

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



Diplomová práce
**Experimentální analýza dynamického zatížení rámu horského kola a návrh
zkoušky životnosti**

Bc. Jakub Šulc

Studijní obor: Aplikovaná mechanika

Odbor Pružnosti a pevnosti

6. srpna 2020



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šulc Jméno: Jakub Osobní číslo: 456391
Fakulta/ústav: Fakulta strojní
Zadávající katedra/ústav: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Aplikovaná mechanika

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Experimentální analýza dynamického zatížení rámu horského kola a návrh zkoušky životnosti

Název diplomové práce anglicky:

Experimental Analysis and Design of the Fatigue Test on the Mountaibike Frame

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši zkušebních metod pro ověřování pevnosti a životnosti rámu horských kol.
2. Navrhněte a popište možnosti způsobu experimentálního určování namáhání komponent a rámu horského kola.
3. Navrhněte a realizujte provozní měření pro daný typ kompozitového rámu
4. Realizujte zpracování provozních měření a navrhněte zkušební parametry pro zjednodušenou únavovou zkoušku v laboratoři, ověřující životnost nejvíce exponovaného uzlu konstrukce.
5. Diskutujte možnosti predikce únavového života takového uzlu konstrukce.

Seznam doporučené literatury:

1. Vlk, M a kol: Experimentální mechanika, skripta VUT v Brně 2003
2. T. Ponižil: Analýza deformací a pevnosti kompozitového rámu. Diplomová práce 2019.
3. ISO 4210 Cycles - Safety requirements for bicycles, Geneva: ISO, 2015.
4. Roohollah Sarfaraz et al: A hybrid S-N formulation for fatigue life modeling of composite materials and structures. Composites: Part A 43 (2012) 445–453.
5. Devaiah B B et al: Stress Analysis Of A Bicycle Frame, Materials Today: Proceedings 5 (2018) 18920–18926
6. Sendecký; viz https://books.google.com/books/about/Test_Methods_and_Design-Allowables_for_F.ht ml?hl=cs&id=ckfxmTcNFHwC

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Milan Růžička, CSc., odbor pružnosti a pevnosti FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **22.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce:

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústav/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

14. 7. 2020
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne _____

Bc. Jakub Šulc

Poděkování

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Milanu Růžičkovi, CSc. za vedení diplomové práce a za veškerou pomoc, kterou mi poskytl. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Karlu Doubravovi, Ph.D. a panu Ing. Bohumilu Kropíkovi za spolupráci při přípravě a realizaci experimentů. V neposlední řadě děkuji společnosti Compo Tech PLUS, spol. s r. o., která mi umožnila podílet se na vývoji rámu, speciálně poté panu Ing. Tomáši Ponížilovi za veškerá poskytnutá data.

Anotační list

Jméno a příjmení autora:	Bc. Jakub Šulc
Název diplomové práce:	Experimentální analýza dynamického zatížení rámu horského kola a návrh zkoušky životnosti
Anglický název:	Experimental Analysis and Design of the Fatigue Test on the Mountainbike Frame
Akademický rok:	2019/2020
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor pružnosti a pevnosti
Vedoucí diplomové práce:	prof. Ing. Milan Růžička CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 67 Počet obrázků: 36 Počet tabulek: 8
Klíčová slova:	Horské kolo, rám, experimentální analýza, únava
Key words:	Mountainbike, frame, experimental analysis, fatigue

Abstrakt

Tato práce se zabývá experimentální analýzou dynamického zatížení rámu horského kola. Zkoumá poměrné deformace kompozitového rámu vzniklé během laboratorních zkoušek základních jízdních režimů a také při provozním měření v terénu. Získané výsledky jsou dále využity pro výpočet únavových charakteristik rámu.

Abstract

This thesis deals with experimental analysis of dynamic load on a mountainbike frame. It examines strain of the composite frame caused during the elementary riding mode and also during the operational measurement in normal terrain. Acquired outcomes are further used for the calculation fatigue characteristics of the frame.

Význam použitých symbolů a zkratek

HT	Hlavová trubka rámu jízdního kola
DT	Dolní trubka rámu jízdního kola
ST	Sedlová trubka rámu jízdního kola
TT	Horní trubka rámu jízdního kola
CHS	Řetězová vzpěra rámu horského kola
SS	Sedlová vzpěra rámu horského kola
DIC	Digitální korelace obrazu
AE	Akustická emise
$\epsilon_{a_{ekv}}$	Ekvivalentní amplitudová deformace
σ_a, σ_m	Amplitudové, střední napětí
E	Youngův modul pružnosti
D	Únavové poškození
Z	Počet opakování zátěžné sekvence do lomu
R_m	Smluvní mez pevnosti
\bar{L}_{P-M}	Střední únavový život
N	Počet cyklů
σ_c	Mez únavy

Obsah

1	Úvod	9
2	Zkušební metody rámců horských kol	10
2.1	Rázová zkouška rámu padající hmotou	11
2.2	Rázová zkouška padajícího rámu s vidlicí	12
2.3	Únavová zkouška šlapacími silami	13
2.4	Únavová zkouška vodorovnými silami	14
2.5	Únavová zkouška svislou silou	15
2.6	Zkouška průchodnosti zadní pneumatiky	16
2.7	Požadavky pro splnění normovaných zkoušek	17
3	Experimentální určování namáhání rámu	18
3.1	Elektrické metody	18
3.1.1	Odporová tenzometrie	18
3.2	Optické metody	19
3.2.1	Digitální korelace obrazu (DIC)	20
3.3	Akustická emise	20
4	Návrh měření deformační odezvy	21
5	Návrh provozního měření v laboratoři	25
5.1	Přejezd překážky	26
5.2	Brždění	27
5.3	Skok	27
5.4	Start	27
5.5	Schody	28
6	Vyhodnocení provozního měření v laboratoři	29
6.1	Přejezd překážky	29
6.2	Brždění	31
6.2.1	Obě brzdy	31
6.2.2	Přední brzda	33
6.3	Skok	33

6.4	Start	35
6.5	Schody	36
7	Provozního měření v terénu	38
8	Vyhodnocení provozního měření v terénu	40
8.1	Točná	40
8.2	Malá Točná	42
9	Únavová charakteristika rámu	45
9.1	Dekompozice provozního zatížení	45
9.1.1	Metoda stékání deště (Rain-flow metoda)	45
9.2	Provozní režimy	48
9.2.1	Sportovní režim	48
9.2.2	Závodní režim	48
9.3	Pevnost a únava kompozitních materiálů	51
9.4	S-N křivka	52
9.5	Vliv střední složky napětí	54
9.6	Kumulace poškození	55
9.7	Vyhodnocení výsledků závodní režim	56
9.7.1	Jmenovitý průřez DT	56
9.7.2	Koncentrátory napětí	56
10	Závěr	60
	Reference	62

1 Úvod

Téma této diplomové práce vzniklo ve spolupráci se společností Compo Tech PLUS, spol. s r. o., která se zabývá výrobou kompozitových komponentů pro široké spektrum zákazníků. Ve firmě je vyvíjen prototyp rámu horského kola, který je vyroben z navíjených kompozitových trubek. Pro návrh a optimalizaci rámu je důležité znát způsob a velikost jeho namáhání. Ten lze určit kvalifikovaným odhadem nebo z experimentů prováděných na rámu.

V této práci byla provedena experimentální analýza rámu horského kola. Na rám byly umístěny odporové tenzometry, pomocí kterých byla měřena deformace rámu. Požadavkem bylo zaměření experimentu na dolní rámovou trubku, která byla na základě zkušeností vyhodnocena jako kritická část konstrukce. Proběhlo laboratorní měření deformační odezvy během vybraných základních jízdních režimů a také provozní měření v terénu. Na dolní rámovou trubku byly umístěny odporové tenzometry v celkem čtyřech řezech tak, aby bylo možné získat jednotlivé složky namáhání po celé délce trubky. Tyto body byly doplněny jedním zkoumaným místem na zadní stavbě rámu.

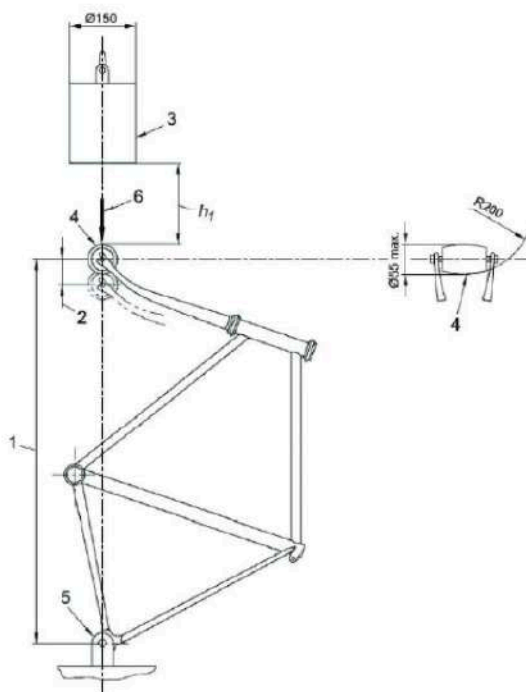
Z naměřených dat byl vyhodnocen smysl a velikost deformace ve všech jízdních režimech a také během provozního zatížení. Byl určen kritický uzel konstrukce. V tomto bodě byly prováděny výpočty na odhad únavového života rámu.

2 Zkušební metody rámu horských kol

Zkušební metody horských kol se řídí normou ČSN EN ISO 4210 Cycles - Safety requirements for bicycles, Geneva: ISO, 2015. Nás bude zajímat hlavně norma ISO EN ČSN 4210.6, která se zabývá ověřováním pevnosti a životnosti rámu jízdních kol a jejich vidlic. Norma specifikuje základní zkušební metody pro silniční, dětská, horská a závodní jízdní kola. Většina metod je stejná pro všechny typy bicyklů, liší se pouze zatížením či počtem cyklů. Dále jsou v normě uvedeny specifické úpravy pro zkoušky horských kol s odpruženými rámy. Norma popisuje také jednu zkoušku přímo určenou pro horská kola se zadním odpružením. Dále se budu podrobněji věnovat jednotlivým zkouškám, popíši jejich konfiguraci a zatížení pro jednotlivé stavy a to především se zaměřením na horská kola.

2.1 Rázová zkouška rámu padající hmotou

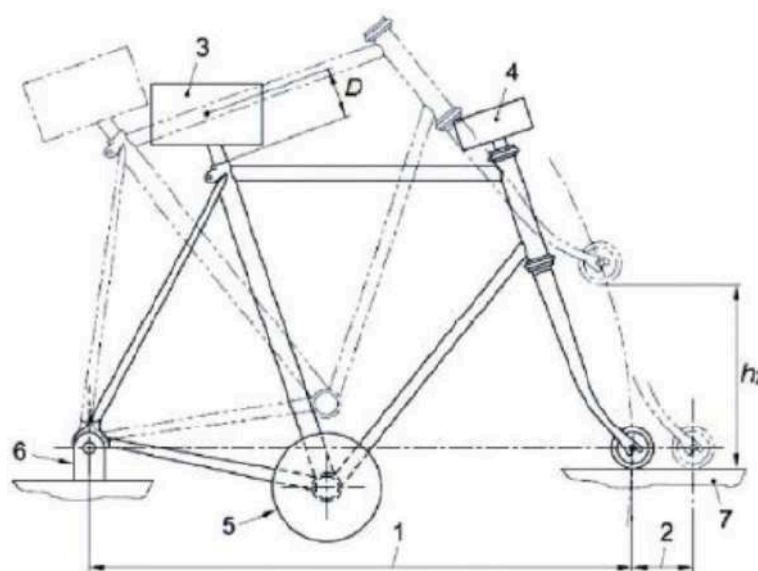
Tato zkouška simuluje náraz předního kola do překážky či průjezd přes nerovnost. Rám je upevněn v místě zadní osy k přípravku rotační vazbou. Přední osa je připevněna k přípravku rotačně posuvnou vazbou, která umožňuje posuv osy ve svislém směru. Na rám se v místě přední osy pustí závaží o hmotnosti 22,5 kg. Přední osa je v místě nárazu vybavena prvkem do kterého závaží narazí. Pro horská kola je výška h_1 definována na hodnotu 360 mm. Dále je také zkouška specifikována pro horská kola s odpruženou přední vidlicí a s zadním odpružením rámu. Pokud je rám vybaven přední odpruženou vidlicí, musí být vidlice při zkoušce ve své původní nezatížené délce. Pokud je možné vidlici zamknout, měla by být uvedena do zamčeného stavu. Zda není možné vidlici zamknout měla by být uzamčena externí metodou nebo by měla být nahrazena vidlicí podle [6]. Zadní tlumič by měl být nastaven na jezdce o hmotnosti 80 kg. Pokud není možné zadní tlumič uzamknout, měl by být nahrazen pevnou vazbou odpovídající velikosti a usazení tlumiče.



Obr. 1: Rázová zkouška rámu padající hmotou [7]

2.2 Rázová zkouška padajícího rámu s vidlicí

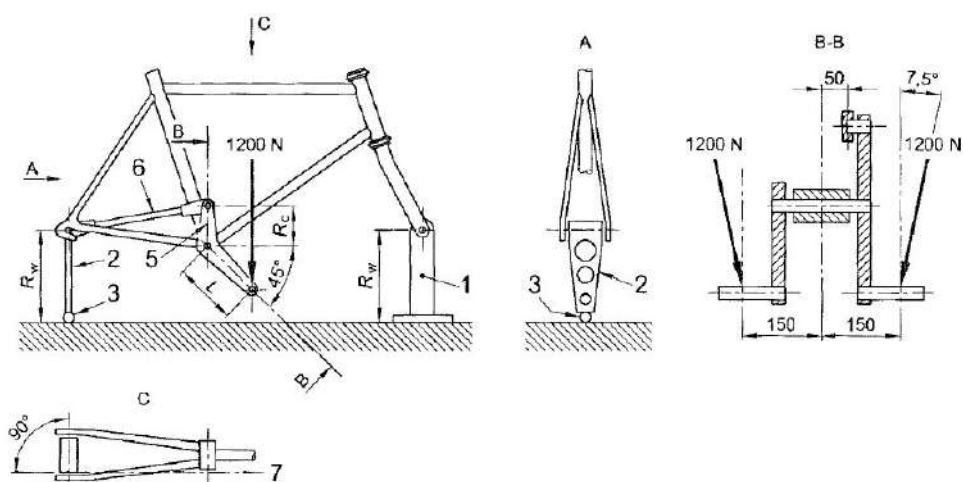
Tato zkouška spočívá v simulování skoku při jízdě. Rám je k přípravku upevněn v místě zadní osy rotační vazbou. Rám je zdvihnut do definované výšky h_2 a poté spuštěn na podložku. V místě dopadu rámu je přední osa vybavena nárazníkem. Na rámu jsou také připevněny závaží v místě sedla, na koncích řídítek a také v místě středového složení. Pro horská kola jsou předepsány tyto hodnoty. Hmotnost masy umístěné v místě sedla by měla být 30 kg. Hmotnost závaží v místě hlavového složení je 10 kg a hmotnost hmoty v místě středového složení je 50 kg. Výška h_2 je definována na 300 mm.



Obr. 2: Rázová zkouška padajícího rámu s vidlicí [7]

2.3 Únavová zkouška šlapacími silami

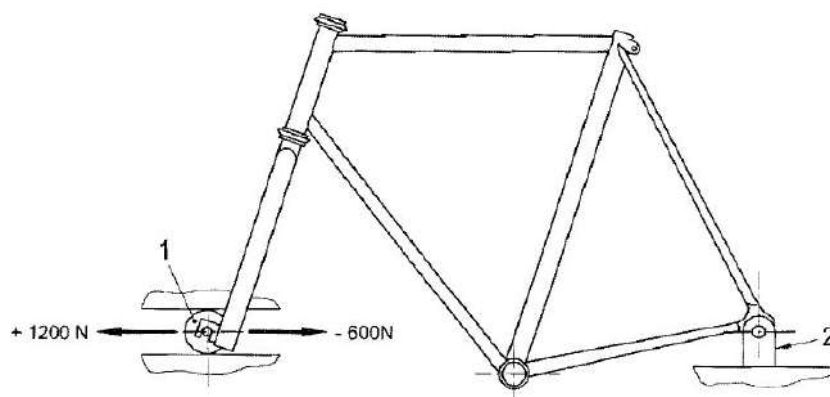
Tuto zkoušku je možné aplikovat také pro rámy se zadním odpružením. Během zkoušky by zadní tlumič měl být nastaven do polohy s maximálním odporem. Pokud je umístěn tlumič, který není možné nastavit, měl by být nahrazen pevným spojením. Rám je uchycen do přípravku v místě přední vidlice pomocí ocelové tyče, tato vazba má dva stupně volnosti. Jedním stupněm je rotace kolem osy hlavového složení a druhým stupněm je rotace kolem osy náboje. V zadní části je přípravek simulující zadní kolo. Ten je uchycen ke kolu v místě patky a s podložkou je spojen pomocí kulového čepu. V místě středového složení je umístěn přípravek simulující kliky a přenos síly pomocí řetězu na zadní kolo. Pro horská kola je předepsána hodnota síly $F_1 = 1200$ N, která by měla být aplikována po dobu 100 000 cyklů.



Obr. 3: Únavová zkouška šlapacími silami [7]

2.4 Únavová zkouška vodorovnými silami

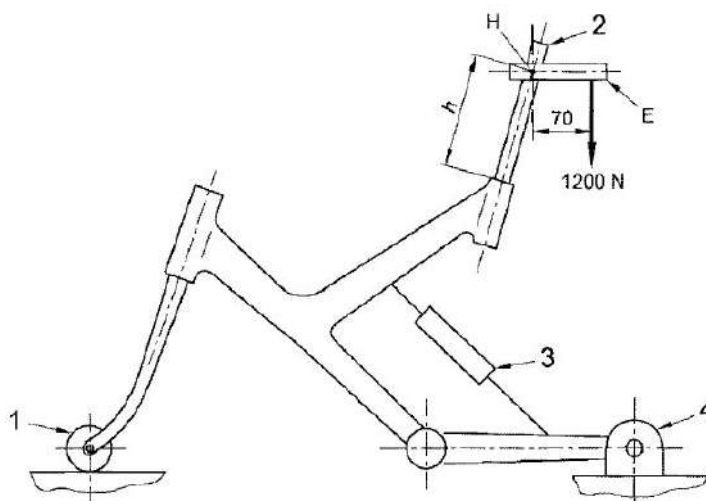
Zkoušku je možno provádět i na rámech se zadním odpružením, musí však být zadní tlumič nastaven na jezdce o hmotnosti 80 kg a musí být uveden do zamčeného stavu. Pokud řetězové vzpěry nejsou vybaveny čepy, ale spoléhají se na jejich flexibilitu, musí být jakékoliv tlumiče nastaveny do pozice minimálního odporu, aby bylo zajištěno adekvátní testování rámu. Pokud je rám vybaven dalšími pomocnými součástmi, které zajišťují odpor proti silám způsobujícím dotyk s podložkou, musí být tyto součásti ve stavu zajišťujícím maximální síly v rámu. Cílem této zkoušky je ověřit odolnost rámu vůči vodorovným silám, které působí v ose předního kola. Rám je chycen k podložce otočně v místě zadních patek. Síla působí v místě předního náboje a působí střídavě k a od osy zadního kola. Norma specifikuje zatížení pro horská kola na hodnoty $F_2 = 1200\text{ N}$ a $F_3 = 600\text{ N}$ po dobu 50 000 cyklů.



Obr. 4: Únavová zkouška vodorovnými silami [7]

2.5 Únavová zkouška svislou silou

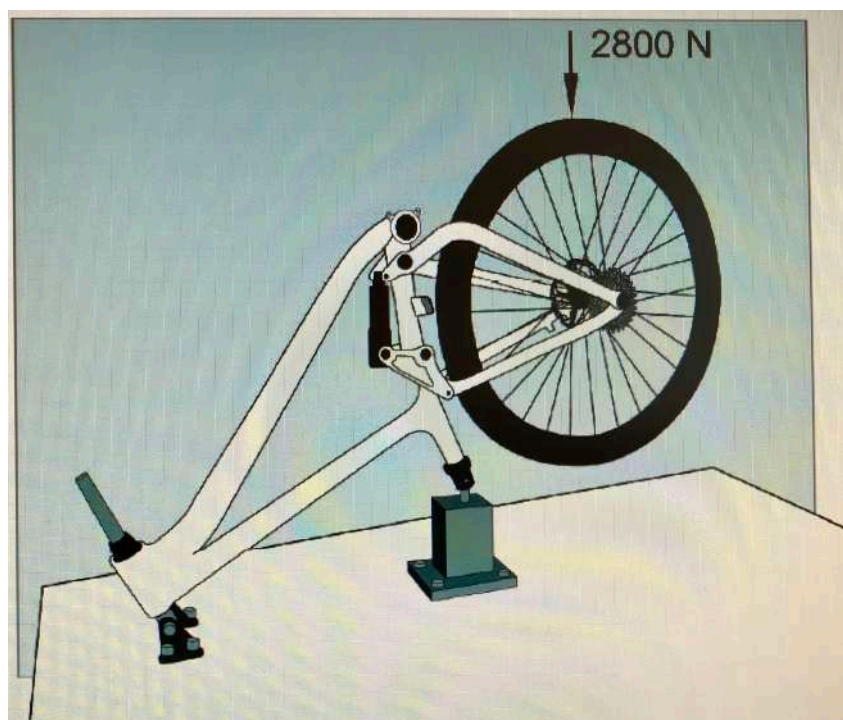
Také tuto zkoušku je možno provádět i na rámech se zadním odpružením, musí však být zadní tlumič nastaven na jezdce o hmotnosti 80 kg a musí být uveden do zamčeného stavu. Pokud řetězové vzpěry nejsou vybaveny čepy, ale spoléhají se na jejich flexibilitu, musí být jakékoliv tlumiče nastaveny do pozice minimálního odporu, aby bylo zajištěno adekvátní testování rámu. Pokud je rám vybaven dalšími pomocnými součástmi, které zajišťují odpor proti silám způsobujícím dotyk s podložkou, musí být tyto součásti ve stavu zajišťujícím maximální síly v rámu. Pokud je rám vybaven odpruženou vidlicí, měla by být nastavena na jezdce o hmotnosti 80 kg a uvedena do zamčeného stavu. Pokud není možno vidlici zamknout, měla by být uzamčena pomocí externího přípravku. Tato zkouška simuluje stav, kdy jezdec při jízdě sedí v sedle. V zadní části je osa upevněna rotační vazbou v místě zadního náboje. V přední části je rám upevněn rotační vazbou osy v místě předního náboje. Rotace je umožněna v přední a zadní ose a také v hlavovém složení. Zatížení se aplikuje pomocí tuhé tyče, která nahrazuje sedlovou trubku. Tyč by měla být usazena v rámu do hloubky 75 mm a síla by měla být aplikována přes přípravek simulující sedlo. Přípravek by měl být umístěn v maximální výšce, kterou předepisuje výrobce rámu pro výšku sedla. Pokud tak není předepsáno přípravek by měl být ve výšce $h = 250$ mm. Síla by měla být aplikována v bodě E, který by měl být ve vzdálenosti 70 mm od bohu H. Pro horská kola je síla stanovena na 1200 N po dobu 50 000 cyklů.



Obr. 5: Únavová zkouška svislou silou [7]

2.6 Zkouška průchodnosti zadní pneumatiky

Tato zkouška je v normě uvedena pouze jako informativní a zabývá se přímo odpruženými rámy a simuluje dopad kola na podložku při skoku, kdy je stlačen zadní tlumič. Rám je uchycen přes sloupek přední vidlice v místě umístění představce a také v na konci sedlové trubky v místě zasunutí sedlovky. Rám je tedy během zkoušky otočen o 180° okolo vodorovné osy. Rám je poté zatížen silou o velikosti 2800N působící na zadní kolo. Tato síla by měla být udržována po dobu 1 minuty. Během zkoušky nesmí žádná část pneumatiky, ani jakýkoliv jiný komponent přijít do styku s rámem jízdního kola. Dále se nesmí žádný z komponentů oddělit. Pro tuto zkoušku jsou předepsány následující podmínky. Zadní pneumatika musí být nahuštěna na maximální předepsaný tlak. Pokud je možné zamknout zadní tlumič rámu, musí být uveden do otevřené polohy. Pokud jde o pneumatický tlumič, musí být tlak v tlumiči nastaven na minimální hodnotu předepsanou výrobcem.



Obr. 6: Zkouška průchodnosti zadní pneumatiky [7]

2.7 Požadavky pro splnění normovaných zkoušek

Vyhodnocováním zkušebních metod jízdních kol se zabývá [6], kde je přímo popsáno, co musí rám splnit pro úspěšný průběh celé zkoušky. Jsou zde popsány parametry pro rázové i pro únavové zkoušky.

Při únavových zkouškách předepisuje norma [6] povolenou trvalou deformaci. Po proběhnutí rázové zkoušky nesmí být na rámu znát jakákoliv známka poškození. Po druhém opakování zkoušky se nesmí žádná část rámu oddělit od celku.

Norma [6] také předepisuje podmínky pro splnění únavových zkoušek pro rámy vyrobené z karbonu. Stanovuje, že výchylka akčního členu nesmí přesáhnout 20 %. Nesmí také dojít k žádnému vzniku trhlin.

Soubor těchto zkoušek dobře simuluje důležité zátěžové stavy, které nastávají při provozu jízdního kola. Splnění popsanych zkoušek se stává nezbytnou součástí vývoje nového jízdního kola. Pokud lze firma vyrábět závodní jízdní kola s certifikátem UCI (mezinárodní cyklistická federace) [4], je splnění těchto zkoušek nezbytné. Zkoušky odpovídají základnímu zatížení bicyklu a splnění zkoušek by tedy mělo být běžným standardem pro zjištění bezpečnosti uživatele jízdního kola.

3 Experimentální určování namáhání rámu

V předchozí kapitole jsem se věnoval předepsaným normovaným zkouškám pro horská kola podle [5]. V této kapitole postupně představím možnosti a způsoby experimentálního určování namáhání rámu horského kola. Budu se zabývat možnými způsoby vyhodnocení zkoušek popsanych v předchozí kapitole, viz 2.

”Oblastí zájmu je zde především vyšetřování velikostí přetvoření, napětí, posunutí, parametrů pohybu a s tím souvisejícím silovým působením (síly, tlaky, kroutící momenty). Největšího uplatnění dosahují v současné době hlavně elektrické metody a rozmanité metody optické.”[1]

3.1 Elektrické metody

Elektrické metody mají mnoho výhod, ať už jde o výstupní data, které je možné získávat v analogové i digitální formě nebo možnost měřit na velkém počtu míst. Další nespornou výhodou je citlivost a hlavně přesnost měření. [1]

V dnešní době se můžeme setkat se třemi typy snímačů. Základní fyzikální jevy a principy využívají snímače I. generace, jejich vývoj se však zcela zastavil a pokroku je dosahováno jen vyjíměčně. Další dvě generace snímačů se stále vyvíjejí a jsou hojně používány. Polovodičové snímače II. generace mají výbornou citlivost, přesnost a také miniaturní rozměry. Světlovodné snímače III. generace se od předchozích dvou generací liší formou výstupního signálu, zde je totiž výstupním signálem světelný tok. To přináší mnoho výhod, jako je například mnohem vyšší citlivost při menších rozměrech a také velká šířka přenášeného pásma na delší vzdálenost. [1]

3.1.1 Odporová tenzometrie

Nejvíce rozšířené jsou snímače odporové a to hlavně odporové tenzometry kovové, které jsou využívány pro experimentální analýzu napjatosti. Polovodičové tenzometry se uplatňují hlavně při výrobě siloměrů. Světové firmy nabízejí rozmanité spektrum kovových odporových tenzometrů, které pokrývají veškeré požadavky uživatelů na měření. Tenzometry mají širokou škálu délek ve které se vyrábějí, od 0,5 mm do 150 mm. Umožňují měřit jak lokální špičky napětí v místech koncentrace, tak příslušné gradienty napětí. Umožňují měřit průměrné hodnoty napětí na nehomogenních materiálech. Meze se nekladou ani ve

směru, lze měřit v jednom směru, při známých hlavních směrech napětí ve dvou směrech a také případně ve více směrech. Problémem není ani velikost délkového přetvoření při statickém a také při cyklickém namáhání. Odporové tenzometry mají využití při velkém teplotním rozsahu. Záleží na materiálu podložky tenzometru a na technologii jeho aplikace. Ve speciálních případech je možné využít tuto metodu do cca 900°C. Měření je možné i za přítomnosti radioaktivního záření. [1]

Kovové odporové tenzometry se využívají při experimentální analýze napětí, ale také při výrobě snímačů sil, tlaku a kroutících momentů. Pro výrobu snímačů se hodí hlavně polovodičové snímače, které mají větší citlivost, ale také větší křehkost, teplotní závislost a hlavně pořizovací náklady. [1]

Pro měření rámu jízdního kola je odporová tenzometrie vhodnou volbou. S využitím této metody jsme schopni určit komplexní zatížení rámu bicyklu. Jak již bylo popsáno v [2], tak pomocí odporové tenzometrie můžeme určit kritická místa na rámu a ty poté dále zkoumat.

3.2 Optické metody

Optické metody mají bohatou historii a s postupem času prošli velkým vývojem spolu s tím, jak pokračoval vývoj využitelné techniky. S příchodem nové techniky se objevilo mnoho nových, často i netradičních způsobů využití optických metod. Klasické optické metody se zabývají interferenčními a difrakčními jevy, které vysvětluje pomocí částečně koherentních světelných svazků. Mezi další známé optické metody patří holografie, holografická interferometrie a metody koherenční zrnitosti, které jsou blíže popsány v [1]. Mezi nesporné výhody optických metod patří hlavně bezkontaktnost a variabilita použití. Je zde také možná vysoká úroveň mechanizace při zpracování dat získaných měření. Optické metody se uplatňují v oblasti výzkumu kompozitních materiálů. Existuje široká škála optických metod, které se více či méně hodí k potřebě měření namáhání rámu jízdního kola. Pro potřeby experimentů uváděných v této práci byla vybrána metoda digitální korelace obrazu. Metoda se již pro zkoumání posuvů a deformací na rámu jízdního kola osvědčila, jak uvádí [2]. [1]

3.2.1 Digitální korelace obrazu (DIC)

Při metodě DIC se musí nejprve připravit zkušební vzorek, následně se pak během zatěžování získává digitální obraz zkoumané plochy a posledním krokem je zpracování pořízeného záznamu pomocí počítačového programu. Metoda spočívá v monitorování zkoumané plochy, která by měla být co možná nejvíce kontrastní. Pokud zkoumaný vzorek není dostatečně kontrastní, je třeba ho ošetřit speciálním vysoce přilnavým a zároveň kontrastním nátěrem. Přilnavost nátěru je nezbytná pro deformaci barvy spolu se zkoumanou plochou. Dalším předpokladem je umístění snímacího zařízení, které by mělo být umístěno v ose normály k sledované ploše, aby se eliminovalo zkreslování deformace. Při zatížení vzorku se zaznamenává průběh deformace dané plochy a získá se tak průběh deformace v čase zatěžování. Následně se záznam vyhodnocuje, což zjednodušeně spočívá v porovnávání polohy jednotlivých bodů ve dvou různých časech. [8] [9]

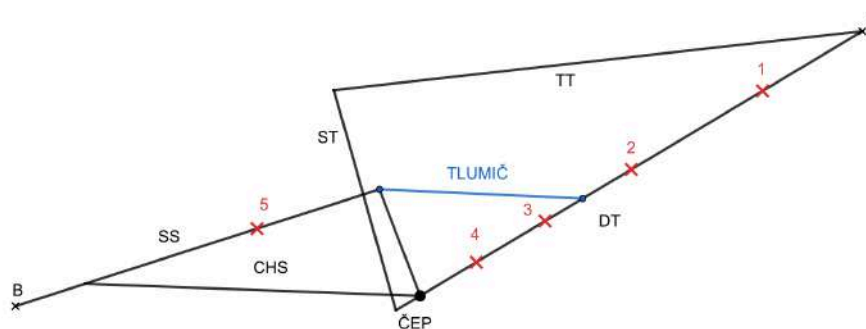
3.3 Akustická emise

Metoda zkoumání součásti pomocí akustické emise nám nedovoluje určovat silové účinky nebo napětí v součásti. Akustická emise se zaměřuje na sledování dosažení konkrétního stavu, jako je například mez kluzu nebo mez pevnosti materiálu. Defekty materiálu se vyznačují akustickými signály, které zasahují do vysokého ultrazvukového spektra. Pomocí této metody jsme schopni indikovat vznik mikrotrhlin a jiných defektů, intenzivní pohyb dislokací nebo například u kompozitů přetrhávání jednotlivých vláken. [1]

Tato metoda se osvědčila při určování kritických bodů na rámu silničního kola, jak je popsáno v [2]. Pomocí AE byly lokalizovány místa vzniku trhlin a bylo možné přesnější využití odporové tenzometrie.

4 Návrh měření deformační odezvy

Při předchozích měření jízdních kol [2] bylo zjištěno, že největší deformace nastávají v dolní rámové trubce (DT). S ohledem na toto zjištění bylo požadováno získání vnitřních účinků v dolní rámové trubce a rozložení deformací v trubce. Dále byly také zkoumány tyto účinky na zadní sedlové vzpěře, toto místo bylo zvoleno, protože je považováno za další kritický segment rámu. Při určování míst umístění tenzometrů bylo vycházeno z předpokladu lineárního průběhu napětí v dolní rámové trubce. Při lokalizaci měřených bodů byla brána v úvahu specifika daného rámu horského kola, především část rámu, kde je připojen zadní tlumič. S ohledem na složitost měření horského kola v terénu byl zvolen menší počet měřených míst. Celkově bylo zvoleno 5 měřících míst. Na dolní rámové trubce byly tenzometry umístěny ve čtyřech řezech, jeden řez byl umístěn do vrchní části trubky a jeden naopak do spodní části. Zbývající dva řezy byly umístěny v okolí připojení tlumiče k dolní rámové trubce, kvůli možnému výskytu extrémů v tomto okolí.



Obr. 7: Základní schéma rámu

V horní části DT byly umístěny dva tenzometry SG_3 a SG_4, které byly zapojeny pomocí čtvrtmostového zapojení Wheatstonova můstku [1], dále zde byl měřen kroutící moment pomocí tenzometrického kříže SG_1 a SG_2 v úhlech $\pm 90^\circ$ k svislé ose průřezu dolní

rámové trubky, které byly zapojeny do celého Wheatstonova můstku. Další dvě měřící místa byla zvolena v okolí připojení tlumiče k DT. V těchto místech byl opět měřen ohybový moment, tentokrát pomocí dvojic tenzometrů SG_5, SG_6 a SG_7, SG_8, které byly umístěny ve svislém řezu DT a zapojeny do půlmostového zapojení Wheatstonova můstku [1]. Poslední místo na DT bylo ve spodní části trubky a byly zde umístěny dva tenzometry SG_9 a SG_10, které byly zapojeny do čtvrtmostového zapojení Wheatstonova můstku. Posledním místem zvoleným pro měření bylo místo na zadní sedlové vzpěře (SSD). V tomto bodě bylo měřeno tahové/tlakové působení na rám pomocí tenzometrů SG_11 a SG_12, které byly zapojeny do čtvrtmostového zapojení Wheatstonova můstku.



Obr. 8: Instalace tenzometrů na dolní rámovou trubku

Na rám bylo tedy celkem nainstalováno 12 tenzometrů od firmy HBM. Ty byly na rám instalovány jednosložkovým lepidlem a dále pomocí měděných drátků připájeny cínem na svorkovnice. Poté již byla připojena kompletní kabeláž. Všechny tenzometry byly připojeny na tenzometrickou ústřednu HBM QuantumX CX22B řízenou softwarem HBM Catman Easy. Ústředna byla napájena externí baterií a vše bylo umístěno do batohu, který měl jezdec na zádech. Měření bylo řízeno pomocí notebooku, který byl připojen přes vzdálenou plochu k ústředně.



Obr. 9: Zapojení tenzometrů do Wheatstonova můstku



Obr. 10: Čtvrtmostové zapojení tenzometru do Wheatstonova můstku



Obr. 11: Čtvrtmostové zapojení tenzometru do Wheatstonova můstku



Obr. 12: Kolo připravené na zkušební měření

5 Návrh provozního měření v laboratoři

Normované laboratorní zkoušky jsou považovány za nutné minimum pro splnění bezpečnosti při provozu jízdního kola. Chceme-li dosáhnout vyšší bezpečnosti v provozu a také špičkových jízdních vlastností, je třeba provádět také měření v reálném provozu. Cílem měření v provozu je vybrat soubor jízdních režimů, které budou co nejvíce odpovídat zatížení jízdního kola při běžném provozu. Tyto režimy jsou navrženy speciálně pro celoodpružené horské kolo s ohledem na jeho využití v terénu. Měly by tedy simulovat základní zátěžové stavy, které nastávají v terénu. Byly vybrány tyto jízdní režimy:

- Přejezd překážky
- Brždění
- Skok
- Start
- Schody

Dále je nutné specifikovat jednotlivé zkoušky tak, aby byly proveditelné s dostupnou měřicí technikou. Všechny stavy musí být opakovatelné, aby bylo možné porovnávat jednotlivé výsledky. Je nezbytné normalizovat překážky a určit podmínky při kterých budou zkoušky probíhat.

Všechny tyto zkoušky proběhly v uzavřených laboratořích fakulty strojní ČVUT v Dejvicích. Zkoušky tedy byly omezeny příslušným prostorem, probíhaly však za stálých vnějších podmínek. Díky tomu byly eliminovány vnější vlivy, které by mohly nepříznivě ovlivnit průběh jednotlivých zkoušek.

5.1 Přejezd překážky

Během jízdy na horském kole je naprosto běžné překonávání různých překážek, dokonce by se dalo říci, že horské kolo bylo zkonstruováno proto, aby umožňovalo jezdcům překonávat všemožné nerovnosti, kořeny, výmoly a další nástrahy, které se naskytanou. Je požadováno, aby horské kolo tyto nástrahy překonávalo bez obtíží a co možná nejlépe. Kolo by nemělo při přejezdu překážky vykazovat jakékoli poškození. Mělo by jezdcům umožňovat stroj kontrolovat a tak přinášet určitou míru pohodlí. Základní překážkou, se kterou se musí horské kolo vypořádat mnohokrát během jedné jízdy je přejezd kořenu či ležící větve stromu.



Obr. 13: Zkušební překážka

Pro zkoušení bylo nezbytné specifikovat rozměry překážky, také bylo důležité, aby všechny zkoušky probíhaly za neměnného nastavení tlumičů a tlaku v pneumatikách. Nastavení by mělo simulovat reálný stav v provozu. Za překážku byl zvolen dřevěný hranol o rozměrech 110x150 mm. Ten byl připevněn k podložce a byl mu zamezen posuv i rotace ve všech směrech. Nájezd na překážku byl veden kolmo na podílnou osu hranolu. Nájezdová rychlost byla při všech opakováních přibližně stejná. Při překonávání překážky stál jezdec v pedálech a nevyvíjel žádnou činnost, která by vedla k usnadnění překonání překážky.

5.2 Brždění

Základním a naprosto nezbytným prvkem na jakémkoli jízdním kole, snad jen s výjimkou dráhových speciálů, jsou brzdy. Ty slouží uživateli k bezpečnému zastavení. Mezinárodní cyklistická unie, ale také obecně platné normy specifikují požadavky na brzdový systém. Při brždění je namáhám rám kola, protože síly z brždění se zákonitě přenášejí na rám. S ohledem na bezpečnost je nutné vyšetřit namáhání rámu při tomto zátěžovém stavu.

Pro tuto zkoušku je hlavní stanovit rychlost, ze které bude brždění probíhat. Nezbytné je stanovit rozložení brždění mezi přední a zadní brzdou. Pro porovnatelné výsledky je vhodné, aby jezdec zaujímal vždy stejné postavení. Nejvhodnější postavení při brždění bude opět stání v pedálech. Brždění by mělo probíhat v maximální možné intenzitě, tak aby brzdná dráha byla co možná nejkratší. Rychlost, ze které brždění probíhalo byla vždy srovnatelná. Byly provedeny zkoušky brždění pouze přední brzdou a poté přední a zadní brzdou současně. Měření brždění pouze zadní brzdou se ukázalo jako neefektivní, protože se zadní kolo dostávalo do smyku.

5.3 Skok

Při provozu horského celoodpruženého kola je naprosto běžné překonávat různé skoky, se kterými jsou spojeny dopady. Při zpětném dosednutí na podložku je rám velmi namáhán a je důležité, aby při dopadu nevznikali žádné defekty rámu. Proto je důležité znát vzniklé napětí v rámu a přizpůsobit rám také tomuto stavu. Pro tuto zkoušku byl uměle vytvořen skok, který se skládal z hranolu o výšce 210 mm a nájezdu z rovného prkna, viz Obr. 14.

5.4 Start

Dalším, ze základních stavů zatížení jízdního kola je rozjezd. Při rychlém startu může vznikat kroutící moment způsobený velkou silou v pedálech. Proto byl zvolen rozjezd z klidové polohy. Jezdec se snažil vystartovat co možná nejrychleji a působit tak co největší sílu do pedálů.

5.5 Schody

Jako poslední, ze základních zátěžových stavů byl zvolen sjezd schodů. Byly sjížděny schody z podesty do přízemí v halových laboratořích. Začínalo se ze statické polohy a pouze jedním šlápnutím do pedálů bylo kolo uvedeno do pohybu. Během sjezdu nebyly vyvíjeny žádné brzdné účinky.



Obr. 14: Zkušební skok

6 Vyhodnocení provozního měření v laboratoři

Cílem provozního měření v laboratoři bylo definovat stavy, které nastávají při užívání jízdního kola a následně vyhodnotit vnitřní silové účinky, které vznikají na základě těchto stavů. Bylo důležité přesně popsat příčiny jednotlivých stavů.

Pro každou zkoušku byly vyhodnocovány maximální a minimální poměrné prodloužení ϵ pro jednotlivé měřicí body. V místech, kde byly tenzometry zapojeny do půlmostového zapojení bylo získáváno přímo ohybové poměrné prodloužení ϵ_o . V místech, kde byly tenzometry zapojeny do čtvrtmostového zapojení bylo pro porovnání nutné dopočítat ohybovou a normálovou složku poměrné prodloužení. Čtvrtmostové zapojení umožňovalo dopočítat normálové napětí σ_N .

Kladné ohybové poměrné prodloužení je vnímáno jako otevírání celého kola a deformace dolní rámové trubky do písmene "U".

6.1 Přejezd překážky

Zkouška byla provedena třikrát za stálých podmínek a výsledky všech tří přejezdů byly prakticky identické. Na Obr. 15 je znázorněn záznam signálu ohybového poměrného prodloužení na spodní rámové trubce. V první části grafu je dobře vidět úsek rozjezdu na překážku při kterém bylo šlapáním kolo uvedeno do nájezdové rychlosti. Poté následuje krátký úsek, ve kterém byla stlačená teleskopická sedlovka do dolní polohy a jezdec stál v pedálech (dále budou všechny signály zobrazovány bez této části, která byla pro většinu stavů stejná). Následuje první čelní náraz předního kola na překážku, který způsobil výrazné záporné ϵ_o . Následovalo odlehčení předního kola a následný dopad na podložku, který naopak vyvolal kladný ohyb dolní rámové trubky. Největší deformace však nastala při přejezdu zadního kola přes překážku, kdy se kolo otevřelo a byl zaznamenán výrazný kladný ohyb trubky.

	PŘEJEZD PŘEKÁŽKY								
	Ohyb ϵ_o [$\mu m/m$]					Tah/tlak ϵ_n [$\mu m/m$]			Krut ϵ_k [$\mu m/m$]
	SG3_4	SG5_6	SG7_8	SG9_10	SG11_12	SG3_4	SG9_10	SG11_12	SG1_2
MAX	1533	1291	626	357	79	143	277	55	198
MIN	-483	-57	12	-73	-76	-94	65	-33	-130

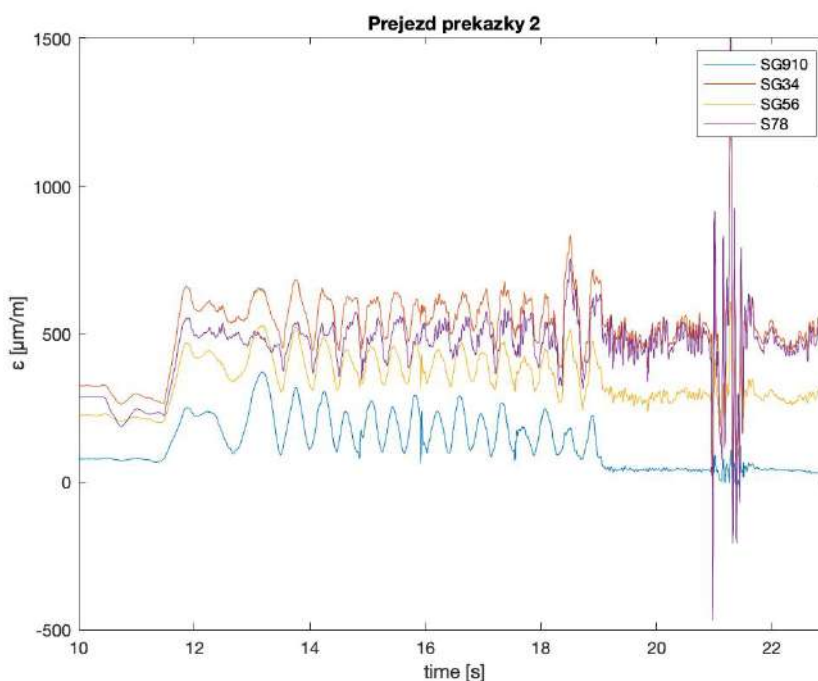
Tab. 1: Deformace Přejezd překážky

Všechny extrémy jsou přehledně zaznamenány v Tab. 1. Je zde uvedena maximální a minimální poměrná deformace ohybové složky pro všech pět měřených bodů. Dále je zde uvedena poměrná deformace od tahové a tlakové složky u bodů, které byly zapojeny do čtvrtmostového zapojení. Je zde také vyobrazena krutová poměrná deformace v měřeném místě.

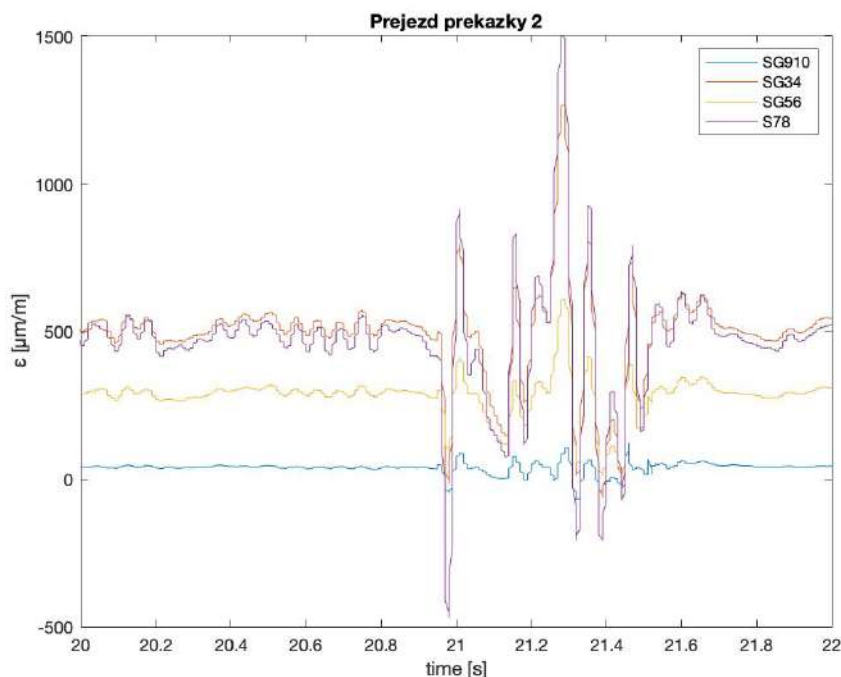
Z Tab. 1 plyne, že nejvíce namáhaným bodem na rámu, je bod SG3_4, který se nachází v horní části rámové trubky. V části trubky nad připojením tlumiče vzniká nezanedbatelná ohybová deformace, která klesá směrem ke středovému složení. Kladné ohybové deformace jsou násobně vyšší než záporné deformace, tudíž je zřetelné, že hlavní smysl zatěžování je ve smyslu otevírání rozvoru kol a protahování spodních vláken na trubce. Na zadní stavbě se při tomto zatěžování neprojeví větší deformace.

Tahová a tlaková složka deformace je v bodě SG3_4 v porovnání s ohybem několikanásobně menší, ale v místě SG9_10 jsou složky srovnatelné. Také na zadní stavbě jsou hodnoty ohybu a tahu/tlaku srovnatelné, nejsou však nikterak výrazné.

Extrémy při zatížení dolní rámové trubky krutem vznikly již při rozjezdu, samotný přejezd překážky neměl na krut prakticky žádný vliv. Ani při rozjezdu na překážku nevznikla výraznější deformace krute.



Obr. 15: Záznam signálu



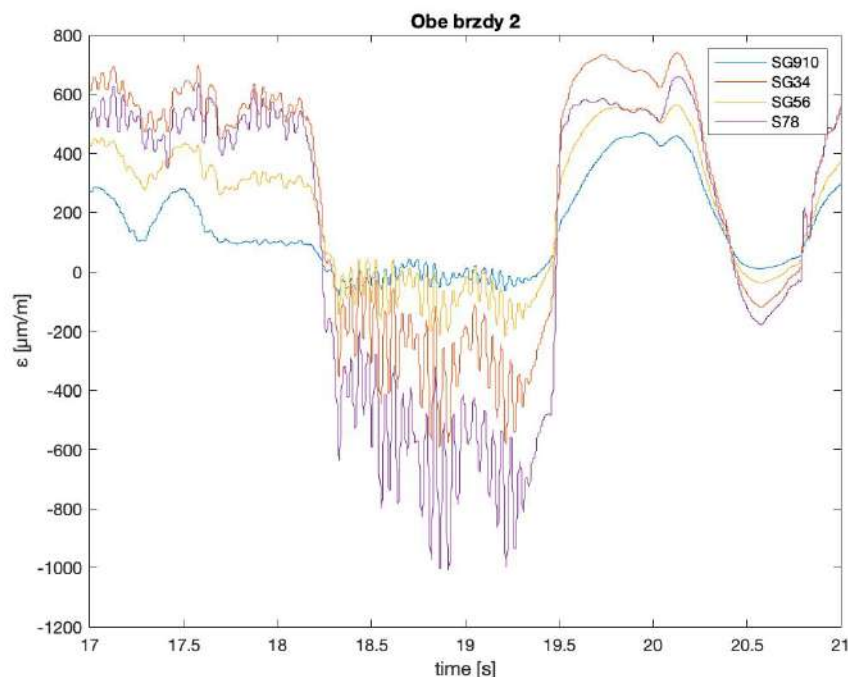
Obr. 16: Záznam signálu vybraného segmentu

6.2 Brždění

Tato zkouška byla rozdělena na dva různé druhy brždění. Nejprve bylo bržděno přední i zadní brzdou zároveň, ve druhém módu bylo bržděno pouze přední brzdou. Zkouška byla rozdělena, protože ve většině případů se kolo zastavuje působením obou brzd současně, mohou však nastat neočekávané okolnosti a kolo být zastaveno pouze účinkem přední brzdy, což může mít za následek extrémní zatížení rámu kola.

6.2.1 Obě brzdy

Očekávání u tohoto druhu zatěžování byla ve smyslu záporného ohybového momentu, tudíž ve smyslu natahování horních vláken trubky. Tato očekávání se vyplnila, opět dominovalo ohybové zatížení, tentokrát však v záporném smyslu. Byl zde prudký nárůst zatížení v čase počátku brždění, jak lze vidět na Obr. 17. Po dokončení brždění a zastavení kola byla stlačena přední odpružená vidlice v důsledku toho, že hmotnost jezdce byla soustředěna v přední části kola. Následně po návratu vidlice do počáteční nestlačené polohy byla hmotnost přesunuta do zadní části a byl stlačen zadní tlumič. Důsledkem toho byl krátkodobý nárůst ohybového zatížení v kladném smyslu.



Obr. 17: Záznam signálu ohybové deformace

V Tab. 2 lze vidět extrémní zatížení rámu během zkoušky brždění oběma brzdami zároveň. Maximální zatížení nastává v bodě SG3_4, v horní části dolní rámové trubky. Dominantním v tomto bodě je záporný ohyb, který je způsoben přímo bržděním. V dalších bodech již není záporný ohyb vzniklý bržděním tak markantní, dokonce větší deformace vzniká při následném odlehčení přední části, která následuje ihned po brždění. Nejsou zaznamenány významné tahové ani tlakové deformace. Deformace způsobená krutem není nikterak velká, nenastává však díky rozjezdu jízdního kola, ale je způsobena přímo bržděním.

	OBĚ BRZDY								
	Ohyb ϵ_o [$\mu m/m$]					Tah/tlak ϵ_n [$\mu m/m$]			Krut ϵ_k [$\mu m/m$]
	SG3_4	SG5_6	SG7_8	SG9_10	SG11_12	SG3_4	SG9_10	SG11_12	SG1_2
MAX	659	744	567	470	65	133	116	15	232
MIN	-1007	-592	-217	-81	-112	-154	-32	-62	-254

Tab. 2: Deformace Obě brzdy

6.2.2 Přední brzda

Průběh namáhání rámu v čase při brždění pouze přední brzdou byl naprosto identický s průběhem namáhání rámu v předchozím módu brždění. Při tomto stylu brždění byla váha jezdce ještě více nad řídky a tudíž byl zaznamenán nárůst maximálního záporného ohybového momentu. Nárůst se v horní části trubky pohybuje okolo 10 %, směrem ke spodní části dolní rámové trubky je však nárůst vyšší a dosahuje až 50 %. Hodnoty ale jsou v porovnání s maximy v horní části trubky zanedbatelné. Složky zatížení tahem/tlakem jsou identické s předchozím zatížením. Změny jsou zde naprosto minimální.

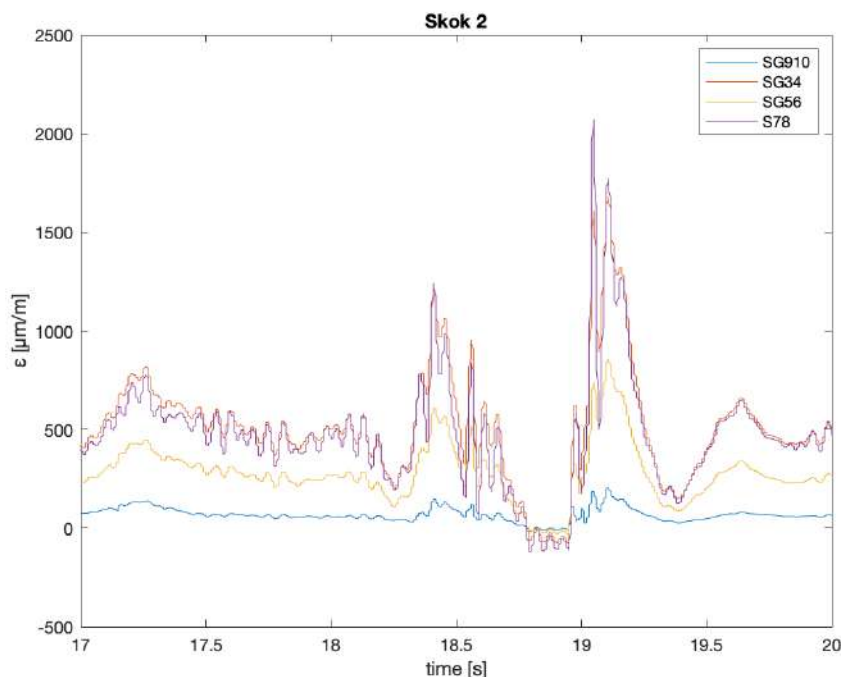
Maximální kladné hodnoty namáhání krutem, jsou srovnatelné s předchozí zkouškou, protože tyto hodnoty nastávají již při rozjezdu a nejsou spojeny s bržděním. Záporná maxima jsou vyvolána přímo bržděním a nárůst je zde zřetelný, pohybuje se okolo 20 %.

PPŘEDNÍ BRZDA									
	Ohyb ϵ_o [$\mu m/m$]					Tah/tlak ϵ_n [$\mu m/m$]			Krut ϵ_k [$\mu m/m$]
	SG3_4	SG5_6	SG7_8	SG9_10	SG11_12	SG3_4	SG9_10	SG11_12	SG1_2
MAX	653	741	576	489	52	152	116	10	212
MIN	-1123	-692	-289	-130	-111	-147	-37	-51	-300

Tab. 3: Deformace Přední brzda

6.3 Skok

Očekávání od této zkoušky byla taková, že by mělo po dopadu kola na podložku dojít k maximálnímu otevření rámu kola a tudíž tedy k vysokým hodnotám deformace. Tento předpoklad se také potvrdil, na Obr. 18 je zřetelný nejprve prvotní nárůst deformace způsobené ohybovou složkou, která vznikla v reakci na nájezd kola na překážku. Následuje letová fáze, kdy bylo očekáváno celkové odlehčení rámu, z čehož by vyplývala také nulová deformace. Tento předpoklad se naplnil, rám nebyl po krátký časový interval nikterak zatěžován, což je patrné na Obr. 18. Po odlehčení nastal dopad na podložku a s ním spojená vysoká deformace. Poté již jen krátké odlehčení způsobené návratem tlumičů do počáteční polohy a konečný nárůst deformace v závislosti na pohybu jezdce zpět do polohy usednutí na sedlo.



Obr. 18: Záznam signálu ohybové deformace

Tab. 4 shrnuje maxima a minima deformace, která byla naměřena v průběhu této zkoušky. Již na první pohled je zřejmé, že dominantním zatížením bylo zatížení ohybem v kladném smyslu. Speciálně hodnoty v horní části dolní rámové trubky byly vysoké. Byly překročeny hodnoty poměrné deformace $2000 \mu\text{m}/\text{m}$, což při žádné jiné zkoušce v laboratoři nenastalo. Také hodnota v bodě SG5_6 je velmi vysoká a blíží se hodnotě z bodu SG3_4. Naopak hodnoty v místech, které jsou již pod připojením zadního tlumiče k rámové trubce jsou výrazně nižší. Dosahují polovičních, respektive čtvrtinových hodnot v porovnání s bodem nad připojením tlumiče. Z tohoto faktu je možné usuzovat, že síla přenášená zadním tlumičem na dolní rámovou trubku má velký vliv na velikost zatížení dolní rámové trubky. Potvrzení této úvahy přináší také hodnoty deformace způsobené tahem a tlakem z bodů nad a pod připojení tlumiče. Zatímco v horní polovině trubky je dominantní deformace způsobená tlakem, tak ve spodní polovině trubky tomu je přesně naopak a dominantní deformaci způsobuje tahová složka. Deformace zadní stavby není nijak vysoká a co se týče smyslu zatížení je obdobné jako u dolní rámové trubky.

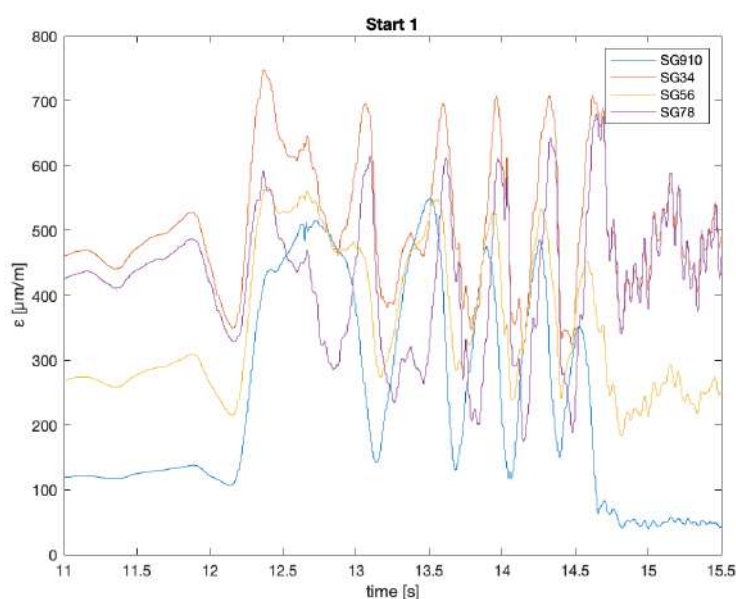
Předpokládán byl také signifikantní krut způsobený při dopadu kola na podložku, tento předpoklad se nenaplnil. Hodnoty v Tab. 4 jsou způsobeny již během rozjezdu na překážku a v průběhu skoku nenastaly žádné extrémní deformace způsobené krutem.

SKOK									
	Ohyb ϵ_o [$\mu\text{m}/\text{m}$]					Tah/tlak ϵ_n [$\mu\text{m}/\text{m}$]			Krut ϵ_k [$\mu\text{m}/\text{m}$]
	SG3_4	SG5_6	SG7_8	SG9_10	SG11_12	SG3_4	SG9_10	SG11_12	SG1_2
MAX	2071	1680	858	478	141	20	297	7	203
MIN	-118	-79	-31	-15	-82	-249	-6	-131	-119

Tab. 4: Deformace Skok

6.4 Start

Tento stav se při používání jízdního kola vyskytuje prakticky neustále. Při této zkoušce byla očekávána vysoká deformace vlivem krutu v porovnání s ostatními zátěžnými stavy. Tento předpoklad se také potvrdil, jak je vidět v Tab. 5, kde jsou uvedeny extrémní deformace v jednotlivých místech podle smyslu zatěžování. Extrémní deformace vzniklé krutem jsou až o 50% vyšší než u ostatních zkoušek. Tento fakt je dán vzniklými silovými účinky od řídítek, kdy jezdec působí velkou silou na obou koncích a vzniká tak velký krutový moment, který působí na dolní rámovou trubku.



Obr. 19: Záznam signálu ohybové deformace

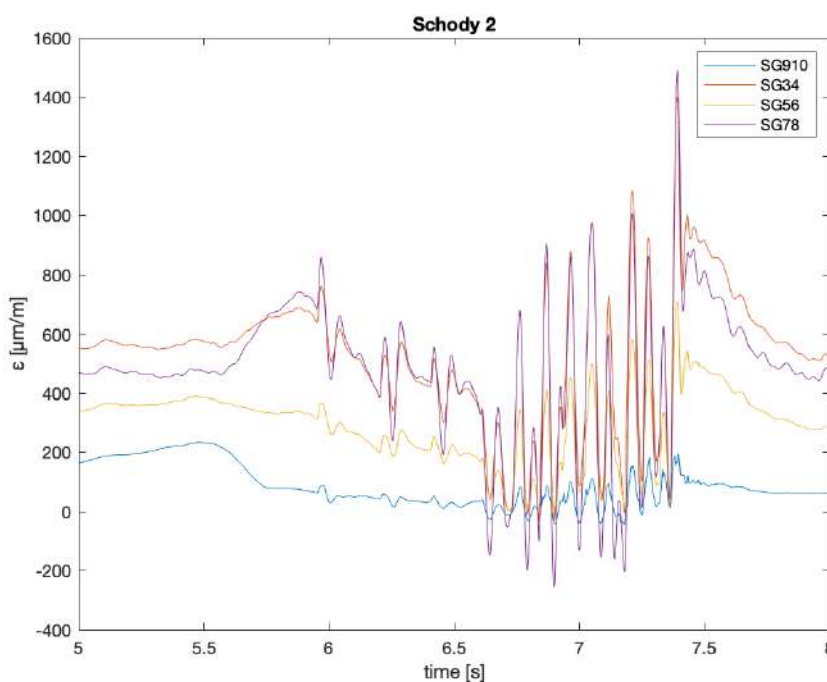
Deformace vzniklá ohybem ani tahem/tlakem není nikterak výrazná. Veškeré ohybové zatížení zůstává v kladném smyslu, dochází tedy k otevírání rámu kola. Nejvyšší hodnoty nastávají v bodě SG5_6, tedy v místě připojení tlumiče k rámu. Příčinou je síla z tlumiče, která vzniká působením do pedálů a stlačením tlumiče.

START									
	Ohyb ϵ_o [$\mu m/m$]					Tah/tlak ϵ_n [$\mu m/m$]			Krut ϵ_k [$\mu m/m$]
	SG3_4	SG5_6	SG7_8	SG9_10	SG11_12	SG3_4	SG9_10	SG11_12	SG1_2
MAX	680	748	565	550	63	108	159	34	515
MIN	173	293	166	14	-168	-176	24	-78	-450

Tab. 5: Deformace Start

6.5 Schody

Závěrečné měření v laboratoři bylo prováděno při sjezdu schodů. Tato zkouška měla simulovat běžnou jízdu v terénu, kdy vzniká také mnoho nárazů a byl očekáván postupný nárůst zatížení se zvyšující se rychlostí na schodech. Jak lze vidět na Obr. 20, tak to se také potvrdilo. Deformace se s časem a tedy i s rostoucí rychlostí zvyšuje, každý schod vyvolává postupně větší deformaci až dojde k extrému při dojezdu na rovnou plochu pod schody.



Obr. 20: Záznam signálu ohybové deformace

Extrémy deformace jsou opět shrnuty v Tab. 6. Maximální ohybová deformace nastala jako u zkoušky Skok a Přejezd překážky v bodě G3_4, tedy nejbližše hlavové trubce. Vysoká hodnota deformace způsobené ohybem byla zaznamenána v místě nad připojením tlumiče, dále pak hodnoty klesaly směrem ke spodnímu konci dolní rámové trubky. Zajímavé je opět rozložení tahu a tlaku po délce trubky, kdy v horní a dolní části trubky dominuje tlak, zatímco ve střední části je dominantní tah.

Deformace vzniklá krutem je nesymetrická, což může způsobit větší váha jezdce na jednu stranu řídlítek. Maximální hodnoty nejsou nikterak vysoké a nevymykají se z ostatních zkoušek.

	SCHODY								
	Ohyb ϵ_o [$\mu m/m$]					Tah/tlak ϵ_n [$\mu m/m$]			Krut ϵ_k [$\mu m/m$]
	SG3_4	SG5_6	SG7_8	SG9_10	SG11_12	SG3_4	SG9_10	SG11_12	SG1_2
MAX	1491	1399	710	234	105	59	226	-1	97
MIN	-256	-31	-5	-43	-9	-190	-4	-108	-179

Tab. 6: Deformace Schody

7 Provozního měření v terénu

S cílem získat naměřená data z reálného provozu kola bylo provedeno měření přímo v terénu. Za lokalitu vhodnou pro provozní měření v terénu byla zvolena oblast Točná, která se nachází jižně od Prahy proti proudu řeky Vltavy. Tato lokalita naskýtá mnoho různých stezek a tratí vhodných pro jízdu na horském kole. Jsou zde i dva bikeparky s množstvím skoků, které jsou nedílnou součástí provozu kola. Měření bylo rozděleno na dvě části.



Obr. 21: Úsek měření Hřeben_3

První část byla pojmenována Točná a probíhala v blízkosti obce Točná. Zde se uskutečnil sběr dat během jízdy po přírodním trailu s názvem Maturita. Jedná se o trasu, která vede po jednom z hřebenů. Nabízí mnoho krátkých terénních vln, zatáček a také menší kamenité sekce. Tento trail byl rozdělen na menší úseky z důvodů přehlednosti získaných dat. První část se skládala pouze z terénních vln s lehce kamenitým povrchem, druhá část nabízela strmější úvod, který ústil do série dvou zatáček a končil menším skokem. Poslední část nabídla skok a rovný úsek s četnými nerovnostmi, viz Obr. 15. Tyto stavy byly pojmenovány Hřeben_1 až Hřeben_3. Většina úseků byla měřena třikrát.

Druhá část měření probíhala blíže ke Komořanům, konkrétně v bikeparku Malá

Točná, kde je vybudováno mnoho uměle vytvořených tras s množstvím klopených zatáček a skoků. Nejprve byl měřen úsek, který se skládal ze sedmi terénních vln a poté následovala série klopených zatáček. Jako druhý stav byly zvoleny dva po sobě jdoucí menší skoky s dopadem do roviny. Dalším stavem byla série větších tří skoků s upraveným dopadem a jako poslední úsek bylo vybráno koryto, ve kterém byly tři středně velké skoky, které byly propojeny klopenými zatáčkami.



Obr. 22: Skok v úseku Koryto

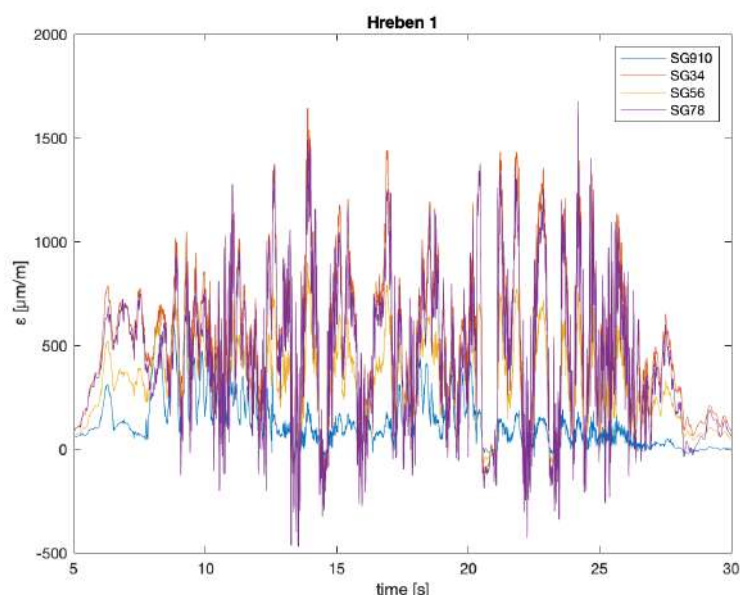
8 Vyhodnocení provozního měření v terénu

Cílem měření v terénu bylo získání reálných dat deformace z provozu horského kola. Následně pak byla tato data zpracována stejným způsobem jako v předchozí kapitole, aby bylo možné jednoduše porovnat měření v laboratoři a v terénu. Získán byl tedy opět průběh deformace ze všech sledovaných bodů na rámu.

Tato kapitola se zaměřuje hlavně na úseky, které mohou být porovnány se zkouškami provedenými v laboratoři. Podrobněji byl tedy vyhodnocen úsek po sobě jdoucích skoků, přejezdu nerovností a také úsek v těžkém kamenitém terénu, který by mohl být porovnatelný s jízdou po schodech.

8.1 Točná

Vyhodnocování dat bylo rozděleno na tři kratší úseky z důvodu přehlednosti naměřených hodnot. Již v prvním úseku se ukázalo, že naměřené hodnoty deformace běžně dosahují extrémů, které jsou vyšší, než při zkouškách realizovaných v laboratoři. Tento úsek neobsahoval žádná těžká místa s velkými nerovnostmi a lze jej hodnotit jako lehký terén. Na Obr. 23 lze vidět záznam signálu ohybové deformace.



Obr. 23: Záznam signálu ohybové deformace

Ve druhém z měřených úseků již bylo dosahováno vyšších rychlostí a bylo zde mnohem více terénních nerovností. Vznikalo tedy mnohem větší zatížení rámu a s ním

spojená deformace. Běžně dosahovala ohybová deformace hodnot přes $2000 \mu m/m$, což v laboratoři nastávalo pouze ojediněle. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo ve spodní části celého měřeného úseku, byl zde rovný úsek s mnoha kameny a terénními vlnami. Právě zde nastal absolutní extrém celého měření v této lokalitě. Byl zde dlouhý skok, který se jezdcí nepovedlo skočit čistě. Dopadl tedy předním kolem za terénní vlnu, ale zadní kolo dopadlo ještě před tuto vlnu. Kolo bylo tedy vystaveno extrémnímu zatížení ve smyslu otevření celého rámu, což je vidět v Tab. 7. Maxima nastala stejně jako při laboratorním měření v bodě nejbližší k hlavové trubce. Vysoké hodnoty, které se blížily extrémům byly zaznamenány také v bodě SG5_6, které se také nachází nad místem připojení tlumiče. Další hodnoty maximální kladné ohybové deformace nebyly tak vysoké, ale v porovnání s laboratorním měřením došlo také k výraznému nárůstu. Dominantním smyslem deformace, je kladná deformace ve smyslu prodlužování spodních vláken trubky. Záporné hodnoty nepřevyšují naměřené extrémy z laboratorního měření.

Deformace vzniklá tahem a tlakem dosahuje hodnot až dvakrát vyšších oproti laboratorním zkouškám. Potvrdil se předpoklad z laboratorního měření, kdy část dolní rámové trubky nad připojením tlumiče je namáhána především tlakem a naopak v části dolní rámové trubky pod tlumičem dominuje tahová deformace. Deformace způsobená tlakem dominovala také na zadní stavbě, což odpovídá laboratorním zkouškám.

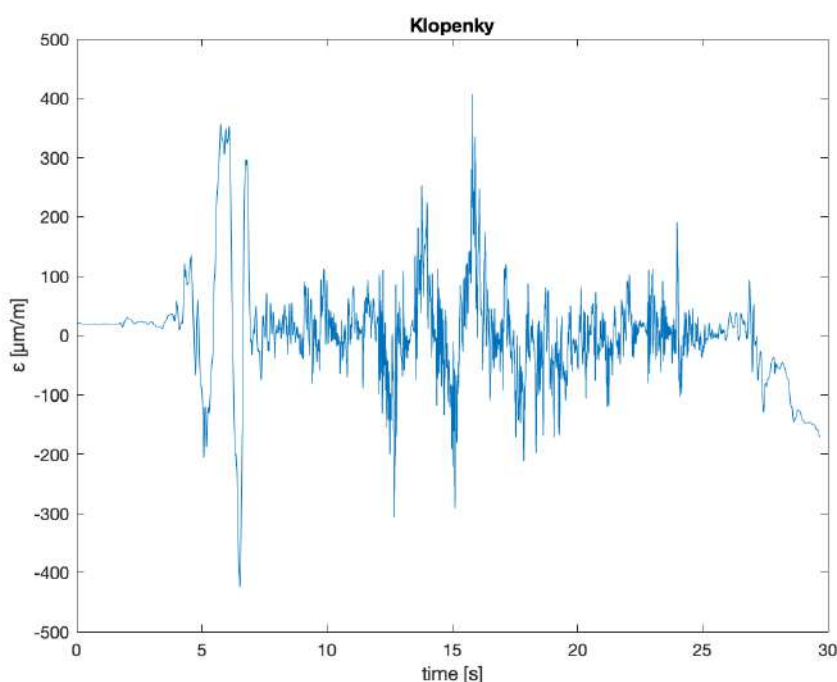
Rám byl zatížen také výrazným krutem. V porovnání s laboratorními zkouškami odpovídá deformace způsobená krutem na tomto úseku deformaci ze zkoušky Start, je zde tedy vidět, že deformace od krutu vzniká během jízdy mnohem častěji než bylo naměřeno v laboratoři. Během tohoto úseku nebyl proveden rychlý start jako v laboratoři, ale deformace vznikla při přenášení váhy jezdce v jednotlivých zatáčkách a při nárazech vzniklých nerovnostmi.

	HŘEBEN								
	Ohyb ϵ_o [$\mu m/m$]					Tah/tlak ϵ_n [$\mu m/m$]			Krut ϵ_k [$\mu m/m$]
	SG3_4	SG5_6	SG7_8	SG9_10	SG11_12	SG3_4	SG9_10	SG11_12	SG1_2
MAX	3040	2804	1478	721	259	175	471	43	520
MIN	-1012	-497	-217	-137	-211	-415	-43	-262	-635

Tab. 7: Deformace Hřeben

8.2 Malá Točná

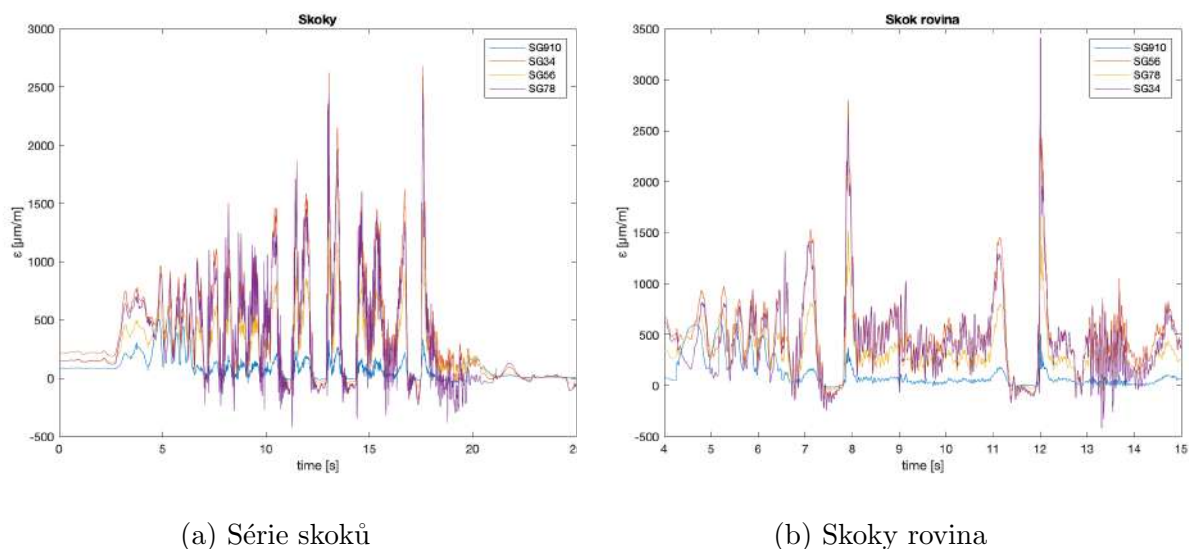
Druhou lokalitou, kde bylo prováděno měření v terénu byl bikepark v oblasti nazývané Malá Točná. Zde byly vybrány celkem tři úseky, na kterých probíhal sběr dat. Prvním úsekem byla série klopených zatáček, ve kterých byla očekávána výrazná deformace způsobená krutem. Tento předpoklad se z části naplnil, zatížení bylo větší než při většině ostatních zkoušek, nicméně vzniklé extrémy nebyly tak vysoké, jak bylo předpokládáno. Průběh deformace způsobené krutem je zobrazen na Obr. 24. Lze pozorovat vysoké hodnoty již na počátku intervalu, kdy se jezdec rozjížděl.



Obr. 24: Záznam signálu krutové deformace

V této lokalitě se nachází množství uměle vytvořených skoků, které byly výborným zdrojem dat k porovnání s naměřenými hodnotami během laboratorních zkoušek. Rozdílem oproti zkouškám v laboratoři byly uměle vytvořené dopady, které zajistí dopad s mnohem menší odezvou a nevznikaly tedy tak vysoké extrémy. Poté byl tedy vybrán také skok, který měl dopad na rovinu a nebyl zde vybudován dopad. Takový případ se mnohem více podobal laboratorní zkoušce.

Na prvním úseku, který se skládal z velkých po sobě jdoucích skoků, které byly propojeny klopenými zatáčkami, je vždy vidět časový interval, ve kterém se jezdec nacházel v letové fázi. Tento interval reprezentuje nulová deformace, která je vidět na Obr. 25a.



Obr. 25: Záznam signálu ohybové deformace

Po každém takovém odlehčení nastává extrém, který je způsobený dopadem kola zpět na podložku.

Obr. 25b zobrazuje ohybovou deformaci při skoku s dopadem na rovinu. Průběh deformace v čase je obdobný jako při průjezdu sérií skoků, liší se pouze v části dopadu, kde dochází k vyšším extrémům ohybové deformace.

Závěrečným úsekem, který byl měřen v této lokalitě, byl úsek s názvem Koryto. Tato část reprezentuje klasické ježdění v bikeparku s řadou různých skoků a klopených zatáček. Během tohoto segmentu nedocházelo k výrazným deformacím, které by převyšovaly ostatní stavy.

	MALÁ TOČNÁ								
	Ohyb ϵ_o [$\mu m/m$]					Tah/tlak ϵ_n [$\mu m/m$]			Krut ϵ_k [$\mu m/m$]
	SG3_4	SG5_6	SG7_8	SG9_10	SG11_12	SG3_4	SG9_10	SG11_12	SG1_2
MAX	3417	3149	1653	617	303	117	513	63	450
MIN	-419	-197	-82	-68	-228	-523	-26	-295	-586

Tab. 8: Deformace Malá Točná

Pro celou lokalitu Malá Točná byla sestavena souhrnná Tab. 8, ve které jsou znázorněny extrémy deformace dosažené v této lokalitě. Během tohoto měření bylo dosaženo globálního extrému ohybové deformace, která v bodě SG3_4 byla 3 417 $\mu m/m$. Obdobně tomu bylo i v ostatních měřených místech, kde byla také zaznamenána absolutní maximální

hodnota ohybová deformace. Co se týče minimálních hodnot ohybové deformace, ty nedosahovaly zdaleka tak vysokých hodnot jako u některých jiných měření. Během tohoto úseku byly zaznamenány také globální extrémy tahové a tlakové deformace. Smysl deformace zůstal stejný jako v předchozích případech, hodnoty byly však vyšší. Hodnoty krutové deformace byly srovnatelné s měřením provedeným na Točné a nevybočují tedy z předchozích měření.

9 Únavová charakteristika rámu

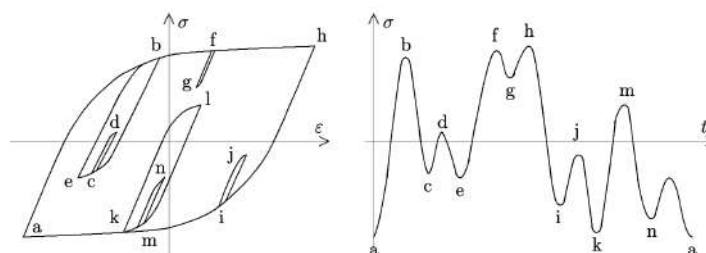
Prvním krokem při vyhodnocení únavových charakteristik rámu je zpracování získaného signálu. Je tedy nezbytné provést dekompozici signálu naměřeného během provozního zatížení. Vyšetřován byl nejvíce exponovaný uzel rámu, tím se během vyhodnocování měření v předchozích kapitolách ukázal být bod SG3_4, který byl umístěn nejbližší spoji dolní rámové trubky s trubicou hlavovou. Kritický bod byl očekáván v úseku od bodu SG3_4 do spojení DT a HT. Lze totiž předpokládat, že ohybový moment bude dále narůstat směrem ke zmíněnému spoji.

9.1 Dekompozice provozního zatížení

Základním krokem v dekompozici signálu bylo nahradit naměřené úseky náhodného procesu souborem kmitů o různé velikosti a odpovídajících z hlediska kumulace únavy. Existují různé metody pro vyhodnocení náhodného procesu, jimiž jsou například metody korelační analýzy nebo metody založené na analýze lokálních extrémů procesu. Právě jednou z metod, která spadá do druhé skupiny z jmenovaných se budu více zabývat a bude využita v dekompozici naměřeného provozního zatížení.[13]

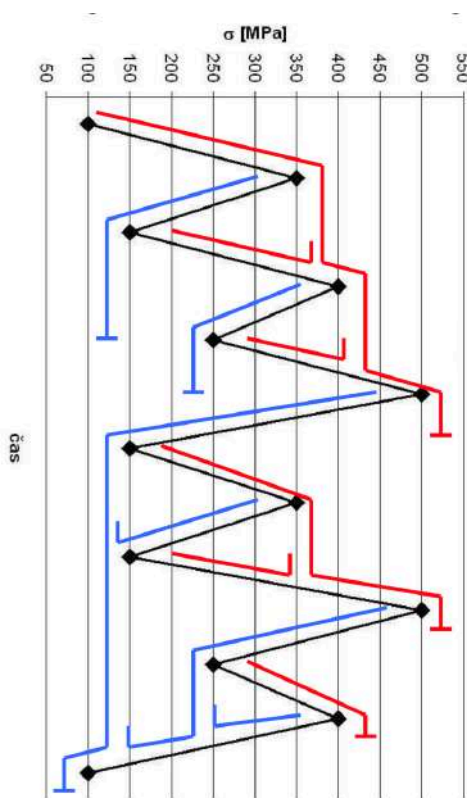
9.1.1 Metoda stékání deště (Rain-flow metoda)

Tato metoda byla představena v již v roce 1968 pány Matsuishi a Endo. Metoda je založena právě na analýze lokálních extrémů. Je velmi často využívána a můžeme ji považovat za jednu z nejsprávnějších metod. Hlavně díky faktu, že tato metoda mnohem lépe interpretuje fyzikální podstatu děje než ostatní způsoby dekompozice. Využívá uzavřených napěťových smyček a také proto je vhodná pro dekompozici náhodného procesu k odhadu poškození podle zákona lineární kumulace.[10]



Obr. 26: Metoda stékání deště [10]

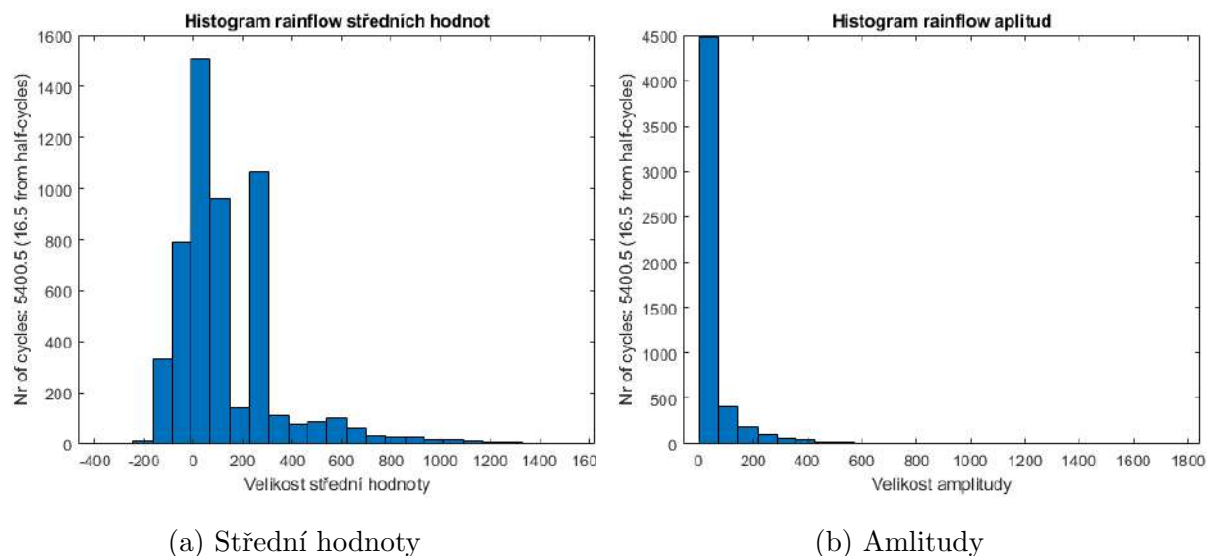
Tento způsob dekompozice vytváří z náhodného procesu soubor do sebe vnořených ukončených cyklů, které odpovídají hysterezním smyčkám v σ - ϵ diagramu. Plocha uzavřená pod každou dílčí hysterezní smyčkou v tomtož diagramu představuje energii, která se spotřebovala na plastické deformaci materiálu a tedy k jeho poškození. Metodu lze chápat i bez znalosti hysterezních smyček a to tak, že se proces otočí o 90° . Poté můžeme jednotlivé kmity chápat jako soustavu střech nad sebou, po kterých stéká déšť. Tento způsob je vidět na Obr. 27.[10]



Obr. 27: Metoda stékání deště [15]

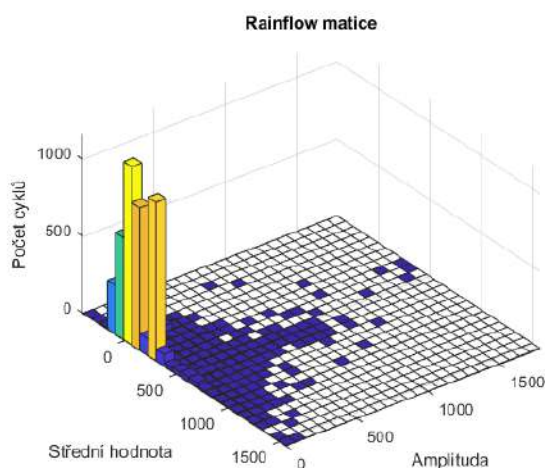
V historii existovaly pochybnosti o možnostech algoritmizovat tuto metodu, to už je však minulostí a metoda je hojně algoritmizována a využívána. V této práci byla použita algoritmizace v prostředí Matlab, kterou blíže popisuje [14].

Byla provedena dekompozice signálu získaného v bodě SG3.4. Ze signálu byla separována ohybová složka deformace a také část deformace vzniklá tahem/tlakem. Dále byl signál zpracováván podle [14]. Výstupem z takto zpracovaného signálu byly 2-D histogramy středních hodnot a amplitud a také 3-D histogramy Rain-flow matic.



Obr. 28: Rainflow histogramy

Cílem takové dekompozice bylo získat spektrum zatížení pro daný uzel. Bylo tedy nutné provést tuto dekompozici pro získaný signál z různých režimů provozního zatížení. Použita byla data naměřená v oblasti Točná a Malá Točná, která byla již vyhodnocována v předchozích kapitolách. Další měření probíhala v oblasti Všenory, Závist a také v okolí Sušice. Soubor získaných dat v těchto lokalitách představuje ucelený pohled na provozní zatížení horského kola.



Obr. 29: Histogram rainflow matice

Ze souboru získaných dat bylo dále nezbytné separovat a stanovit základní zátěžové stavy, které se podobají zkouškám v laboratoři a lze z nich sestavit celkové provozní zatížení.

9.2 Provozní režimy

Horské kolo je určeno pro široké spektrum uživatelů a jeho provoz se může velmi lišit v závislosti na uživateli. Z hlediska vyhodnocení únavy rámu je možné mluvit o třech základních zátěžových módech provozu kola. Prvním, nejméně náročným módem, je režim, který můžeme nazvat *turistický*. V tomto režimu je kolo využíváno pouze k občasným vyjížděním po zpevněném terénu, který není nikterak náročný a nedochází k extrémnímu zatížení rámu. Typ rámu, kterému se tato práce věnuje je možné specifikovat jako enduro. Není určeno pro tento jízdní režim a není tedy nutné s ním dále počítat, také protože ostatní módy dosahují většího provozního zatížení. Zbylé dva režimy jsou popsány níže a byly pojmenovány *sportovní* a *závodní*. V dalších kapitolách bude sestaveno zatížení pro časově omezený úsek pro závodní režim, ze kterého je dále možné získat i výsledky pro ostatní jízdní módy.

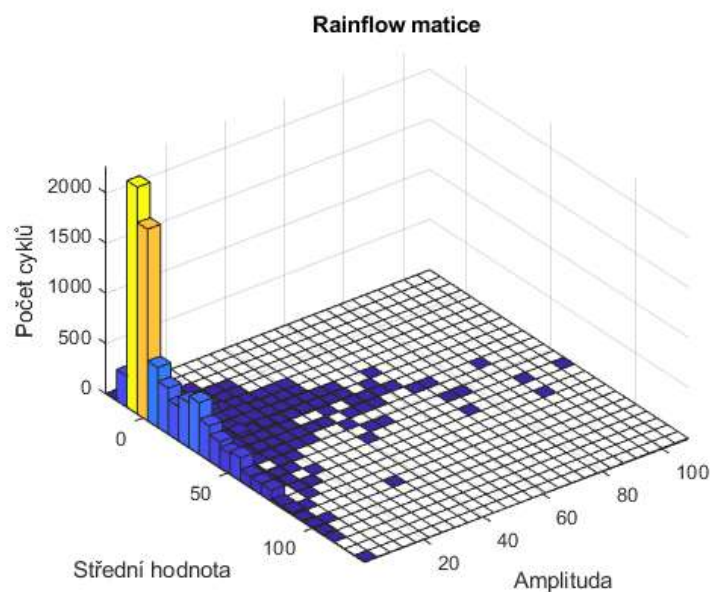
9.2.1 Sportovní režim

Tento režim nejvíce odpovídá využití tohoto typu horského kola, počítá s častým užíváním kola ve středně těžkém terénu a částečně také v těžkém terénu. Během tohoto režimu není běžně dosahováno extrémního zatížení, takové stavy nastávají pouze ve výjimečných případech.

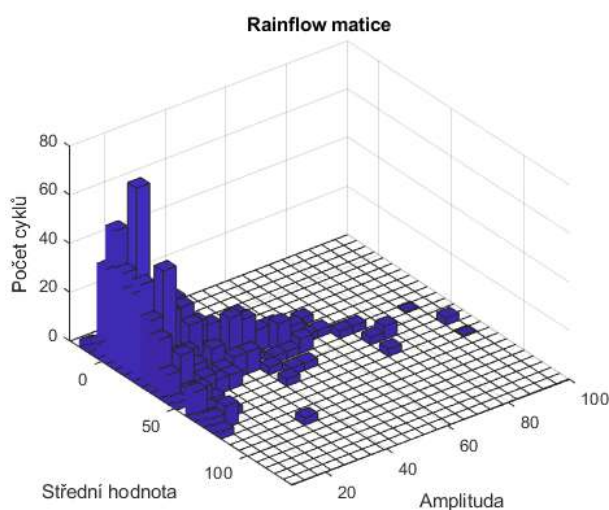
9.2.2 Závodní režim

Závodní režim představuje maximální nasazení horského kola v těch nejtěžších podmínkách. Je zde uvažováno časté dosažení extrémního zatížení a tedy i plynoucí maximální deformace rámu. Pro tento jízdní mód bylo sestaveno zatížení kola v časově omezeném intervalu. Signál je složen z dat naměřených během zkoušek jízdního kola, které jsou popsány v předchozích kapitolách. Výsledné složení signálu založeno na zkušenostech. Je důležité správně zvolit poměr extrémního zatížení a signálu, který vyplňuje časový prostor mezi nimi. Pro tyto potřeby byla analyzována závodní data předních českých závodníků v disciplíně enduro a následně byly diskutovány. Závodní enduro tratě mají v České republice obvykle délku od 2 do 5 minut. Jako vhodný časový interval byly tedy zvoleny 3 minuty. Pro takto sestavený časový interval byl vytvořen histogram rainflow matice, který je zobrazen na Obr. 30. Dále byly také sestaveny histogramy amplitud a středních hodnot deformace. Tyto histogramy představuje Obr. 32. Na histogramech je

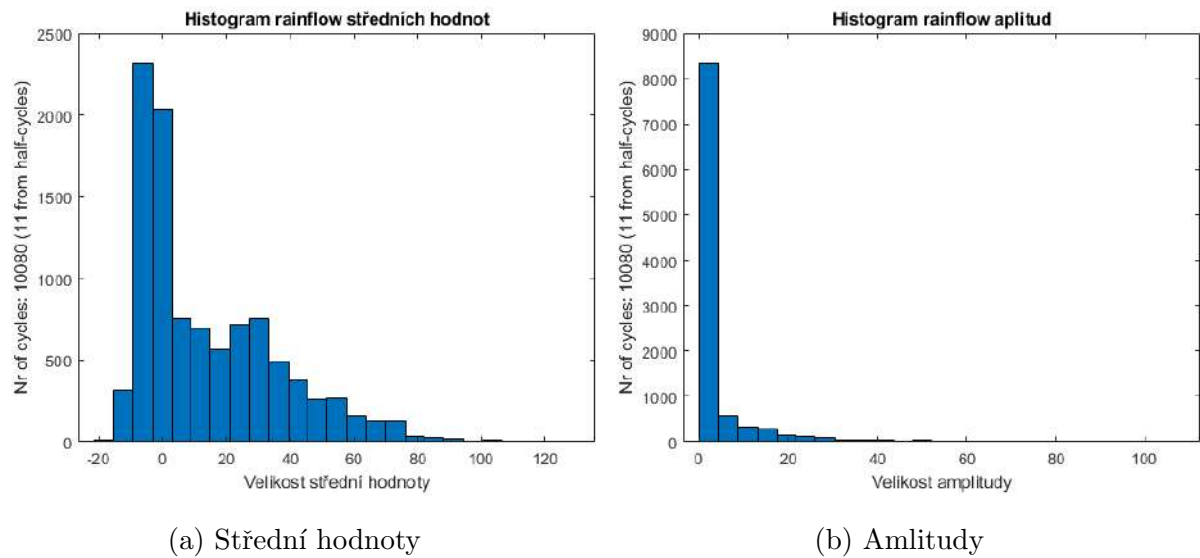
patrné, že se v histogramu objevuje velké množství kmitů s malou velikostí amplitudy. Takové kmity však nejsou s hlediska únavy tolik podstatné, protože nepoškozují součást takovým způsobem, jako cykly s vyššími amplitudami. Z tohoto důvodu byly vytvořeny také histogramy, které zanedbávají cykly s nízkými amplitudami. Tyto histogramy jsou zobrazeny na Obr. 31 a Obr. 33.



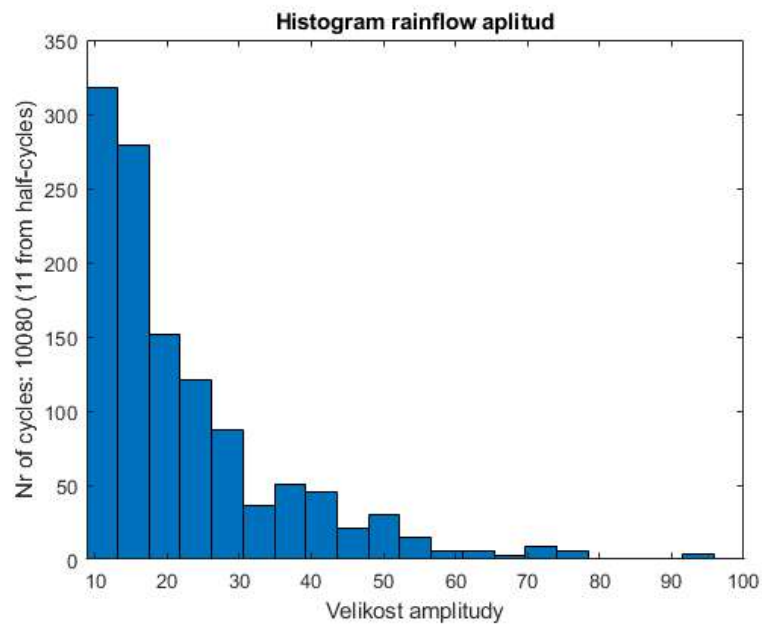
Obr. 30: Histogram rainflow matice závodního režimu



Obr. 31: Histogram rainflow - detail



Obr. 32: Rainflow histogramy závodního režimu



Obr. 33: Histogram amplitud - detail

9.3 Pevnost a únava kompozitních materiálů

Pevnostní charakteristiky a únava je velmi podrobně popsána pro kovové materiály, pro které také byla většina teorií sestavena. Kompozitní materiály se v mnoha směrech liší od kovových. Pokud se jedná o statiku, kde u kovů dochází k rozvoji plastických deformací a také k přizpůsobení. Únava kovových materiálů lze zjednodušeně popsat následujícím způsobem, striační pásma, vznik mikrotrhlin, následné spojování mikrotrhlin, vznik magistralní trhliny a následný lom. U kompozitních materiálů dochází ve statické i během únavy k mnoha různým mechanismům poškozování dle složek materiálu, stavby kompozitu a také výrobě kompozitu. Mezi tyto mechanismy můžeme zařadit například trhliny v matrici, intra-laminární trhliny (porucha fázového rozhraní vlákno-matrice), spojování krátkých trhlin, delaminace vrstev lamin, lom vláken, příčné smykové trhliny v matrici. Běžně dochází ke kombinaci a interakci výše vypsanych mechanismů. [16]

Dále je také nutné uvažovat vliv okolních podmínek (teplota, prostředí), stav napjatosti (jedosá - víceosá, střední napětí, zbytkové napětí), frekvenci zatěžování a vliv koncentrátorů napětí. Vliv těchto faktorů je obvykle vyšší než u kovových materiálů.[16]

Přes všechny tyto odlišnosti se přebírá řada metod známých pro popis únavové degradace kovů. Mezi využívané metody patří například S-N křivky, Manson-Coffinovy křivky nebo Haighův diagram. Rovněž se také modifikují statická kritéria porušování laminátů jako jsou například Tsai-Hill, Tsai-Wu a další kritéria.[16]

Různé mechanismy poškozování cyklickým zatěžováním ve struktuře kompozitních materiálů jsou indikovány v závislosti na stavbě a struktuře kompozitu. Lze vyzorovat různá stádia stavu poškození kompozitu:

- Nukleace nezávislých trhlin nebo systémů soustav trhlin
- Šíření těchto trhlin (řada různých módů, dle podmínek růstu)
- **Vznik a šíření delaminací mezi složkami kompozitu nebo mezi vrstvami laminátu**
- Porušování vláken
- Lom

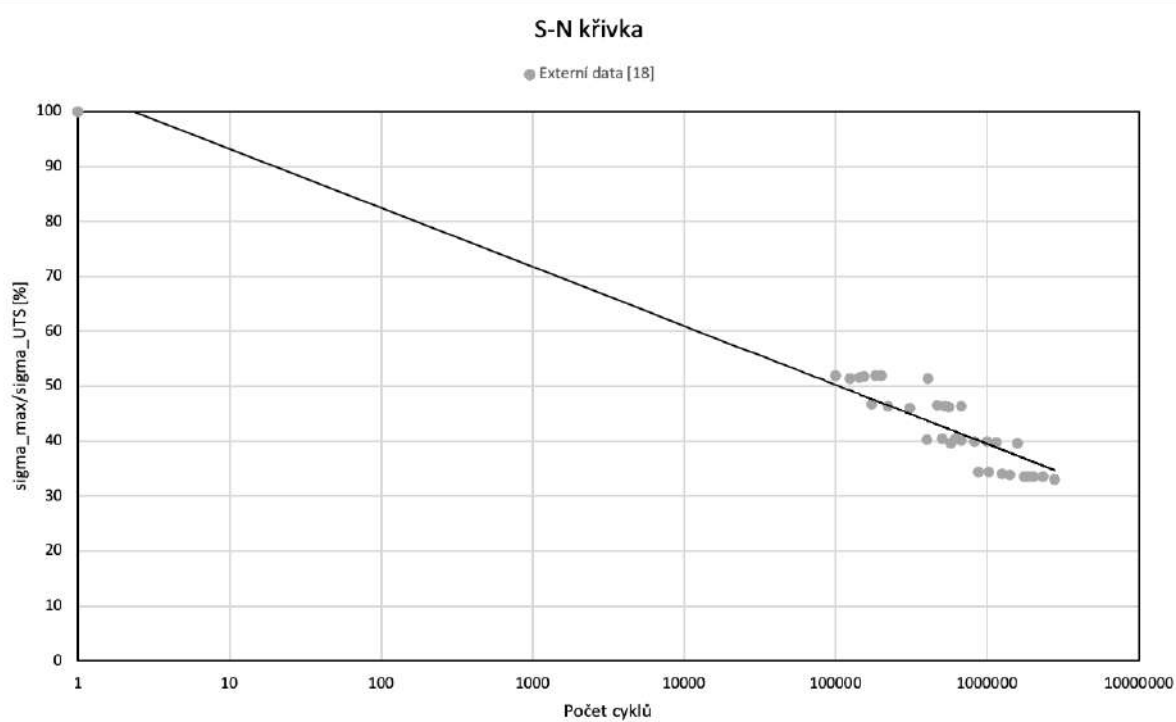
9.4 S-N křivka

Pro daný typ materiálu, ze kterého byla vytvořena dolní rámová trubka na zkušebním prototypu rámu, bylo nutné sestavit únavovou křivku. V ideálním případě by bylo nutné pro sestavení křivky realizovat zkoušky na zkušebním vzorku dolní rámové trubky. Z omezených časových důvodů, které byly ovlivněny nastalou situací, bylo nezbytné vycházet z již provedených zkoušek. Predikci únavové životnosti kompozitních materiálů se obsáhle věnuje [18]. V této práci bylo publikováno množství únavových zkoušek pro velkou řadu materiálů. Křivky jsou členěny podle typu vlákna, matrice, orientace skladeb, vrstvení a cyklování.

Autoři použili relativizování mezní amplitudy napětí vůči statické pevnosti. S-N křivky byly přepočítány pro dva typy pravděpodobnostního přežití (P.S. = probability of survival), pro tuto práci byla vybrána pravděpodobnost 50%. Relativní meze únavy byly odečteny pro $2 \cdot 10^6$ cyklů.

$$\varphi_{50\%} = \left(\frac{\sigma_{MAX,50\%P.S.}}{\sigma_{UTS}} \right)_{N_f=2 \cdot 10^6}$$

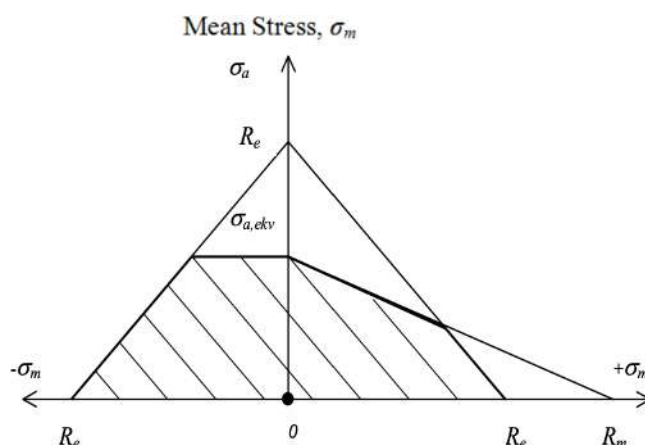
Pro tuto práci bylo hlavním problémem sestavení šikmé části křivky, pro kterou musela být využita data z [18]. Dolní rámová trubka je navinuta z vlákna T700 a objemový podíl vlákna $V_f = 48\%$. Pro tuto skladbu byly vybrány nejvíce odpovídající záznamy v databázi. Z těchto externích dat byla sestavena únavová křivka, viz Obr. 34.



Obr. 34: S-N křivka

9.5 Vliv střední složky napětí

Pro vyjádření vlivu střední složky napětí se v praxi se nejčastěji používají Haighův a Smithův diagram. Haighův diagram vyobrazuje zkoušky v souřadném systému σ_m, σ_a . Takový diagram znázorňuje Obr. 35. Oba dva zmíněné diagramy byly popsány pro kovové materiály, jejich využití je však možné i u materiálů kompozitových. Vliv středního napětí na únavu lze výhodně vyjádřit pomocí ekvivalentního amplitudového napětí. Ekvivalentní amplitudové napětí $\sigma_{a,ekv}$ odpovídá amplitudě napětí zatížení symetricky střídavým kmitem, jež vede k dosažení stejné životnosti jako při zatížení nesymetrickým cyklem. Existují různé teorie výpočtu $\sigma_{a,ekv}$, nejvíce využívanou metodou je však korekce ekvivalentního amplitudového napětí, která je nazývána podle Goodmana. Tuto teorii představili pánové Langraf a Morrow.



Obr. 35: Haighův diagram [16]

Pro požadavky této práce bylo nutné přepsat veškeré uvedené teorie pro využití deformací. Lze tedy uvádět místo ekvivalentního amplitudového napětí $\sigma_{a,ekv}$ ekvivalentní amplitudovou deformaci $\epsilon_{a,ekv}$. Podobně lze modifikovat Haighův diagram pro souřadný systém ϵ_m, ϵ_a , kde smluvní mez pevnosti R_m nahradíme statickou pevností ϵ_{pev} . Pro výpočet ekvivalentní amplitudové deformace $\epsilon_{a,ekv}$ tedy platí:

$$\epsilon_{a,ekv} = \frac{\epsilon_a}{1 - \frac{\epsilon_m}{\epsilon_{pev}}}.$$

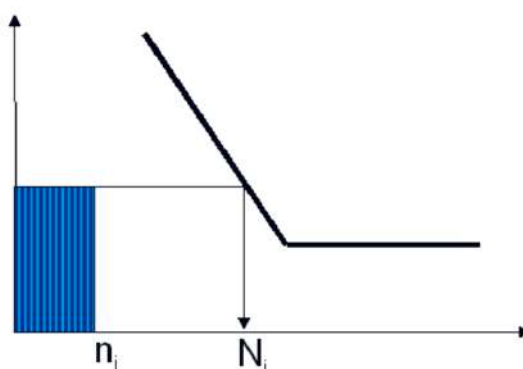
9.6 Kumulace poškození

Existují různé hypotézy kumulace poškození. Nejvíce využívanou je teorii kumulace poškození, kterou formuloval v roce 1945 Miner, později tato teorie vešla v povědomí pod názvem jako lineární kumulace poškození Palmgrem-Miner. Hypotéza zahrnuje poškození od různých jednotlivých hladin poškození. Toto únavové poškození je vyjádřeno vztahem:

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_p}{N_p} = \sum_{i=1}^p \frac{n_i}{N_i} .$$

Lze tedy predikovat počet kmitů do poruchy, k tomu je využívána kritická hodnota poškození $D_c = 1$. Dále lze tedy vyjádřit počet opakování zátěžné sekvence do lomu jako:

$$Z = \frac{D_c}{D} = \frac{1}{D} .$$



Obr. 36: Lineární kumulace poškození [15]

Výslednou hodnotou, která je pro danou součást požadována, je střední únavový život. Slouží k odhadu časového intervalu nebo například vzdálenosti, kterou je schopna součást plnit svou úlohu bez defektu. Pro výpočet středního únavového životu byla využita opět hypotéza Palmgren-Miner:

$$\bar{L}_{P-M} = \frac{N_p}{\sum_{i=1}^p \frac{n_i}{h} \left(\frac{\sigma_{a,i}}{\sigma_{a,p}} \right)^w} .$$

9.7 Vyhodnocení výsledků závodní režim

Únavové výpočty byly prováděny na vzorku závodního režimu, který byl již popsán v předchozích kapitolách. Byly zvoleny dvě různá místa výpočtů, první se zabýval výpočtem únavových charakteristik ve jmenovitém průřezu trubky, který reprezentuje místo SG4. Druhým bodem byl výpočet odhadu únavy rámu v kritických místech, neboli koncentrátorech napětí.

9.7.1 Jmenovitý průřez DT

Nejprve byly únavové výpočty prováděny v bodě SG4, kde byly nainstalovány odporové tenzometry a byly zde získána data pro výpočty. Veškeré výpočty probíhaly podle postupů popsaných v předchozích kapitolách. Bylo využito únavové křivky, kterou zobrazuje Obr. 32. Dále byl uvažován vliv střední složky napětí, který byl modifikován pro deformace. Následně proběhl výpočet kumulace poškození. Bylo využito teorie lineární kumulace poškození.

Výsledkem výše popsaného postupu byl odhad středního únavového života v cyklech. Výsledný odhad středního únavového života je $\bar{L}_{P-M} = 3.6634 \times 10^{11}$ cyklů. Hodnota je vyšší než 10^7 cyklů, což znamená, že životnost DT v místě jmenovitého průřezu spadá do oblasti neomezené životnosti.

9.7.2 Koncentrátory napětí

Lokální změny průřezu a tvaru součástí se projevují lokálním zvýšením napětí, nazýváme je tedy koncentrátory napětí neboli vruby. Konstrukčními vruby mohou být například drážky, otvory, zápichy nebo spoje s dalšími součástmi. Na DT se nachází několik takových bodů, jedním z nich je například otvor pro připojení tlumiče. Pro takové místo je nutné provést únavové výpočty.

Základní teorie koncentrace napětí byly publikovány pro isotropní materiály, především pak pro ocel. Nejvíce využívanou je teorie podle Neubergera, která popisuje elasticko-plastickou korekci ve vrubech. Tyto teorie popisují rozložení napětí, neboli koncentraci napětí ve vrubech na základě geometrie koncentrátoru napětí. Využívá se takzvaný součinitel tvaru (součinitel koncentrace elastických napětí) K_t . Teorie tedy nelze používat pro kompozitové materiály, jako je dolní rámová trubka. Pro ortotropní materiály je součinitel koncentrace napětí funkcí materiálových parametrů.

Nejprve je nutné popsat rozložení napětí v okolí otvoru ortotropní rovinné desky. Rovinný problém teorie plasticity, podmínka rovnováhy:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 ,$$

rovnice kompatibility:

$$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0 .$$

Závislost napětí a poměrné deformace pro průměrné hodnoty:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = t \cdot \begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} & A'_{16} \\ & A'_{21} & A'_{26} \\ sym & & A'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

poté lze vyjádřit napětí jako funkci F:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} , \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} , \quad \tau_{xy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} .$$

Parciální diferenciální rovnice čtvrtého řádu pro F pro ortotropní desku, podle Lekhnitskii [20]:

$$A'_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + (2A'_{12} + A'_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + A'_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0$$

$$\frac{1}{E_{22}} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + \left(2 \frac{\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{G_{12}} \right) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{1}{E_{11}} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 ,$$

z čehož plyne charakteristická rovnice ve tvaru:

$$A'_{22} s^4 + (2A'_{12} + A'_{66}) s^2 + A'_{11} = 0 .$$

V [20] bylo dokázáno, že řešení této rovnice má čtyři imaginární kořeny:

$$s_1 = \alpha_1 + i \cdot \beta_1$$

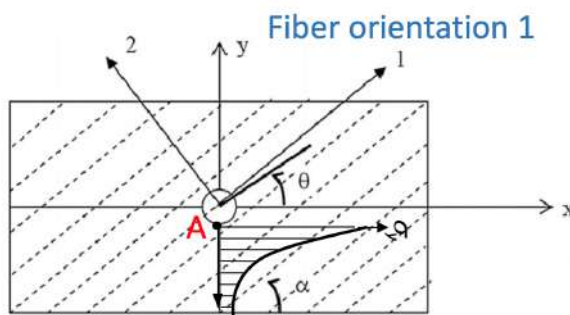
$$s_2 = \alpha_2 + i \cdot \beta_2$$

$$s_3 = \alpha_1 - i \cdot \beta_1$$

$$s_4 = \alpha_2 - i \cdot \beta_2 ,$$

a pro ortotropní materiály platí, že:

$$\alpha_1 = 0 , \alpha_2 = 0 .$$



Obr. 37: Rozložení napětí ortotropní deska [19]

Rozložení napětí v řezu je obecně vyjádřeno funkcí:

$$\sigma_x(y) = f(\sigma_{nom}, y, R, \beta_1, \beta_2) ,$$

poté můžeme vyjádřit distribuci napětí v bodě A, který je zakreslen na Obr. 35:

$$\sigma_x(A) = \sigma_{nom}(1 + \beta_1 + \beta_2) .$$

Poté již můžeme vyjádřit součinitel koncentrace napětí K_t :

$$K_t = \frac{\sigma_x(A)}{\sigma_{nom}} = (1 + \beta_1 + \beta_2) ,$$

po dosazení získáme konečný tvar rovnice pro výpočet K_t :

$$K_t = 1 + \sqrt{\frac{2}{A'_{22}} \left(\sqrt{A'_{11}A'_{22}} - A'_{12} + \frac{A'_{11}A'_{22} - A'^2_{12}}{2A'_{66}} \right)}.$$

V dolní rámové trubce byla vlákna orientována pod úhly $0^\circ / \pm 45^\circ / 90^\circ$. Pro tuto skladbu odpovídá podle [19] hodnota $K_t = 3.010$.

Tato hodnota součinitele tvaru $K_t \equiv \alpha$. Dále byl určen součinitel vrubu β , pro který je experimentálně ověřeno, že $\beta \leq \alpha$. Pokud tedy zvolíme $\beta = \alpha$, dostaneme velmi konzervativní (bezpečnou) predikci. Pro β také platí:

$$\beta \equiv K_f = \frac{\sigma_c}{\sigma_c^x} \cdot [19]$$

Pro takto sníženou mez únavy byl výsledný odhad životnosti $\bar{L}_{P-M} = 8.7357 \times 10^6$ cyklů, což v přepočtu na jednotku času odpovídá přibližně 2 426 hodinám. Je nutné vzít v úvahu, že zatížení aplikované na rám bylo extrémní a je velmi nepravděpodobné, že nastane během každého využití kola. Toto zatížení odpovídá závodnímu nasazení, které nastává výrazně méně často než obvyklá jízda v terénu.

10 Závěr

Na základě provedené rešerše na téma zkušebních metod pro ověřování pevnosti a životnosti rámu horských kol a zkušeností byl sestaven soubor základních jízdních režimů horského kola. Během těchto režimů byla pomocí odporových tenzometrů měřena deformační odezva rámu. Experimenty byly zaměřeny především na dolní rámovou trubku. Sběr dat proběhl jak během typických jízdních režimů v laboratoři, tak během rozsáhlého provozního měření v terénu.

Následovalo kompletní vyhodnocení získaných dat z laboratorního měření. Pro jednotlivé režimy byl stanoven smysl zatěžování. Pro jízdní režimy Skok a Přejezd překážky bylo typické prodlužování dolních vláken DT a s tím spojené otevírání celého rámu. Pro jízdní režim brždění naopak docházelo ke zkracování dolních vláken a tedy k uzavírání rámu. Zvláštním stavem byl Start a s ním spojené rozjíždění před jednotlivými překážkami, kdy docházelo ke vždy srovnatelné tahové deformaci DT. Byly stanoveny maximální a minimální hodnoty deformací pro jednotlivé měřené body. Tyto hodnoty byly pro každý režim přehledně shrnuty v tabulce, která ukazuje také rozložení deformací mezi ohybem a tahem/tlakem. V jednom místě byly umístěny odporové tenzometry pro měření deformační odezvy způsobené krutem, ten se však ukázal jako zanedbatelný v porovnání s ostatním zatížením rámu. Extrémy deformace dolní rámové trubky byly dosahovány v bodě SG3.4, který byl umístěn v horní části DT. V průběhu deformace po délce DT byl jasně patrný nárůst spojený s přenosem síly tlumičem ze zadní stavby rámu. Jeden zkoumaný bod byl také na zadní stavbě rámu, deformace naměřené v tomto bodě byly výrazně nižší než na DT.

Vyhodnocena byla také data získaná během provozního měření v terénu. Naměřené deformace odpovídaly smyslem zatížení základním jízdním režimům. Maximální a minimální hodnoty byly však v terénu až o 50% vyšší. Tento rozdíl byl způsoben především velikostí překážek a rychlostí, kterou byly zdolávány. Absolutního extrému bylo dosaženo v lokalitě Malá Točná, při simulaci špatného dopadu při zdolávání skoku. V bodě SG3.4 bylo dosaženo ohybové deformace $3\,417\ \mu\text{m}/\text{m}$.

Poté byla naměřená data využita k odhadu únavového života nejvíce exponovaného místa rámu. Tímto bodem byl již zmiňovaný bod SG3.4, ve kterém nastávaly extrémy při všech typech zatěžování. Byly definovány tři základní režimy užívání horského kola. Pro závodní režim, který nejvíce zatěžuje horské kolo, byly vypočteny únavové charakteristiky.

Byl stanoven odhad středního únavového života, který pro jmenovitý průřez DT (bod SG3.4) spadal do oblasti neomezené životnosti. Dále byly tedy výpočty provedeny pro potenciální kritické místo trubky, kterým může být například místo spojení tlumiče s DT. Takové místo můžeme označit koncentrátorem napětí, ve kterém je životnost konstrukce výrazně nižší. Hodnota odhadu středního únavového života byla vypočtena na 2 426 hodin. Tato hodnota je výrazně ovlivněna vybraným způsobem zatížení, které bylo extrémní.

Můžeme tedy konstatovat, že hlavním způsobem zatížení dolní rámové trubky je ohyb, který je výrazně ovlivněn silou přenášenou tlumičem. Extrémní hodnoty byly zaznamenány v blízkosti spoje DT a hlavové trubky. Jedním z kritických uzlů konstrukce může být tento bod a druhým připojení tlumiče k DT.

Reference

- [1] Vlk, M a kol: Experimentální mechanika, skriptá VUT v Brně 2003
- [2] T. Ponížil: Analýza deformací a pevnosti kompozitového rámu. Diplomová práce 2019.
- [3] D. Zedler, „The ISO 4210 standard for bike tests sets a floor, not a ceiling,“ Zedler-Group, 2017. [Online]. Available: <https://www.zedler.de/en/zedler-aktuell/publikationen/news-detail/the-iso-4210-standard-for-bike-tests-sets-a-floor-not-a-ceiling.html>. [Přístup získán 8 2019].
- [4] UCI, „CLARIFICATION GUIDE OF THE UCI TECHNICAL REGULATION,“ 31 7 2019. [Online].
- [5] ISO 4210 Cycles - Safety requirements for bicycles, Geneva: ISO, 2015.
- [6] ISO 4210-2 Cycles - Safety requirements for bicycles, Geneva: ISO, 2015.
- [7] ISO 4210-6 Cycles - Safety requirements for bicycles, Geneva: ISO, 2015.
- [8] LUCAS, B. D. a T. KANADE. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. Proceedings of Imaging Understanding Workshop. 1981.
- [9] PAN, B., K. QIAN, H. XIE a A. ASUNDI. Two – dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. Measurement Science and Technology. 2009, roč. 20, č.6.
- [10] BALDA, Miroslav. VÍCEKANÁLOVÉ SLEDOVÁNÍ KUMULACE POŠKOZENÍ V REÁLNÉM ČASE. Západočeská univerzita - ÚFY, Veveslavínova 11, 301 14 Plzeň, 1995.
- [11] Roohollah Sarfaraz at all: A hybrid S–N formulation for fatigue life modeling of composite materials and structures. Composites: Part A 43 (2012) 445–453.
- [12] Devaiah B.B at all: Stress Analysis Of A Bicycle Frame, Materials Today: Proceedings 5 (2018) 18920–18926
- [13] RŮŽIČKA, Milan. Dynamická pevnost a životnost. 2., přeprac. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1992.

- [14] Adam Nieslony (2020). Rainflow Counting Algorithm (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved June 9, 2020.
- [15] BARTOŠÁK, Michal a Milan RŮŽIČKA. Analýza provozních zatížení a hypotézy kumulace poškození: Přednáška 6. Praha, 2019.
- [16] RŮŽIČKA, Milan. Únava kompozitních materiálů: Letní škola mechaniky kompozitních materiálů. Cvikov, 2019.
- [17] REINHART, T. J. Engineered Materials Handbook Volume 1. Composites. Metals Park, OH: American Society for Metals, 1987. ISBN 0-87170-279-7.
- [18] QUARESIMIN, M., M. RICOTTA a L. SUSMEL. FATIGUE LIFE PREDICTION OF COMPOSITE LAMINATES. Vicenza, 2004. University of Padova.
- [19] RŮŽIČKA, Milan. INFLUENCE OF NOTCHES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS: Computational mechanics. Srní, 2019.
- [20] LEKHNITSKII, S.G. Theory of elasticity of an anisotropic body: Teorija uprugosti anizotropnogo tela / S.G. Lekhnitskii. Moscow: Mir, 1981.

Seznam obrázků

1	Rázová zkouška rámu padající hmotou [7]	11
2	Rázová zkouška padajícího rámu s vidlicí [7]	12
3	Únavová zkouška šlapacími silami [7]	13
4	Únavová zkouška vodorovnými silami [7]	14
5	Únavová zkouška svislou silou [7]	15
6	Zkouška průchodnosti zadní pneumatiky [7]	16
7	Základní schéma rámu	21
8	Instalace tenzometrů na dolní rámovou trubku	22
9	Zapojení tenzometrů do Wheatstonova můstku	23
10	Čtvrtmostové zapojení tenzometru do Wheatstonova můstku	23
11	Čtvrtmostové zapojení tenzometru do Wheatstonova můstku	24
12	Kolo připravené na zkušební měření	24
13	Zkušební překážka	26
14	Zkušební skok	28
15	Záznam signálu	30
16	Záznam signálu vybraného segmentu	31
17	Záznam signálu ohybové deformace	32
18	Záznam signálu ohybové deformace	34
19	Záznam signálu ohybové deformace	35
20	Záznam signálu ohybové deformace	36
21	Úsek měření Hreben_3	38
22	Skok v úseku Koryto	39
23	Záznam signálu ohybové deformace	40
24	Záznam signálu krutové deformace	42
25	Záznam signálu ohybové deformace	43
26	Metoda stékání deště [10]	45
27	Metoda stékání deště [15]	46
28	Rainflow histogramy	47
29	Histogram rainflow matice	47
30	Histogram rainflow matice závodního režimu	49
31	Histogram rainflow - detail	49

32	Rainflow histogramy závodního režimu	50
33	Histogram amplitud - detail	50
34	S-N křivka	53
35	Haighův diagram [16]	54
36	Lineární kumulace poškození [15]	55
37	Rozložení napětí ortotropní deska [19]	58

Seznam tabulek

1	Deformace Přejezd překážky	29
2	Deformace Obě brzdy	32
3	Deformace Přední brzda	33
4	Deformace Skok	35
5	Deformace Start	36
6	Deformace Schody	37
7	Deformace Hřeben	41
8	Deformace Malá Točná	43

Seznam příloh

Přílohy jsou k této práci přikládány v elektronické podobě na CD.

- Ukázka vyhodnocení naměřených dat a únavových výpočtů v prostředí Matlab.
[CD]/Zavodni_rezim.m