz obr. 15). Tento prvek vede ke zlepšení jízdního komfortu. U sedlových vzpěr je navíc použit rozpěrný můstek o tloušťce stěny 1 mm, který vzhledem k absenci klasických brzd (uchycení) nemusí být použit a spousta výrobců má tendenci při použití kotoučových brzd tento můstek odstranit. Ten nicméně plní z hlediska namáhání několik funkcí. Spojuje zadní rámy (trojúhelníky) k sobě, čímž zvyšuje příčnou tuhost, a navíc zkracuje vzpěrnou délku okolo příčné osy.



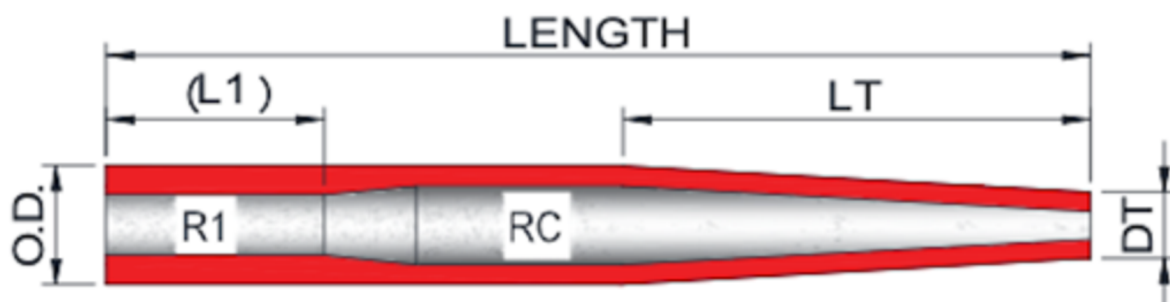
Obr. 14 Výkres sedlové vzpěry [8]



Obr. 15 Příklad deformace rámu pod vertikálním zatížením [1]

## 2.9 ŘETEZOVÉ VZPĚRY

Řetězové vzpěry (obr. 16) jsou z rodiny trubek Life. Jejich průřez je u středové spojky vertikálně zploštělá elipsa (16x30 mm) a postupně se mění (LT=290) na kruhový průřez průměru 12,5 mm (DT) u patek rámu. Trubky jsou taktéž ztenčovány. U středové spojky je tloušťka stěny 0,7 mm (R1) a na délce 40 mm (T1, T2) se ztenčuje na 0,5 mm (RC).



Obr. 16 Výkres řetězové vzpěry [8]

Průřezy obou konců jsou velikostně velmi rozdílné. Toto tvarové řešení umožňuje dobrý přenos výkonu z klik na zadní kolo (díky většímu průřezu u středové spojky) a malou vertikální poddajnost u zadního kola, která společně se sedlovými vzpěrami tvoří funkční celek, který zlepšuje jízdní komfort. Průřezy jsou pravděpodobně stále dost široké na to, aby poskytovaly dobrou příčnou tuhost, ke které přispívá opět použití rozpěrného můstku podobně jako u sedlových vzpěr. Průřezy by opět bylo pravděpodobně lepší orientovat ve smyslu horizontálně zploštělé elipsy, to bohužel kvůli malým mezerám mezi trubkou, kolem a klikou nelze.

## 2.10 PATKY

Flat-mount patky (obr. 17) vytváří společně s hliníkovými vložkami celek pro uchycení zadního kola s pevnou osou o rozměrech 142x12 mm. Patky jsou na zakázku odlévány z oceli pomocí metody ztracené formy. Při jejich vývoji byl použit 3D tisk, který výrazně pomáhá zkrátit potřebný čas. Dále byl brán zřetel na hmotnost, funkčnost a design. Díky tomu jsou patky duté a pravá patka navíc



umožňuje integrované vedení mechanického/elektrického řazení. Patky dosedají do sedlových a řetězových vzpěr bez viditelných přechodů, čímž je vyzvednuta celková vizuální čistota rámu [13].



*Obr. 17 Detail na patky rámu [13]*

### 3 TUHOST

Standardní metriky, dle kterých se dá kvantifikovat výkonnost rámců kol, nejsou zcela ucelené. Cervelo například klade důraz na tuhost, aerodynamickou účinnost, váhu, komfort a univerzálnost. Colnago a Pinarello tyto kvality potom doplňuje ještě o odolnost a bezpečnost rámců. Všechny tyto zmíněné metriky lze vesměs objektivně změřit a při návrhu kol je tedy potřeba je vhodně vybalancovat s přihlédnutím na účely, pro které je kolo konstruováno.

Vzniká otázka, zda tužší kolo znamená lepší kolo z hlediska výkonu. Pokud budeme brát kolo jako samostatný stroj tak ano. Cyklistika na všech úrovních je ale právě o syntéze člověka se strojem, a tedy je potřeba brát v potaz biomechanický pohled, ve kterém jízda na nerovném povrchu v důsledku méně komfortního kola způsobí s postupujícím časem snižující se efektivitu jezdce. Dále se v cyklistickém světě diskutuje možnost tzv. planingu. Heine, který ve svých textech *What is planing* [11] a *The Biomechanics of Planing* [10] tuto diskuzi spustil, tvrdí, že rámy, které nejsou tolik tuhé dovolují jezdcům podat lepší výkon, a to díky dvěma efektům. První přirovnává k „tlačení proti zdi“. Tato analogie vysvětluje únavu svalů vzniklou tlačáním proti nehybné zdi. Dochází k vynaložení energie, ve svalech se hromadí laktát a dochází k jejich únavě, ale jelikož se zeď nehne, není zde žádná práce v pohybu zdi, kterou lze použít. Druhým efektem je energie vyložená na deformaci rámu, která se vrací zpět do pohonu v blízkosti tzv. mrtvého bodu. V okamžiku, kdy se rám vrací zpět do původní nedeformované pozice, způsobuje rotaci klik po směru hodinových ručiček.

Autor se tyto efekty snaží sám ve svém „výzkumu“ prokázat, nicméně jeho článek postrádá jakékoliv vědecké metody a hlubší pohled na problematiku. Myšlenky, které prezentuje, nejsou úplně zavádějící, ale bylo by nutné hlubší analýzy a propočty, tedy zda je efektivnější si tuto vázanou energii z deformace středu odevzdávat do pohonu (méně tužší rám), nebo si co nejvíce této energie vozit s sebou (tužší rám).

Předně jsou dle Cervela [7] definovány tři typy tuhosti, které mají výrazný vliv na chování kola, a i tedy na samotný pocit jezdce z kola:

- 1) Tuhost hlavové trubky, torzní tuhost, nebo tuhost řízení je tuhost, která ovlivňuje ovladatelnost kola. Lze obecně říct, že vyšší tuhost hlavové trubky vede k lepší ovladatelnosti tím, že se zvýší rychlost responzibility. Tuto tuhost je potřeba konstruovat v závislosti na použití rámu. Nedostatečná tuhost této části vede k „vyměklému“ pocitu z řízení. Naopak předimenzování,



kdy tuhost je natolik vysoká, že nepřináší žádný další benefit, ale vede k zvýšení hmotnosti rámu a ke snížení komfortu, v důsledku většího přenášení vibrací do řídítek, a tedy i do rukou jezdce.

- 2) Tuhost středu, nebo také „pedaling stiffness“ je laterální tuhost rámu, která se projevuje při šlapaní jezdce na kole. Obecně lze říct, že vyšší tuhost této oblasti vede k efektivnějšímu přenosu energie do hnacího ústrojí a na kola než do samotné deformace rámu. Návrh této tuhosti závisí na faktorech jako je velikost rámu, účel použití, fyzických vlastností jedince. Příkladem, dráhová kola vyžadují vyšší tuhost než kola určená pro vytrvalostní disciplíny.
- 3) Vertikální tuhost sedlové trubky mimo faktory jako volba plášťů, kol, sedla či sedlové trubky přispívá k jízděnému komfortu. Opět, pokud je tato tuhost příliš nízká, nedochází ke zvýšení komfortu, ale naopak dochází k nečekaným pohybům, úskokům kola pod jezdce, které snižují efektivitu přeneseného výkonu a kontrolou nad kolem. Příkladem, u dráhových kol na dráze, kde se jedná o hladký povrch, je vyšší tuhost benefitní.

## 4 TEST TUHOSTI EFBE

EFBE Prüftechnik GmbH je laboratoř na testování cyklistických komponent dle ISO, EN, nebo vlastních EFBE norem. Společnost byla založena roku 1995 se sídlem v německém Waltropu. Z důvodu soustředění velkých částí výrobních kapacit světových výrobců kol na Taiwanu má dnes svoji pobočku i zde.

Společnost si brzy vybuodovala silnou pozici ve světě cyklistiky při poskytování certifikací nebo podpory při vyvíjení cyklistických komponent. Mezi jejich testy patří např. tuhostní, impaktové, únavové a overload testy, na které má vytvořenou vlastní metodiku testování, resp. se jedná o jimi vyvinuté testy [9]. Na základě mailové komunikace s firmou jsme získali potřebné informace o testech, které jsou uvedeny níže.

### 4.1 TEST TUHOSTI HLAVOVÉ TRUBKY (EFBE)

Rám je uchycen za zadní patky, kde má rotační stupeň volnosti. Ve středu hlavové trubky je rám vertikálně podepřen. K testu je použit tzv. tube in tube design k oddělení zátěžové od měřicí „páky“. Délka páky od působíště síly do středu hlavové trubky je 850 mm. Odchylka je měřena ve stejné vzdálenosti a směru, kde je působeno silou 51 N (viz obr. 18).



Obr. 18 Test tuhosti řízení

## 4.2 TEST TUHOSTI STŘEDU (EFBE)

Rám je uchycen pod laterálním úhlem  $26^\circ$ . Vidlice je nahrazena tzv. „dummy fork“, kde má rotační stupeň volnosti okolo hlavové trubky a okolo přední osy, která je pro silniční kola ve vzdálenosti 400 mm od spodní hrany hlavové trubky.

Zadní kolo má rotační stupeň volnosti okolo zadní a podélné osy. Patky jsou staženy k ose na testovací stolici. Délka páky od působíště síly do středu středové spojky je 150 mm. K přenosu síly je použita tuhá páka, na kterou působí vertikální síla 756 N. Odchylka je měřena ve stejné vzdálenosti, kde působí síla, a ve směru působení síly (viz obr. 19).



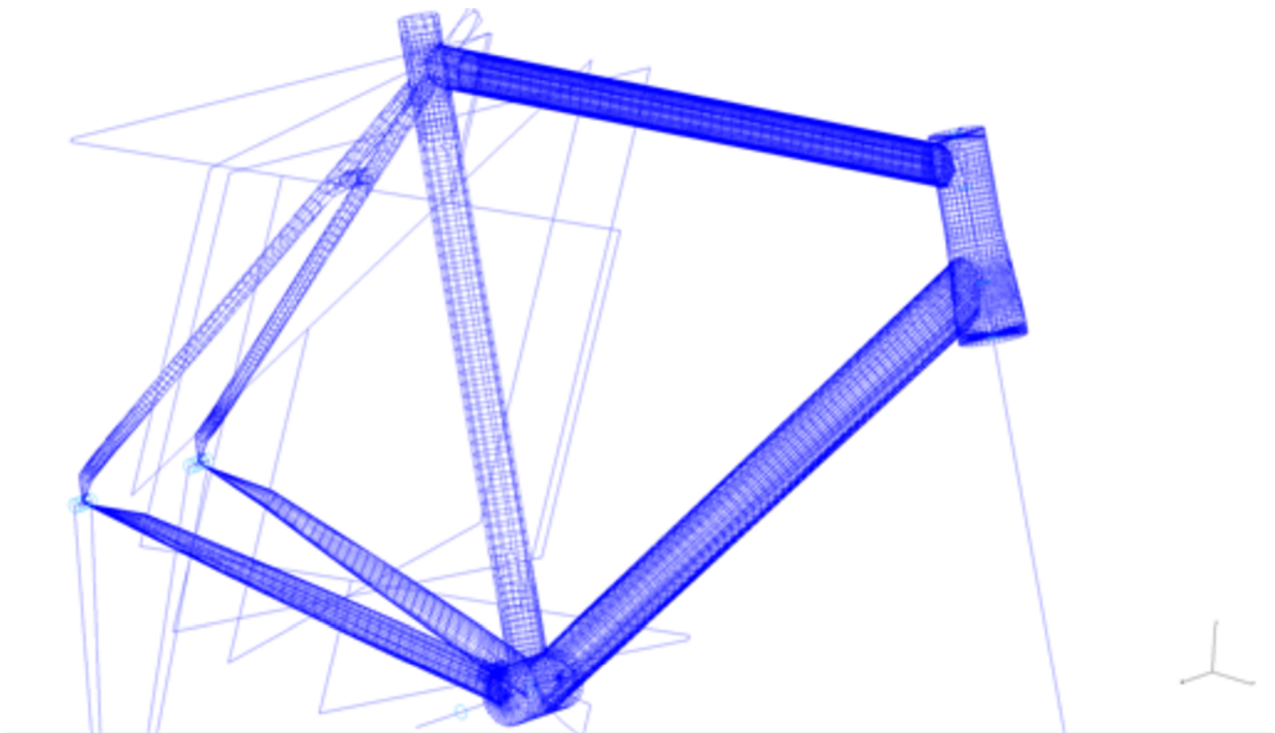
*Obr. 19 Test tuhosti středu*

## 5 PEVNOSTNÍ VÝPOČET

Lineárně statická analýza rámu silničního kola byla provedena za použití metody konečných prvků (MKP) v softwaru NX I-DEAS 6.1.

### 5.1 POPIS MKP MODELU

Pro tvorbu MKP modelu byl použit skořepinový model (obr. 20) tvořící čtyřuzlové prvky thin shell, který uvažuje střednicové plochy. Rám samotný splňuje předpoklady pro použití skořepinového modelu, kdy tloušťka stěny materiálu je několikanásobně menší než ostatní rozměry. Tento postup má tu výhodu, že oproti použití objemových prvků je značně úspornější na výpočtový čas při uchování kvality výsledku.



*Obr. 20 Skořepinový model*

Prvkům byla posléze přiřazena odpovídající tloušťka materiálu. Při tvorbě modelu byly vynechány díry pro umístění bidonů a průchodky pro vedení brzd a řazení. Vzhledem k umístění těchto prvků nemají

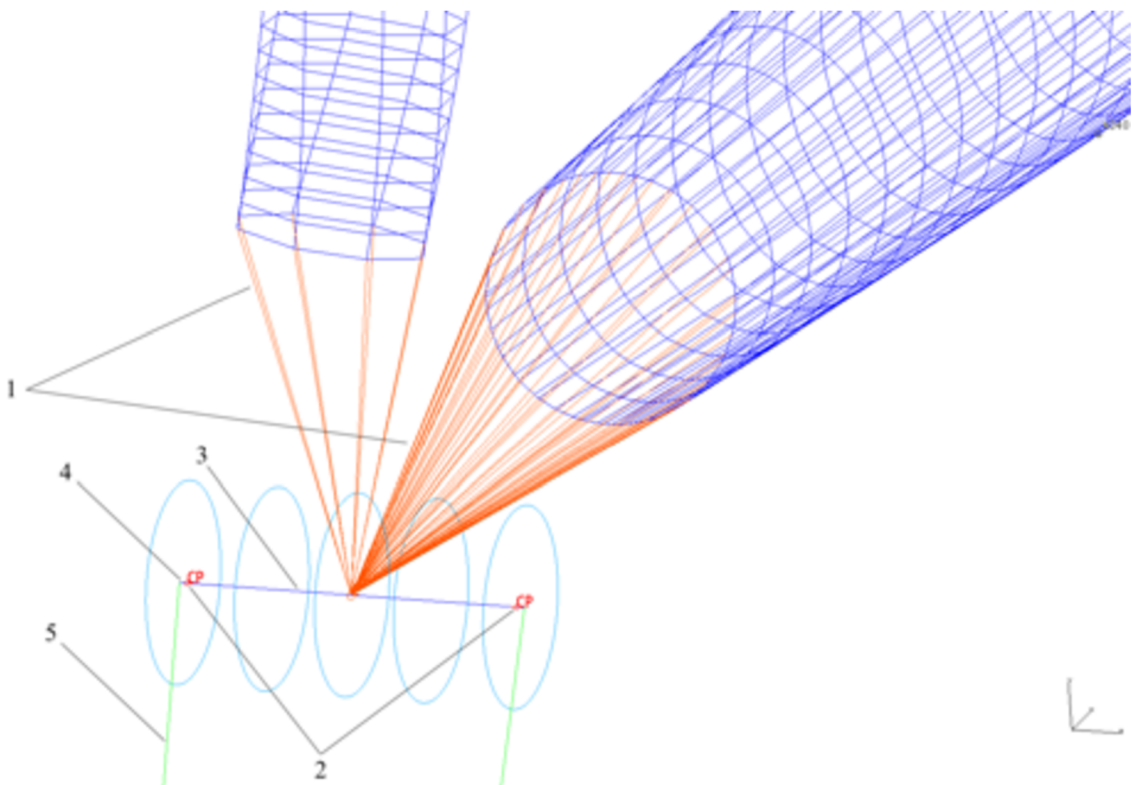
tato zjednodušení podstatný vliv na výsledek výpočtu. Síť je tvořena převážně mapovaně s výjimkou tvarově složitých míst (napojení trubek), kde je použita síť volná. Z důvodu omezených zkušeností se síťováním a MKP analýzami je síť, kterou jsme vytvořili místy příliš hrubá, nebo se zde vyskytují nekvalitní prvky, které mohou mít vliv na přesnost výpočtu. V tabulce 1 je vidět jaké typy a množství prvků bylo použito k vytvoření MKP modelu.

*Tab. 1 Množství a typy použitých prvků*

<b>Typ</b>	<b>Počet</b>
Thin Shell	25691
Constraint (RBE3)	4
Rigid (RBE2)	4
Coupled DOF	8
Beam	19

## 5.2 NÁHRADY PATEK RÁMU

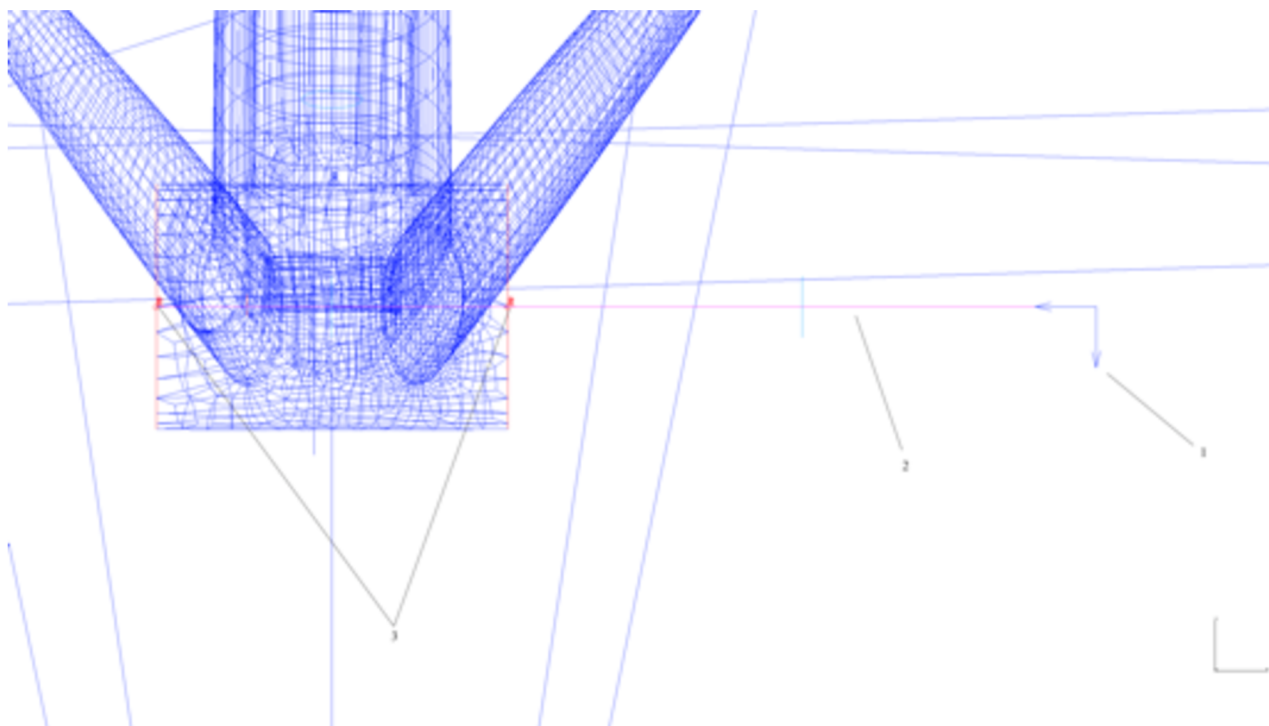
Patky rámu jsou z důvodu tvarové komplexity a nepodstaty pro výpočet nahrazeny prvkem constrain (1 na obr. 21)). Patka je stažena do samostatného uzlu, který leží v ose uchycení zadního kola tak, jak je vidět na obr. 21. Vzhledem k tomu, že uzel, do něhož je již navedený constraint prvek, tzv. Master, nelze dále použít pro jiné prvky, je za pomoci beam prvku rozšířen na dva prvky tak, aby bylo možné tento prut (3) stáhnout pomocí coupled DOF (2) k ose kola, prutu (4) vytvořeného ze tří beam prvků pro jednu patku (jeden CDOF má aktivován posuv podle osy x a osy y, druhý má aktivován posuv podle os x, y, z). Takto nahrazená patka (Constraint set 1 a 2) je potom stáhnuta pomocí prvku rigid (5) do jednoho uzlu tak, jak je vytvořena testovací stolice EFBE. Do tohoto uzlu je potom vložen restraint, kde je pro test tuhosti středu povolena pouze rotace okolo osy x (Restraint set 1) a pro test tuhosti řízení je povolena pouze rotace podle osy z (Restraint set 2).



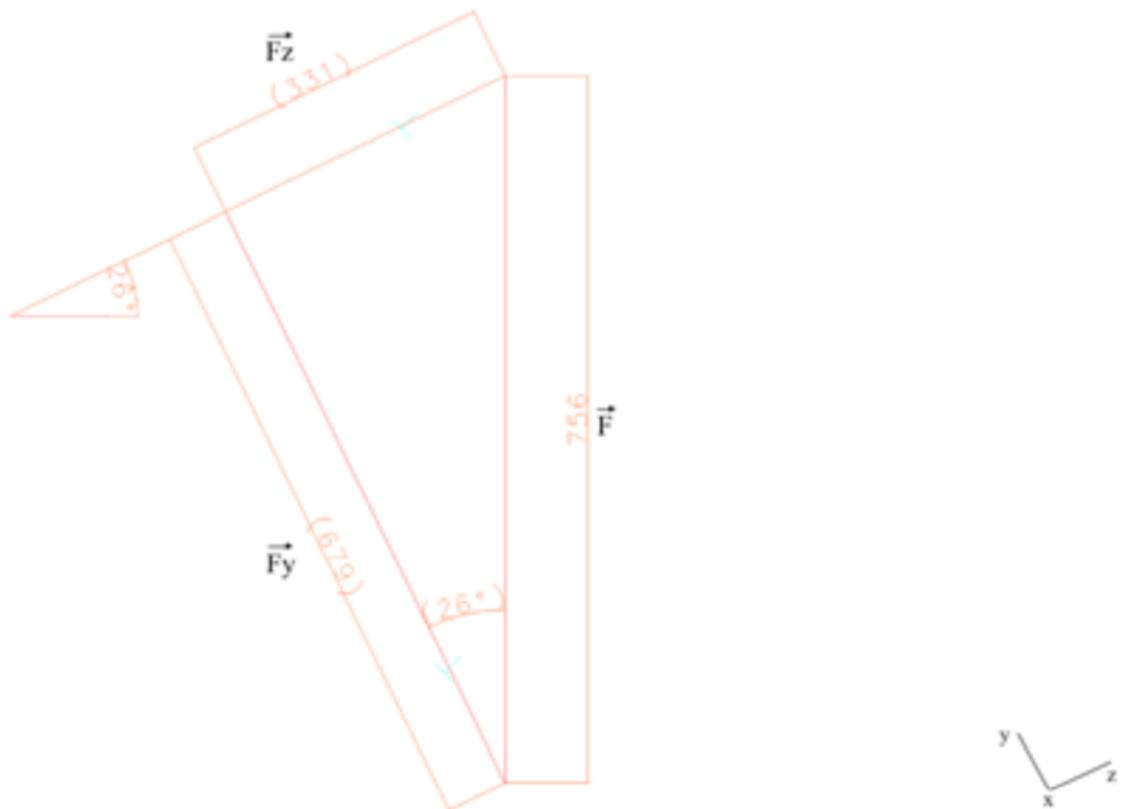
Obr. 21 Náhrada patek rámu detail

### 5.3 NÁHRADA INSERTU VE STŘEDOVÉ SPOJCE

Pro test tuhosti středu je do středové spojky vložen Insert, který je nahrazen prutem (2 na obr. 22) vytvořeným ze tří beam prvků a umístěný do osy středové spojky. Dva uzly jsou umístěny na krajích středové spojky a jsou do nich navedeny rigid (3) prvky z krajů středové spojky. Třetí uzel je ve vzdálenosti 150 mm od středu středové spojky a v případě testu tuhosti je do něj vložena síla (1)  $F_z=331$  N,  $F_y=679$  N (Load set 1). Viz obr. 23.



Obr. 22 Náhrada insertu ve středové spojce

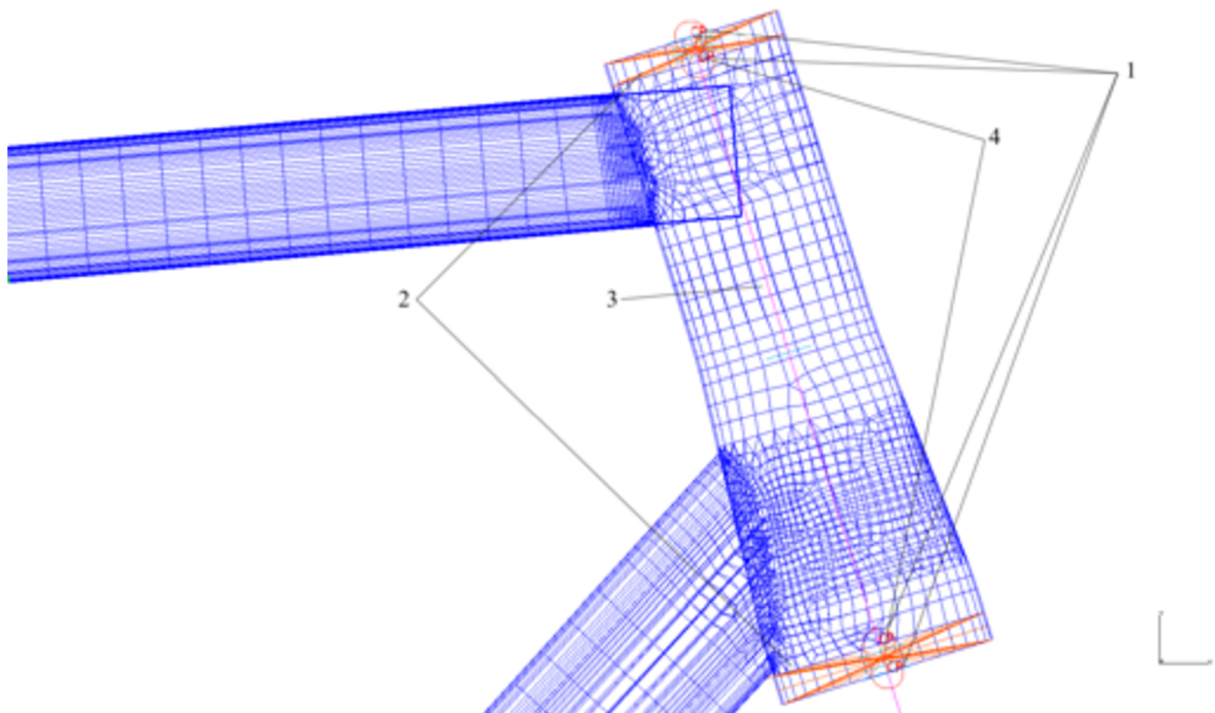


Obr. 23 Rozložení síly  $F$  do složek  $F_z$  a  $F_y$



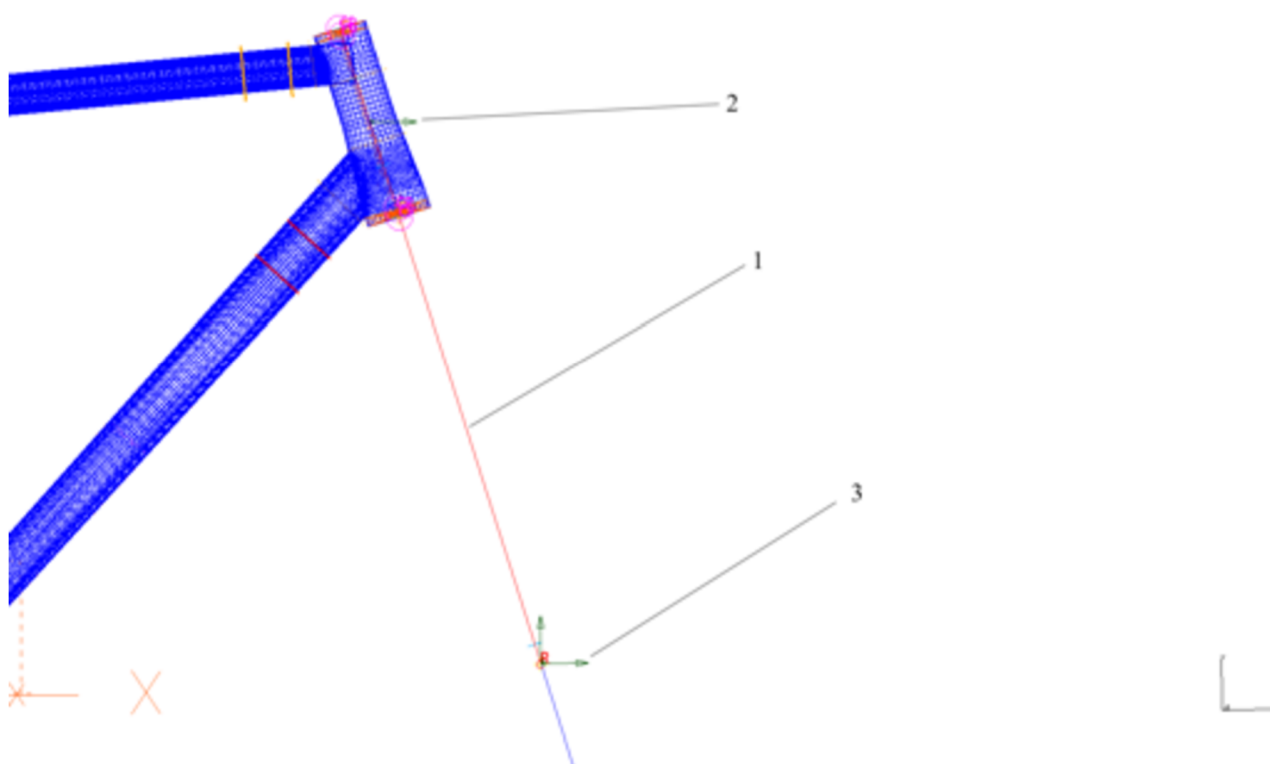
## 5.4 NÁHRADA UCHYCENÍ HLAVOVÉ TRUBKY

Tato část (obr. 24) je řešena velmi podobně jako u náhrady patek. Místo, kde je ložisko řízení je nahrazeno constainem (2) a staženo do uzlu, který leží v ose hlavové trubky. Opět, uzel, do kterého je navedený master nelze použít pro jiné prvky, tak je za pomoci beam prvku rozšířen na dva prvky tak, aby bylo možné tento prut (4) stáhnout pomocí coupled DOF (1) k ose řízení – k prutu (3) vytvořenému z šesti beam prvků. Jeden CDOF má aktivován posuv v ose x a ose z, druhý má aktivován posuv v osách x, y, z.



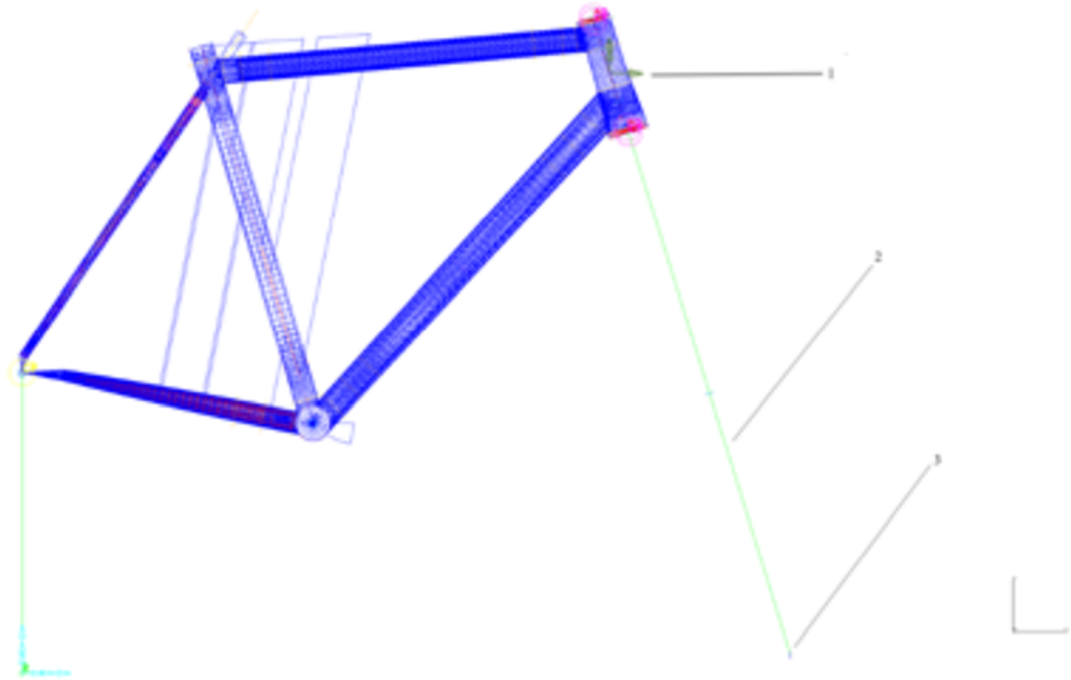
Obr. 24 Náhrada uchycení hlavové trubky detail

Pro test tuhosti středu jsou krajní uzly staženy pomocí prvku rigid (1 na obr. 25) do uzlu, který leží ve vzdálenosti 400 mm od spodní hrany hlavové trubky v ose řízení (Constrain set 1). V tomto uzlu je potom vložena vazba (3), ve které je zamezeno všem posuvům, další vazba (2) je vložena do středu osy řízení, ve které je zamezeno posuvům dle os x a z tak, aby nedocházelo k rotaci okolo osy x (Restraint set 1).



Obr. 25 Náhrada uchycení hlavové pro test tuhosti středu

Pro test tuhosti řízení je restraint (1 na obr. 26) pouze v uzlu ve středu hlavové trubky, kde je povolen posuv podle osy y a rotace okolo osy x (Restraint set 2). Celá osa hlavové trubky, prut (2), je prodloužena na délku 850 mm od středu hlavové trubky. Na jejím konci působí síla (3) ve směru osy z o velikosti 51 N (Load set 2).



Obr. 26 Náhrada uchycení hlavové pro test řízení

## 5.5 ZATĚŽOVACÍ STAVY

V tabulce číslo 2 lze vidět jaké Constraint, Restraint a Load sety byly použity pro jednotlivé testy, tedy test tuhosti středu a test tuhosti řízení.

Tab. 2 Množství a typy použitých prvků

Zatěžovací stav	Constraint set		Restraint set		Load set	
	1	2	1	2	1	2
Testu tuhosti středu						
Test tuhosti řízení						

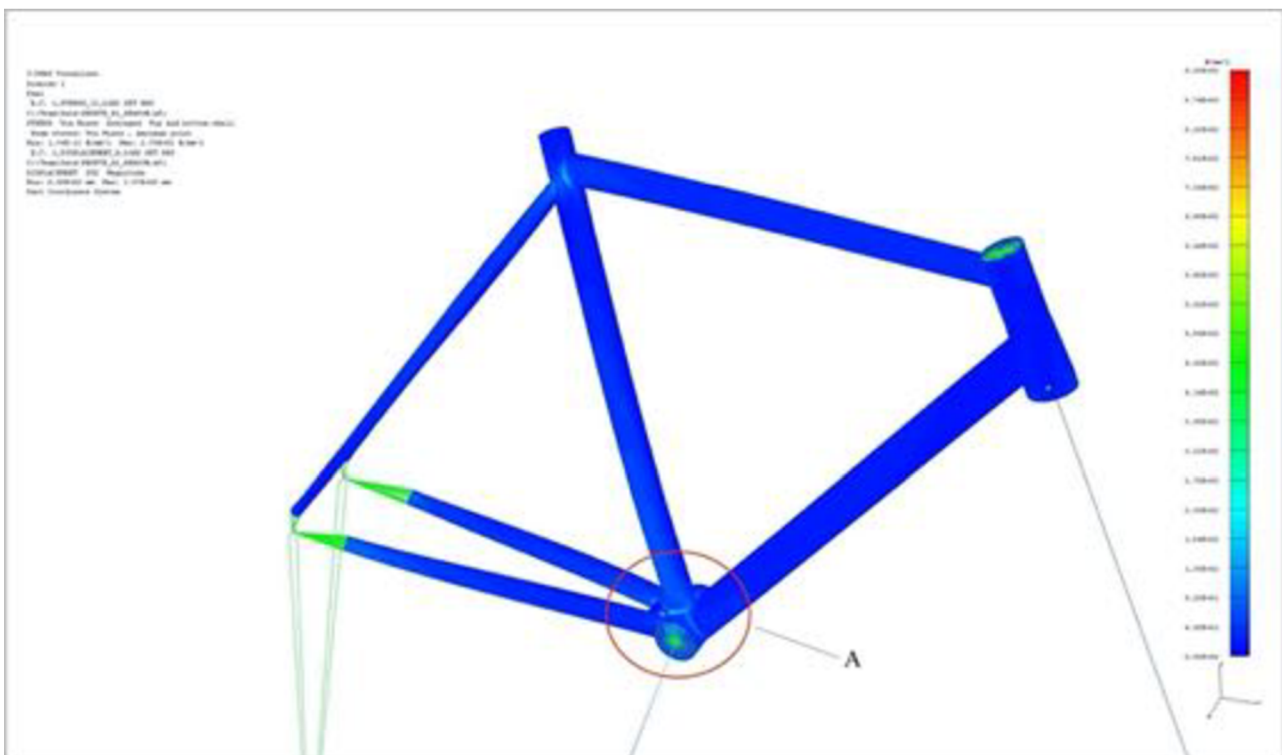
## 6 VÝSLEDKY

Rám tvoří s výjimkou patek slitina niobu s mezí kluzu 920 MPa. Výsledky tuhosti středu jsou tedy porovnávány s touto hodnotou. U testu tuhosti řízení je záměrně zvoleno jako maximum 150 MPa kvůli lepší viditelnosti výsledků. Napětí bylo určeno na základě teorie HMH (I-deas: Von Mises)

### 6.1 TEST TUHOSTI STŘEDU

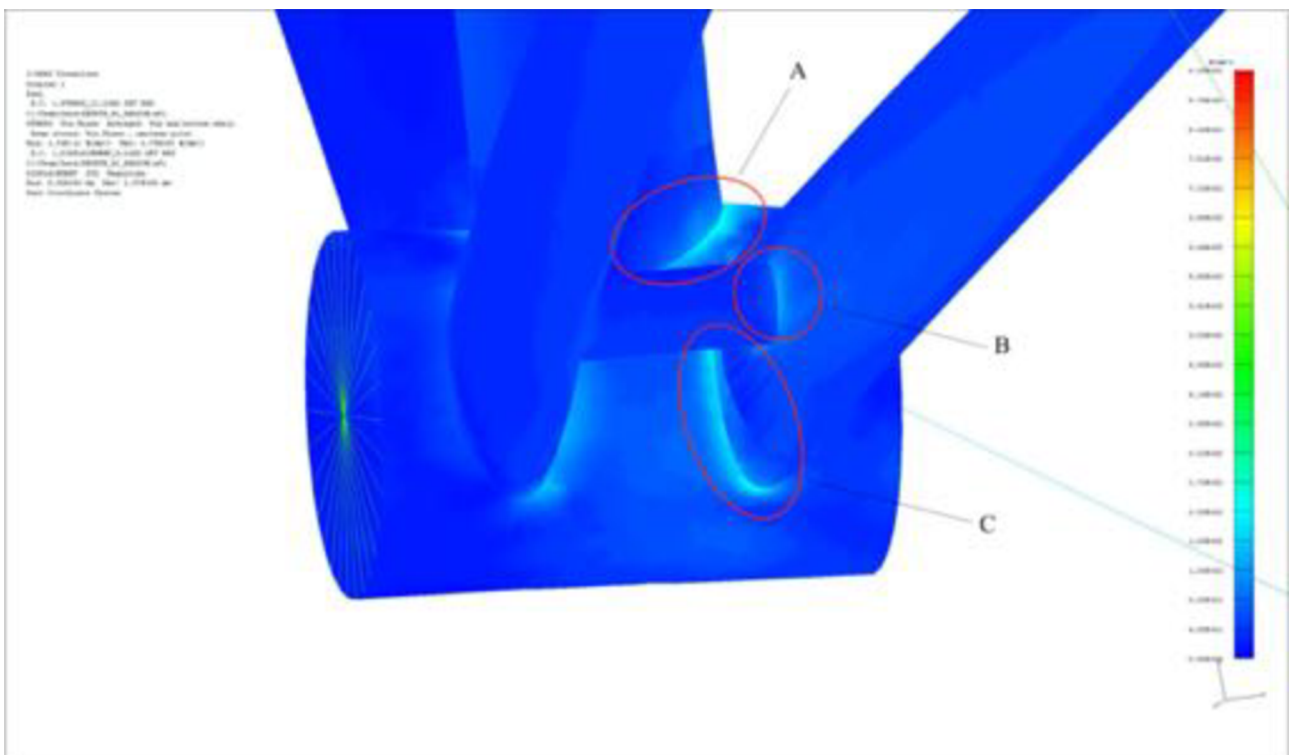
#### 6.1.1 NAPĚTÍ

Maximální napětí se vyskytují v místech spoje sedlové trubky se středovou spojkou a řetězové vzpěry se středovou spojkou (detail A - obr. 27). Maximální hodnota napětí (HMH) je 275 MPa. Namáhání vzniklé při testu tuhosti středu je tedy podstatnější než namáhání při testu nárazem (110-130 MPa).



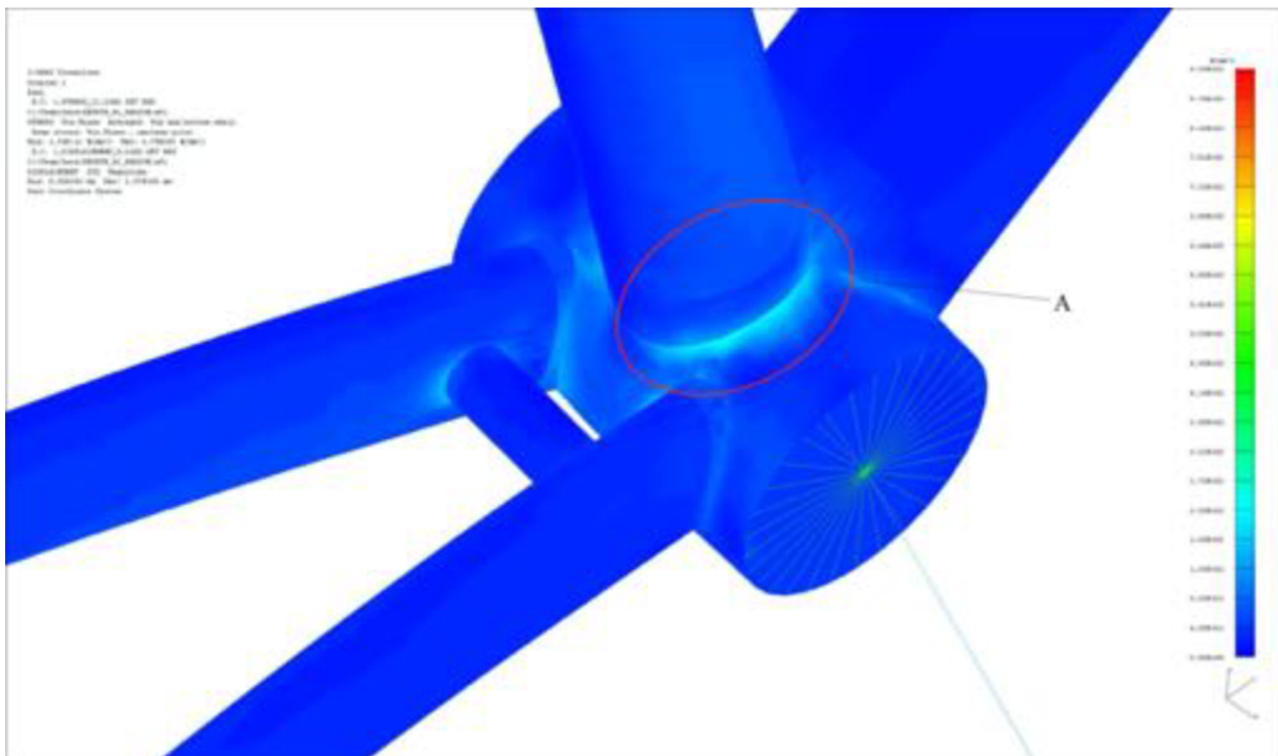
*Obr. 27 Celý rám; test tuhosti středu; HMH; deformovaný stav (deformace 10:1); vrchní i spodní strana modelu; max. napětí 275 MPa; stupnice 0-920 MPa*

Nepříjemné místo z hlediska konstrukce je v místě spoje řetězových vzpěr se středovou spojkou (detail C - obr. 28). Napojení dvou trubek velikostně rozdílných průměrů způsobuje, že osová síla se snaží probořit stěnu středové spojky, ta není ale tak podstatná, a dodatečný ohyb způsobuje, že na jedné straně je materiál vytrháván a na druhé vtlačován do stěny středové spojky (275 MPa). Tento problém se dodatečně snaží řešit můstek, ve kterém se v podstatě děje to stejné (B) akorát v menší míře.



Obr. 28 Středová spojka; test tuhosti středu; HMH; deformovaný stav (deformace 10:1); vrchní i spodní strana modelu; max. napětí 275 MPa; stupnice 0-920 MPa

Ve spoji sedlové trubky a středové spojky (detail A - obr. 29) opět narážíme na stejný problém s tím rozdílem, že osová síla se snaží stěnu středové spojky ne probořit, ale vytrhnout. V místě spoje je svar, ten ale nelze ve skořepině dostatečně dobře posoudit.

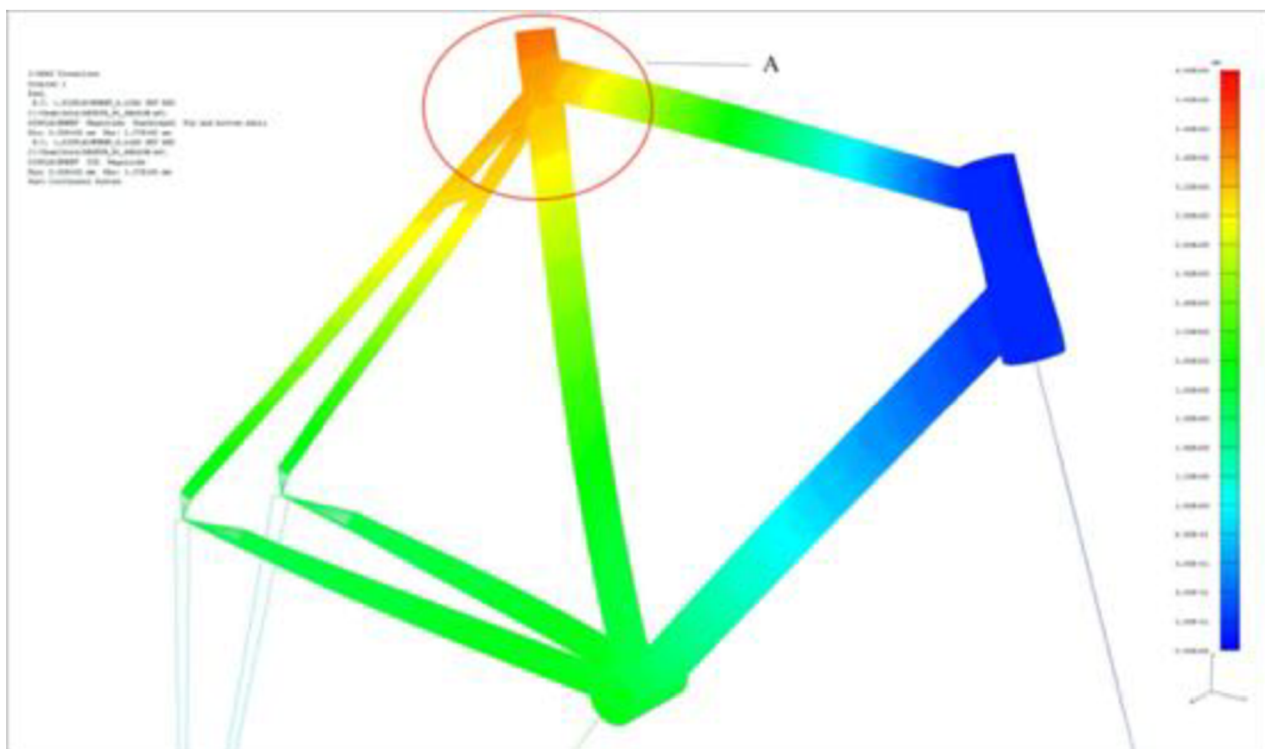


Obr. 29 Středová spojka; test tuhosti středu; HMH; deformovaný stav (deformace 10:1); vrchní i spodní strana modelu; max. napětí 275 MPa; stupnice 0-920 MPa

Doporučení, jak tato místa zlepšit je hned několik. Jedním řešením by bylo předělání rámu na nátrubkovou (lid. mufnovou) koncepci, která by sice tyto problémy řešila, ale za cenu zvýšení hmotnosti, zvýšení výrobních nákladů a předělání celé koncepce rámu, nemluvě o nutnosti zakázkové výroby nátrubků pro tyto trubky. Schůdnější alternativou je zvětšení tloušťky stěny středové spojky tak, aby lépe odolávala probořování resp. vytrhávání. Problém by také pomohlo trochu zmírnit zvětšení průřezů trubek tak, aby velikosti průřezů nebyly tolik rozdílné. Další možností je zaoblit konce řetězových vzpěr. Tento úkon přináší další poměrně složitý krok do výrobního procesu a bylo by třeba ověřit zlepšení vlastností v porovnání se zvýšením ceny. Poslední možností je předělat středovou spojku a napojované řetězové vzpěry do kompaktního celku, který by měl vyřešená kritická místa a zlepšil by tuhost rámu.

### 6.1.2 DEFORMACE

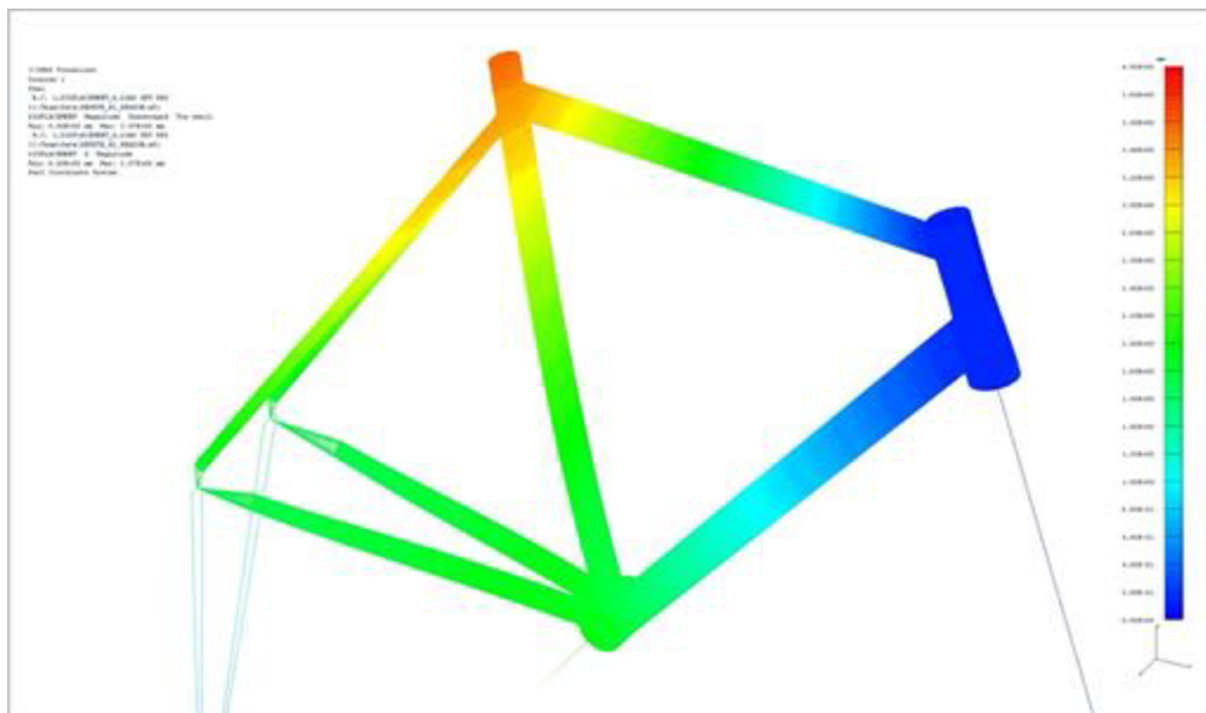
Maximální hodnoty deformace rámu jsou v místě napojení horní rámové trubky, sedlových vzpěr se sedlovou trubkou (detail A - obr. 30).



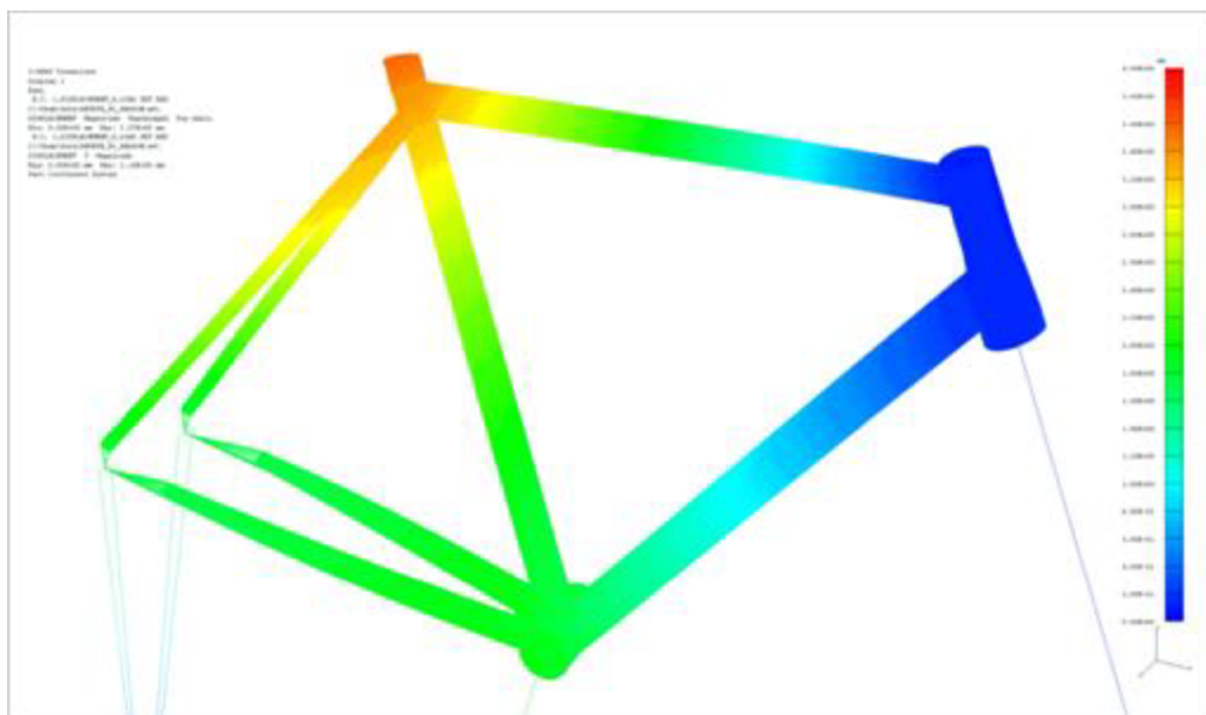
*Obr. 30 – Celý rám; test tuhosti středu; deformace rámu; deformovaný stav (deformace 10:1); vrchní i spodní strana modelu; max. deformace 3,57 mm; stupnice 0-4 mm*

Na obrázku 31 je zobrazena deformace v ose z a na obrázku 32 deformace v ose y. U středové spojky, kde se při testu tuhosti středu měří posuv na konci insertu, dosáhla výchylka přibližně 2,8 mm v ose z a 2,7 mm v ose y.





Obr. 31 Celý rám; test tuhosti středu; deformace rámu v ose z; deformovaný stav (deformace 10:1); vrchní i spodní strana modelu; max. deformace 3,57 mm; stupnice 0-4 mm

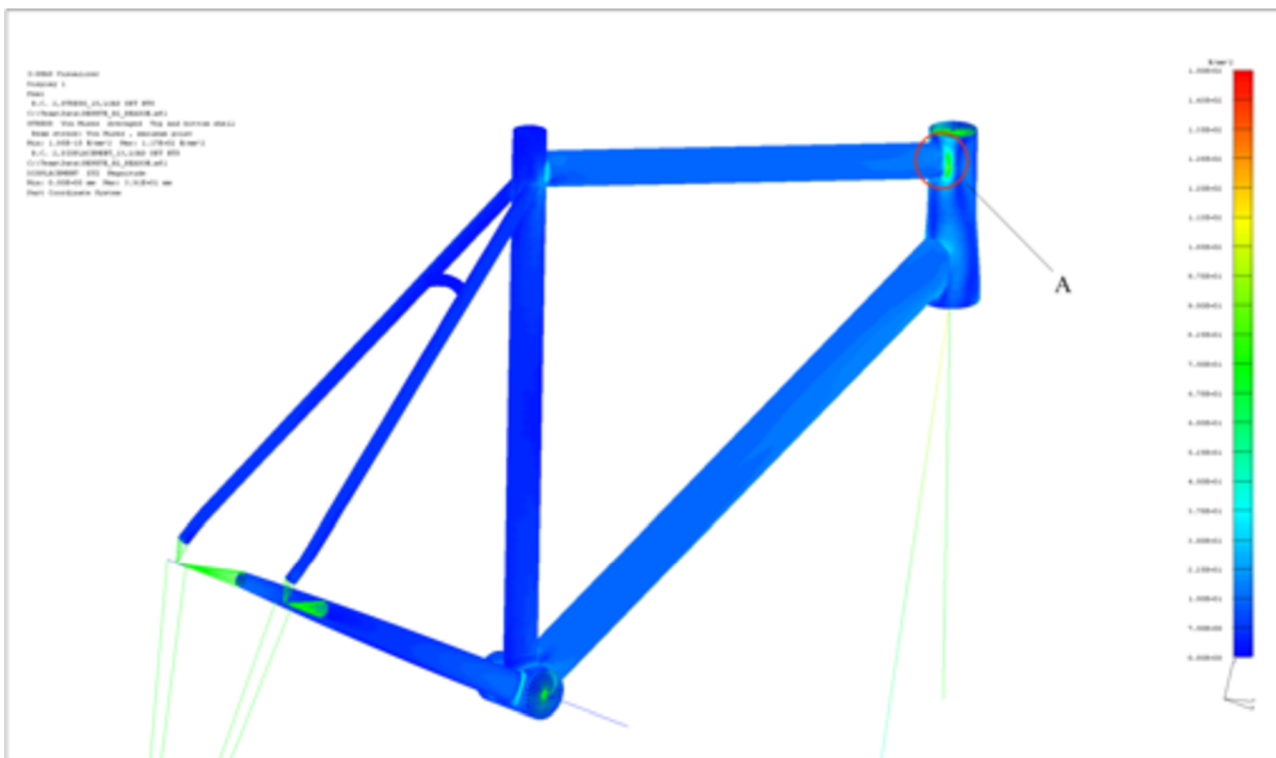


Obr. 32 Celý rám; test tuhosti středu; deformace rámu v ose y; deformovaný stav (deformace 10:1); vrchní i spodní strana modelu; max. deformace 3,57 mm; stupnice 0-4 mm



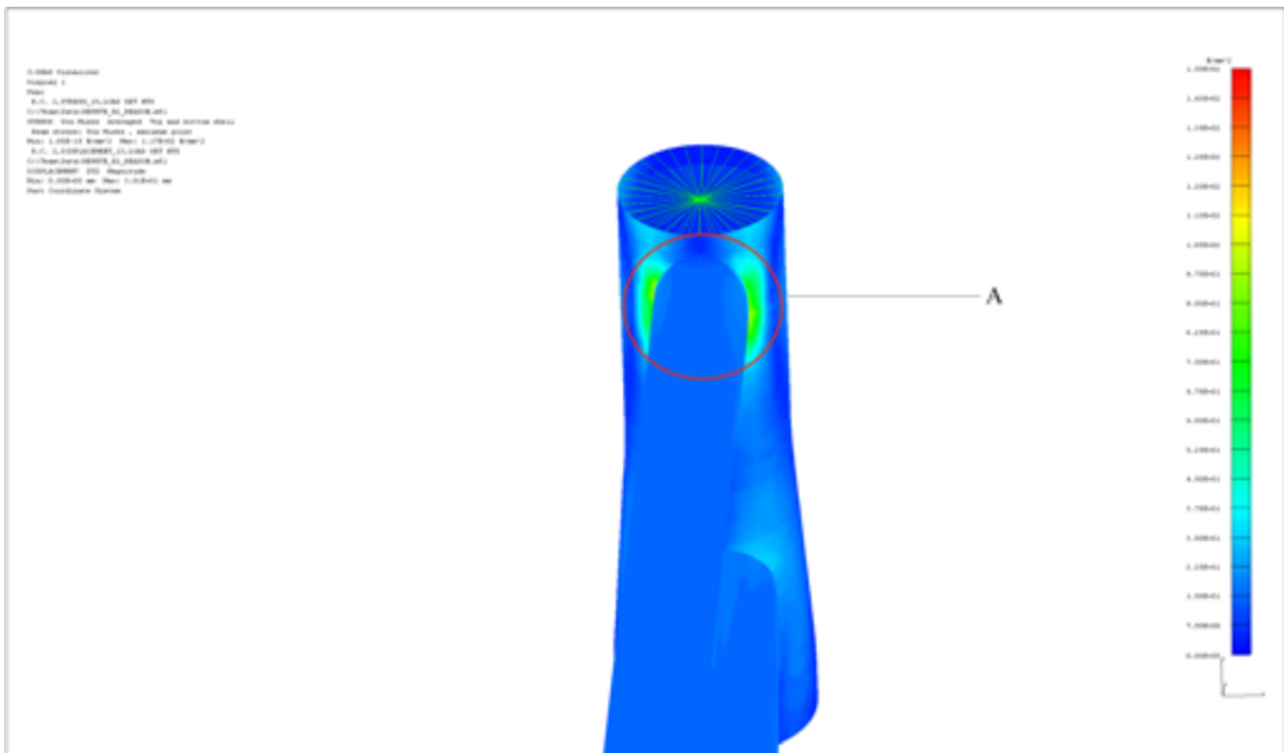
## 6.2 TEST TUHOSTI ŘÍZENÍ

Maximální napětí se vyskytuje v místě spoje hlavové trubky s horní rámovou trubkou (detail A na obr. 33). Maximální hodnota napětí (HMH) je 117 MPa.



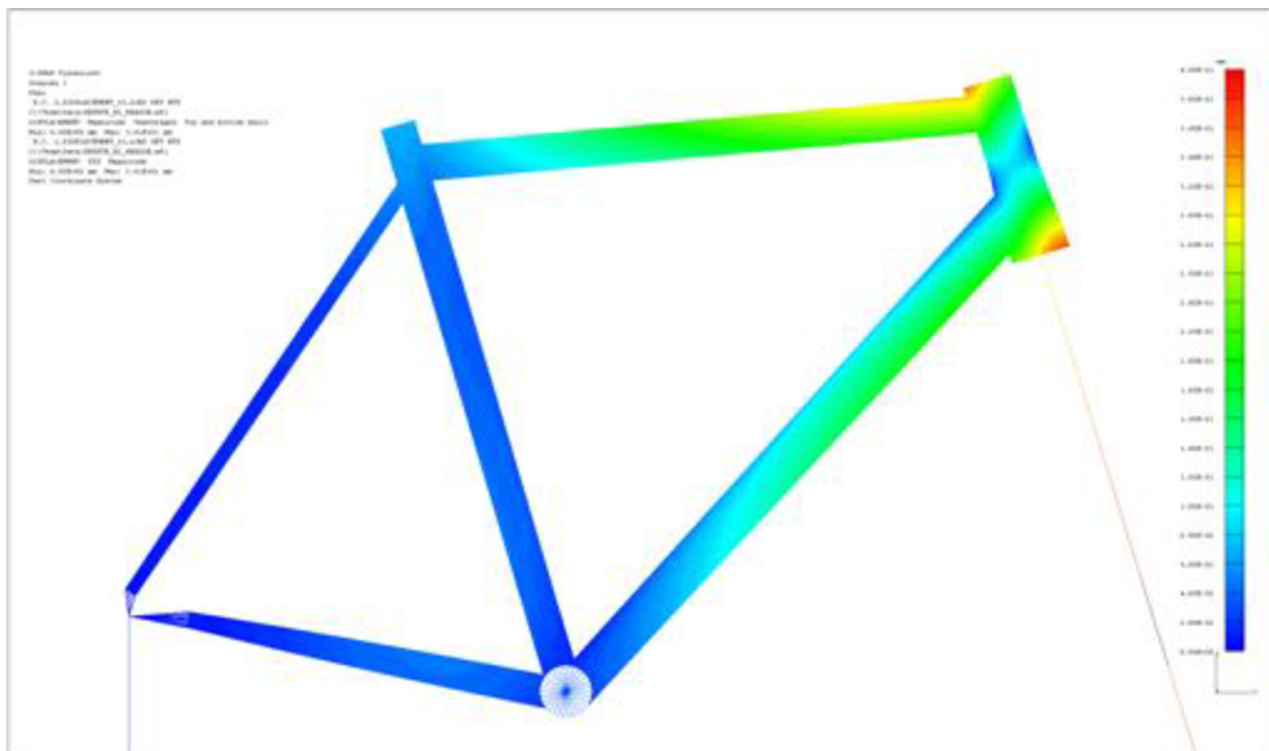
*Obr. 33 Celý rám; test tuhosti řízení; HMH; deformovaný stav (deformace 10:1); vrchní i spodní strana modelu; max. napětí 117 MPa; stupnice 0-150 MPa*

Na obrázku 34 je zobrazen detail spoje (A). V tomto místě dochází ke kombinaci namáhání krutu s ohybem. Ohyb je v tomto případě opět podstatnější složka namáhání. Horní rámovou trubku by bylo tedy vhodnější orientovat ve směru horizontálně zploštělé elipsy a její průřez udělat více zakulacený a rozměrově větší. V oblasti středové spojky opět dochází k podobnému jevu jako u testu tuhosti středu, tedy že na jedné straně je materiál vytrháván a na druhé vtlačován do stěny středové spojky.



Obr. 34 Hlavová trubka; test tuhosti řízení; HMH; deformovaný stav (deformace 10:1); vrchní i spodní strana modelu; max. napětí 117 MPa; stupnice 0-150 MPa

Deformace na rámu jsou velmi malé, pohybují se v rozmezí 0-0,4 mm (viz obr. 35). Maximální hodnota deformace je v místě na konci páky, kde se v testu měří výchylka v ose z. Výchylka zde dosáhla hodnoty 39,1 mm.



Obr. 35 Celý rám; test tuhosti řízení; deformace rámu; deformovaný stav (deformace 10:1); vrchní i spodní strana modelu; max. deformace 39,1 mm; stupnice 0-0,4 mm

## 7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit výpočtový model rámu silničního kola a provést analýzu tuhosti rámu s použitím MKP.

REPETE cycles je firma, která se momentálně zabývá výrobou ocelových rámu silničních kol. Cílem práce bylo analyzovat jejich rám R2 :REASON a najít případná kritická místa z pohledu napjatosti a deformace.

Rám, z velké části vyrobený z trubek firmy Colombus Tubi, byl analyzován pomocí testu založeného na metodice německé laboratoře EFBE. Konkrétně jde o test tuhosti středu a test tuhosti řízení. Tuhost jako taková má totiž výrazný vliv nejen na výkon jezdce, ale i na to, jak efektivně je tento výkon přenášen.

Analýzu jsme prováděli pomocí programu I-deas 6.1. Na základě výsledků se nám podařilo definovat u testu tuhosti středu dvě místa, kde se vyskytuje maximální napětí (cca 275 MPa), která mohou být při vyšší zátěži problematická. Obě jsou okolo středové spojky rámu. Jedním je napojení středové spojky a řetězových vzpěr, druhým je napojení středové spojky se sedlovou trubkou. Maximální hodnota deformace na rámu byla 3,57 mm. U středové spojky, kde se při testu tuhosti středu měří posuv na konci insertu, dosáhla výchylka přibližně 2,8 mm v ose z a 2,7 mm v ose y.

Diskutujeme také možnosti řešení těchto napětí jako je předělání rámu na nátrubkovou koncepci, zvětšení tloušťky stěn středové spojky, změna tvaru průřezů trubek, zaoblení konců řetězových vzpěr či zkompaktnění celé středové oblasti rámu.

U testu tuhosti řízení jsme objevili pouze jedno místo s maximálním napětím (117 MPa), a to v oblasti napojení hlavové trubky s horní rámovou trubkou. Deformace na rámu se pohybovaly v rozmezí 0-0,4 mm. Deformace na konci páky, kde se při testu měří výchylka, dosáhla hodnoty 39,1 mm. Výsledky obou testů mohou být nicméně zkresleny kvalitou vytvořené sítě.

Vzhledem k tomu, že je podstatnější zatížení ohýbáním rámu do boku, dává větší smysl orientovat průřezové profily ve smyslu horizontálně zploštělé elipsy, a ne vertikálně zploštělé elipsy, jako je tomu nyní.

Na tuto MKP analýzu naváže ověření reálným testem v laboratořích EFBE. Na základě společných výstupů potom dojde k inovovanému návrhu rámu pro novou generaci.

## 8 POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] COVILL, Derek, Steven BEGG, Eddy ELTON, Mark MILNE, Richard MORRIS a Tim KATZ, 2014. Parametric Finite Element Analysis of Bicycle Frame Geometries. *Procedia Engineering*. **72**, 441-446. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2014.06.077
- [2] COVILL, Derek, Alex BLAYDEN, Daniel COREN a Steven BEGG, 2015. Parametric Finite Element Analysis of Steel Bicycle Frames: The Influence of Tube Selection on Frame Stiffness. *Procedia Engineering*. **112**, 34-39. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.07.172
- [3] COVILL, Derek a Jean-Marc DROUET, 2018. On the Effects of Tube Butting on the Structural Performance of Steel Bicycle Frames. *Proceedings*. **2(6)**. ISSN 2504-3900. Dostupné z: doi:10.3390/proceedings2060216
- [4] *EN 14781:2005*, 2005. E. CEN: CEN.
- [5] AL-RABEH, Waleed, 2015. Bicycle Frame Design Using SOLIDWORKS Simulation – Part 2. *SOLIDWORKS Tech Blog* [online]. September 15, 2015 [cit. 2020-08-24]. Dostupné z: <https://blogs.solidworks.com/tech/2015/09/bicycle-frame-design-using-solidworks-simulation-part-2.html>
- [6] ARTHUR, David, 2008. The NAHBS 2015 in pictures - the best bikes that scooped the awards. *Https://road.cc* [online]. Bath, MAR 12, 2015 [cit. 2020-08-25]. Dostupné z: <https://road.cc/content/news/145347-nahbs-2015-pictures-best-bikes-scooped-awards>
- [7] CERVÉLO. STIFFNESS. *Cervélo* [online]. San Diego [cit. 2020-08-25]. Dostupné z: <https://www.cervelo.com/en/stiffness>
- [8] COLUMBUS, 2018. *Tube Sets 2018 Catalogue and Pricelist*. Caleppio di Settala.
- [9] *EFBE Prüftechnik GmbH: Engineering for Bikes* [online]. [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <https://www.efbe.de>
- [10] HEINE, Jan. The Biomechanics of Planing. *René Herse cycles* [online]. 31.11.2014 [cit. 2020-08-24]. Dostupné z: <https://www.renehersecycles.com/the-biomechanics-of-planing/>

- [11] HEINE, Jan. What is Planing? *René Herse cycles* [online]. 23.11.2014 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.renehersecycles.com/what-is-planing/>
- [12] NEJEDLÝ, Petr, 2019. Kola Repete: mladá česká značka známější v zahraničí než doma. *RoadCycling.cz Czech cycling magazine* [online]. Louny [cit. 2020-08-25]. Dostupné z: <https://www.roadcycling.cz/clanek/kola-repete-mlada-ceska-znacka-znamejsi-v-zahranici-nez-doma>
- [13] *REPETE cycles* [online]. Praha [cit. 2020-08-25]. Dostupné z: <http://repete.cc>
- [14] Technical Supplement: Tube Manipulation. *Seven Cycles* [online]. [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <https://www.sevencycles.com/buildingbike/techsupplement/tubeman.php>
- [15] VÍT, Ladislav, 2016. *Problematika konstrukce rámu cyklistického kola*. Plzeň. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ivana Mazínová.