



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A**  
**BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

# **NAPJATOSTNÍ, DEFORMAČNÍ A SPOLEHLIVOSTNÍ ANALÝZA PŘEDNÍ KOMPOZITNÍ NÁPRAVY LEHOKOLA**

STRESS, DEFORMATION AND SAFETY ANALYSIS OF THE RECUMBENT BICYCLE  
FRONTAL COMPOSITE AXLE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. JAN ONDREJKA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

**prof. RNDr. Ing. JAN VRBKA, DrSc., dr.  
h. c.**

SUPERVISOR

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Ondrejka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Inženýrská mechanika a biomechanika (3901T041)**

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 diplomové práce:

**Napjatostní, deformační a spolehlivostní analýza přední kompozitní nápravy lehokola**

v anglickém jazyce:

**Stress, deformation and safety analysis of the recumbent bicycle frontal composite axle**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výpočtové modelování napjatosti, deformace a spolehlivosti modifikované kompozitní přední nápravy lehokola pomocí metody konečných prvků (MKP), využitím programu ANSYS, případně jiného. Návrh struktury kompozitního materiálu. Tvorba adekvátního prostorového modelu úlohy. Stanovení poddajnosti nápravy.

Cíle diplomové práce:

Výpočet a posouzení poddajnosti a bezpečnosti modifikované kompozitní konstrukce nápravy při charakteristických zatíženích. Návrh konstrukčních úprav, vedoucích k vhodnému odpružení kola. Případná výroba prototypu přední nápravy ve spolupráci s firmou AZUB BIKE s.r.o. a Leteckým ústavem FSI. Experimentální ověření výsledků získaných teoretickým přístupem.

Seznam odborné literatury:

- Janíček,P.,Ondráček,E.,Vrbka,J.,Burša,J.: Mechanika těles. Pružnost a pevnost I. CERM, 2004  
Ondráček,E.,Vrbka,J.,Janíček,P.,Burša,J.: Mechanika těles. Pružnost a pevnost II. CERM, 2006  
Agarwal,B.D., Broutman,L.J.: Vláknové kompozity. SNTL, Praha,1987  
Vrbka,J.: Mechanika kompozitů. Učební text, ÚMTMB FSI VUT, 2008  
Madenci,E.,Güven,I.: The finite element method and applications in engineering using ANSYS.  
Springer, 2006  
Podkladové materiály fy. AZUB

Vedoucí diplomové práce: prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc., dr. h. c.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.11.2013

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vytvořením výpočtového modelu kompozitní nápravy lehokola – tříkolky firmy AZUB pro analýzu deformačně napěťových stavů.

Diplomová práce se skládá ze čtyř částí. První část obsahuje seznámení s nabídkou celoodpružených tříkolek nejznámějších výrobců. Dále obsahuje pojednání o kompozitních materiálech, které tvoří hlavní prvek odpružení firmy AZUB a popis přední nápravy téže firmy.

V druhé části je podrobně zpracován výpočtový model sloužící k analýze deformačně napěťových stavů pro tři zvolené zátěžné stavy. Je diskutován vliv některých parametrů materiálu a geometrie na chování nápravy s cílem vybrání vhodné varianty odpružení.

Třetí část se zabývá výrobou prototypu přední nápravy a zkouškami, které slouží ke zjištění vstupních dat do numerického výpočtu a k verifikaci výsledků výpočtového modelu.

Úpravy a změny vedoucí k výrobě druhého prototypu jsou obsahem poslední části. Na základě těchto zkušeností jsou pak formulována doporučení pro budoucí vývoj výpočtového modelu odpružené nápravy i samotného odpružení přední nápravy lehokola.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Lehokolo, přední náprava, kompozit, MKP, deformačně napěťová analýza, ANSYS

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with creation of computational model of AZUB recumbent tricycle composite axle for stress strain analysis.

The thesis consists of four main parts. The first part contains introduction to the offer of full suspended tricycles from the most known manufacturers. Furthermore it contains introduction to composite materials that makes the main element of AZUB's suspension, and the description of the AZUB's front axle.

In the second part there is detailed compilation of computational model for purpose of stress strain analysis of three load states. The effect of specific material and geometry parameters on axle behavior is discussed with the aim of choosing the most appropriate variant.

Third part deals with the manufacturing of the front axle prototype and with tests leading to input data for numerical model and verification of computational model.

Modifications and changes that lead to manufacturing of the second prototype are content of the last part. Based on this experience some recommendations for future development of the numerical axle model and the front axle suspension itself are formulated.

## KEYWORDS

recumbent bicycle, front axle, composite, FEA, stress-strain analysis, ANSYS

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ONDREJKA, J. *Napjatostní, deformační a spolehlivostní analýza přední kompozitní nápravy lehokola*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 73 s. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc., dr. h. c..

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a že jsem ji vypracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Ing. Jana Vrbky, DrSc., dr. h. c.. Dále prohlašuji, že seznam použitých zdrojů a literatury je úplný.

V Brně 27.5.2014

.....

Jan Ondrejka

Chtěl bych touto cestou poděkovat všem, kteří ke vzniku této práce jakkoli přispěli a podporovali mne při studiu. Jmenovitě pak vedoucímu práce panu profesorovi Janu Vrbkovi, lidem z firmy AZUB a panu Ing. Michalovi Mališovi, Ph.D z Leteckého ústavu FSI VUT.

---

## OBSAH

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2. PROBLÉMOVÁ SITUACE .....</b>	<b>11</b>
<b>3. FORMULACE PROBLÉMU .....</b>	<b>11</b>
<b>4. CÍLE ŘEŠENÍ .....</b>	<b>11</b>
<b>5. PŘEHLED ODPRUŽENÍ SOUČASNÝCH VÝROBCŮ .....</b>	<b>12</b>
5.1. Vidlice Lauf TR29 .....	12
5.2. Icetrikes company Sprint.....	13
5.3. HP Velotechnik Scorpion fs.....	14
5.4. Windcheetah Hypersport.....	15
5.5. Steintrikes Mungo .....	16
<b>6. TŘÍKOLKA AZUB TRICON .....</b>	<b>17</b>
<b>7. KOMPOZITY .....</b>	<b>18</b>
7.1. Výhody a nevýhody kompozitů .....	19
7.2. Použití kompozitních materiálů .....	19
7.2.1. Boeing dreamliner.....	19
7.2.2. Další využití .....	20
7.3. Volba materiálu:.....	21
7.3.1. Volba výztuže .....	21
7.3.2. Volba matrice .....	22
7.4. Popis materiálu .....	23
7.5. Základní vlastnosti vrstvy (laminy) .....	23
7.5.1. Podélný modul pružnosti v tahu a Poissonovo číslo.....	24
7.5.2. Příčný modul pružnosti v tahu a modul pružnosti ve smyku.....	25
7.5.3. Podélná pevnost v tahu .....	25
7.5.4. Příčná pevnost v tahu .....	25
7.6. Mechanismy porušování vláknových kompozitů .....	26

---

<b>7.7. Mezní stavy kompozitů .....</b>	<b>28</b>
7.7.1. Pevnost kompozitní vrstvy – laminy .....	28
7.7.2. Mezní stav pevnosti hlavních orthotropických napětí .....	28
7.7.3. Mezní stav pevnosti hlavních orthotropických přetvoření.....	29
7.7.4. Tsai-Hillova kvadratická podmínka MS pevnosti .....	30
<b>8. PŘEDNÍ NÁPRAVA LEHOKOLA .....</b>	<b>31</b>
<b>8.1. Požadavky pro přední odpruženou nápravu .....</b>	<b>31</b>
<b>8.2. Konstrukce odpružené přední nápravy.....</b>	<b>32</b>
<b>8.3. Konstrukční varianty .....</b>	<b>32</b>
<b>9. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ .....</b>	<b>34</b>
<b>9.1. Model materiálu.....</b>	<b>34</b>
<b>9.2. Model geometrie .....</b>	<b>34</b>
<b>9.3. Model diskretizace .....</b>	<b>35</b>
<b>9.4. Model okrajových podmínek.....</b>	<b>35</b>
<b>9.5. Model zatížení .....</b>	<b>36</b>
<b>9.6. Nastavení řešiče .....</b>	<b>37</b>
<b>9.7. Výsledky konstrukčních variant .....</b>	<b>37</b>
<b>9.8. Materiálové varianty .....</b>	<b>38</b>
<b>9.9. Výsledky materiálových variant .....</b>	<b>39</b>
<b>9.10. Rozteč uložení v čepech.....</b>	<b>39</b>
<b>9.11. Tvarová úprava vetknutí .....</b>	<b>40</b>
<b>9.12. Tvarová úprava listového pera.....</b>	<b>41</b>
<b>9.13. Úprava materiálu.....</b>	<b>43</b>
<b>9.14. Výsledky výpočtového modelování .....</b>	<b>45</b>
<b>10. VÝROBA PROTOTYPU .....</b>	<b>46</b>
<b>10.1. Příprava a výroba.....</b>	<b>46</b>
<b>10.2. Výpočet objemového podílu.....</b>	<b>48</b>

---

---

<b>11.</b>	<b>ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM .....</b>	<b>49</b>
11.1.	Výpočet modulu pružnosti v ohybu a napětí .....	52
<b>12.</b>	<b>SIMULACE ZKOUŠKY OHYBEM .....</b>	<b>53</b>
12.1.	Model materiálu.....	53
12.2.	Model geometrie .....	53
12.3.	Model diskretizace.....	54
12.4.	Model okrajových podmínek.....	54
12.5.	Model zatížení .....	54
12.6.	Výsledky simulace zkoušky ohybem .....	54
12.7.	Shrnutí poznatků z ohybové zkoušky a její simulace.....	55
<b>13.</b>	<b>APLIKACE NA VÝPOČTOVÝ MODEL NÁPRAVY .....</b>	<b>56</b>
13.1.	Měření průhybu nápravy a určení těžiště .....	56
13.2.	Úprava numerického modelu nápravy .....	57
13.3.	Výsledky výpočtového modelování upravené nápravy .....	58
13.4.	Shrnutí dosavadního postupu a zhodnocení prvního prototypu.....	60
<b>14.</b>	<b>DRUHÝ PROTOTYP .....</b>	<b>61</b>
<b>15.</b>	<b>NÁMĚTY NA DALŠÍ VÝVOJ .....</b>	<b>66</b>
<b>16.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>67</b>
<b>17.</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>68</b>
<b>18.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>70</b>
<b>19.</b>	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>71</b>
<b>20.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN .....</b>	<b>72</b>

## 1. ÚVOD

Již od svého vzniku v roce 1817 se jízdní kolo stalo nedílnou součástí lidských životů. Během svého téměř dvousetletého vývoje prošlo kolo mnoha změnami a postupně se z něj stal především prostředek k trávení volného času, s čímž souvisí i rozvoj alternativní cyklistiky. Lehokola přinesla do cyklistiky mnoho nového a jsou dnes vyhledávána pro své pohodlí a rychlost jízdy.

Lehokolo nabízí díky poloze cyklisty menší čelní plochu a tím pádem menší aerodynamický odpor. Z těchto důvodů drží výkony na lehokolech drtivou většinu všech rychlostních rekordů. Světový rychlostní rekord na rovném povrchu má v současnosti hodnotu 133,78 km/h. Sebastiaan Bowier ho dosáhl v Nevadské poušti na speciálním celokapotovaném lehokole. (Phys.org, 2013)

Tyto rekordy by však nepadly bez moderních technologií a materiálů. Kompozity jsou vyhledávaným materiálem pro špičkové stroje. Zejména uhlíkové kompozity si získaly oblibu pro vysokou hodnotu měrné tuhosti tj. kombinace nízké hmotnosti a vysoké tuhosti. Jejich nevýhodou avšak dodnes zůstává vysoká cena.

Lehokola se však uplatnila i na opačném konci řetězce. Oblíbili si je lidé, kteří s oblibou jezdí dlouhé trasy kolikrát i „na těžko“ tj. s plnými brašnami. Lehokolo jim totiž nabízí pohodlí, kterému klasické kolo nemůže konkurovat. Díky pozici cyklisty vleže totiž odpadají problémy s bolestmi hýždí.

V současné době se oblibě těší lehokola na třech kolech. Jsou vyhledávána pro pohodlí při dlouhých cestách a stabilitu za všech okolností. Dalším krokem ke zvýšení jejich komfortu je odpružení těchto tříkolek.

Tato práce je výsledkem spolupráce s firmou AZUB bike. V portfoliu jejich výrobků nalezneme tříkolku s odpruženým zadním kolem. Zbývajícím krokem je proto výroba celoodpruženého kola. Unikátní myšlenku, jak by by taková odpružená náprava měla vypadat, přinesl této práci konstruktér z firmy AZUB. Základním kamenem je nahrazení hliníkové trubky přední nápravy dvojicí kompozitních listových per. A právě přesun od myšlenky k funkční odpružené nápravě je náplní této práce.

Tuto práci jsem si zvolil kvůli své zálibě v cyklistice a také z důvodu, že výsledky výpočtového modelování je možné v poměrně krátké době srovnat s reálným měřením na prototypu. Cení si proto spolupráce s firmou AZUB, která umožnila, aby se výsledky této práce staly skutečností a jednoho dne, doufejme, i komerčně úspěšným produktem.



Obr. č. 1 První prototyp odpružené tříkolky

## 2. PROBLÉMOVÁ SITUACE

Firma AZUB vyrábí lehokola, a mimo jiné i tříkolky. V současném provedení nemá tříkolka odpruženou přední nápravu, což zhoršuje komfort uživatele. Z objektivních důvodů je žádoucí nápravu odpružit. Od této realizace si firma slibuje zvýšený odbyt a spokojenost zákazníků. Konstruktér firmy AZUB provedl konstrukční návrh nového provedení, v němž je odpružení realizováno zmenšením tuhosti ramen nápravy. Je žádoucí, aby tato konstrukce byla spolehlivá. K tomu je nutné provést deformačně napěťovou analýzu prvků přední nápravy, jejíž výsledky budou tvořit vstupy do posouzení možných mezních stavů. Výrobce projevil zájem realizovat parametrickou studii, přičemž parametry, které se mění, jsou konstrukční a materiálové provedení.

## 3. FORMULACE PROBLÉMU

- realizace parametrické konstrukční a materiálové studie pro účely určení deformačně napěťových stavů
- pevnostní posouzení navržených variant
- výběr vhodné varianty

## 4. CÍLE ŘEŠENÍ

- výpočet a posouzení poddajnosti a bezpečnosti modifikované kompozitní konstrukce nápravy při charakteristických zatíženích
- návrh konstrukčních úprav, vedoucích k vhodnému odpružení kola.
- případná výroba prototypu přední nápravy ve spolupráci s firmou AZUB BIKE s.r.o. a Leteckým ústavem FSI.
- experimentální ověření výsledků získaných teoretickým přístupem.

## 5. PŘEHLED ODPRUŽENÍ SOUČASNÝCH VÝROBCŮ

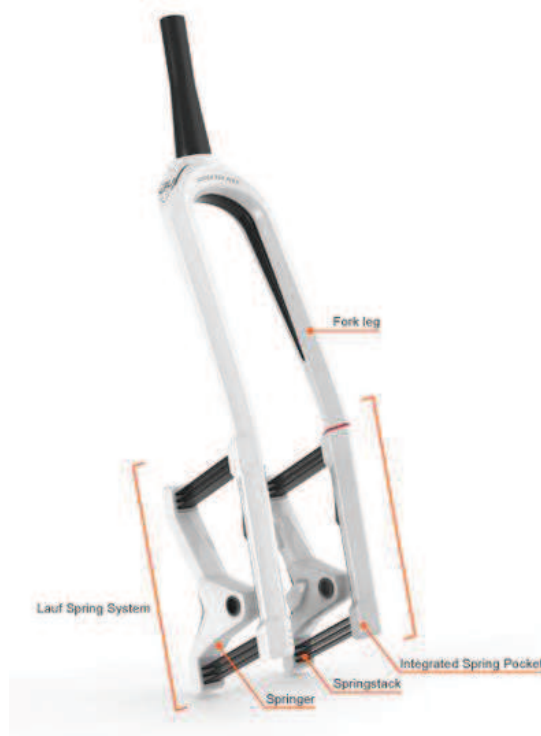
Na následujících stranách jsou příklady, jak řeší odpružení přední nápravy jiné firmy zaměřující se na výrobu lehkol. Jedná se o výběr výrobců zachycující nejrozšířenější konstrukční varianty odpružení přední nápravy, potažmo celé tříkolky. Jako první uvádím příklad odpružení klasického jízdního kola na podobném principu, jako je odpružení firmy AZUB.

### 5.1. Vidlice Lauf TR29

S nápadem na revoluční konstrukci odpružené vidlice přišli roku 2010 na Islandu Benedikt Skulason a Gudberg Björnsson. Konstrukce eliminuje jakékoli pohyblivé části a tření. Celá vidlice je z uhlíkového kompozitu a odpružení je realizováno pomocí listových per ze skelné výztuže. Hmotnost klasických odpružených vidlic pro kola o průměru 29 palců se pohybuje od 1500g u nejlehčích vidlic. Hmotnost vidlice Lauf je 990g a hmotnost neodpružené části je 200g. Tato hmotnost není dosažena bez kompromisů. Zdvih vidlice je 60mm, což ovšem některým cyklistům postačuje, a je omezen mechanickým dorazem. Vidlice neumožňuje jakékoli nastavení ani uzamčení a vyrábí se proto ve dvou variantách – pro cyklisty do 70kg a nad 65kg. Obě varianty jsou pevnostně omezeny hmotností cyklisty do 110kg.

Konstrukce spoléhá na čtyři trojice planžet ze skelného kompozitu, který je dostatečně pružný. Jsou uloženy v kapsách integrovaných ve vidlici. Spojení je trvalé a planžety jsou tím pádem oboustranně vetklé. Průběh pružení je lineární s výraznou progresí ke konci zdvihu.

Vidlice Lauf nabízí mimořádně nízkou hmotnost pro cyklisty, kteří se spokojí s menším zdvihem. Její konstrukce je zcela jedinečná a využívá naplno vlastností kompozitních materiálů. Cena této unikátní vidlice je 990\$. Více informací je na stránkách výrobce <http://www.laufforks.com/>. (Zpracováno dle: Lauf forks)



Obr. č. 2 Vidlice Lauf  
Zdroj: Lauf Forks

## 5.2. Icetrikes company Sprint

Firma ICE (Inspired Cycle Engineering) byla založena roku 1998. Převzala výrobu tříkolky Trice, která se vyráběla již od roku 1986. Tato anglická firma vyvinula mnoho modelů tříkolek a od roku 2010 nabízí 3 modely tříkolek v mnoha variantách.



Obr. č. 3 Tříkoka ICESprint FSX

Zdroj: *Recumbent Trikes - ICE*

Nejbližším zástupcem celoodpružených tříkolek je ICE Sprint FSX. Je postavena na 20palcových kolech s rozchodem 762 mm a vybavena kotoučovými brzdami. Zadní odpružení pracuje se 100 milimetry zdvihu, přední odpružení obstarává 40 mm. Odpružení je realizováno na konci sloupku řízení, takže hlavní křížová trubka zůstává pevná. Sloupek přechází v profil tvaru písmene C, na jehož konci je umístěn paralelogram. Ten zajišťuje neměnnost úhlů řízení při zdvihu předních kol. Konec paralelogramu stlačuje elastomer vložený do sloupku řízení.

Firma ICE nabízí tři varianty výměnných elastomerů různé tuhosti pro potřeby různých jezdců. Použití elastomerů má výhodu v jejich inherentním tlumení. Výhoda tohoto systému spočívá rovněž v tom, že i při intenzivním brzdění nedochází ke stlačení elastomeru. Pružení a brzdění jsou tedy na sobě nezávislé. Nevýhodou je poměrně velké množství pohyblivých částí, a s tím související větší náročnost údržby.

V závislosti na variantě, cena začíná na €4.397,74. Více informací je k dispozici na oficiálních stránkách výrobce <http://www.icetrikes.co>. (Zpracováno dle: *Recumbent Trikes - ICE*)



Obr. č. 4 Detail nápravy ICESprint

Zdroj: Warren, 2011, The Recumbent & HPV Information Center

### 5.3. HP Velotechnik Scorpion fs

Německá firma HP Velotechnik OHG se specializuje na výrobu lehokol již více než 20 let. V současnosti nabízí 7 základních modelů v několika variantách, z nichž u dvou modelů jde o tříkolky.



Obr. č. 5 HP Velotechnik Scorpion fs 20

Zdroj: Liegerad, HP Velotechnik Liegeraeder, 1993-2014

K porovnání přichází v úvahu model Scorpion fs, a to konkrétně varianta Scorpion fs 20. Jeho sesterská varianta s 26 palcovým zadním kolem se stala lehokolem roku 2013 dle online magazínu BentRider online. Jde o celoodpruženou tříkolku se všemi koly o průměru 20 palců s rozchodem 780 mm a kotoučovými brzdami. Zadní odpružení obstarává 80 mm zdvihu, přední náprava operuje s 60 milimetry. Přední odpružení je typu Mac Pherson. Využívá jak vinuté pružiny, tak elastomeru. Jejich výměnou za jiný typ je pak možno přizpůsobit odpružení potřebám jezdce. Celoodpružené tříkolky HP Velotechnik jsou vybaveny stabilizačním systémem ve tvaru vidlicovité ptačí kosti (wishbone). Ten propojuje odpružení pravé a levé nápravy a zamezuje tak přílišnému náklonu v zatáčkách. Rovněž také omezuje zanoření při intenzivním brzdění. Funguje na principu zkrutné tyče, která je v kontaktu s podpěrou nápravy v blízkosti kol.

Cena základní varianty modelu Scorpion fs je € 3.690,00. Více informací je k dispozici na oficiálních stránkách výrobce <http://www.hpvelotechnik.com>. (Zpracováno dle Liegerad, HP Velotechnik Liegeraeder, 1993-2014)



Obr. č. 6 Detail nápravy Scorpion fs

Zdroj: Liegerad, HP Velotechnik Liegeraeder, 1993-2014

## 5.4. Windcheetah Hypersport

Již 30 let vyrábí firma Advanced Velo Design Windcheetah lehokola-tříkolky. V současnosti nabízí tři modely silničních tříkolek.



Obr. č. 7 Windcheetah HyperSport

Zdroj: Windcheetah HPV, 2013

V rámci srovnání připadá v úvahu model HyperSport. Jde o silniční lehokolo pro nejnáročnější jezdce. Důraz byl kladen na minimální hmotnost. Rám je vyroben z uhlíkového kompozitu, který přinesl dvacetiprocentní úsporu hmotnosti proti modelu ClubSport. Nejedná se o klasickou odpruženou tříkolku v pravém smyslu slova. Celý rám je bez odpružení, odpružena je pouze sedačka. Právě toto unikátní uložení sedačky je důvodem zařazení do této rešerše. Jedná se o využití kompozitního materiálu v podobě listové pružiny. List i sedačka je vyrobena z uhlíkového kompozitu a u tohoto modelu se jedná o standartní výbavu. List pružiny je k hlavní trubce připevněn uprostřed dvěma šrouby pomocí upínacího dílu, který umožňuje posuv pro nastavení sedačky. Průhyb listu pak zprostředkovává pohodlí jezdce při průjezdu nerovnostmi. Výhodou tohoto systému je absence jakýchkoliv částí, které by se mohly opotřebovat a odpružení zůstává bezúdržbové po celou dobu života tříkolky. Nevýhodou je schopnost pohltnout pouze malé rázy.

Cena modelu Windcheetah HyperSport začíná na € 5,177,86. Více informací je k dispozici na oficiálních stránkách výrobce <http://www.windcheetah.co.uk>. (Zpracováno dle Windcheetah HPV © 2013)



Obr. č. 8 Detail odpružení HyperSport

Zdroj: Windcheetah HPV, 2013

### 5.5. Steinrikes Mungo

Firma Steinrikes byla založena roku 2000 a od roku 2004 spolupracuje s firmou Bike Revolution, která se stala distributorem pro Evropu a spolupracuje na návrhu tříkolek. Jejich nabídka tříkolek obsahuje 11 modelů, přičemž nejznámějším je terénní model MadMax.



Obr. č. 9 Steinrikes Mungo

Zdroj: Steinrikes, 2009

Na základě tříkolky MadMax staví i model Mungo. Jde o terénní tříkolku s širším rozchodem kol o rozměru 20 palců. Kotoučové brzdy na všech kolech, zdvih 85 milimetrů na přední nápravě a 75 milimetrů na zadní poskytuje dostatek prostor pro jízdu mimo cesty. Paralelogram přední nápravy je svařen z tenkých, za studena tažených trubek. Diagonálně mezi nimi jsou umístěny pružící a tlumící prvky. Výhodou těchto tlumičů je jejich standardní použití u celoodpružených kol a tím pádem větší výběr a nižší cena. Výhodou této konstrukce je možnost dosáhnout velkého zdvihu nápravy. Nevýhodou je velké množství pohyblivých součástí a vysoká hmotnost. Dalším mínusem je naprostá nezávislost pravé a levé části nápravy. To sice umožňuje pohodlnější jízdu v těžkém terénu, nevýhodou je však poddajnost v zatáčkách, a s tím související nevíтанé vyklánění jezdce při ostrém zatáčení a propadání do zdvihu při brzdění.

Cena modelu Mungo začíná na € 3,590.00. Více informací je k dispozici na oficiálních stránkách výrobce <http://www.steinrikes.net>. (Zpracováno dle: Steinrikes, 2009)



Obr. č. 10 Detail nápravy Mungo

Zdroj: Steinrikes

## 6. TŘÍKOLKA AZUB TRICON

Tříkolka firmy AZUB využívá koncepci známou pod anglickým názvem tadpole – tedy koncepce se dvěma koly vpředu a jedním vzadu. Všechna kola jsou průměru 20 palců, rozvor je 1120 mm. Celková délka je minimálně 1780 mm, celková šířka 830 mm a celková výška je minimálně 760 mm. Hmotnost tříkolky je 17 kg a je dimenzována pro zatížení do 125 kg.

Rám je svařen z hliníkové slitiny, přičemž hlavní nosný prvek tvoří ohýbaná trubka o průměru 60 mm. Zadní náprava je odpružená a operuje se zdvihem 100 mm. Výška sedačky od země je 310 mm, výška šlapacího středu 380mm.

Řízení je nepřímé, řídítka jsou uchycena pod hlavní rámovou trubkou a přenos sil na poloosy je realizován pomocí táhel a kulových čepů. Řídítka je možné otočit pro optimální úchop. Minimální poloměr otáčení je 5 metrů.

Firma Azub klade důraz na široké možnosti nastavení posedu. Šlapací střed je možné posunovat v rozmezí 200 mm. Sedačka je posouvateľná o 180 mm a opěradlo je možné nastavit v úhlu 20-50° vůči zemi. Tříkolka je díky těmto možnostem nastavení vhodná pro osoby vysoké od 145 cm do 195 cm.

Tříkolka je snadno složitelná do kompaktních rozměrů. Pro přepravu autem je možné ji rychle složit napůl během několika vteřin po sundání sedačky. Rozměry složené tříkolky jsou 113x83x50 cm. Tříkolku lze však složit ještě kompaktněji. Po odmontování kol lze rám složit až na rozměry 61x71x34 cm. Pro snadné skládání jsou všechny spoje upevněny pomocí rychloupínáků.

(Zpracováno dle *AZUB BIKE*)



Obr. č. 11 Azub Tricon

Zdroj: AZUB BIKE

Na respektovaném internetovém portále o lehkokolech <http://www.bentrideronline.com> najdeme recenzi od hlavního vydavatele Bryan J. Ball (*BentRider Online*, 2014):

„This is Azub’s top of the line three wheeler and it has blown people away with it’s easy fold, super stiff chassis and superb handling. I’ve heard at least three recumbent dealers and/or dealer employees call it “the best handing trike I’ve ever ridden.”“

## 7. KOMPOZITY

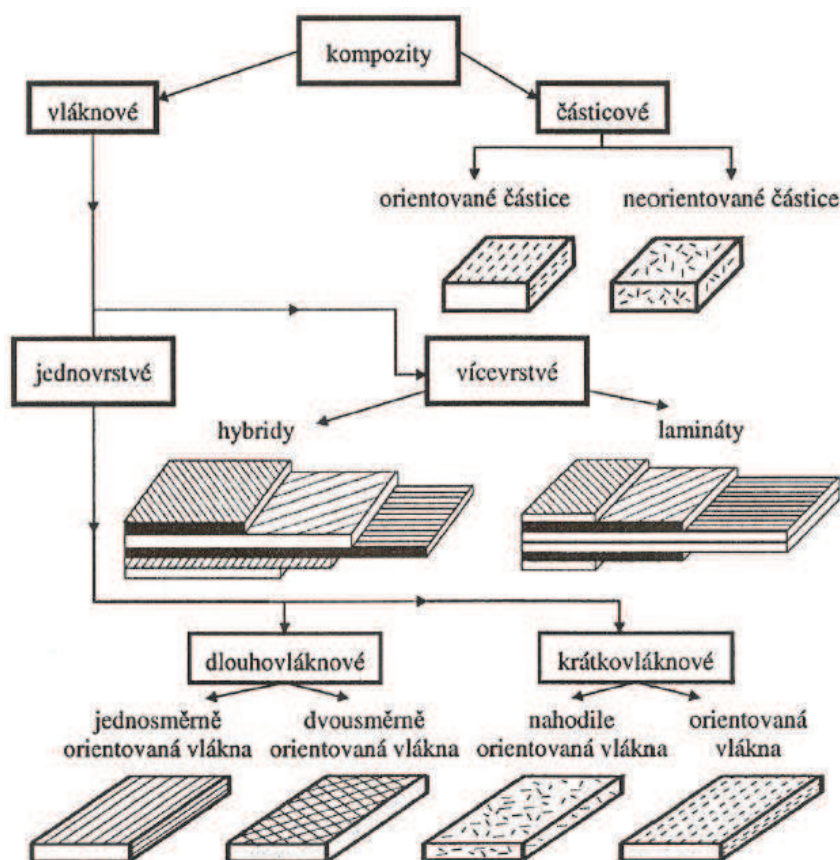
„Kompozitní materiály (kompozity) jsou složené materiály, skládající se ze dvou či více složek, z nichž každá plní jinou specifickou funkci a má jiné materiálové vlastnosti, většinou značně odlišné.“ (Vrbka, 2008, s. 5)

A structural composite is a material system consisting of two or more phases on a macroscopic scale, whose mechanical performance and properties are designed to be superior to those of the constituent materials acting independently. (Daniel I., Ishai O, 1994, s. 3)

Pro mnoho lidí symbolizuje slovo kompozit moderní technologie, laboratoře a vynálezy posledních pár let. Kompozitní materiál však není výsadou moderní doby. V podobě hliněných cihel vyztužených slámou je znám již z doby starověkého Egypta. V 19. století byly využívány železné tyče vkládané do zdiva, které vedly k vývoji železobetonu. Počátky vlákniny vyztužovaných plastů spadají do začátku 20. století vynálezem bakelitu. Koncem 70 let minulého století se kompozitní materiály v podobě, jak je známe i dnes, dočkaly značného rozšíření v oblastech letectví, automobilismu, sportovních potřeb a mnoha dalších. V současné době jsou zejména dlouhoválnové kompozity využívány všude tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na mechanické vlastnosti v daných směrech a nízkou hmotnost produktu.

Kompozity se skládají nejméně ze dvou složek. Jedna z nich je nosná část – výztuž. Ta není kontinuální a je charakteristická vyšší tuhostí a pevností. Druhá část – matrice - je poddajnější a méně pevná.

U kompozitů, které jsou konstruovány pro nízké zatížení, obvykle najdeme menší procento výztuže. V těchto případech je obvyklé použití částicového nebo krátkoválnového kompozitu. Výztuž zde dopomáhá k mírnému zlepšení mechanických vlastností, ale hlavní nosnou částí je matrice. Pro významně zatěžované díly je charakteristické vysoké procentní zastoupení výztuže, nejčastěji ve formě dlouhých vláken. Vlastnosti vláken pak dominují v mechanických vlastnostech kompozitu jako celku a slouží k přenosu zatížení. Matrice pak plní funkci přenosu zatížení mezi jednotlivými vlákny.



Obr. č. 12 Rozdělení kompozitních materiálů

Zdroj: Laš V., 2004

## 7.1. Výhody a nevýhody kompozitů

Kompozitní materiály mají mnoho výhod, ale i nevýhod proti konvenčním materiálům. Mezi největší výhody patří vysoká pevnost, tuhost, nízká hmotnost, odolnost vůči únavovému poškození, a zejména možnost úpravy kompozitu pro konkrétní aplikaci. Za vysokou pevností a tuhostí kompozitů stojí vlákna. Například uhlíková nebo borová vlákna vykazují vyšší tuhost než ocel, přičemž jsou několikanásobně lehčí. Díky tomu je možné vyrábět díly stejné tuhosti, které mají výrazně nižší hmotnost. Jejich nevýhodou je velký rozptyl v jejich mechanických vlastnostech v hlavních materiálových směrech a značná křehkost. Ta je snižována použitím houževnaté matrice, která zajišťuje přenos zatížení na vlákna.

Významou vlastností KM je jejich anizotropie, tzn. závislost jejich materiálových charakteristik na směru. Úspěšné použití kompozitu se pojí právě se schopností využít směrové vlastnosti v prospěch aplikace. Naplno využít vlastností kompozitu je možné pouze tam, kde dopředu známe směr zatížení, a zejména pak tam, kde dominuje zatížení v jednom směru. V aplikacích, kde je zatížení značně směrově proměnlivé a hmotnost nehraje primární roli, se zpravidla použití dlouhovláknových kompozitů nevyplatí. S anizotropií souvisí obtížnost navrhování takových součástí. Z hlediska jednoduchosti použití je jasně výhoda na straně klasických homogenních a isotropních materiálů.

Vyrobít jednoduchý kompozit je možné i v domácích podmínkách za pomoci jednoduchých nástrojů. Vyrobít specifický KM o daných vlastnostech je již náročnější. Pro odlišné aplikace bylo vyvinuto množství výrobních procesů od ruční laminace, přes navíjení, vytlačování, vytvrzování v autoklávu, až po lisování v přípravku. Nevýhodou zůstává množství ruční práce zkušených lidí a limity automatizace procesu. Výhodou je v závislosti na výrobním procesu minimální, případně i nulový odpad. S výrobou je spojena i cena. Zde je možné pozorovat velký kontrast mezi klasickými a kompozitními materiály. U klasických materiálů, jako například oceli, je cena surovin nízká. Významnou položkou jsou náklady na obrábění, které hrají v ceně výrobku dominantní roli a náklady na montáž. Náklady kompozitních materiálů tvoří z velké části vysoké ceny jednotlivých komponent. Naopak náklady na obrábění bývají nízké. Z kompozitů je možné vytvořit komplexní tvary, které snižují počty spojů, a s tím spojené náklady na montáž. Vzhledem k úspoře hmotnosti se dále můžou ukázat jako cenově výhodnější během provozu technického díla.

## 7.2. Použití kompozitních materiálů

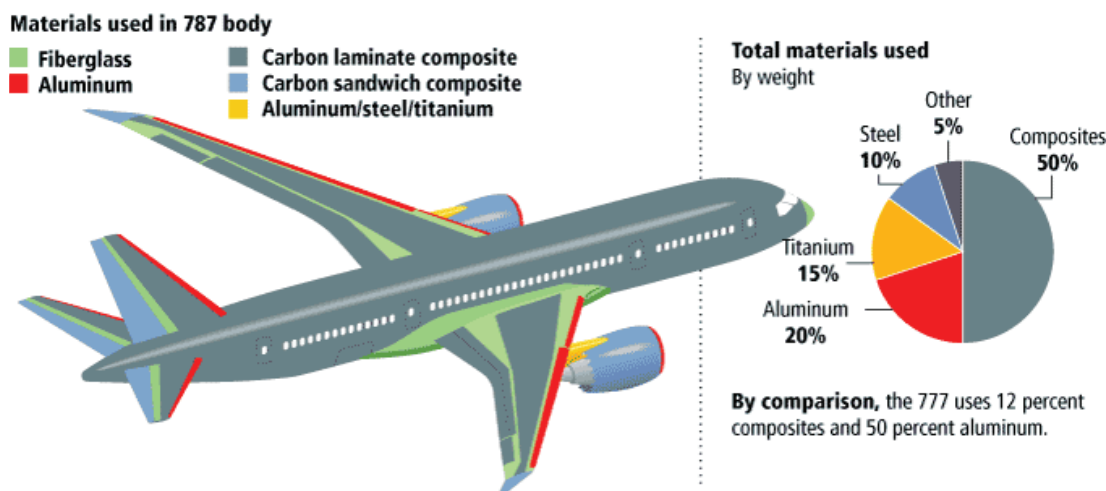
V dnešní době již téměř každá větší letecká společnost vyrábí některé díly z dlouhovláknových kompozitních materiálů. Jsou vyhledávány pro výborný poměr pevnosti ku hmotnosti již od roku 1960. „Pokud budeme předpokládat, že hmotnost konstrukce letadla je přibližně 50% vzletové hmotnosti, pak zbývajících 50% musí být rovnoměrně rozděleno mezi náklad a potřebné palivo a maziva. Snížením hmotnosti konstrukce letadla o 10% vzroste náklad o 20%. Toto je velká výhoda pro rentabilitu letadla a důležitý základ pro průkopníky v letecké konstrukci při použití vláknových kompozitů.“ (R&G, 2009)

V součastnosti je ukázkovým příkladem použití kompozitů Boeing 787 Dreamliner.

### 7.2.1. Boeing dreamliner

Boeing 787 se stal komerčně nejúspěšnějším dvoumotorovým letadlem již 5 let před prvním zkušebním letem. Ten se konal 15. prosince 2009. Letadlo má o 20% nižší spotřebu paliva a unese o 20-45% zavazadel oproti podobně velkým letadlům. O tento velký vzrůst

charakteristik se mimo jiné postaralo rozsáhlé využití kompozitních materiálů. Až 50% hmotnosti letadla tvoří kompozity. Proti konvenčnímu hliníkovému stroji se ušetřilo přibližně 20% celkové hmotnosti.



Obr. č. 13 Použití materiálů na Boeingu 787

Zdroj: Modern Airlines

Použití kompozitů nešetří pouze na hmotnosti. Intervaly mezi servisními úkony se prodloužily z důvodu menšího korozního a únavového poškození. Jednotlivé úseky trupu se nyní vyrábějí z jednoho kusu, a tím odpadá montáž a údržba přibližně 1500 hliníkových plechů a 40000-50000 kusů spojovacího materiálu na každý úsek. Pro opravy kompozitních konstrukcí, které za normálních podmínek trvají přibližně 24 hodin z důvodů tvrdnutí pryskyřice, vyvinula firma Boeing speciální technologii umožňující provést dočasnou opravu během jedné hodiny. Kromě tohoto setu pro rychlé opravy je možné provádět opravy stejným způsobem, jako je tomu u běžných letadel, a to pomocí nýtovaných spojů. Z důvodu obrovského zájmu o nové stroje jsou Boeingy 787 vyráběny s historicky největší četností. V současnosti je vyrobeno 10 kusů každý měsíc a objednáno je zatím 1030 letadel pro 60 zákazníků po celém světě. (Zpracováno dle: Everett & Wash a Boeing,2008)

### 7.2.2. Další využití

V automobilním průmyslu se dočkal dlouhodobého úspěchu model Chevrolet Corvette, jehož karoserie je již od roku 1953 vyráběna ze skelných vláken. Na stejném modelu byly roku 1981 nahrazeny ocelové pružiny podvozku vážící 18,6 kg kompozitními, které vážily pouze 3,7 kg (Zpracováno dle: Wood, 2014). V současnosti dochází ke stále hojnějšímu použití zejména uhlíkových kompozitů na sportovních vozech. Běžně užívané jsou kompozitní střechy či kapoty vozů.

V komeční sféře se kompozity uplatnily zejména ve sportovní výbavě. Například rybářské pruty vyrobené ze skelných vláken se od roku 1940, kdy se začaly vyrábět, staly během 20 let standartem. Dalšími objekty, ve kterých našla skelná vlákna uplatnění, byly lodě, tenisové rakety nebo surfová prkna. „Nákladnější vláknové systémy jako například bor-epoxid nebo uhlík-epoxid jsou používány v golfových holích a tenisových raketách přes jejich vysokou cenu, protože vysoce soutěživí spotřebitelé jsou značně chtiví a dokonce nadšení k utrácení většího množství peněz na ‘exotické’ vláknové systémy, které by jim mohly dodat ‘ostrot’ v jejich hře. Ve skutečnosti, brzké použití uhlík-epoxid kompozitu na golfové hole bylo významným faktorem v rozšíření použití na vojenských letadlech, protože zvýšené vyrobené množství uhlíku a epoxidu snížilo cenu pro všechny uživatele.“ (Jones, 1999, s. 52)

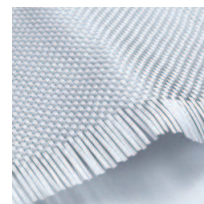
### 7.3. Volba materiálu:

Pro výrobu listových pružin pro potřebu odpružení přední nápravy tříkolky AZUB byl zvolen kompozitní dlouhvláknový dvousložkový materiál s nekovovou anorganickou výztuží ve formě tkaniny a nekovovou polymerní matricí. Materiál byl volen s ohledem na možnost výroby ve spolupráci s leteckým ústavem.

#### 7.3.1. Volba výztuže

Nejběžnějšími výztužemi jsou:

Skelná vlákna – E-sklo je nejběžnějším materiálem pro vláknové kompozity. V porovnání s ostatními druhy výztuže má nízkou cenu. Má vysokou pevnost, dobrou chemickou odolnost a odolává teplotám až do 400°C. Skelná vlákna mají v porovnání s ostatními vláknovými výztužemi nižší modul pružnosti, nicméně jejich kritické přetvoření je větší.



Obr. č. 14 Skelná tkanina

Zdroj: Bikeoff Design Resource, 2008

Uhlíková vlákna – Uhlíková vlákna vykazují vyšší modul pružnosti, vyšší pevnost a menší hustotu oproti skelné výztuži. Dále mají vynikající únavové vlastnosti. Nepříjemnou vlastností je vyšší citlivost k nárazům a křehkost. Neměly by proto být používány bez patřičné ochrany (např. aramidová vrstva) tam, kde hrozí vysoké riziko nárazů. Další nevýhodou je vysoká cena. V současné době je nutné poznamenat, že uhlíkové kompozity mají jakýsi punc exkluzivity a mnozí lidé při pohledu na lesklý černý povrch přehodnotí své cenové možnosti.



Obr. č. 15 Uhlíková tkanina

Zdroj: Bikeoff Design Resource, 2008

Aramidová vlákna – Aramidová vlákna jsou vyhledávána pro své mimořádně dobré rázové vlastnosti, odolnost proti otěru a velké tlumení. Z toho důvodu se používají na náběžné hrany letadel a vrtulové listy helikoptér. Vlákna s obchodním názvem Kevlar jsou používány pro výrobu neprůstřelných vest. Aramidová vlákna vykazují mírně vyšší tuhost a pevnost proti skelným vláknům. Za zmínku rovněž stojí jejich výborná chemická odolnost a nízká hustota. Nevýhodou je poměrně vysoká cena, vysoká pohltivost vody a obtížná práce s tkaninou – zapotřebí jsou speciální nůžky ke stříhání.

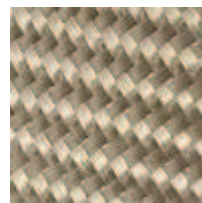


Obr. č. 16 Aramidová tkanina

Zdroj: Bikeoff Design Resource, 2008

Čedičová vlákna – Čedičová vlákna mají mírně vyšší modul pružnosti a pevnost než vlákna skleněná. Mezi další přednosti patří chemická a teplotní stabilita. Z toho důvodu jsou trubky z čedičového kompozitu používány pro přepravu korozivních tekutin a plynů. Čedičová vlákna vykazují vynikající izolační vlastnosti a to jak teplotní, tak elektrické a zvukové. Kompozity rovněž vykazují výborné únavové vlastnosti a mezi jejich velké výhody

patří i nízká absorpce vody. Nevýhodou této výztuže je mírně vyšší cena ve srovnání se skelnými vlákny a také fakt, že čedičová vlákna nejsou zdokumentována tak podrobně jako například vlákna skleněná nebo uhlíková. Z toho pramení i nejistoty o materiálových vlastnostech výsledného kompozitu. Snad poslední výhodou čedičových vláken je jejich přírodní původ. Vlákna vznikají tavením čediče a při jejich výrobě nevznikají nebezpečné toxické látky jako při výrobě například skelných vláken.



Obr. č. 17 Čedičová tkanina

Zdroj: SMARTER BUILDING SYSTEMS, 2010

### 7.3.2. Volba matrice

Mezi matricemi převládají dva typy:

**Polyesterové pryskyřice** – Polyesterové pryskyřice jsou zvláště při výrobě lodí nejpoužívanější. Největším pozitivem je jejich nízká cena. Vykazují dobrou smáčivost skelných vláken, ale vazba je v porovnání s epoxidovou pryskyřicí slabší. Nemodifikované nenasyčené polyesterové pryskyřice jsou křehké, snadno v nich vznikají trhliny a vykazují velké smrštění při vytvrzování. K přípravě pryskyřice je potřeba přimíchat další látky v přesném množství. Jsou to: katalyzátor a urychlovač k řízení reakce a dosažení co nejlepších vlastností a případné aditiva pro speciální aplikace. Nepříjemnou vlastností při výrobě je silný zápach pryskyřice.

**Epoxidové pryskyřice** – Epoxidové pryskyřice mají nejlepší mechanické vlastnosti mezi ostatními pryskyřicemi. To je předurčuje k použití u vysoce namáhaných dílů. Další vítanou vlastností je vysoká odolnost vůči vodě. Při přípravě epoxidové pryskyřice je nutné dodržet poměr míchání s tvrdidlem. Volbou tvrdidla je možné prodloužit nebo zkrátit dobu, po kterou je možné s pryskyřicí pracovat. Doba, za kterou bude pryskyřice vytvrzena lze řídit teplotou. Při zvýšení teploty při vytvrzování o 10°C se potřebná doba zkrátí zhruba na polovinu. Vytvrzování za zvýšených teplot mírně zvyšuje konečné mechanické vlastnosti výrobku. Největší nevýhodou epoxidových pryskyřic je jejich vysoká cena.

Pro účely zhotovení prvního prototypu byla zvolena kombinace skelné výztuže a epoxidové pryskyřice. Sklo bylo zvoleno pro nízkou cenu, dostatečné mechanické vlastnosti vzhledem k aplikaci a vyšší houževnatosti oproti uhlíku. Epoxidová pryskyřice byla zvolena automaticky z toho důvodu, že je v laboratoři pro výzkum kompozitních materiálů Vysokého učení technického k dispozici. S touto kombinací navíc mají lidé z Leteckého ústavu bohaté zkušenosti.

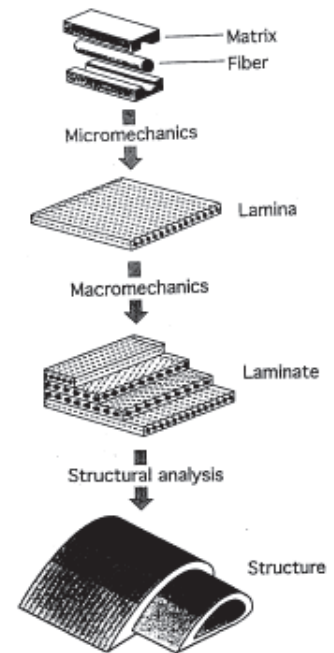
Pro druhý prototyp prezentovaný na německé výstavě Spezi 2014 byla použita čedičová výztuž. Ta má podobné vlastnosti jako výztuž skelná. Vzhledem k tomu, že tříkolka bude takto poprvé představena, je nutné aby i designově náprava odpovídala kolu. Použití čedičových vláken zajišťuje jednak tmavou barvu a také větší důraz na ekologii výsledného produktu.

## 7.4. Popis materiálu

Práce s kompozitními materiály vyžaduje odlišný postup od práce s homogenními izotropickými materiály.

„Izotropní, lineárně pružný materiál je určen lineárními závislostmi složek tenzoru napětí a přetvoření, které obsahují dvě nezávislé charakteristikami pružnosti  $E\mu$ .“ (Janiček, Ondráček, Vrbka a Burša, 2004, s. 36)

Pokud chceme znát chování tělesa, je nutné začít od vlastností jednotlivých složek. Ty jsou zjištěny z materiálových zkoušek. Z těchto je možné posoudit chování jedné vrstvy na základě jednoduchých modelů a aplikace mikromechaniky. Následuje přestup do mechaniky kontinua, kde je s každou vrstvou počítáno jako s homogenní strukturou. Dalším podstatným krokem je navržení skladby kompozitu. Na základě znalostí o vrstvení laminátu je pak možno zjistit chování celého laminátu a následně i tělesa jako celku. Pro jednoduchá tělesa jako např. deska nebo stěna lze funkce pružnosti vyjádřit v uzavřeném tvaru. V případě složitějších tvarů přichází na řadu metoda konečných prvků.



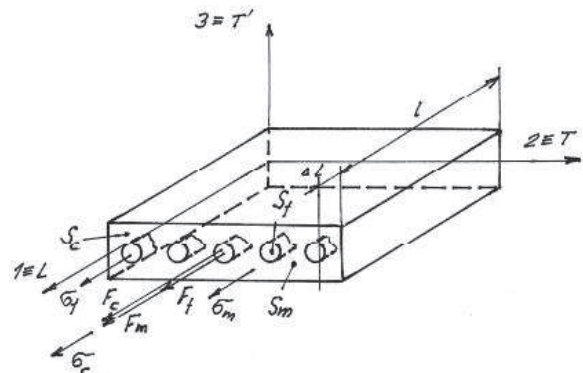
Obr. č. 18 Schéma postupu

Zdroj: Daniel I., Ishai O., 1994, s.38

## 7.5. Základní vlastnosti vrstvy (laminy)

Pro dlouhovláknové kompozity je typickou vlastností směrovost materiálových charakteristik, čili anisotropie. Pro každou jednotlivou vrstvu můžeme rozeznat tři kolmé hlavní materiálové směry, ve kterých se materiál chová isotropicky. Takový materiál označujeme jako orthotropický. (Janiček, Ondráček, Vrbka a Burša, 2004)

V případě, že se jedná o jednosměrně vyztužený kompozit, mluvíme o směru longitudálním, ve směru vláken. Dva směry transversální – kolmé na vlákna. V případě použití tkané výtzuže rozeznáváme směr osnovy – nejdelší vlákna ve směru nejdelší strany pásu tkaniny, směr útku – kratší vlákna a transversální směr – kolmý na vlákna. Tyto směry se nazývají hlavní materiálové směry a označují se čísly 1,2,3. Tyto hlavní směry jsou obecně odlišné od hlavních směrů napětí a přetvoření. Je-li v dalším textu zmíněn hlavní směr, je tím myšlen hlavní materiálový směr. Orthotropický materiál má 9 nezávislých materiálových charakteristik. Jsou to tři moduly pružnosti v tahu  $E_1, E_2, E_3$ , tři Poissonovy čísla  $\mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{13}$  a tři moduly pružnosti ve smyku  $G_{12}, G_{23}, G_{13}$ . Pro vyváženou tkaninu, která má stejný počet vláken v osnově i útku je možné pomocí symetrie zredukovat počet neznámých na 6 nezávislých proměnných.



Obr. č. 19 Souřadný systém kompozitu

Zdroj: Vrbka, 2008, s. 17

Pro popis materiálu je nejprve nutné objasnit následující značení:

$E_1$  modul pružnosti v tahu ve směru 1 (longitudální)

$G_{12}$  modul pružnosti ve smyku mezi směrem 1 a 2

$\mu_{12}$  Poissonovo číslo, první index označuje směr zatížení, druhý pak směr přetvoření

indexy m označují matici ( $v_m, M_m$ ), indexy f označují vlákna ( $v_f, M_f$ ), indexy c označují kompozit ( $v_c, M_c$ ).

$$v_f = \frac{\text{objem vláken}}{\text{objem kompozitu}} \text{ objemový podíl vláken}$$

Na základě jednoduchých modelů je možné určit charakteristiky jedné vrstvy jednosměrného dlouhovláknového kompozitu. Tyto charakteristiky jsou ve formě směšovacích pravidel a předpokládají dokonalou adhezi mezi složkami. Pro jednoduchost je předpokládán dvousložkový kompozit.

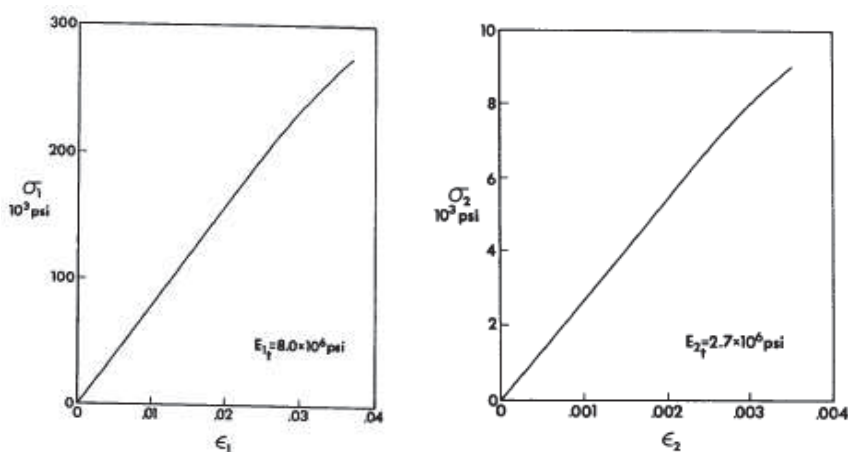
### 7.5.1. Podélný modul pružnosti v tahu a Poissonovo číslo

Vztah pro modul pružnosti kompozitu  $E_1$  vychází ze silové rovnováhy v podélném směru.

$$E_1 = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m$$

kde  $E_f$  je modul pružnosti vláken,  $E_m$  je modul pružnosti matrice,  $v_f$  je objemový podíl vláken a  $v_m = 1 - v_f$  je objemový podíl matrice

Jak je ze vztahu vidět, podélný modul pružnosti kompozitu je především závislý na vlastnostech vláken. Typický tahový diagram pro dobře navržený kompozit je na obrázku níže (podélný směr vlevo, příčný směr vpravo).



Obr. č. 20 Záznam zkoušky tahem kompozitu sklo-epoxid

Zdroj: Jones, 1999, s. 486-487

Z grafu je patrné, že kompozity s dostatečně tuhou výztuží mají lineární odezvu na zatížení až do lomu.

Podobný vztah jako je pro modul pružnosti kompozitu platí pro Poissonovo číslo  $\mu_{12}$

$$\mu_{12} = \mu_f \cdot v_f + \mu_m \cdot v_m$$

Kde  $\mu_f$  je Poissonovo číslo vláken a  $\mu_m$  je Poissonovo číslo matrice

### 7.5.2. Příčný modul pružnosti v tahu a modul pružnosti ve smyku

Vztah pro příčný modul v tahu vychází z předpokladu stejného napětí napříč kompozitem. Za předpokladu lineárního chování všech komponent pak dostáváme pro příčný modul v tahu  $E_2$ :

$$\frac{1}{E_2} = \frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m}$$

Obdobnou formu má také vzorec pro modul pružnosti ve smyku  $G_{12}$ :

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{v_f}{G_f} + \frac{v_m}{G_m}$$

Kde  $G_f$  je modul pružnosti ve smyku vláken a  $G_m$  je modul pružnosti ve smyku matrice

Všechny tyto vztahy jsou odvozeny z výrazně zjednodušených modelů a platí pro ideální materiál s dokonalou adhezí bez poruch. Některé vztahy předpokládají lineární chování všech komponent. Z toho důvodu je nutné brát na tyto omezující předpoklady zřetel. Zde slouží pro náhled do struktury materiálu a jako vodítko pro úpravy materiálu.

### 7.5.3. Podélná pevnost v tahu

Za předpokladu stejného podélného přetvoření je pomocí směšovacího pravidla pro napětí možno definovat pevnost kompozitu v tahu  $\sigma_{p1}$ .

$$\sigma_{p1} = \sigma_{pf} \cdot v_f + \sigma_{m,\varepsilon_{f,krit}} \cdot (1 - v_f)$$

kde  $\sigma_{pf}$  je pevnost vláken v tahu a  $\sigma_{m,\varepsilon_{f,krit}}$  je napětí v matrici odpovídající stavu, kdy praská vlákno

Pokud je modul pružnosti vláken výrazně vyšší, než modul pružnosti matrice, je možné rovnici dále zjednodušit na:

$$\sigma_{p1} = \sigma_{pf} \cdot v_f$$

### 7.5.4. Příčná pevnost v tahu

Nielsenův vztah pro příčnou pevnost kompozitu vychází z kritického přetvoření matrice  $\varepsilon_{2,krit}$ .

$$\varepsilon_{2,krit} = \varepsilon_{m,krit} \cdot \left(1 - v_f^{\frac{1}{3}}\right)$$

Za předpokladu lineárního chování komponent až do lomu, je možná úprava na vztah pro napětí. Příčnou pevnost kompozitu  $\sigma_{p,2}$  lze pak určit jako:

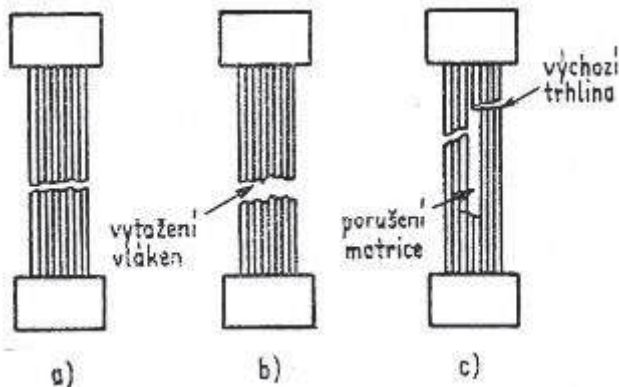
$$\sigma_{p,2} = \frac{\sigma_{pm} \cdot E_{t,2}}{E_m} \cdot \left(1 - v_f^{\frac{1}{3}}\right)$$

## 7.6. Mechanismy porušování vláknových kompozitů

U dlouhvláknového jednosměrného kompozitu se vyskytuje několik druhů porušení materiálu.

### *Tahové podélné namáhání*

Při tomto typu namáhání dochází nejčastěji ke křehkému porušení vláken. Některá vlákna se začínají porušovat již při nízkých napětích. Porušení vlákna však neznamená absolutní ztrátu únosnosti. Zatížení je stále smykem přenášeno matricí na ostatní vlákna. Takové místo působí následovně jako koncentrátor napětí. Porušení kompozitu často doprovází vytažení vláken z matrice.



Obr. č. 21 Způsoby porušení při tahovém namáhání  
Zdroj: Vrbka, 2008, s. 36

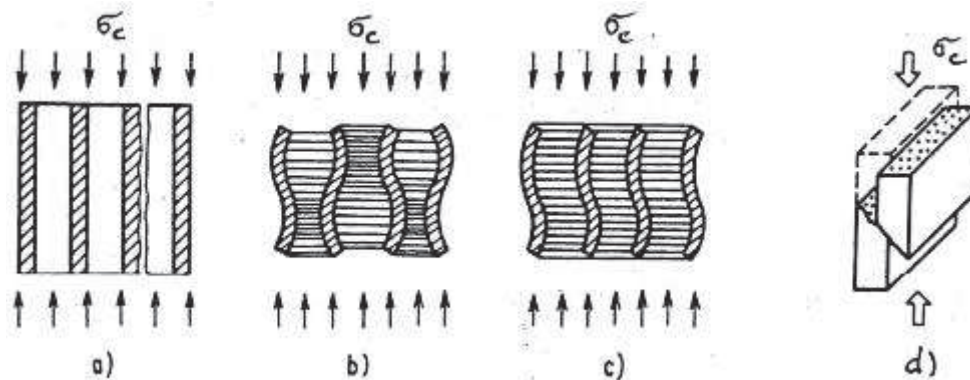


Obr. č. 22 vzorky po zkoušce tahem  
Daniel I., Ishai O., 1994, s. 92

### *Tlakové podélné namáhání*

V závislosti na druhu materiálu dojde k jednomu z následujících typu porušení

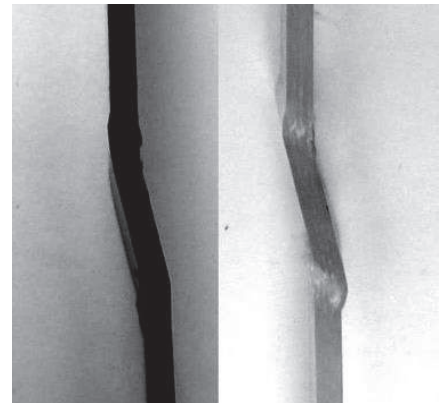
- příčné tahové porušování
- mikroprohnutí vláken s extenzní deformací
- mikroprohnutí vláken se smykovou deformací
- smykové porušování



Obr. č. 23 Způsoby porušení při tlakovém namáhání

Zdroj: Vrbka, 2008, s. 37

Pro kompozity s velkým objemovým podílem  $v_f$  je charakteristický mechanismus porušování c) mikroprohnutí se smykovou deformací. K porušení vláken dojde z důvodu vysokého smykového napětí. V místě prohnutí rovněž vzniká trojosá napjatost. Pro malý objemový podíl je charakteristický druhý mechanismus porušení s mikroprohnutím, kdy jsou vlákna natolik vzdálená, že nedochází k jejich vzájemnému ovlivnění. K porušení prvním uvedeným mechanismem dochází z důvodu rozdílné roztažnosti vlákna a matrice.

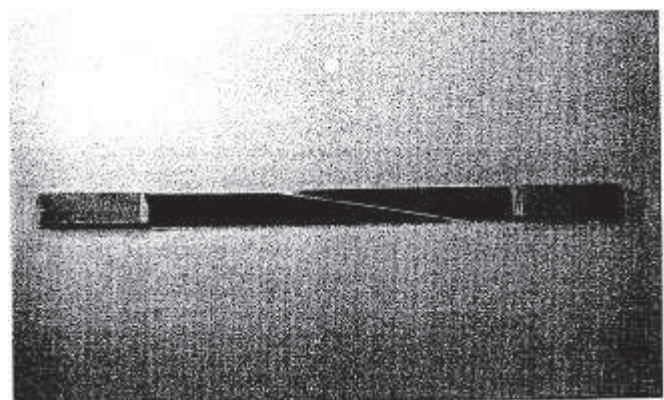


Obr. č. 24 Vzorky po zkoušce tlakem

Zdroj: Parnas, Shaw, Liu, 2007, s. 26

### *Smykové namáhání*

Při tomto druhu namáhání dochází k velkému smykovému namáhání rozhraní složek a k oddělování vláken od matrice.

Obr. č. 25 Vzorek po zkoušce tahem s vychýlením vláken o  $10^\circ$ 

Zdroj: Daniel I., Ishai O., 1994, s.126

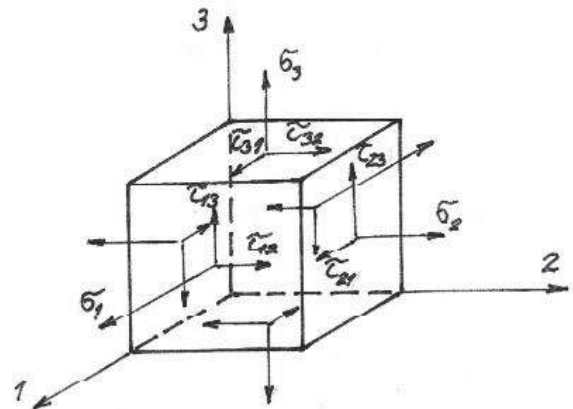
## 7.7. Mezní stavy kompozitů

Pro kompozitní materiály nemají uplatnění mezní stavy určované pomocí redukovaných napětí. Ty souvisí s použitím izotropního materiálu. Pro určení mezních stavů pro kompozit je potřeba zohlednit směrovost materiálových charakteristik a jednotlivé fáze. Pro kompozity se nejčastěji uplatňují mezní stavy pevnosti (failure criteria), které definují porušení kompozitu respektive jeho komponent. Tři nejobvyklejší jsou: MS pevnosti hlavních orthotropických napětí, MS pevnosti hlavních orthotropických přetvoření a Tsai-Hillova kvadratická podmínka MS pevnosti. V programu Ansys jsou všechna tři kritéria obsažena. Nevykresluje však bezpečnost, ale její převrácenou hodnotu.

### 7.7.1. Pevnost kompozitní vrstvy – laminy

Pro posouzení mezních stavů u orthotropického materiálu je nutné posuzovat pevnost vrstvy v hlavních materiálových směrech nezávisle. Kompozity mají rovněž obvykle rozdílné vlastnosti v tahu a tlaku. Pro posouzení pevnosti jedné vrstvy jednosměrového dlouhovláknového kompozitu je proto nutné zahrnout následující pevnosti:

- $\sigma_{pt,L}$  – podélná pevnost v tahu
- $\sigma_{pd,L}$  – podélná pevnost v tlaku
- $\sigma_{pt,T}$  – příčná pevnost v tahu
- $\sigma_{pd,T}$  – příčná pevnost v tlaku
- $\tau_{p,LT}$  – smyková pevnost



Obr. č. 26 Souřadný systém kompozitu

Zdroj: Vrbka, 2008, s.58

### 7.7.2. Mezní stav pevnosti hlavních orthotropických napětí

Mezního stavu je dosaženo, jestliže jedno z hlavních orthotropických napětí ( $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ ) dosáhne hodnoty na příslušné mezi pevnosti. Toto kritérium je možno rozdělit na pět případů:

$$\sigma_1 = \sigma_{pt,L} \text{ pro } \sigma_1 > 0$$

$$|\sigma_1| = \sigma_{pd,L} \text{ pro } \sigma_1 < 0$$

$$\sigma_2 = \sigma_{pt,T} \text{ pro } \sigma_2 > 0$$

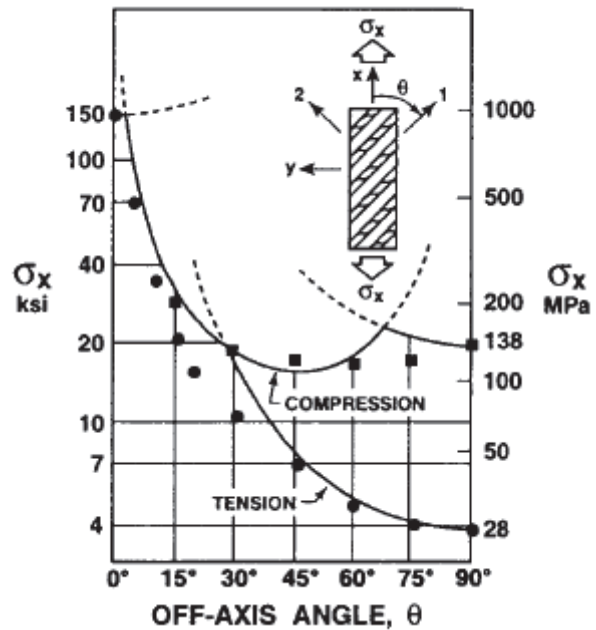
$$|\sigma_2| = \sigma_{pd,T} \text{ pro } \sigma_2 < 0$$

$$|\tau_{12}| = \tau_{pLT}$$

Podle toho, které kritérium je porušeno, je možné odhadnout který mechanismus vedl k poruše. Pokud bylo naplněno kritérium  $\sigma_1$ , lze předpokládat, že došlo k porušení vláken. Naopak naplnění kritéria obsahující  $\sigma_2$  poukazuje na porušení matrice.

Bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí je pak určena minimem ze všech podílů hlavních napětí a příslušných mezí pevnosti.

Toto kritérium bylo rovněž použito pro posouzení spolehlivosti nápravy. Na obrázku vpravo je vidět znázornění kritéria pro jednosměrný kompozit a různý směr vláken v porovnání s experimentálně zjištěnými hodnotami (tečky).



Obr. č. 27 Kritérium hlavních napětí

Zdroj: Jones, 1999, s.107

### 7.7.3. Mezní stav pevnosti hlavních orthotropických přetvoření

Mezního stavu je dosaženo, jestliže jedno z hlavních orthotropických přetvoření ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ ) dosáhne kritické hodnoty, kdy dochází k porušení celistvosti. Princip tohoto kritéria je podobný kritériu předchozímu. Toto kritérium je opět možno rozdělit na pět případů:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{krit,t,L} \text{ pro } \varepsilon_1 > 0$$

$$|\varepsilon_1| = \varepsilon_{krit,d,L} \text{ pro } \varepsilon_1 < 0$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{krit,t,T} \text{ pro } \varepsilon_2 > 0$$

$$|\varepsilon_2| = \varepsilon_{krit,d,T} \text{ pro } \varepsilon_2 < 0$$

$$|\gamma_{12}| = \gamma_{krit,LT}$$

Pro případ dvouosé napjatosti lze každou z předchozích rovnic zapsat ve tvaru pro napětí následovně:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_L}{E_L} - \mu_{TL} \cdot \frac{\sigma_T}{E_T} = \varepsilon_{krit,t,L} \text{ pro } \varepsilon_1 > 0$$

Je zde vidět, že narozdíl od mezního stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí je zde zahrnuto i Poissonovo číslo.

Bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí je pak určena obdobně jako v předchozím případě jako minimum ze všech podílů hlavních přetvoření a příslušných kritických přetvoření.

#### 7.7.4. Tsai-Hillova kvadratická podmínka MS pevnosti

Tato podmínka vychází z podmínky plasticity pro orthotropní materiály, kterou definoval Rodney Hill. Orthotropická plasticita, stejně jako orthotropická pevnost se vyznačují ukončením lineárně elastického chování materiálu. Tsai-Hillovu podmínku lze zapsat v následujícím tvaru: (Jones, 1999, s. 65)

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1$$

kde

$$X = \sigma_{pt,L} \text{ pro } \sigma_1 > 0$$

$$X = \sigma_{pd,L} \text{ pro } \sigma_1 < 0$$

$$Y = \sigma_{pt,T} \text{ pro } \sigma_1 > 0$$

$$Y = \sigma_{pd,T} \text{ pro } \sigma_1 < 0$$

$$S = \tau_{p,LT}$$

Výhodou tohoto kritéria je možnost posoudit pevnost celého kompozitu pomocí jedné rovnice. Nevýhodou je to, že nelze určit mechanismus porušení tak, jak je to možné u předchozích dvou kritérií.

## 8. PŘEDNÍ NÁPRAVA LEHOKOLA

Původní konstrukce neodpružené nápravy je realizována pomocí dvou ohýbaných trubek o vnějším průměru 50 mm vyrobených z hliníkové slitiny. Ohyb trubky je nutný pro dostatečný prostor pro šlapání zejména menších lidí, umožňuje také lepší nasedání na tříkolku a současně zvětšuje poddajnost nápravy. Trubky jsou na jednom konci přivařeny k hlavní rámové trubce a na druhé straně k hlavové trubce poloosy.



Obr. č. 28 Neodpružená náprava tříkolky AZUB

Zdroj: Bent Up Cycles, 2012

### 8.1. Požadavky pro přední odpruženou nápravu

Základní charakteristikou odpružení je zdvih. Náprava by měla umožnit maximální zdvih o hodnotě přibližně 40 mm. U jízdních kol je zvykem nastavit tzv. sag, což je hodnota stlačení pružících elementů při klidové poloze cyklisty na kole. Tato hodnota určuje tuhost odpružení.

„Obecně se pro cross-country bikování doporučuje ponoření tlumičů o čtvrtinu kroku, pro vyloženě sportovní jízdu to může být méně, k freeridu inklinující jezdci naopak asi ponechají ponor o něco hlubší.“ (Taich, 2005)

Jezdce na lehokole je proti klasickému cyklistovi znevýhodněn tím, že nemůže ve stejné míře pohybovat s těžištěm a tím si pomoci při průjezdu po nerovném povrchu. Proto se sag u lehokol často nastavuje na přibližně 30% zdvihu. V našem případě je tato hodnota zcela primární a tuhost nápravy je volena tak, aby při klidovém zatížení jezdce byl průhyb nápravy přibližně 12 mm.

Druhým požadavkem je nezávislost řízení na odpružení. Řízení tříkolky by se mělo chovat stejně v celém rozmezí zdvihu. Aby toho bylo dosaženo, je nutné zachování příklonu a záklonu rejdové osy a poloměru rejdu.

Dalším důležitým požadavkem je stabilizace tříkolky při průjezdu zatáčkou. V důsledku rozdílného zatížení levé a pravé strany nápravy tříkolky při průjezdu zatáčkou, propužší zatíženější strana více než méně zatížená. Tříkolka tak má tendenci vykláčet svého řidiče ven ze zatáčky. Aby se tento jev eliminoval, je nutné určitým způsobem propojit průhyb obou stran nápravy.

Náprava by měla být použita pro jezdce v rozmezí hmotnosti 60-120 kg.

Poslední žádanou vlastností nápravy je její nízká hmotnost.

## 8.2. Konstrukce odpružené přední nápravy

Konstrukce odpružené nápravy spoléhá na dvojici listových per z kompozitního materiálu, které obstarávají pružení nápravy. Laděním jejich tuhosti bude dosaženo velikosti zdvihu. Listy jsou shodně uloženy nad sebou a plní funkci paralelogramu. Tím zůstává v ideálním případě natočení hlavové trubky stejné a je zajištěn požadavek na nezávislost řízení a odpružení. O stabilizaci tříkolky se stará spojení listů a hlavní rámové trubky. To je realizováno pomocí čtveřice otočných čepů. Čepy jsou s listy napevno spojeny pomocí šroubů. Na hlavní rámovou trubku jsou přivařeny dva prstence s dírami pro čepy. Čepům je v prstencích umožněna rotace, protože jsou uchyceny šrouby přes kluznou vložku. Při souměrném zatížení obou stran dojde k prohnutí listů a natočení levého i pravého čepu o stejnou hodnotu, ale v opačném směru. Při zatížení pouze například levé stany dojde k průhybu levé části listu a natočení levého čepu. To vyústí k prohnutí listu v oblasti mezi čepy a k natočení i pravého čepu. V oblasti za pravým čepem je již list rovný, ale jeho konec je vychýlen na stejnou stranu jako zatížený levý konec. O uchycení listových pružin na hlavovou trubku je pojednáno níže.

Použitelnosti nápravy pro široké rozmezí hmotnosti jezdce je možné dosáhnout pomocí výměny listových per. Měly by být k dispozici dvě varianty per o stejné tloušťce – jedna plná a jedna s otvory. Jezdci v rozmezí hmotnosti 60-80 kg pak přísluší dvojice listů s otvory, jezdci 80-100kg přísluší po jednom plném listu a jednom listu s otvory a pro jezdce 100-120 kg je určena konfigurace s dvěma plnými listy.

## 8.3. Konstrukční varianty

Pro odpružení přední nápravy pomocí listových pružin připadají v úvahu dvě konstrukční řešení.

### *Varianta č.1 - S použitím čepů*

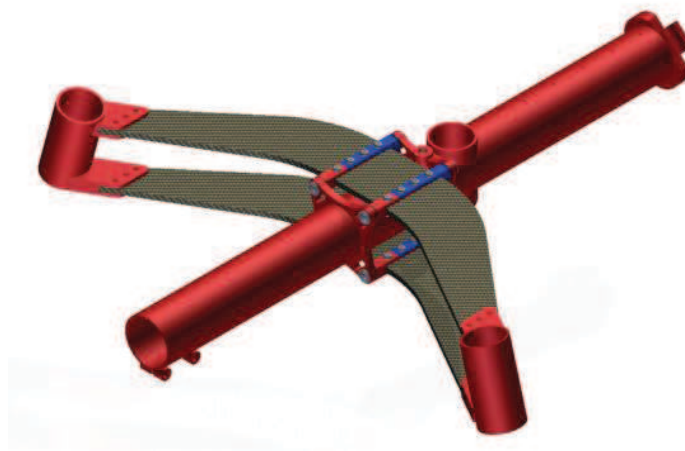
Tato varianta počítá se spojením listových per s hlavovou trubkou pomocí otočného spojení. Je tak umožněno vzájemné rotaci konce listového pera a hlavové trubky. Konec listového pera je v tomto případě sevřen kovovým dílem, kterým prochází čep. Jeho konce jsou uchyceny v hlavové trubce a čep je rovnoběžný s podélnou osou tříkolky. Již před výpočtem je tato varianta v malé nevýhodě spočívající ve větším množství pohyblivých i nepohyblivých dílů.



Obr. č. 29 Varianta s čepy

*Varianta č.2 – Vetknutí*

Druhá varianta spoléhá na pevné vetknutí listového pera a hlavové trubky. K hlavové trubce jsou přivařeny hliníkové díly, do kterého je vyfrézována drážka. Listové pero se usadí v této drážce a stáhne se pomocí šroubů.



Obr. č. 30 Varianta s vetknutím

O tom, která varianta se ukáže vhodnější, bude rozhodnuto na základě výpočtu v konečněprvkovém programu ANSYS.

## 9. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

Před jakýmkoli výpočtem bylo zřejmé, že podobných výpočtů bude pro dosažení optimálního naladění odpružení velké množství. Z toho důvodu byl výpočet zpracován parametricky v prostředí Ansys mechanical APDL.

### 9.1. Model materiálu

Na základě podkladů Zájmového sdružení německých akademických leteckých skupin IDAFLIEG (1988) a bohatých zkušeností odborníků z Leteckého ústavu VUT byly materiálové vlastnosti pro kompozitní materiál se skelnou výztuží ve formě vyvážené tkaniny pro objemový podíl vláken  $v_f=35\%$  určeny následovně:

Materiálová charakteristika	Hodnota	Jednotka
$E_1$	16600	MPa
$E_2$	16600	MPa
$E_3$	4000	MPa
$\mu_{12}$	0,2	-
$\mu_{23}$	0,2	-
$\mu_{13}$	0,2	-
$G_{12}$	3800	MPa
$G_{23}$	1880	MPa
$G_{13}$	1880	MPa

Tabulka 1 Materiálové charakteristiky

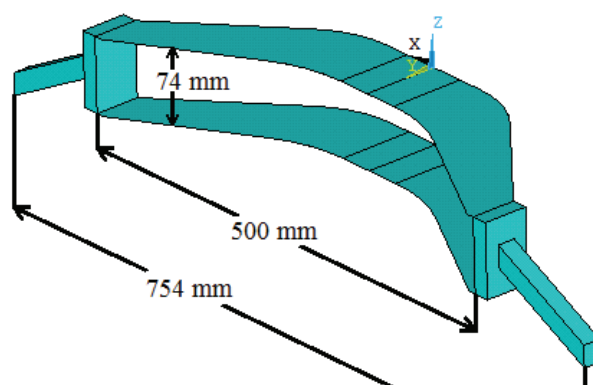
Model materiálu byl zvolen jako lineárně pružný a elastický. Tento základní model s velmi dobrou přesností vystihuje chování materiálu ve směru vláken viz kapitola Podélný modul pružnosti v tahu a Poissonovo číslo. Orientace materiálových vlastností je dána natáčením souřadnicového systému elementů.

Pro pomocné modelové těleso byl zvolen Hookovský materiál s tuhostí řádově vyšší, než je tuhost kompozitu.

### 9.2. Model geometrie

Geometrie kompozitních dílů se vícekrát měnila. Pro lepší představu jsou na obrázku níže uvedeny některé základní rozměry. Pro výpočet byl použit zjednodušený model listových per bez otvorů pro šrouby. Reálně jsou v listu vyvrtány otvory pro šrouby. To s sebou přináší snížení tuhosti. Listy jsou však sevřeny v hliníkových čepech, které naopak zabraňují volné deformaci kompozitu a zvyšují tak jeho tuhost. Pro jednoduchost a možnost rychlého

parametrizovaného výpočtu byl proveden výpočet pro listy bez děr. Pro přenos sil z osy kol na listová pera bez nutnosti prepočtu momentů je vymodelováno pomocné těleso. To propojuje listy mezi sebou a zajišťuje přenos sil.



Obr. č. 31 Model geometrie

### 9.3. Model diskretizace

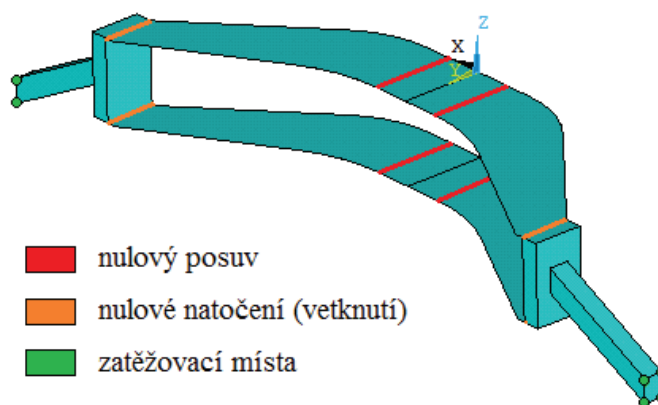
Pro počáteční výpočty jsem zvolil pro diskretizaci listových per vrstevnatou variantu prvku SHELL 181. Jedná se o čtyřuzlový prvek vhodný pro modelování tenkých skořepin s šesti stupni volnosti v každém uzlu. Jde o 3 posuvy a 3 natočení. Vzhledem k tomu, že je výpočet primárně orientovaný na vyhodnocení posuvu, byla velikost prvku zvolena poměrně velká. Maximální velikost elementu je 3 mm. Tam, kde to bylo možné byla použita mapovaná síť. Na ostatních místech listů je použita vždy nedegenerovaná varianta prvku.

Pro pomocné těleso byl zvolen prvek SOLID 185 jedná se o osmiuzlový prvek s třemi stupni volnosti. Vzhledem k tomu, že výsledky napětí na tomto tělese jsou irelevantní, byla velikost prvku ponechána v původním nastavení. Použita byla volná automatická tvorba sítě degenerovanými prvky.

### 9.4. Model okrajových podmínek

Definování odpovídajících okrajových podmínek je jednou z nejdůležitějších částí analýzy.

Pro tento model jsem zvolil přístup, kdy je náprava vazbami zachycena v místě čepů, tedy u hlavní trubky. Zatížení je aplikováno v místech os předních kol (konec pomocného tělesa modelu). Pro model se skořepinovými prvky bylo uložení listových per v čepích realizováno předepsáním nulového posuvu ve všech směrech uzlům v místě osy čepu. Rotační stupně volnosti zůstaly bez omezení. U varianty 1 (s použitím čepů) měl konec listu společné uzly s pomocným tělesem. Díky tomu, že prvky typu shell mají i rotační stupně volnosti narozdíl od prvků typu solid, bylo umožněno natáčení listu.



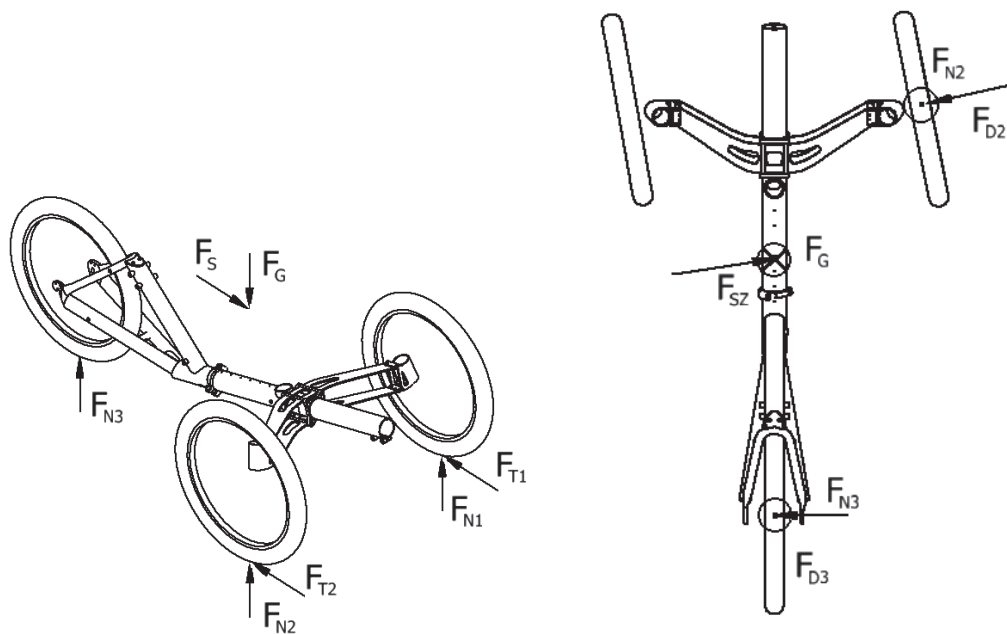
Obr. č. 32 Model okrajových podmínek

Varianta 2 byla realizována obdobně jako varianta 1. Vetknutí je realizované pomocí lokálního souřadného systému. Uzly listového pera a pomocného tělesa jsou společné a je jim předepsáno nulové natočení okolo osy lokálního souřadného systému.

Tento model vetknutí není zcela korektní, neboť předpokládá nulové natočení pomocného modelového tělesa. Během zatížení se však pomocné těleso natáčí. Toto natočení je však natolik malé, že model vetknutí byl shledán dostatečným.

### 9.5. Model zatížení

Náprava byla analyzována při třech typických zátěžných stavech. Pro výpočty prvního prototypu bylo zvoleno zatížení odpovídající jezdcí o hmotnosti 90kg. První zátěžný stav je stav, kdy je jezdec na tříkolce v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu. Tento stav sloužil především k optimalizaci tloušťky listů. Druhý zátěžný stav napodobuje průjezd zatáčkou. Vychází z podmínky překlopení tříkolky a je nutný ke zjištění míry stabilizace tříkolky. Třetí stav odpovídá situaci při brzdění. Vychází ze situace usmýknutí předních kol.



Obr. č. 33 Model zatížení pro stav klid, brzdění (vlevo) a stav zatáčka (vpravo)

Velikosti sil pro všechny zátěžné stavy jsou shrnuty v následující tabulce.

	$F_{N1}$ [N]	$F_{N2}$ [N]	$F_{N3}$ [N]	$F_{T1}$ [N]	$F_{T2}$ [N]	$F_{D1}$ [N]	$F_{D2}$ [N]	$F_S$ [N]	$F_{SZ}$ [N]	$F_G$ [N]
klid	325	325	400	0	0	0	0	0	0	1050
zatáčka	0	602	448	0	0	303	209	0	507	1050
brzdění	525	525	0	289	289	0	0	578	0	1050

Tabulka 2 Velikosti zátěžných sil

Všechny nositelky sil byly přesunuty na pomocné těleso v místě osy kol. Vzniklé momenty byly nahrazeny silovými dvojicemi.

## 9.6. Nastavení řešiče

Úloha byla řešena pro velké deformace z důvodu nezanedbatelné odchylky od totožné úlohy řešené pomocí malých deformací. Úloha byla rozdělena na deset substepů a řešena standardní Newton-Ralphson metodou.

## 9.7. Výsledky konstrukčních variant

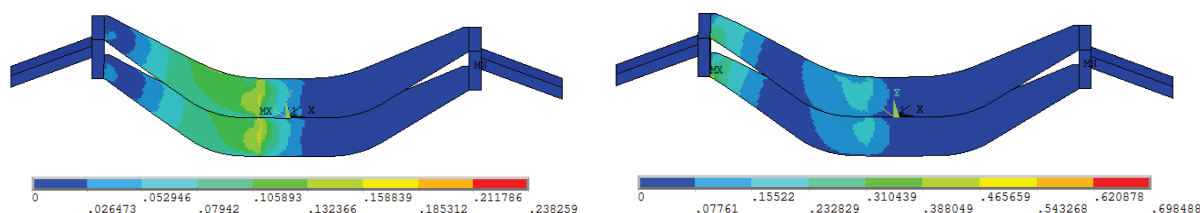
Pro variantu 1 (S čepy) a požadovaný průhyb konců nápravy vůči uchycení ve středu 12 mm vyšla tloušťka listových per 9,3 mm, což odpovídá 31 vrstevnatému kompozitu. Napětí ve směru vláken vyšlo velmi příznivě. Maximum bylo dosaženo v místě vazby listů na jeden z čepů. Napětí v tahu má hodnotu 33,5 Mpa, v tlaku 35,7 MPa.

Varianta 2 (vetknutá) se podle předpokladů ukázala jako značně tužší a tloušťka byla stanovena na 21 vrstev tj. 6,3 mm. Průhyb při této konfiguraci činí 11,8 mm. Proti verzi bez vetknutí vyšly výrazně vyšší napětí. Maximum již není v místě čepů, ale ve vetknutí. Maximum dosažené v tahu je 123,9 MPa, v tlaku 101,6 MPa. Je však nutno říci, že místa nejvyššího napětí mají vysokou koncentraci napětí a při jemnější síti by byly dosaženy daleko vyšší hodnoty. Na druhou stranu je napětí v listu mimo vetknutí srovnatelné s variantou s čepy.

Pro účely srovnání byla modelován i zátěžný stav simulující průjezd zatáčkou. Zatížená strana varianty s čepy se prohla o 25,1 mm, zatímco na nezatížené byl evidován průhyb 2,5 mm. Jednoduchým přepočtem jsem zjistil, že to znamená náklon tříkolky o 1,7°. Napětí se vyšplhaly na 75 Mpa v tahu a 79 MPa v tlaku. Maxima byla zjištěna opět v oblasti středu - uchycení listu v čepech.

Pro druhou variantu byl zjištěn průhyb 25 mm respektive 2,2 mm. Náklon tříkolky je srovnatelný s variantou 1, protože rozdíl je patrný až na druhém desetinném místě a náklon tříkolky je 1,7°. Napětí v kompozitu jsou v místě vetknutí opět výrazně vyšší. Maximální napětí ve směru vláken v tahu vyšlo 254,9 MPa a v tlaku pak 221,2 MPa. Podobně jako v předchozím případě je však napětí již v relativní blízkosti napěťové špičky srovnatelné s první variantou.

Na následujícím obrázku je zobrazeno porovnání bezpečnosti vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropních napětí při druhém zátěžném stavu. Referenční hodnota pro stanovení bezpečnosti je 363 MPa viz kapitola Zkouška tříbodovým ohybem. Pro variantu č. 1 (vlevo) je bezpečnost 4,2. Pro variantu č. 2 (vpravo) je bezpečnost 1,4.



Obr. č. 34 Porovnání kritéria pevnosti hlavních orthotropních napětí

Na základě těchto simulací lze varianty zhodnotit následovně. Obě varianty poskytují zhruba stejnou míru stabilizace. Výhodou varianty 1 je nižší namáhání nápravy, tím pádem vyšší spolehlivost. Výhodou druhé varianty je menší tloušťka a tím pádem zhruba o třetinu nižší hmotnost. Po poradě jsme se rozhodli, že dále budeme pracovat na variantě 2

s vetknutím. Vysoké hodnoty napětí je možné snížit vhodnou tvarovou úpravou místa. V případě, že by se ukázala tato cesta jako chybná, je možné se vrátit k méně problémové variantě 1.

### 9.8. Materiálové varianty

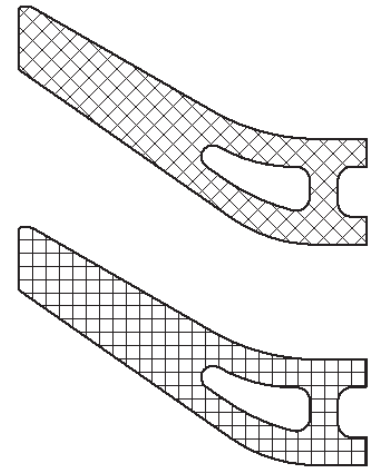
Pro první prototyp jsme se rozhodli pro symetrický laminát a shodnou orientaci všech vrstev. Symetrický laminát poskytuje výhodu omezení jevů vázaných deformací při zatížení. Jako referenční rovina pro orientaci vrstev je zvolena svislá rovina probíhající středem podél celé tříkolky.

#### *Varianta č.3 – vlákna $\pm 45^\circ$*

Všechna vlákna jsou od referenční roviny odkloněna o  $45^\circ$ . Toto uspořádání poskytuje nižší tuhost v ohybu. Výhodou této konfigurace je daleko vyšší tuhost v krutu. Krutem je náprava zatěžována z důvodu jejího zahnutého tvaru. Tato orientace vláken byla použita v posuzování konstrukčních variant. Na obrázku č.35 je nahoře

#### *Varianta č.4 – vlákna $0/90^\circ$*

Jeden ze dvou směrů vláken je rovnoběžný s podélnou osou tříkolky. Druhý směr je orientován shodně s myšlenou spojnicí předních kol. V případě, že bychom si nápravu přiblížili jako ohyb nosníku, měla by být tato konfigurace tužší. Na obrázku je zobrazena dole.

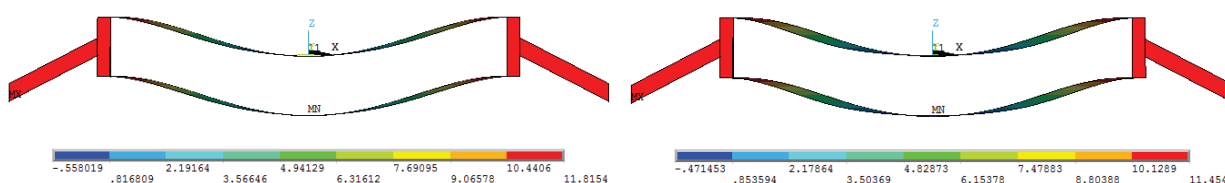


Obr. č. 35 Materiálové varianty

Všechny ostatní části analýzy zůstaly nezměněny. Jak bylo již dříve předesláno, materiálové varianty byly testovány na konstrukční variantě 2 s vetknutím. Zvolen byl zátěžný stav představující klidovou zátěž.

### 9.9. Výsledky materiálových variant

Na základě výsledků analýz bylo zjištěno, že obě varianty dosahují podobného průhybu. Konkrétně jde o 11,8 mm pro variantu  $\pm 45^\circ$  a 11,5 mm pro variantu  $0/90^\circ$ . Velmi odlišný je způsob, jakým je tohoto průhybu dosaženo. Zatímco varianta č.3 je primárně ohýbána a zabraňuje krutu, u varianty č.4 je kompozit výrazně kroucen viz obrázky níže. Po napěťové stránce vyznívá situace lépe pro variantu  $\pm 45^\circ$ . V místě vetknutí je maximální napětí ve směru vláken v tahu 123,9 MPa, v tlaku 101,6 MPa. Pro variantu  $0/90^\circ$  vychází ve směru vláken maximum v tahu 176,7 MPa, v tlaku 145,9 MPa.

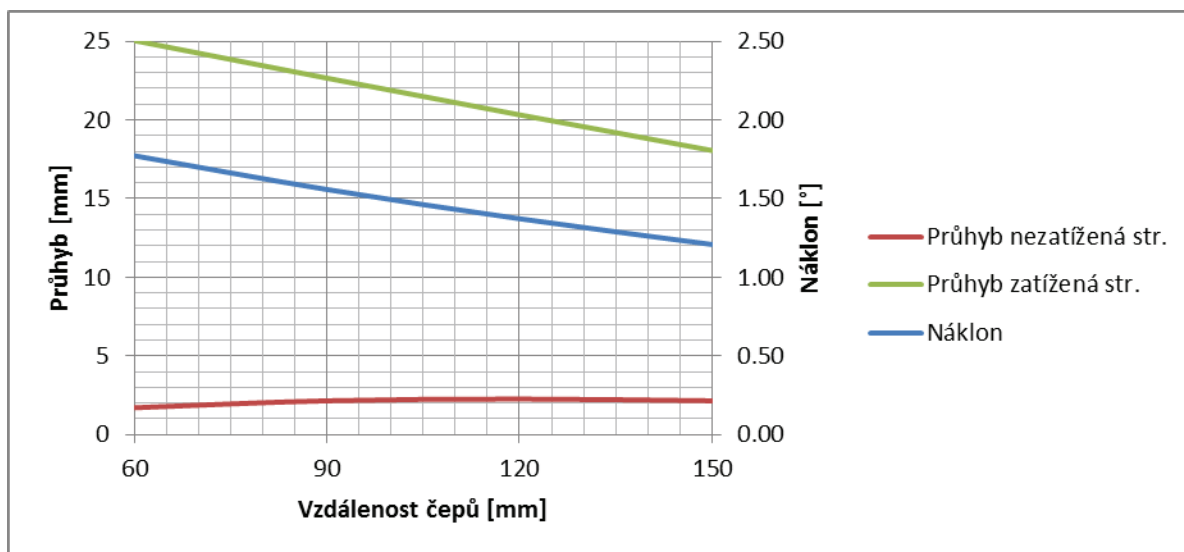


Obr. č. 36 Porovnání průhybu nápravy

Na základě výsledků byla zvolena pro další postup varianta č.3 s vlákny  $\pm 45^\circ$ . Ve směru vláken je dosaženo menšího napětí při dosažení téměř totožného průhybu. Pro potřeby stabilizace tříkolky je navíc vhodnější deformování kompozitu ohybem než krutem.

### 9.10. Rozteč uložení v čepích

Další možností jak ovlivnit míru stabilizace je pomocí změny vzdálenosti mezi čepy, které vážou listy s hlavní rámovou trubkou. Můžeme předpokládat lepší stabilizaci tříkolky při širším umístění čepů. Vzhledem k tomu, že o stabilizaci je možné mluvit pouze při nesymetrickém namáhání nápravy, je v těchto výpočtech použit zátěžný stav průjezd zatáčkou. Závislost mezi rozstupem čepů a náklonem tříkolky případně průhybu nápravy je zobrazena na grafu níže.



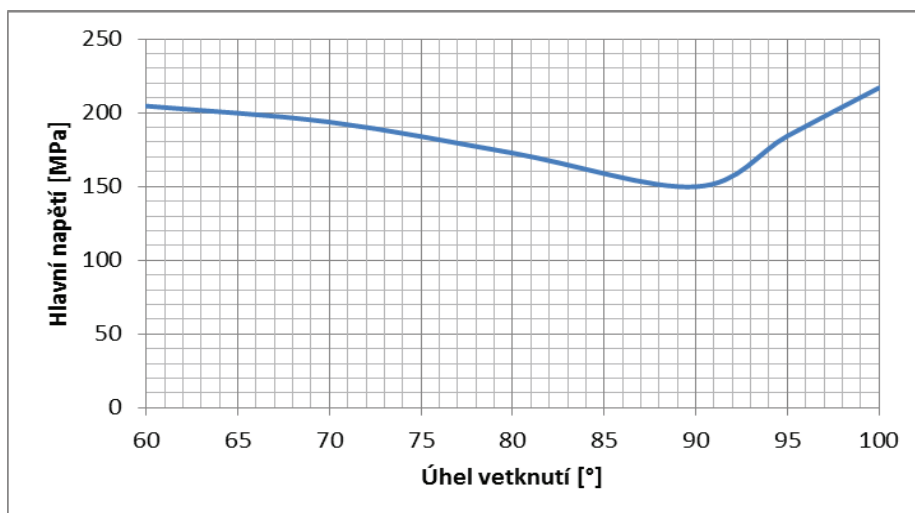
Graf č. 1 Chování nápravy v závislosti na rozestupu čepů

Z grafu je zřejmé, že tříkolka se opravdu méně naklání s širším postavením čepů. Zároveň při tom dochází ke zmenšení průhybu a tím pádem i k menšímu namáhání listů. Negativem je větší průhyb v oblasti mezi čepy. To je nežádoucí, protože aby bylo možné použít stávající díly hlavové trubky poloosy, musí být listy umístěny blízko sebe. Kdyby došlo k vymezení vůle mezi hlavní rámovou trubkou a listovým perem, oddělila by se pravá a levá strana nápravy, a ta by se nadále chovala, jako by byla listová pera vetknutá v rámové trubce. Další nepříjemností je to, že mezi listy v blízkosti rámové trubky probíhá řetěz. Přitom je potřeba zajistit dostatek místa pro uchycení čepů k rámové trubce. Z konstrukčních důvodů jsme se usnesli na rozestupu čepů o hodnotě 70 mm. Mělo by tím být dosaženo přibližně o 10% menšího náklonu v zatáčkách proti pevnému uložení listových per bez čepů.

Za předpokladu, že uchycení v čepích je zcela tuhé, nabízí se otázka, zda nebude průhyb listů mezi čepy ovlivněn rozdílem délky rovného a prohlého listu mezi čepy. Tuto problematiku jsem řešil úpravou stávajících okrajových podmínek. Vazbě simulující uchycení v čepu byl na jedné straně nápravy umožněn posuv vůči druhé straně. Výsledné chování se změnilo naprosto zanedbatelně. Vzhledem k tomu, že průhyb listů mezi čepy se pohybuje do 0,5 mm při klidové zátěži a do 1mm při brzdění je vzájemný posuv čepů je v řádu tisícín milimetru. Tento problém by proto mělo smysl řešit až při daleko větší vzdálenosti čepů a větších průhybech. Pro případ odpružené nápravy je tento problém zanedbatelný.

### 9.11. Tvarová úprava vetknutí

Jak bylo již výše zmíněno, nejvyšší napětí bylo zjištěno v místě vetknutí. Průběh měl charakter ostré napěťové špičky. Z toho důvodu bylo zapotřebí tvarově upravit konec listového pera. Ideálním výsledkem je stav, kdy je napětí konstantní po celé délce vetknuté hrany. Úprava konce listu spočívá ve změně úhlu mezi vetknutou hranou a přední hranou listu. Úhel mezi vetknutou a přední hranou listu byl původně tzn. při vetknutí, které je rovnoběžné s podélnou osou tříkolky,  $60^\circ$ . Závislost na maximálním napětí ve směru vláken a úhlu konce listu byla zkoumána pro zátěžný stav brzdění, protože ten nejvíce zatěžuje listová pera a je při něm dosaženo největšího průhybu i napětí.



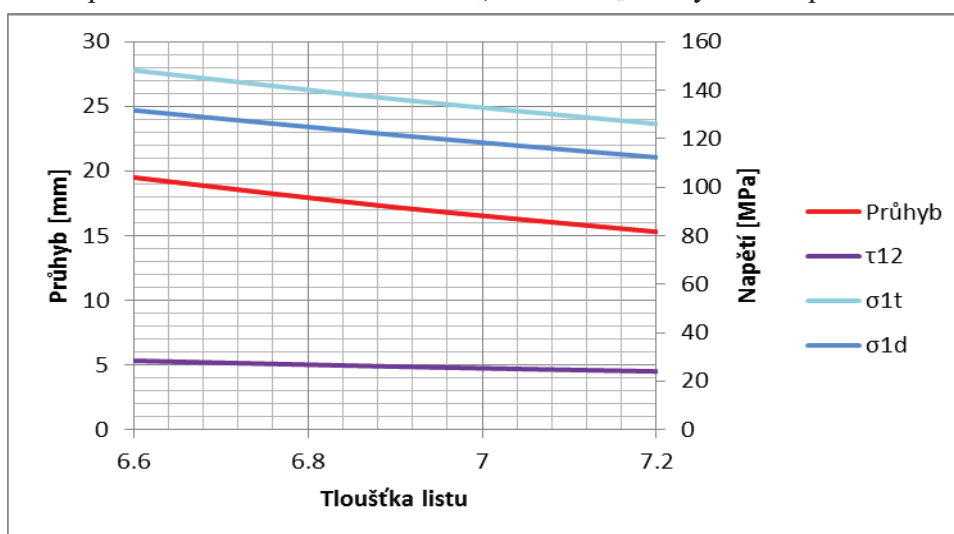
Graf č. 2 Závislost hlavního napětí na úhlu vetknutí

Jako je vidět z grafu, napětí s rostoucím úhlem pomalu klesá až do velikosti úhlu přibližně 90°. Toto zkosení můžeme proto považovat za dosažitelné optimum. Následně však napětí velmi rychle roste k vysokým hodnotám. Díky této úpravě, která téměř neovlivnila chování nápravy bylo výrazně sníženo namáhání kompozitního dílu.

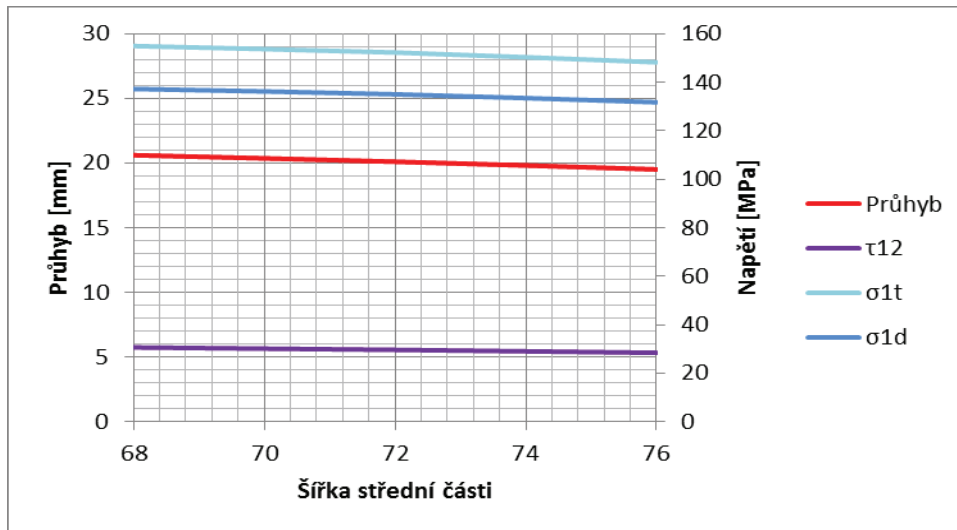
### 9.12. Tvarová úprava listového pera

Po úspěšné úpravě úhlu vetknutí, která snížila napětí v kompozitu je nasnadě otázka, jak ovlivňují napjatost, průhyb a celkovou odezvu na zatížení menší úpravy geometrie. Motivací pro tyto úpravy je možnost ladění tuhosti pružin pomocí otvorů a to zejména mezi čepy ve středu listu. Dále možnost zkrátit čepy, čímž se dá ušetřit pár gramů hmotnosti a místo pro sloupek řízení. Zvolen byl opět zátěžný stav brzdění. Byla provedena citlivostní analýza následujících úprav: 1) zmenšení šířky listu v oblasti mezi čepy, 2) zmenšení úhlu, kterým se rozšiřují ramena listu 3) zvětšení tloušťky listu

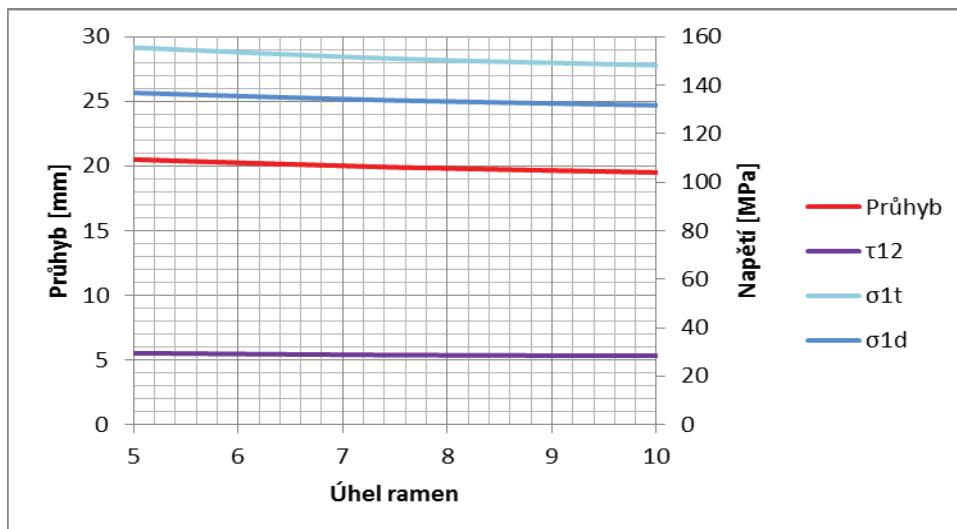
Vliv těchto úprav je znázorněn na následujících grafech. Je na nich vyneseno průhyb, maximální napětí ve směru vláken v tahu  $\sigma_{1t}$ , v tlaku  $\sigma_{1d}$  a smykové napětí v rovině listu  $\tau_{12}$ .



Graf č. 3 Chování nápravy v závislosti na tloušťce listových per

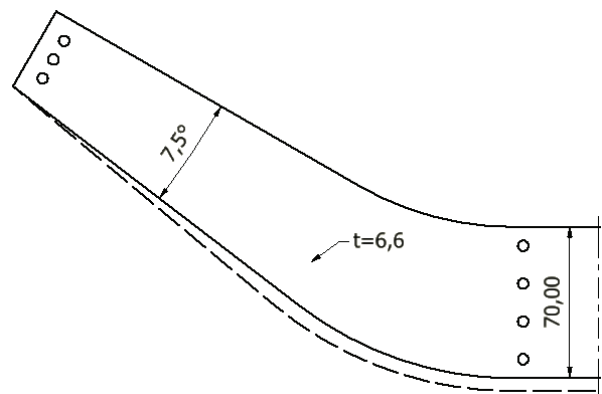


Graf č. 4 Chování nápravy v závislosti na šířce středové části



Graf č. 5 Chování nápravy v závislosti na úhlu ramen

Jak je z grafů patrné, nejvíce projev pružení ovlivňuje tloušťka listového pera. Šířka středové části i úhel ramen má vliv výrazně menší. Po vzájemné domluvě jsme se rozhodli, že provedeme určité změny. Šířka středové části byla zmenšena na 70 mm, úhel ramen byl zmenšen na  $7,5^\circ$  a tloušťka listu byla zvětšena na 6,6 mm.



Obr. č. 37 Tvarová úprava

### 9.13. Úprava materiálu

Po všech úpravách byly kompozitní díly připraveny na výrobu. Při schůzce s Ing. Mališem na Leteckém ústavu jsme se však dozvěděli, že při tloušťce okolo 7 mm se dá dosáhnout i lepšího objemového podílu vláken než je 35%, pro který jsou dány materiálové hodnoty. S rostoucí tloušťkou kompozitu dochází k prosakování pryskyřice ze spodních vrstev a pro další vrstvy tak není zapotřebí dodávat tolik pryskyřice. Při stávající tloušťce by mělo být možné dosáhnout objemového podílu až k 50%. Po samotné výrobě se tento odhad dokonce ukázal jako podhodnocený. Po schůzce jsme se rozhodli pro poslední sérii výpočtů s rozdílným objemovým podílem vláken v materiálu. Pro porovnání stávajícího výpočtu  $v_f=35\%$  byl proveden výpočet pro  $v_f=40\%$  a  $v_f=45\%$ .

S rostoucím objemovým podílem vláken se samozřejmě mění materiálové charakteristiky a materiál se stává tužším. Na základě doporučení pana Ing. Mališe jsem upravoval hodnotu modulů pružnosti v tahu a ostatní materiálové charakteristiky zůstaly konstantní. Kvantitativní závislost objemového podílu a modulů pružnosti vychází z poznatku, že tuhost je úměrná obsahu vláken v příčném průřezu. Pro tkaninu je navíc nutné rozdělit růst hodnot na polovinu pro dva směry vláken. Pro tři dříve specifikované objemové podíly jsou moduly pružnosti v tahu uvedeny v tabulce níže. Vzhledem k tomu, že jsme vybrali i konkrétní materiál, váže se ke každému objemovému podílu i konkrétní tloušťka vrstvy viz tabulka. Tyto informace pocházejí z volně stažitelného katalogu firmy R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. (R&G, 2009)

podíl vláken	$v_f$ [%]	35	40	45
modul pružnosti v tahu longitudální	$E_1=E_2$ [MPa]	16600	17795	18993
modul pružnosti v tahu transversální	$E_3$ [MPa]	4000	4288	4576.5
tloušťka vrstvy	$t_v$ [mm]	0.429	0.375	0.333

Tabulka 3 Materiálové charakteristiky

Na základě těchto nových dat byly znova navrženy nové tloušťky listů a 3 modifikované modely nápravy prošly výpočtem všech třech zátěžných stavů. Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce.

	podíl vláken	35	40	45	[%]
	počet vrstev	15	16	18	[-]
	tloušťka	6.4	6	6	[mm]
klid	průhyb	10.63	11.91	11.03	[mm]
	$\sigma_{1t}$	69.70	74.90	72.10	[Mpa]
	$\sigma_{1d}$	58.30	63.50	64.70	[Mpa]
	$\tau_{12}$	20.20	21.30	20.20	[Mpa]
brzdění	průhyb	22.93	25.55	23.72	[mm]
	$\sigma_{1t}$	163.50	178.00	171.20	[Mpa]
	$\sigma_{1d}$	137.70	144.20	146.60	[Mpa]
	$\tau_{12}$	48.00	51.00	48.00	[Mpa]
zátáčka	průhyb zat.	23.19	26.09	24.05	[mm]
	průhyb nez.	2.04	2.33	2.19	[mm]
	náklon	1.61	1.80	1.66	[°]
	$\sigma_{1t}$	66.50	79.10	81.50	[Mpa]
	$\sigma_{1d}$	79.10	93.60	97.00	[Mpa]
	$\tau_{12}$	45.00	48.00	45.00	[Mpa]

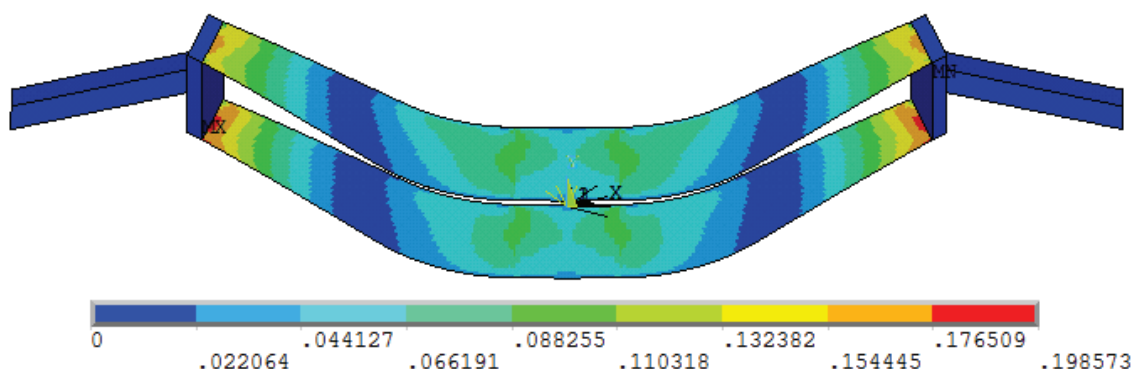
Tabulka 4 Srovnání listových per s různým objemovým podílem

Na základě těchto výsledků můžeme konstatovat, že s rostoucím objemovým podílem klesá tloušťka listů nutná pro požadovaný „sag“ při klidovém stavu. To má za následek nárůst napětí v listech. Je však nutné si uvědomit, že s rostoucím objemovým podílem roste rovněž pevnost kompozitu. Podle vztahu pro podélnou pevnost jednosměrného kompozitu:

$$\sigma_{pc} = \sigma_{pf} \cdot v_f + \sigma_{m, \varepsilon_f \text{ krit}} \cdot (1 - v_f)$$

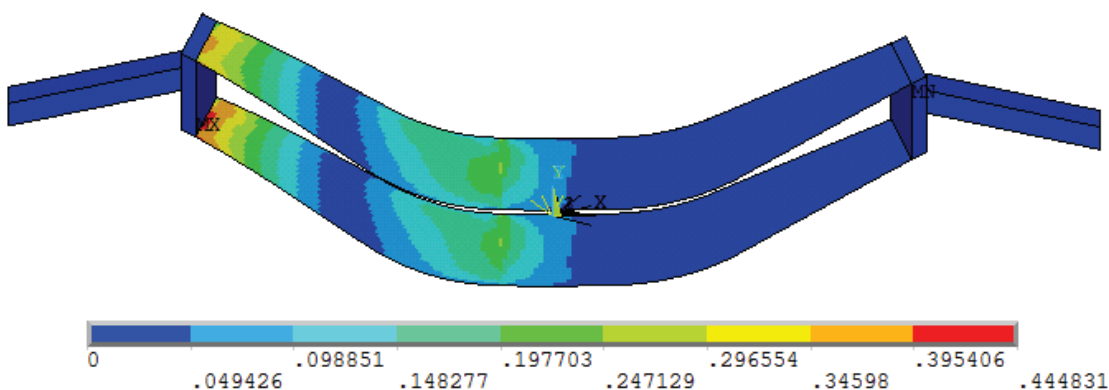
můžeme usuzovat přibližně usuzovat že desetiprocentní nárůst objemového podílu způsobí přibližně stejný nárůst pevnosti kompozitu. Vzhledem k tomu, že výztuž ve formě tkaniny je možné s dostatečnou přesností modelovat jako dvě vrstvy jednosměrné výztuže na sobě, můžeme předpokládat, že stejný nárůst pevnosti bude platit i pro tkanou výztuž. Přírůstek napětí se tedy přibližně vykompenzuje nárůstem pevnosti. Díky tomu jsme zvolili variantu s objemovým podílem  $v_f=45\%$ . Tenčí list pak ušetří kousek místa a umožní použití menšího čepu. Byla tím pádem zvolena finální podoba kompozitního dílu včetně všech volitelných parametrů.

### 9.14. Výsledky výpočtového modelování



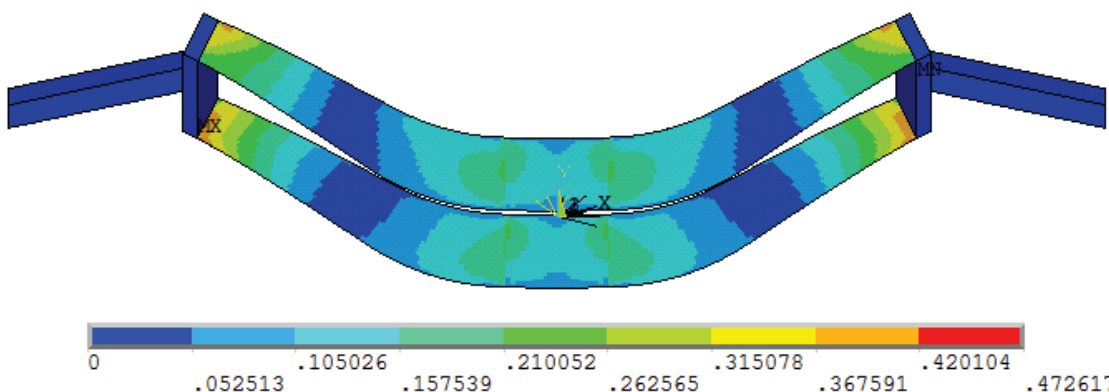
Obr. č. 38 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav klid

Pro zátěžný stav klid je minimální bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí kompozitního dílu  $k=5$ .



Obr. č. 39 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav zatáčka

Pro zátěžný stav zatáčka je minimální bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí kompozitního dílu  $k=2,2$ .



Obr. č. 40 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav brzda

Pro zátěžný stav brzda je minimální bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí kompozitního dílu  $k=2,1$ .

## 10. VÝROBA PROTOTYPU

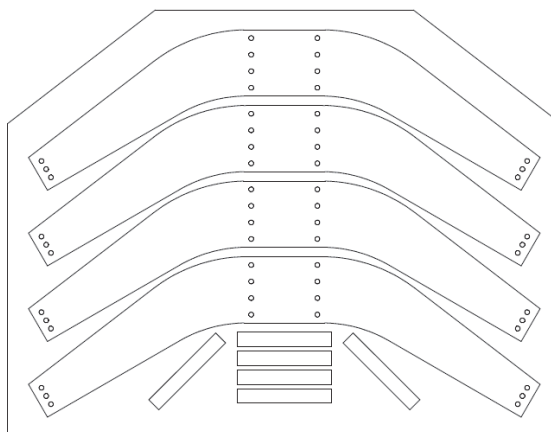
Při výrobě prototypu byly použity následující materiály:

1. Skleněná tkanina INTERGLAS 92140 keprová vazba 390g/m<sup>2</sup>
2. Epoxidová pryskyřice MGS 285
3. Tužidlo MGS 287
4. Strhávací tkanina – „Strhávací tkanina odděluje konečný výrobek od pomocných materiálů /odsávací rohož/ a zároveň propouští pryskyřici. Po vytvrzení a odtržení zanechává ucelený, mikrobublinek zbavený matný povrch. Navíc po odtržení není nutno povrch brousit pro nanášení dalších vrstev nebo lepení.“ (Havel Composites, s. 32)
5. Separátor povrchu
6. Perforovaná separační folie
7. Odsávací rohož
8. Těsnící páska
9. Vakuovací folie

Při výrobě planžet byla nejprve vyrobena kompozitní deska, která byla vakuována a ze které byly jednotlivé listy vyřezány vodním paprskem.

### 10.1. Příprava a výroba

Před samotnou laminací bylo potřeba rozvrhnout nástřih tkaniny tak, aby bylo zajištěno optimální využití materiálu. Po stanovení konečných rozměrů planžet a jejich vyráběnému množství bylo zvoleno rozložení. Přesnost při řezání vodním paprskem je  $\pm 0,2$  mm, nicméně nutný rozestup mezi jednotlivými výrobky je 3-5 mm. Při návrhu nástřihu byl minimální rozestup mezi díly cca 6 mm. Na okrajích desky byl zvolen volný okraj 20 mm. Při výrobě 4 planžet byly konečné rozměry desky 584x451 mm. Z důvodu lepšího využití materiálu nebyla vyráběna celá obdélníková deska, ale ve vzdálenosti 40 mm od šikmého konce poslední planžety byly seříznuty rohy desky.

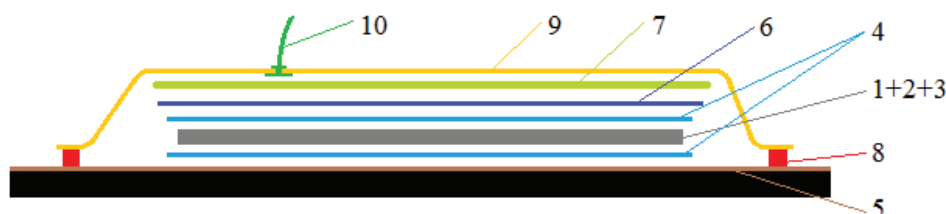


Obr. č. 41 Rozložení listových per a ohybových vzorků na vyráběné desce

Před laminací bylo potřeba spočítat kolik pryskyřice bude zapotřebí. Objemový poměr vláken byl zvolen na 45 procent. V katalogu firmy R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, která se zabývá prodejem materiálu pro laminování je možné se dočíst, že pro skelnou tkaninu 390g/m<sup>2</sup> je potřeba dodat 202g/m<sup>2</sup> pryskyřice pro objemový podíl vláken 45 procent.

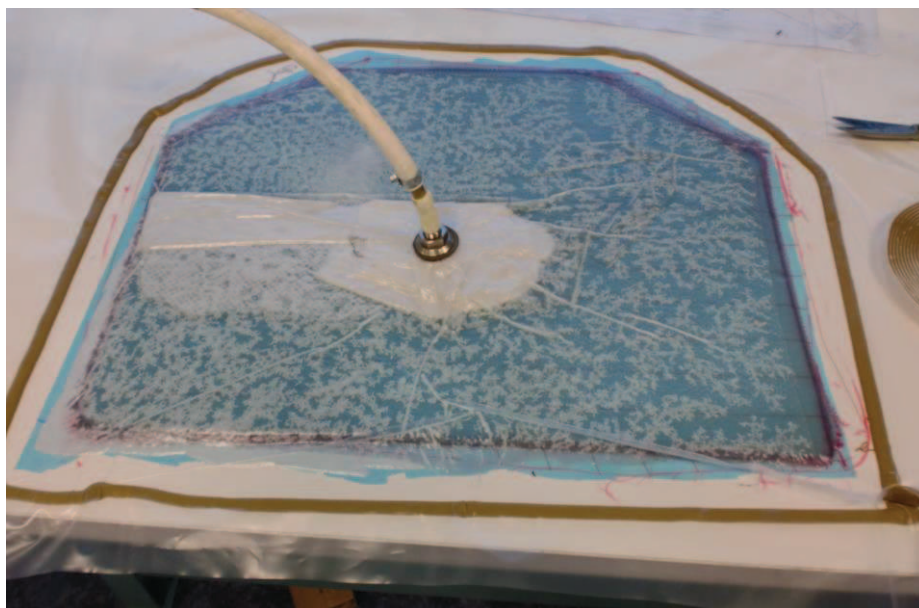
S povrchem jedné vrstvy  $S=0,264\text{m}^2$  je potřeba na každou vrstvu 53 g pryskyřice, celkem tedy přibližně 980 g pryskyřice. Do této hmotnosti je započítána i hmotnost pryskyřice, která nebude využita (zůstatek na válečku a v kelímku).

Byla vytvořena papírová šablona nástřihu, která urychlila a zjednodušila stříhání tkaniny. Tato byla obkreslena na tkaninu a pomocí řezacího kolečka a nůžek bylo vystřženo 18 kusů tkaniny. Pro laminaci bylo nejprve potřeba pomocí pasty (5) naseparovat stůl, aby se laminát ke stolu nepřilepil. Poté byla namíchán první kelímek pryskyřice (2) s tužidlem (3) o hmotnosti 280 g. Hmotnostní poměr při míchání je 10 dílů pryskyřice na 4 díly tužidla. Použití tužidla MGS 287 zajišťuje tekutý stav směsi po 4 hodiny. S trochou pryskyřice byla na stůl položena strhávací tkanina (4), která zaručuje snadné oddělení laminátu od ostatních vrstev. V tomto okamžiku byla položena první vrstva skelné tkaniny (1). Ta byla pečlivě srovnána podle šablony, protože následně sloužila jako reference pro srovnání všech dalších vrstev. Na první vrstvu se nalila pětina prvního kelímku pryskyřice a pomocí válečku byla tkanina rovnoměrně prosycena. Tento postup se opakoval celkem 18 krát pro všechny další vstvy. Každá tkanina byla položena na již prosycenou vstvu, vyrovnána a prosycena pryskyřicí pomocí válečku. Vzhledem k přebytku pryskyřice při závěrečných vrstvách bylo nakonec použito pouze 910 g oproti původně plánovaných 980 g pryskyřice. Po naskládání všech vrstev skelné tkaniny byla na vrch zalaminována opět strhávací tkanina. Další vrstvou byla perforovaná fólie (6), která umožňuje zcela snadné oddělení dalších vrstev a průchod přebytečné pryskyřice. Předposlední vstavou je sací vrstva (7). Tato slouží k rozvodu podtlaku po celé ploše laminátu a k pohlcení přebytečné pryskyřice. Nyní bylo potřeba utěsnit celou soustavu. Okolo celého laminátu byla nalepena na stůl těsnící páska (8), která svou konzistencí připomíná plastelínu. Přes ni byla položena plastová folie (9), do které byl zaveden ventil k odvodu vzduchu (10). Folie se přitiskla k těsnící pásce a po celém obvodu utěsnila. Nakonec byla k ventilu připevněna hadice od vývěvy a bylo zahájeno vakuování. Laminovaná deska byla vakuována 24 hodin.



Obr. č. 42 Schéma výroby kompozitu

Druhý den byla odpojena vývěva, odstraněna folie a oddělena sací vstva s perforovanou folií. Strhávací tkanina byla na laminátu ponechána pro ochranu laminátu při transportu k řezání vodním paprskem. Výsledná hmotnost desky byla 2,34 kg, tloušťka se bohužel v závislosti na místě měření pohybovala mezi 4,8 až 5,7 milimetry oproti plánovaným šesti milimetrům. Nerovnoměrnost tloušťky se ukázala jako hlavní problém při zpřesňování numerického výpočtu.



Obr. č. 43 Foto z výroby kompozitní desky

## 10.2. Výpočet objemového podílu

Vzhledem k menší tloušťce listů při zachování počtu vrstev je zřejmé, že muselo dojít ke změně objemového podílu vláken. Pro potřeby úpravy mnerického výpočtu bylo potřeba zjistit jaký je skutečný objemový podíl ve vyrobeném dílu. Ten se samozřejmě mění v závislosti na tloušťce kompozitu a tím pádem na poloze. Nejčastěji se však tloušťka pohybovala okolo 5mm, a proto budeme předpokládat, že celá deska má pětimilimetrovou tloušťku.

Nejrychlejším způsobem jak zjistit objemový podíl bylo s pomocí již výše zmíněného katalogu firmy R&G. Vyrobené kompozitové desce s idealizovanou tloušťkou 5mm odpovídá tloušťka jedné vrstvy  $t_v=0,278$  mm. Jednoduchou interpolací sousedních hodnot v katalogu dospějeme k objemovém podílu vláken  $v_f=55\%$ .

Pro kontrolu jsem se rozhodl provést výpočet využívající hmotnosti jednotlivých složek a hustoty kompozitu.

Vstupní údaje:

$M_f=1855$  g hmotnost použité tkaniny

$M_c=2340$  g hmotnost kompozitní desky

$\rho_f=2,6$  g/cm<sup>3</sup> hustota skelných vláken

$\rho_m=1,1$  g/cm<sup>3</sup> hustota matrice

Z poměru hmotnosti výztuže a celkové hmotnosti kopolzitu stanovíme hmotnostní podíl vláken  $m_f$ .

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} = \frac{1855}{2340} = 0,79$$

Objemový podíl  $v_f$  stanovíme z hmotnostního podílu s pomocí hustoty vláken a hustoty kompozitu.

$$v_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot m_f$$

Nejprve je zapotřebí stanovit hustotu kompozitu  $\rho_c$ :

$$\rho_c = \frac{1}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}}$$

, kde  $m_m$  je hmotnostní podíl matrice

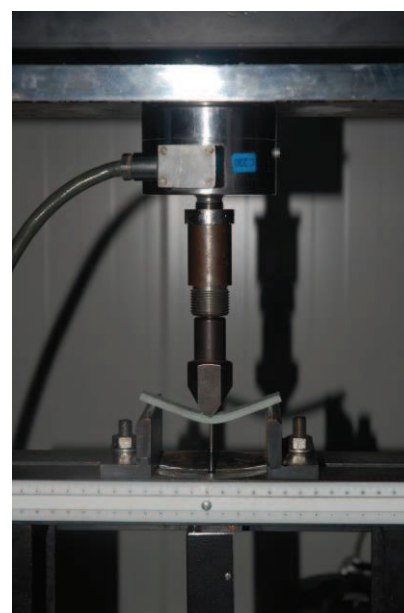
$$m_m = \frac{M_m}{M_c} = \frac{M_c - M_f}{M_c} = \frac{2340 - 1855}{2340} = 0,21$$

Zpětným dosazením dostáváme hustotu kompozitu  $\rho_c = 2,03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a objemový podíl  $v_f = 62\%$ . Vzhledem k tomu, že tento výpočet vychází z prostých přepočtených vztahů a skutečných naměřených hmotností, zdá se být věrohodnější. Nejlepším způsobem jak stanovit objemový podíl je pomocí metody, kdy se za normou daných podmínek spálí předem přesně zvážený kus kompozitu. Tím se odstraní matrice a zbydou pouze nehořlavá skelná vlákna. Ta se následně zváží a provede se výše uvedený výpočet. Jako materiál k této zkoušce mohly sloužit vzorky pro zkoušku ohybem (po zkoušce samozřejmě). Alternativně lze podobný proces provést rozpuštěním pryskyřice v jisté kapalině. Bohužel experimentální zjištění objemového podílu se během tvoření této práce nepodařilo uskutečnit.

Na tomto místě je vhodné přibližně určit modul pružnosti v tahu pro takový objemový podíl. Podobnou úvahou jako v kapitole Úprava materiálu můžeme dojít k hodnotě modulu pružnosti v tahu pro objemový podíl 62%  $E_1 = E_2 = 24485 \text{ MPa}$ .

## 11. ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM

Pro verifikaci použitého materiálového modelu, jeho úpravě a zjištění některých materiálových charakteristik byla provedena zkouška tříbodovým ohybem. Pro zkoušku ohybem jsme se rozhodli z důvodu její blízkosti s reálným zatěžováním kompozitních dílů. Dle slov Ing. Mališe numerický model, který je v naprosté shodě s reálnou tahovou zkouškou kompozitu vykazuje při zkoušce ohybem až 10% odchylku proti skutečnosti. Tím, že bude model materiálu vycházet z dat získaných zkouškou blízké reálnému zatěžování nápravy, jsme se chtěli této nepřesnosti vyhnout. Později se však ukázalo, že tento postup má vlastní úskalí.



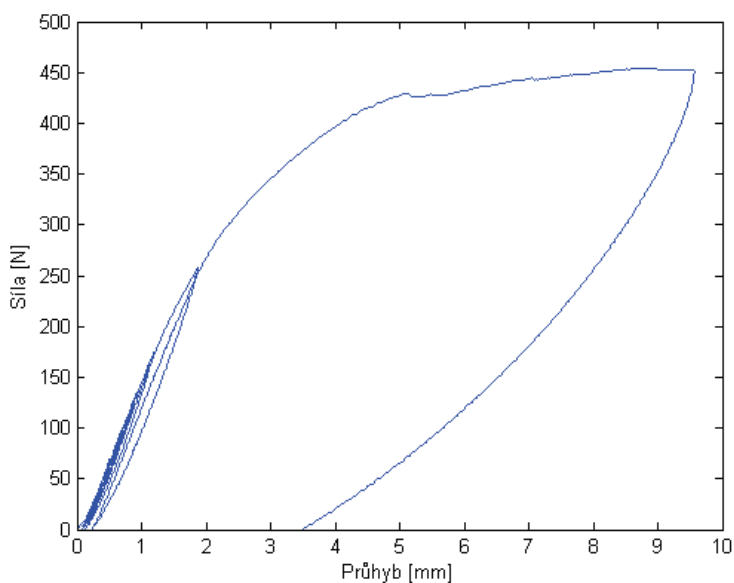
Obr. č. 44 Ohybová zkouška kompozitu

Z laminátu byly pomocí vodního paprsku vyřezány 4 listová pera a 6 vzorků pro zkoušku trojbodým ohybem. Čtyři vzorky mají orientaci vláken  $\pm 45^\circ$  od své osy, dva zbývající vzorky byly vyřezány ve směru šikmých ramen planžet tedy pod úhlem  $0/90^\circ$  stupňů.

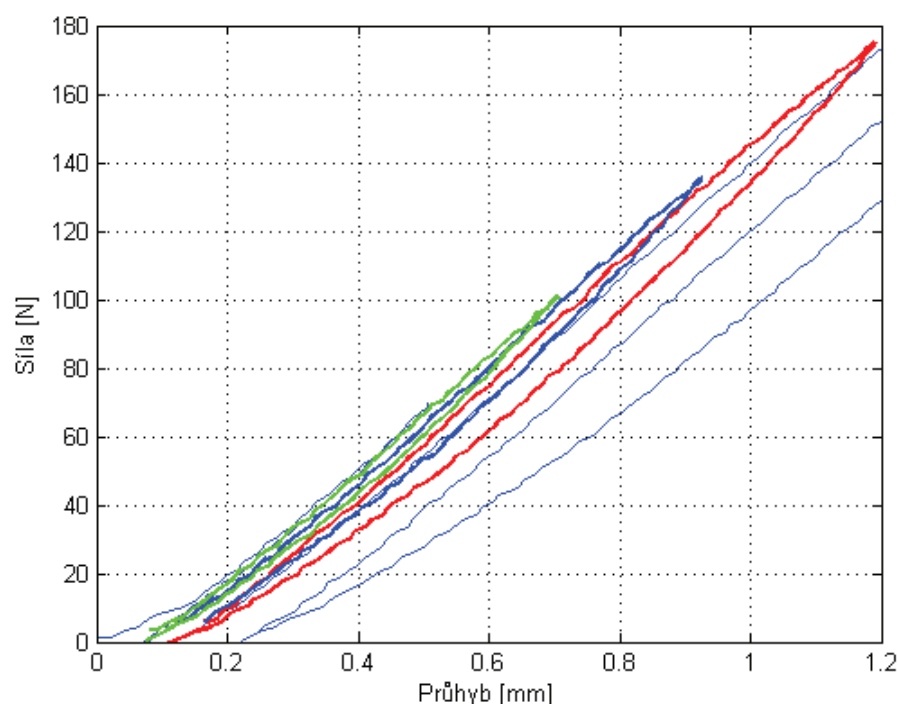
Ohybová zkouška se v rámci možností řídila normou DIN EN 2746 pro skelné lamináty. Zkouška sloužila zejména ke zjištění modulu pružnosti a pevnosti laminátu. Během zkoušky byla měřena zatěžující síla, průhyb na posuvoměru a příčnicku stroje. Při vyhodnocování dat ze zkoušky byly použity hodnoty z posuvoměru tam, kde to bylo možné, protože v hodnotách posuvu příčnicku se promítne vymezení vůle v závitech siloměru, trnu a podobně. Vzorek pro zkoušku na tříbodý ohyb má rozměry  $100 \times 15 \times 5$  milimetrů. Délka vzorku je podle normy dvacetinásobek tloušťky. Tento poměr byl zachován. Vzdálenost podpor byla 80 milimetrů a poloměr zaoblení podpor byl v tomto případě nestandartní a to 2 milimetry. Naopak poloměr zaoblení tlačného trnu odpovídá normě a je 2 milimetry. Rychlost zatěžování byla pro první vzorek zvolena 1,5 mm/min, pro zbylé vzorky s orientací  $\pm 45^\circ$  rychlost 3,5 mm/min, a pro vzorky s orientací  $0,90^\circ$  rychlost 2,5 mm/min.

Po nastavení a nulování siloměru a posuvoměru započalo měření prvního vzorku s orientací vláken  $\pm 45^\circ$ . Úvodní část záznamu průhyb-síla je lineární až do velikosti síly přibližně 300 N. Poté se charakteristika mění na sploštělou nelineární. Aby se zabránilo poškození posuvoměru při případném zlomení vzorku, bylo jej nutné odpojit. Při dalším zatěžování nad 450 N se již zátěžná síla téměř nezvyšovala a vzorek sklouzával po podporách. V tomto okamžiku byla zkouška ukončena, protože bylo zřejmé, že k porušení vzorku již nedojde. Bylo dosaženo průhybu 12,25 mm při zátěžné síle 489,3 N. Po odlehčení byla na vzorku zjištěna trvalá deformace. S vědomím, že se vzorky s orientací vláken  $\pm 45^\circ$  nezlomily, bylo možné nechat posuvoměr zapojený po celou dobu zatěžování. Zkouška byla provedena až do průhybu 10 mm při síle 515,9 N a následně bylo provedeno odlehčení. Na prvním záznamu je patrná trvalá deformace o hodnotě průhybu 3,83 mm. Aby bylo možné zjistit do kterého bodu se vzorek chová elasticky byly následující vzorky několikrát odlehčovány a znovu zatěžovány. Tím se v nelineární oblasti vytvořily hysterezní smyčky. Takové chování vykazují viskoelastické materiály. První hysterezní smyčka na záznamu, která je dostatečně široká, aby byla při dané přesnosti pozorovatelná, je vidět při odlehčování z hodnoty síly přibližně 100 N.

Při odlehčování z větší hodnoty síly a průhybu se smyčky rozšiřují. Při odtížení z hodnoty síly do 180 N je zbytková deformace do 0,1 mm a dá se tedy považovat za zanedbatelnou. Při odtížení z hodnoty 250 N je již trvalá deformace dvojnásobná.

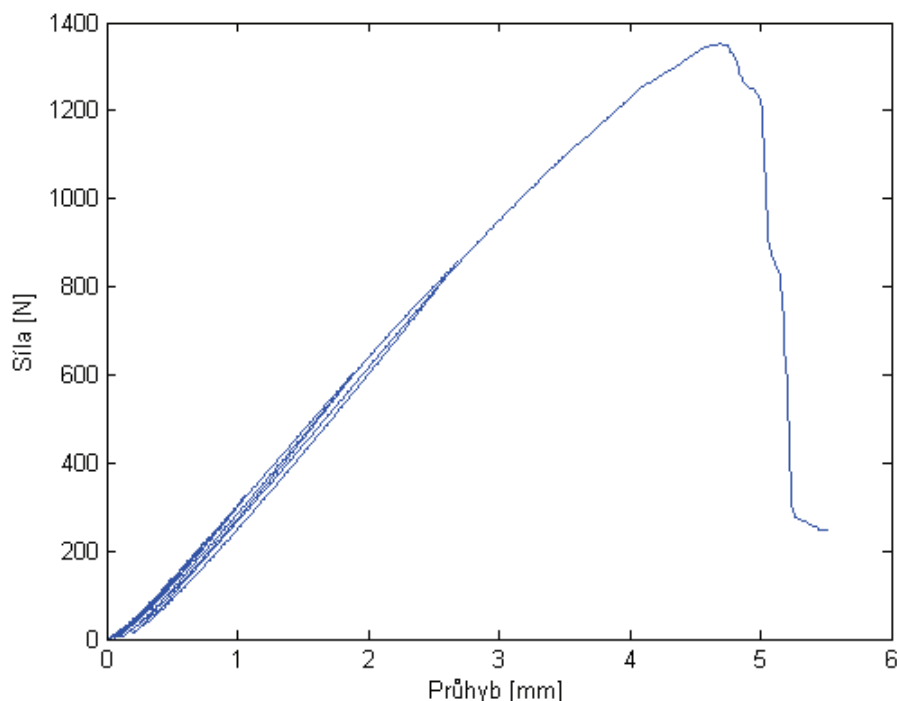


Obr. č. 45 Záznam ohybové zkoušky pro vzorky  $\pm 45^\circ$



Obr. č. 46 Detail hysterézních smyček

Pomocí posledních dvou vzorků byla určena pevnost kopozitu. Vzorky byly vyřezány tak, aby byla vlákna rovnoběžně s podélnou osou vzorku. Dá se tedy očekávat, že vzorky budou na ohyb výrazně tužší. To se potvrdilo při zkoušce. Vzhledem k tomu, že se dalo očekávat porušení vzorku, byl snímač průhybu v průběhu zkoušek z důvodu možného poškození snímače odebrán a hodnocená data jsou z posuvu příčnicku. Již od počátku zkoušky bylo patrné, že vzorky s podélnými vlákny jsou značně tužší. Charakteristika průhyb-síla je přibližně lineární až do porušení. U prvního vzorku došlo k prvnímu porušení vláken při síle 1098 N a průhybu 4,56 mm. Oproti vzorkům s vlákny pod úhlem  $\pm 45^\circ$  bylo dosaženo zátěžné síly přibližně dvojnásobné při polovičním průhybu. Po první poruše došlo k velmi rychlé degradaci vzorku, vlákna začala praskat ve velkém počtu a vzorek prakticky přestal klást odpor tlačnému trnu. Z makroskopického hlediska je možné pozorovat na tažené straně vzorku širší zbledlý pruh, což je možné přičítat plastické deformaci epoxidové pryskyřice a povytažení některých vláken. Na tlačené straně je možné pozorovat úzký bílý pruh, kde došlo ke kontaktu s tlačným trnem a nerovnosti na povrchu způsobené delaminací a vzájemným překrytím vrchních vrstev laminátu. Druhý vzorek zůstal neporušený až do velikosti zátěžné síly 1351 N při dosaženém průhybu 4,73 mm. Vzhled vzorku po porušení vykazuje stejné znaky jako předchozí vzorek.



Obr. č. 47 Záznam ohybové zkoušky pro vzorky 0/90°

### 11.1. Výpočet modulu pružnosti v ohybu a napětí

Z dat ohybové zkoušky je možné pomocí snadného výpočtu zjistit ohybové napětí  $\sigma_o$  a modul pružnosti v ohybu  $E_o$  pomocí následujících vztahů.

$$\sigma_o = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

$$E_o = \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta d}$$

Kde  $F$  [N] je zátěžná síla,  $L$  [mm] je vzdálenost podpor,  $b$  [mm] je šířka vzorku,  $h$  [mm] je tloušťka vzorku,  $d$  [mm] je průhyb vzorku.

(Klement, Helešic, Horský, Dymáček, Juračka, 1995)

Je zřejmé, že jak vztah pro ohybové napětí, tak vztah pro modul pružnosti v ohybu se váže s podélným směrem vláken. Z toho důvodu je možné vzorky přímo použít pro určení pevnosti kompozitu a úpravu materiálových charakteristik kompozitu pouze v případě, že vlákna jsou orientována rovnoběžně s podélnou osou vzorku. Dále je nutné si všimnout, že v obou vztazích hraje velmi důležitou roli tloušťka vzorku, neboť se vyskytuje v druhé a třetí mocnině. Z toho důvodu jsem zvolil přesné měření tloušťky pomocí mikrometru. Mikrometr dosahuje přesnosti měření 0,01 mm. Každý vzorek jsem měřil na čtyřech místech. Výsledky měření jsou shrnuty v následující tabulce.

	měření 1	měření 2	měření 3	měření 4	průměr
vzorek 1	4.98	4.98	5.055	5.06	5.02
vzorek 2	5.1	5.06	5.21	5.21	5.15
vzorek 3	4.89	4.89	5.01	5.01	4.95
vzorek 4	4.97	4.93	4.91	4.87	4.92
vzorek 5	4.95	4.95	4.89	4.9	4.92
vzorek 6	5.01	5.03	5.26	5.26	5.14

Tabulka 5 Tabulka tloušťek vzorků

Pro výpočet jsou použitelné poslední dva vzorky. Po dosažení stavu porušení kompozitu do vzorce pro napětí byla zjištěna mez pevnosti o hodnotě 363,2 MPa pro vzorek č.5 a 408,8 MPa pro vzorek č.6.

Po dosažení do vzorce pro ohybový modul pružnosti dostáváme pro vzorek č.5  $E_{05}=20873$  MPa, pro vzorek č.6  $E_{06}= 21607$  MPa.

## 12. SIMULACE ZKOUŠKY OHYBEM

Pro úpravu materiálových charakteristik numerického modelu bylo nutné simulovat zkoušku ohybem. Cílem analýzy je ověření materiálových charakteristik a jejich případná úprava. Tyto budou nastaveny tak, aby průhyb modelového vzorku byl shodný s průhybem reálného vzorku v lineární části záznamu zkoušky.

### 12.1. Model materiálu

Model materiálu zkušební vzorku byl použit shodný s modelem materiálu nápravy. Jde o lineárně elastický orthotropní materiál. Z toho vyplývá 9 nezávislých materiálových parametrů. V simulacích byly měněny čtyři z nich, a to konkrétně moduly pružnosti v tahu  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  a modul pružnosti ve smyku  $G_{12}$ . Všechny moduly pružnosti v tahu budou upravovány pro vzorky s vlákny rovnoběžnými a kolmými na podélnou osu vzorku. Modul pružnosti ve smyku bude vyhodnocován u vzorků s vlákny odkloněnými od podélné osy vzorku o úhel  $45^\circ$ .

Pro tlačný trn a podpory jsem zvolil Hookovský materiál s materiálovými charakteristikami odpovídajícími oceli tj.  $E=210000$  MPa a  $\mu=0,3$ .

### 12.2. Model geometrie

Z důvodu úspory elementů bylo využito symetrie úlohy. Byla proto modelována pouze čtvrtina celku. Podpora byla modelována jako polovina válce a tlačný trn jako čtvrtina válce. Model samozřejmě rozměrově korespondoval se skutečnými rozměry zkušebního stroje a vzorku. Pro tloušťku, která je nejdůležitější ve vztahu se zkouškou ohybem, jsem zvolil aritmetický průměr tloušťky všech ohybových vzorků. Tloušťka modelu vzorku tedy byla  $t=5,02$  mm.

### 12.3. Model diskretizace

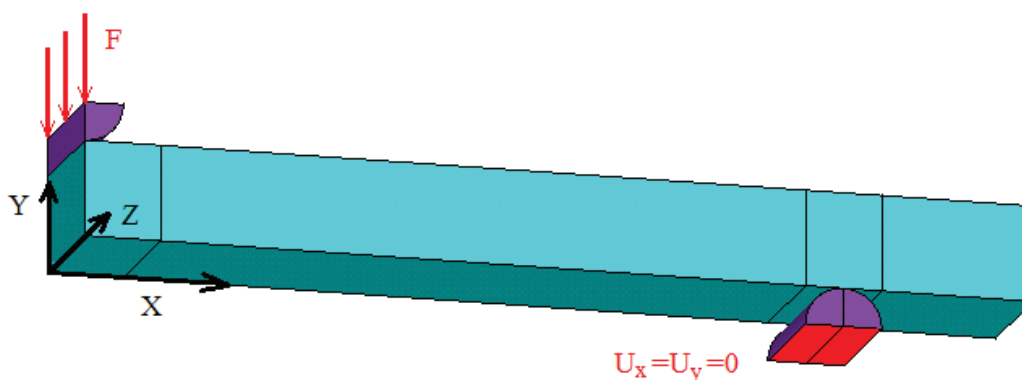
Vzhledem k tomu, že jde o kontaktní úlohu, rozhodl jsem se pro kompozit zvolit prvek typu solid. Konkrétně byla na listech uplatněna vrstevnatá varianta prvku SOLID 185 vhodnější pro modelování silnějších skořepin. Po tloušťce jsem použil 6 elementů. Na části vzorku v okolí kontaktu s trnem nebo podporou jsem zvolil velikost prvku 0,2 mm, stejně tak na tělese podpory a trnu. Ve zbylém objemu kompozitu pak velikost prvku byla 1 mm.

Pro modelování kontaktu byly zvoleny prvky CONTACT 173 a TARGET 170.

### 12.4. Model okrajových podmínek

Zvolené okrajové podmínky zajišťovaly zejména dodržení symetrie. Všem uzlům v rovině XY byl zamezen posuv v ose z a podobně všem uzlům v rovině YZ byl zamezen posuv v ose x. Uzlům ve spodní rovině podpory byl předepsán nulový posuv v ose x i y.

V okolí podpory a zatěžovacího trnu byl definován standardní kontakt pomocí komponent z uzlů. Rovinná plocha je volena jako contact a zaoblené těleso je vždy target.



Obr. č. 48 Model geometrie a okrajových podmínek

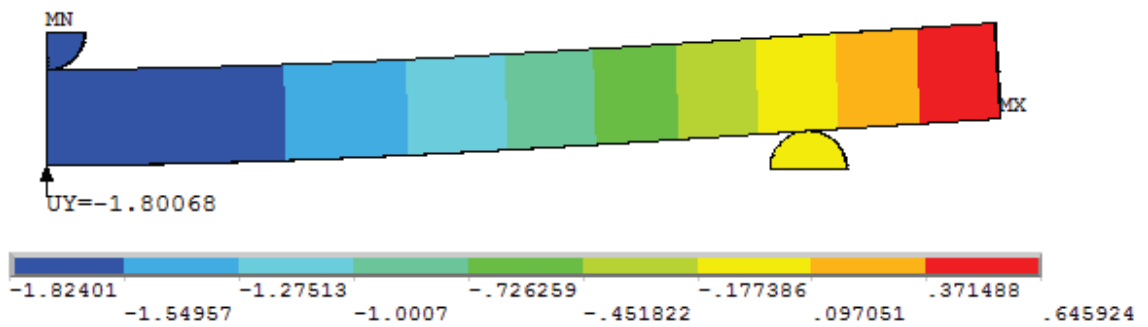
### 12.5. Model zatížení

Do výpočtu vstupuje pouze jedna síla a to ve svislém směru tj. ve směru osy y. Velikost síly je převzata z lineární části záznamu zkoušky trojbodým ohybem. Pro vzorky s vlákny rovnoběžnými s podélnou osou byla tato síla 571 N pro cílený průhyb 1,798 mm. Pro vzorky s vlákny pod 45 stupni od podélné osy vzorku se stává závislost zátěžné síly na průhybu dříve nelineární. Proto budou zatěžovány silou pouze 150 N s cíleným průhybem 0,880 mm.

Celková zátěžná síla je rozdělena a aplikována do uzlů v ose zatěžovacího trnu ve směru osy y.

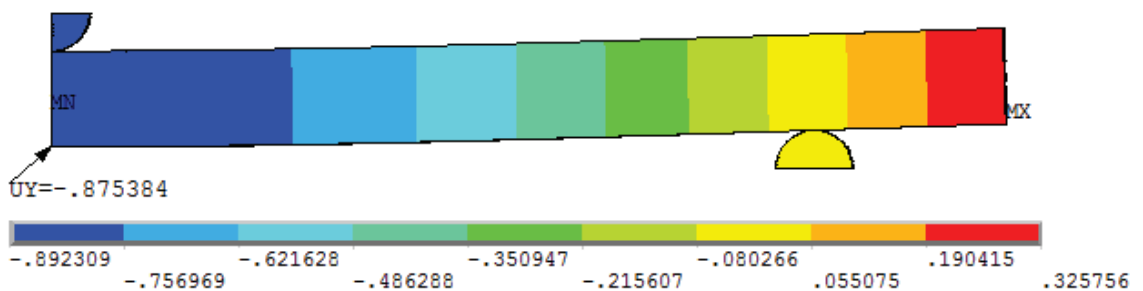
### 12.6. Výsledky simulace zkoušky ohybem

Po několika iteračních krocích se podařilo dostat do souladu průhyb modelu s průhybem reálným. Nejprve byly odladěny moduly pružnosti v tahu na vzorcích 0/90°. Následně byl odladěn i modul pružnosti ve smyku na vzorcích 45°. Materiálové charakteristiky a průhyb vzorků je znázorněn níže.



Obr. č. 49 Průhyb vzorku 0/90°

$E_1=E_2=22335$  MPa,  $E_3=5382$  MPa



Obr. č. 50 Průhyb vzorku ±45°

Obr 45° ;  $G_{12}=3534$  MPa

Nyní je možné srovnání modulu pružnosti získaného pomocí úvahy o struktuře materiálu, přepočtem z dat zkoušky trojbodým ohybem a výpočtovým modelováním.

$E_{\text{struktura}}=24485$  MPa

$E_{\text{zkouška}}=21240$  MPa

$E_{\text{ANSYS}}=22335$  MPa

## 12.7. Shrnutí poznatků z ohybové zkoušky a její simulace

Provedení zkoušky na trojbodý ohyb přineslo několik podstatných informací a pozitiv.

- Byl upraven model materiálu, aby lépe odpovídal reálnému materiálu
- Byla zjištěna podélná pevnost materiálu
- Bylo zjištěno, že při ohybu materiálu ve směru odchýleném od směru vláken o 45° nedojde k porušení vláken kompozitu pro reálnou aplikaci na nápravě a místo toho dojde k trvalé deformaci rozeznatelné pomocí zbledání matrice
- Bylo zjištěno, že materiál má inherentní tlumení hysterezního charakteru

## 13. APLIKACE NA VÝPOČTOVÝ MODEL NÁPRAVY

### 13.1. Měření průhybu nápravy a určení těžiště

Pro přímou verifikaci výsledků výpočtového modelování bylo potřeba změřit chování celé nápravy. Ideální případ verifikace by spočíval v upnutí celé nápravy do trhacího stroje a měření celé závislosti průhybu na zatížení. Vzhledem k tomu, že je náprava rozměrná a listová pera jsou zahnutá, nelze ji jednoduše upnout do trhacího stroje. Proto bylo nutné spokojit se s měřením pomocí nádrhu.



Obr. č. 51 Nádrh

Zdroj: Uni-max, 1996 – 2014

Na vhodně zvolených bodech nápravy byla nejprve změřena výška bodů od podlahy nezatížené tříkolky. Poté se na tříkolku usadil testovací jezdec a vybrané body byly opět změřeny. Je nutné podotknout, že měření pomocí nádrhu navíc se zatížením v podobě živého člověka výrazně ovlivnilo přesnost. Dle mého odhadu se tato pohybovala okolo 1mm. I tak byly zjištěny důležité poznatky. Odečtením deformace pneumatik byla zjištěna průměrná hodnota průhybu nápravy při zatížení jezdcem o hmotnosti 106 kg. Po zaokrouhlení z důvodu přesnosti měření je průhyb nápravy 30 mm.

Na dílu s hlavovou trubkou byla snaha o zjištění natočení konců nápravy při zatížení. V porovnání s přesností měření se natočení jeví jako zanedbatelné.

Z důvodu upřesnění velikosti zatížení v jednotlivých zátěžných stavech bylo rovněž určeno těžiště tříkolky s jezdcem. To se provádělo měřením hmotnosti pod každým kolem nejprve ve vodorovné poloze a následně s podloženým zadním kolem. Pro tento konkrétní případ jezdce bylo zjištěno těžiště ve výšce 382 mm od podlahy a vzdáleno 407 mm od předních kol směrem vzad. Zde je nutné uvést, že variabilita posedu na tříkolce je značná. Celou sedačku lze posouvat v předozadním směru a úhel opěradla je rovněž nastavitelný. Proto lze toto měření brát jako orientační.

### 13.2. Úprava numerického modelu nápravy

V modelu nápravy byl aktualizován model materiálu. Byly použity materiálové parametry zjištěné ze simulace ohybové zkoušky.

Materiálová charakteristika	Hodnota	Jednotka
$E_1$	22335	MPa
$E_2$	22335	MPa
$E_3$	5382	MPa
$\mu_{12}$	0,2	-
$\mu_{23}$	0,2	-
$\mu_{13}$	0,2	-
$G_{12}$	3534	MPa
$G_{23}$	1880	MPa
$G_{13}$	1880	MPa

Tabulka 6 Tabulka upřesněných materiálových charakteristik

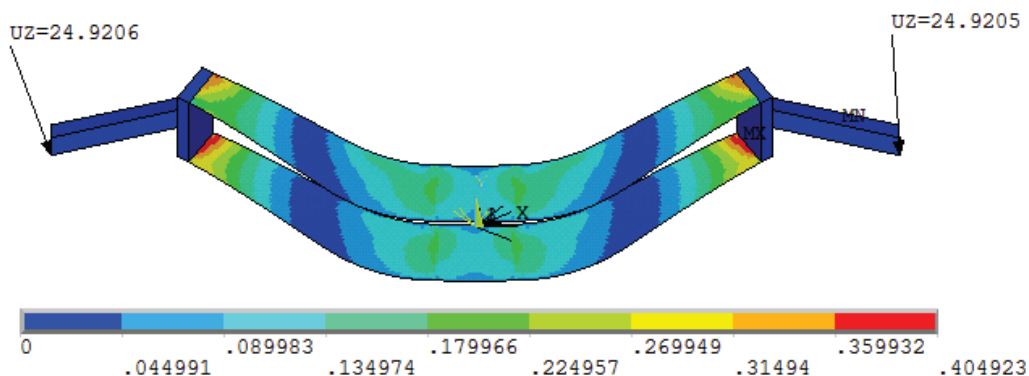
Geometrie byla upravena tak, aby tloušťka odpovídala průměrné tloušťce naměřené mikrometrem tj. 5,02mm. Vzhledem k tomu, že materiál byl odladěn na modelu s prvky typu solid, bylo potřeba zjistit, zda tento fakt hraje ve výpočtech důležitou roli. Byl proto zpracován výpočet jak s prvky typu shell, tak s prvky typu solid.

Pro variantu s objemovými prvky byla zvolena vrstevnatá varianta prvku SOLID 185 stejně jako při simulaci ohybové zkoušky. Počet prvků po tloušťce kompozitu byl také zachován.

Pro model s objemovými prvky byly okrajové podmínky nastaveny následovně. V místě osy čepu byly vytvořeny uzly, pro které byl předepsán nulový posuv ve všech směrech. Vetknutí bylo modelováno pomocí uzlů společných pro list i pro pomocné těleso.

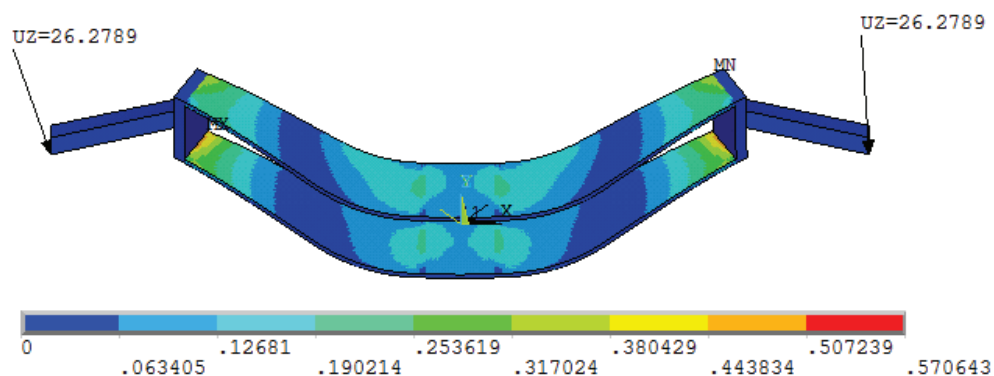
Zatížení bylo voleno tak, aby odpovídalo zatížení při měření poddajnosti nápravy nádrhem tj. odpovídající zatížení jezdcem o hmotnosti 106 kg. Jedná se o první zátěžný stav - klid.

### 13.3. Výsledky výpočtového modelování upravené nápravy



Obr. č. 52 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí - shell

Pro prvky typu shell je maximální hlavní napětí v tahu je 147 MPa, při průhybu 24,9 mm. Bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí kompozitního dílu je  $k=2,47$ .



Obr. č. 53 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí – solid

Pro prvky typu solid je maximální hlavní napětí v tlaku je 207 MPa, při průhybu 26,3 mm. Bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí kompozitního dílu je  $k=1,75$ .

Jak je vidět varianty dávají rozdílné výsledky. Varianta se skořepinovými prvky se ukázala jako tužší. Rozdíl mezi průhyby je přibližně 1,4 mm. Protože byl materiál odladěn na prvku solid, je možné považovat tyto výsledky za věrohodnější. Následující analýzy jsou prováděny již výhradně s tímto typem prvku. Umožňuje to také lepší spojení navazujících dílů. Posledním kladem je také korektnější realizace okrajové podmínky vetknutí. Nevýhodou je výrazně delší výpočetní čas.

Na výsledcích je rovněž patrné, že varianta s objemovými prvky vykazuje vyšší napětí. To je způsobeno větším průhybem nápravy. Při detailnějším zkoumání výsledků jsem zjistil větší napětí na objemové variantě i při srovnatelném průhybu. Ve variantě s objemovými prvky mají vliv i Poissonovské efekty a rozdílná tuhost spojení kompozit-ocel. Tyto efekty u reálného spojení nejsou a vypočtené napětí je z tohoto důvodu vyšší než reálné.

Modely vykazují chybu přibližně 15% respektive 21% v průhybu proti měření. Na velikost chyby můžou mít vliv následující faktory:

- Nerovnoměrná tloušťka listových pružin

Zřejmě největším zdrojem odchylek od skutečnosti se jeví nerovnoměrná tloušťka listů. V kapitole Výpočet modulu pružnosti v ohybu a napětí již byl zmíněn velký vliv tloušťky na chování laminátu.

- Deformace dílů navazujících na laminát

Již před měřením bylo zjištěno, že na součásti s hlavovou trubkou došlo k mírnému ohybu hliníkové části. Dá se tedy předpokládat, že tato oblast se mohla pružně deformovat i během zatížení při měření a ovlivnit tak měření. Toto místo se pro další prototyp upravovalo.

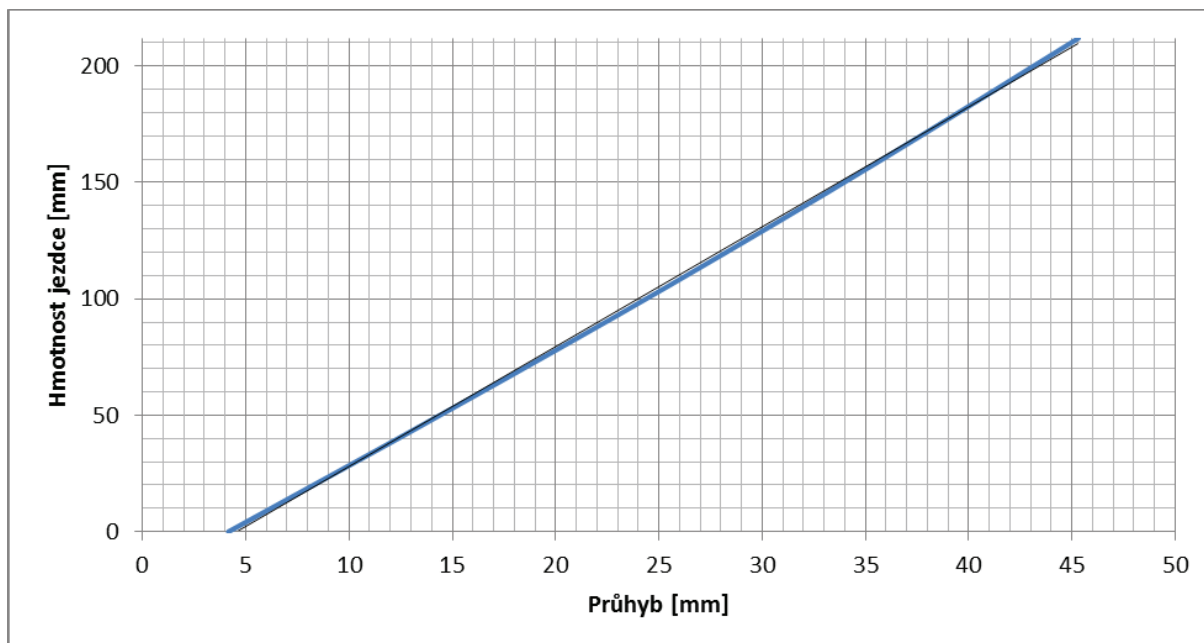
- Vliv tvaru vetknutí laminátu

V modelu je modelováno vetknutí jako rovné. Reálně mají svorky, které drží laminát na okraji poměrně velké zaoblení. Tato změna se může jevit jako zanedbatelná, ale právě deformace a napjatost tohoto konstrukčního uzlu se jeví jako zásadní. Při analýzách druhého prototypu je již tvarová úprava do geometrie zahrnuta.

- Tuhost spojení laminátu v čepech

Reálně je uchycení laminátu v otočných čepech realizováno pomocí šroubového spoje. V laminátu jsou vyvrtány otvory a ten je následně stažen hliníkovým čepem. V analýze se předpokládá, že tuhost spoje bude shodná s tuhostí laminátu bez děr. Nižší reálná tuhost spoje by vysvětlovala větší průhyb nápravy.

Vzhledem k tomu, že vyrobené kompozitní díly jsou tenčí než bylo plánováno, je potřeba zjistit pro jak hmotného člověka by tato varianta připadala v úvahu. K tomu je nejvhodnější použít charakteristiku pružení neboli závislost zátěžné síly na průhyb nápravy. Na následujícím grafu je závislost hmotnosti jezdce na průhybu vyrobené nápravy.



Obr. č. 54 Graf závislosti hmotnosti jezdce na průhybu nápravy

Z grafu je patrné, že závislost je téměř lineární s mírnou progresivitou v celém provozním pásmu. To umožňuje určit použitelnost vyrobené nápravy. Jednoduchým propočtem zjistíme, že ideální hmotnost jezce by byla v tomto případě jen 40 kg.

### 13.4. Shrnutí dosavadního postupu a zhodnocení prvního prototypu

Byl vytvořen zjednodušený numerický model nápravy lehokola z kompozitního materiálu. Na základě tohoto modelu bylo rozhodnuto o konstrukčním provedení nápravy, ideální tloušťce listových per, vrstvení kompozitu a provedly se úpravy geometrie listů. Provedla se příprava pro laminaci a vyrobil se laminát. Bohužel se nepodařilo vyrobit kompozit s danou tloušťkou. Byla vyrobena deska tenčí a tím pádem méně tuhá oproti předpokladu. Dále byla provedena zkouška vyrobeného kompozitního materiálu trojbodým ohybem a byly zjištěny některé materiálové charakteristiky. Další materiálová charakteristika byla zjištěna z numerické simulace ohybové zkoušky. Mezitím byl osazen první prototyp tříkolky s kompozitní nápravou a bylo provedeno měření tuhosti nápravy. Nakonec byl upraven numerický model nápravy a byl porovnán s měřením. Přesto, že má model chybu okolo 15%, prototyp jako takový můžeme považovat za úspěch. Jízda je na první pocit příjemná, náprava pohlcuje nerovnosti. Při krátkém testování lidmi z firmy AZUB tříkolka prokázala kvalitní jízdní vlastnosti. I při testování jezdcí s hmotností okolo 100 kg nedošlo k žádnému viditelnému poškození kompozitu. Původní návrh počítal s přidáním tlumičů, což se při jízdách díky tlumení materiálu neukázalo jako nutné. Náklon tříkolky v zatáčkách byl přijatelný a deformace listů při brzdění byla nízká.



Obr. č. 55 Foto prvního prototypu odpružené tříkolky

## 14. DRUHÝ PROTOTYP

První prototyp ukázal, že toto řešení přední nápravy je použitelné a má cenu ho zlepšovat. Cílem druhého prototypu bylo přiblížit se produktu, který by se měl komerčně vyrábět. Změnou prošel materiál i geometrie. Tento prototyp byl následně představen obchodníkům na výstavě lehkol Spezi 2014.

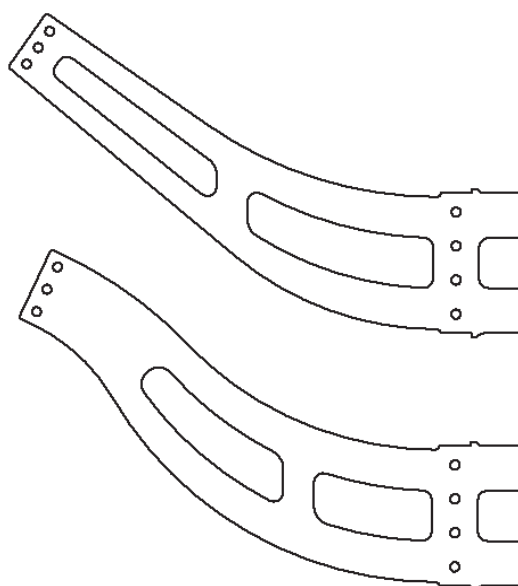
Pro materiál výztuže byla zvolena čedičová vlákna ve formě vyvážené tkaniny. Tento materiál je přírodního původu a jeho použitím bude zajištěn vzhled nápravy odpovídající designu celého lehkola. Vzhledem k tomu, že materiálové vlastnosti by měly být podobné, zůstal model materiálu totožný s modelem sloužícím k výpočtům pro první prototyp.

Byly navrženy dvě nové geometrie listových pružin. Rovná varianta využívá uchycení kompozitu o šířce 35 mm (na obrázku nahoře), zahnutá varianta počítá s 40 mm širokým vetknutím (na obrázku dole). Tloušťka pružin je volena pro dosažení průhybu pružin okolo 12 mm při klidovém zatížení jezdcem o hmotnosti 110 kg. Na druhém prototypu bude použito vyřezávání otvorů do kompozitních dílů pro snížení tuhosti a ladění pro jezdce o hmotnostech 110/90/70 kg. Geometrie pomocného tělesa je upravena přidáním zaoblení v části svírající listové pero.

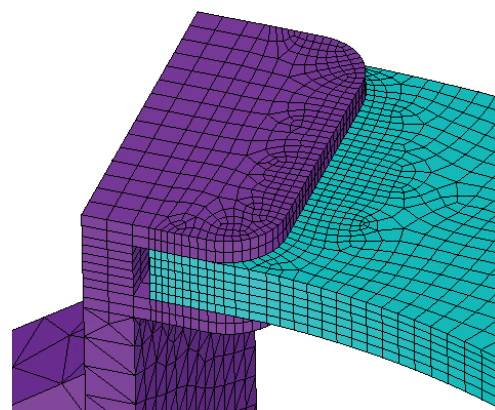
Model diskretizace zůstal obdobný. Využívá objemové prvky a přibližně stejnou velikost prvků.

Model okrajových podmínek je obdobný první variantě. Vetknutí listových per je realizováno pomocí uzlů společných pro list a pomocné těleso. Proti první variantě má však odpovídající nezjednodušený tvar. Pro úsporu výpočetního času jsou použity poloviční modely pro symetrické zátěžné stavy.

Zatížení je realizováno shodně s předchozím výpočtem.



Obr. č. 56 Nové geometrie listových per

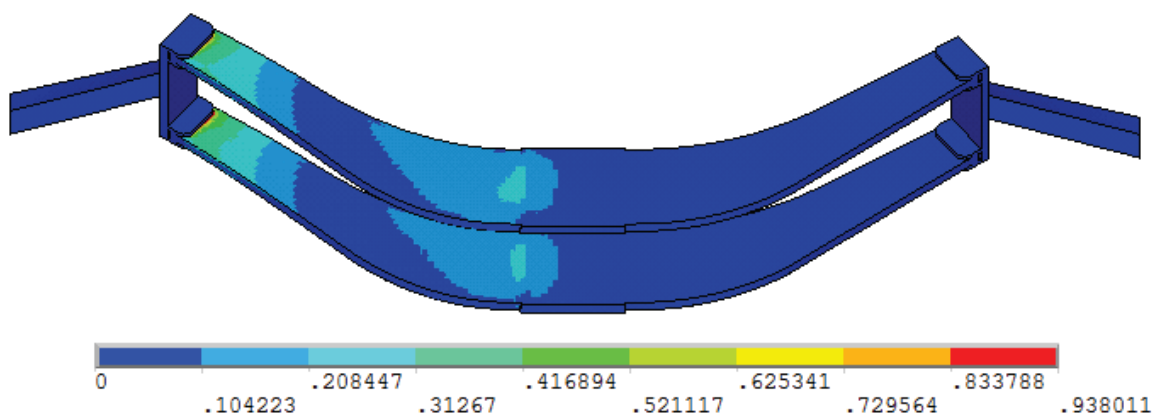


Obr. č. 57 Detail uchycení listového pera

Nejprve je nutné přizpůsobit kompozitní díly bez děr pro jezdce o jmenovité hmotnosti 110 kg. V druhém kroku se vytvoří otvory v listových perech tak, aby poskytovaly ideální odpružení pro jezdce o hmotnosti 70 kg.

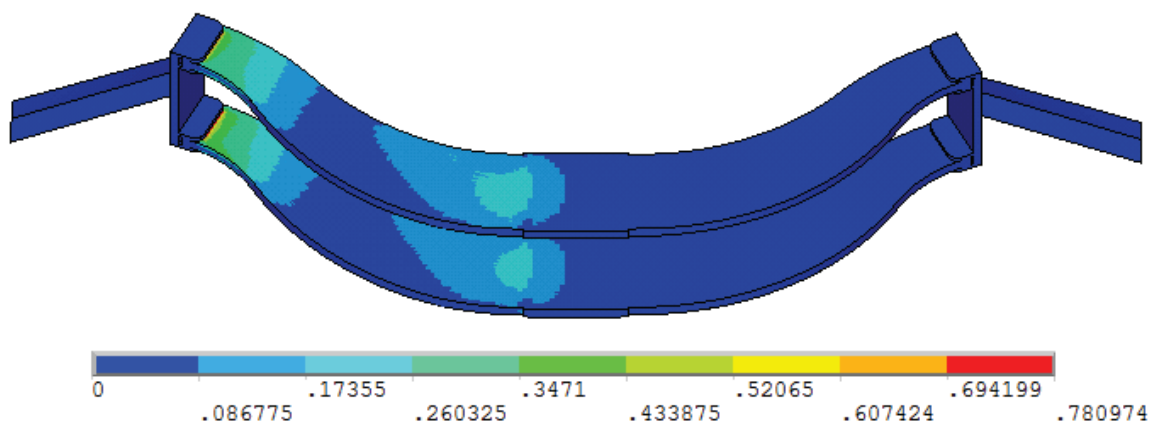
Pro porovnání náprav s novou geometrií byla zvolena shodná tloušťka listů 7 mm. Při klidové zátěži (zátěžný stav č.1) je pro přímou variantu dosaženo průhybu 12,6 mm. Pro zahnutou variantu je průhyb 11,6 mm. Můžeme tedy konstatovat, že zahnutá varianta je tužší.

Při druhém zátěžném stavu simulujícím průjezd zatáčkou dosahuje rovná varianta průhybu zatížené strany 22,5 mm a náklonu 1,56°. Bezpečnost vůči MS pevnosti hlavních napětí je 1,07.



Obr. č. 58 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav zatáčka - rovná

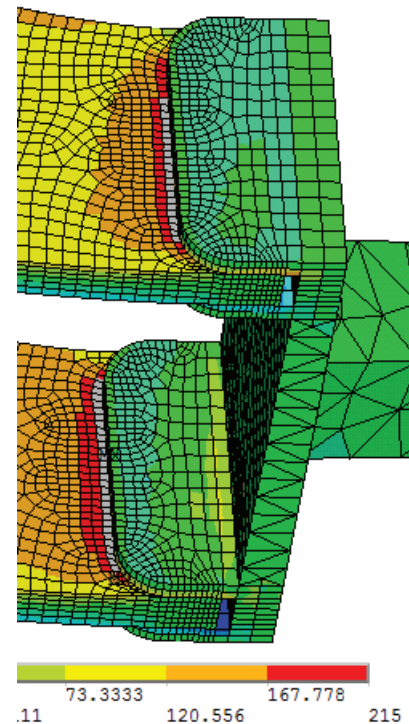
Zahnutá varianta nápravy dosahuje náklonu 1,41° při průhybu zatížené strany 20,32 mm. Bezpečnost vůči MS pevnosti hlavních napětí je 1,28.



Obr. č. 59 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav zatáčka – zahnutá

Z výpočtového modelu je zřejmé, že napětí působící v místě vetknutí jsou značná. Vysoké hodnoty jsou z velké míry dány zjednodušujícími okrajovými podmínkami a nejsou reálná. Reálné napětí v těchto místech budou výrazně nižší zejména z důvodu nedokonalého upnutí laminátu a malých vzájemných posuvů na okraji hliníkového dílu. Rovněž nelze zanedbat ani deformaci hliníkového dílu v upnutí.

Minimálně první řada elementů od vetknutí vykazuje objektivně nereálné hodnoty napětí z důvodu nereálné okrajové podmínky a rovněž nezohledňuje Poissonovské efekty. Na druhé řadě elementů je z těchto důvodů možné pozorovat výrazný pokles napětí. Zatímco první řada elementů vykazuje hlavní orthotropické napětí o hodnotě 281 MPa, druhá řada elementů vykazuje totéž hlavní napětí přibližně o 65 MPa nižší. Na skutečné konstrukci z těchto důvodů můžeme očekávat o desítky MPa nižší napětí než je maximální hodnota napětí zjištěná z tohoto výpočtového modelu.



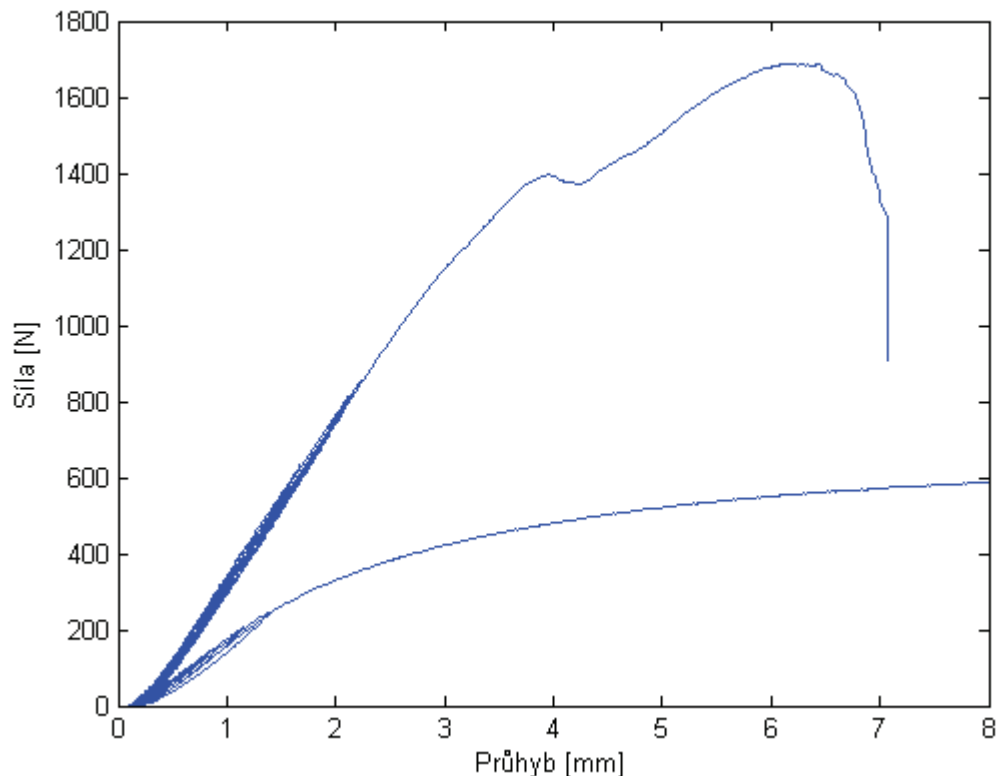
Obr. č. 60 Detail vetknutí listů - zatáčka

Pro výrobu druhého prototypu byla zvolena zahnutá varianta z následujících důvodů:

- delší vetknutá část snižuje napětí v kritickém místě
- větší prostor k ladění otvorů
- zahnutá varianta je tužší v krutu než rovná varianta

Výroba druhého prototypu probíhala opět ve spolupráci s leteckým ústavem. Stejně jako v prvním případě byla vyrobena deska, ze které se následně vodním paprskem vyřezal příslušný tvar listového pera. Deska byla opět vyráběna metodou ruční laminace, ale pro dodržení jednotné tloušťky byl kompozit vakuován mezi dvěma deskami s vloženými distančními podložkami. I přes tuto změnu se nepodařilo dosáhnout rovnoměrné tloušťky 7 mm. Tloušťka kompozitní desky se pohybovala v rozmezí 5,9 - 6,1 mm. Bylo tedy dosaženo rovnoměrné tloušťky, ale na tenčí desce. Snižování tuhosti kompozitních dílů tedy nebylo možno provést, protože nebyl splněn základní požadavek pro tuhost plných listových per.

Z čedičové desky byly vyřezány vzorky na zkoušku ohybem stejně jako u prvního prototypu. Na následujícím grafu je záznam zkoušky pro vzorek s podélnými vlákny a vzorek s vlákny pod úhlem 45°.



Obr. č. 61 Záznam ohybové zkoušky pro čedičovou výztuž

V průběhu zkoušky byly vzorky několikrát zatíženy a odtíženy při nízkých hodnotách zatížení s cílem rozpoznat hodnotu zatížení, kdy se objeví první trvalá deformace. Při vyšších hodnotách zatížení byl rovněž pozorován ratchetting. Na vzorcích bylo proto provedeno několik cyklů při stejném zatížení pro zjištění hranice, kdy se ratchetting projevuje. Touto hranicí se ukázala hodnota zátěžné síly přibližně 600 N, což odpovídá hlavnímu napětí o hodnotě přibližně 136 MPa. Pro dlouhotrvající použití je tedy nezbytně nutné, aby tato hodnota nebyla překročena.

Na základě dat ze zkoušky ohybem vzorků s podélnými vlákny byl vyhodnocen modul pružnosti v ohybu  $E_1=E_2=16346$  MPa. Je tedy zřejmé, že hodnota modulu pružnosti kompozitu s čedičovou výztuží je nižší, než kompozitu se skelnou výztuží. Nepotvrdil se tedy předpoklad o vyšší tuhosti čedičové výztuže proti výztuži ze skelných vláken.

Pevnost čedičového kompozitu byla určena na 276 MPa, což je opět výrazně nižší hodnota proti skelné výztuži.

Na základě těchto poznatků je možné říci, že čedičová výztuž je méně vhodná pro tuto aplikaci a lepší volbou materiálu výztuže je sklo.



Obr. č. 62 Druhý prerotyp odpružené tříkolky



Obr. č. 63 Detail odpružené nápravy druhého prototypu

## 15. NÁMĚTY NA DALŠÍ VÝVOJ

Kompozitní náprava si vyžádá ještě delší vývoj a testování než je možné v rámci této diplomové práce. V následujících bodech je nastíněn případný další postup, který by přinesl nové poznatky využitelné při vývoji nových typů nápravy.

- Kontaktní úloha vetknutí listů

Prakticky u všech výpočtů se ukázalo jako kritické místo vetknutí laminátu do dílu s hlavovou trubkou. To je velmi limitující, protože napětí ve skutečnosti bude odlišné od napětí získaného z modelu nápravy použitého v této práci. Přesnější výpočtový model tohoto spoje by umožnil lepší posouzení pevnosti laminátu. Jednalo by se o kontaktní úlohu, která by umožnila malý relativní posuv laminátu na okraji spoje.

- Zahrnutí navazujících dílů do výpočtu

Zahrnutím čepů a dílu ve kterém je kompozit uchycen by umožnilo lepší dimenzování a využití materiálu na těchto dílech. Cílem by měla být odpovídající bezpečnost a hmotnostní úspora na nápravě.

- Prozkoumání vlivu děr v laminátu a stažení laminátu v čepech na tuhost a pevnost
- Upřesnění více materiálových charakteristik

Implementací více materiálových zkoušek by zajistilo model materiálu, který by lépe odpovídal skutečnosti.

- Posouzení spolehlivosti nápravy pomocí jiných kritérií

Tento bod úzce souvisí s bodem předchozím. Zkušební zjištění Poissonových čísel by umožnilo použití kritéria pevnosti hlavních orthotropických přetvoření. Rovněž stanovení pevnosti kompozitu v tlaku by umožnilo lepší posouzení pevnosti nápravy.

- Ladění pomocí různé orientace jednotlivých vrstev

V kapitole Materiálové varianty byl prokázán velký vliv orientace vrstev na deformaci a napjatost. Různou orientací jednotlivých vrstev případně použitím například jednosměrné tkaniny v některých místech má velký potenciál pro další vývoj. S tím ovšem souvisí analýza okrajových efektů, kterou již nebude možné zanedbat.

- Kvantifikace tlumení

Pro praktické používání tříkolky je tlumení velmi důležitým faktorem. Zjištění hysterezního tlumení materiálu bylo velmi vítané. Do budoucna by bylo vhodné toto tlumení kvantifikovat a ideálně i zvětšit. Nabízí se zde například možnost použití tlumících vrstev přímo v laminátu.

- Analýza nápravy při dynamickém zatěžování

## 16. ZÁVĚR

V této práci byl vytvořen výpočtový model kompozitní nápravy lehokola firmy AZUB pomocí metody konečných prvků. Pomocí tohoto modelu pak byla zpracována deformačně napěťová analýza nápravy, jejíž výsledky byly posouzeny z hlediska možných mezních stavů.

Cíle práce byly v plném rozsahu splněny. Analýza byla provedena pro tři zátěžné stavy. Jako nejnebezpečnější se ukázal zátěžný stav brzdění, při kterém byla minimální bezpečnost v místě vetknutí laminátu, a to ve vrstvě na povrchu dílu. Bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí kompozitního dílu je  $k=2,1$ .

Byly posuzovány varianty konstrukční a materiálové, pomocí kterých byla vybrána vhodná varianta pro výrobu kompozitních dílů. Rovněž byla provedena citlivostní analýza úprav geometrie, pomocí které se významně snížilo namáhání kompozitu, a upřesnil se výsledný tvar listových pružin nápravy.

Ve spolupráci s Leteckým ústavem FSI byly vyrobeny celkem dva prototypy kompozitních dílů nápravy, které byly testovány na upravené tříkolce firmy AZUB. Při výrobě se ukázal jako největší problém dodržení stanovené tloušťky kompozitu. Ta má přitom zcela zásadní roli pro tuhost a chování nápravy. První prototyp listových pružin byl vyroben tenčí a se značně kolísající tloušťkou, což neumožnilo přesnou verifikaci výsledků a náprava byla významně poddimenzována. Pro druhý prototyp byl použit upravený výrobní postup, kterým byla dosažena rovnoměrná tloušťka, ačkoli konečná tloušťka listového pera byla opět nedostatečná. Zde se projevíly nevýhody ruční laminace kompozitů.

Pro korekci materiálových vlastností byla na vyrobených vzorcích provedena zkouška tříbodovým ohybem. Ta byla v rámci možností provedena dle normy DIN EN 2746 a následně simulována v programu ANSYS. Tímto způsobem byly zjištěny skutečné vlastnosti vyrobeného kompozitu, a to konkrétně moduly pružnosti v ohybu  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  a modul pružnosti ve smyku  $G_{12}$ . Po zahrnutí těchto materiálových charakteristik do výpočtu bylo provedeno měření tuhosti nápravy, které bylo porovnáno s numerickým výpočtem. Chyba výpočtu od skutečnosti je 15%.

Při provádění zkoušky ohybem bylo rovněž zjištěno inherentní tlumení materiálu hysterezního charakteru. Toto materiálové tlumení je v aplikaci pro nápravu lehokola velmi cenné. Při původním návrhu bylo počítáno s použitím olejových tlumičů. Po krátkém testování se však ukázalo, že použití tlumičů u nápravy s kompozitními listovými pery není nezbytně nutné.

Dále bylo zjištěno, že u kompozitních materiálů použitých v této práci dochází od určitého zatížení k ratchetingu. Je tedy nezbytně nutné, aby byla listová pera namáhána pod touto hranicí. K tomu je zapotřebí zejména dodržení stanovené tloušťky kompozitních dílů při výrobě.

Druhý prototyp tříkolky byl prezentován na výstavě lehokol v Německu Spezi 2014, kde si získal pozitivní reakce obchodníků.

## 17. POUŽITÁ LITERATURA

1. April 24, 2012. *Bent Up Cycles* [online]. Dostupné z: <http://bentupcycles.blogspot.cz/2012/04/azub-t-tris-trike-is-here.html> [Citováno 2014-05-11]
2. *AZUB BIKE: recumbents, trikes, vélo couché, liegerad, liegedreirad* [online]. Dostupné z: <http://www.azub.eu/CZ/azub-tricon-folding-recumbent-trike/> [Citováno 2014-05-09]
3. Ball, B. ©2014. *BentRider Online* [online]. Dostupné z: <http://www.bentrideronline.com/?p=5952> [Citováno 2014-05-09]
4. Daniel, I. & Ishai, O. 1994. *Engineering mechanics of composite materials*. New York: Oxford University Press.
5. Everett & Wash. PRNewswire. *Boeing: The Boeing Company* [online]. Dostupné z: <http://boeing.mediaroom.com/2014-01-24-Boeing-Rolls-Out-First-787-Dreamliner-at-Increased-Production-Rate> [Citováno 2014-05-10]
6. Havel Composites. *Hlavní katalog Havel*. Přáslavice, Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/>
7. IDAFLIEG. März 1988. *Dimensionierungsrichtwerte für den Segel- und Motorsegelflugzeugbau*
8. Jones, R. 1999. *Mechanics of composite materials*. 2nd ed. Philadelphia: Taylor.
9. Klement, J., Helešic, J., Horský, J., Dymáček, P. & Juračka, J. VUT Brno, Fakulta strojní, Letecký ústav. 1995. *Zařízení a metodika pro výzkum provozních vlivů na vlastnosti kompozitních dílů*
10. Laš, V. 2004. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita.
11. *Lauf Forks* [online]. Dostupné z: <http://www.laufforks.com/TheLaufTrailRacer.aspx> [Citováno 2014-05-09]
12. *Modern Airlines* [online]. Dostupné z: [http://modernairliners.com/Boeing787\\_files/Specifications.html](http://modernairliners.com/Boeing787_files/Specifications.html) [Citováno 2014-05-10]
13. Parnas, R., Shaw, M. & Liu, Q.. August 2007. *Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites*. Závěrečná zpráva. Burlington: University of Connecticut. Dostupné z: [www.uvm.edu/~transctr/pdf/netc/netc63\\_03-7.pdf](http://www.uvm.edu/~transctr/pdf/netc/netc63_03-7.pdf)
14. Přemysl, J., Ondráček, E., Vrbka, J. & Burša, J. 2004. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I. 3.*, přeprac. vyd., v Akademickém nakl. CERM 1. Brno: CERM.
15. *Recumbent Trikes - ICE* [online]. Dostupné z: <http://www.icetrikes.co/explore-our-trikes/sprint#> [Citováno 2014-05-09]
16. R&G. 06/2009. *Faserverbundwerkstoffe Handbuch*. Waldenbuch, Dostupné z: [www.r-g.de](http://www.r-g.de)
17. Sep 17, 2013. *Phys.org* [online]. Dostupné z: <http://phys.org/news/2013-09-high-tech-bike-world.html> [Citováno 2014-05-11]

18. *Steintrikes* [online]. Dostupné z: <http://www.steintrikes.net/steintrikes-our-products/galerie-steintrikes/index.php> [Citováno 2014-05-09]
19. Taich, T.: Nastavení odpružení krůček po krůčku. *Velo*. 2005, č. 3. Dostupné z: <http://www.iveloc.cz/casopis/2005-3/ukazka1/>
20. Vrbka, J.: *Mechanika kompozitů*. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně, 2008, Brno. (cs)
21. Warren. 04/20/2011. *The Recumbent & HPV Information Center* [online]. Dostupné z: [http://www.recumbents.com/forums/topic.asp?TOPIC\\_ID=3850](http://www.recumbents.com/forums/topic.asp?TOPIC_ID=3850) [Citováno 2014-05-09]
22. Wood, K. 2/3/2014. *Composites World* [online]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/composite-leaf-springs-saving-weight-in-production-suspension-systems> [Citováno 2014-05-10]
23. 1993-2014. *Liegerad: HP Velotechnik Liegeraeder, Dreirad und recumbent Infos* [online]. Dostupné z: [http://www.hpvelotechnik.com/produkte/scorpionfs/fahrwerk\\_e.html](http://www.hpvelotechnik.com/produkte/scorpionfs/fahrwerk_e.html) [Citováno 2014-05-09]
24. © 1993-2014. *Liegerad: HP Velotechnik Liegeraeder, Dreirad und recumbent Infos* [online]. Dostupné z: [http://www.hpvelotechnik.com/produkte/scorpionfs/index\\_e.html](http://www.hpvelotechnik.com/produkte/scorpionfs/index_e.html) [Citováno 2014-05-09]
25. © 1996 - 2014. *Uni-max* [online]. Dostupné z: <http://www.uni-max.cz/nadrh-0-300-mm-002/d/> [Citováno 2014-05-11]
26. © 2008. *Boeing: The Boeing Company* [online]. Dostupné z: [http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/article\\_04\\_2.html](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html) [Citováno 2014-05-10]
27. © 2008. Carbon Fibre. *Bikeoff Design Resource* [online]. Dostupné z: [http://www.bikeoff.org/design\\_resource/DR\\_materials\\_typology\\_composites\\_carbon.shtml](http://www.bikeoff.org/design_resource/DR_materials_typology_composites_carbon.shtml) [Citováno 2014-05-09]
28. © 2008. Glass Fibre. *Bikeoff Design Resource* [online]. Dostupné z: [http://www.bikeoff.org/design\\_resource/DR\\_materials\\_typology\\_composites\\_glass.shtml](http://www.bikeoff.org/design_resource/DR_materials_typology_composites_glass.shtml) [Citováno 2014-05-09]
29. © 2008. Aramid Fibre. *Bikeoff Design Resource* [online]. Dostupné z: [http://www.bikeoff.org/design\\_resource/DR\\_materials\\_typology\\_composites\\_aramid.shtml](http://www.bikeoff.org/design_resource/DR_materials_typology_composites_aramid.shtml) [Citováno 2014-05-09]
30. © 2009. *Steintrikes: trike and recumbent place* [online]. Dostupné z: <http://www.steintrikes.com/trike/mungo.php> [Citováno 2014-05-09]
31. © 2010. *SMARTER BUILDING SYSTEMS* [online]. Dostupné z: <http://www.basalt-mesh-fiber.com/> [Citováno 2014-05-10]
32. © 2013. *Windcheetah HPV: the world's most advanced recumbent tricycle* [online]. Dostupné z: <http://www.windcheetah.co.uk/hypersport.html> [Citováno 2014-05-09]

## 18. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 První prototyp odpružené tříkolky.....	10
Obr. č. 2 Vidlice Lauf.....	12
Obr. č. 3 Tříkoka ICESprint FSX.....	13
Obr. č. 4 Detail nápravy ICESprint .....	13
Obr. č. 5 HPVelotechnik Scorpion fs 20 .....	14
Obr. č. 6 Detail nápravy Scorpion fs .....	14
Obr. č. 7 Windcheetah HyperSport .....	15
Obr. č. 8 Detail odpružení HyperSport.....	15
Obr. č. 9 Steintrikes Mungo .....	16
Obr. č. 10 Detail nápravy Mungo .....	16
Obr. č. 11 Azub Tricon.....	17
Obr. č. 12 Rozdělení kompozitních materiálů.....	18
Obr. č. 13 Použití materiálů na Boeingu 787 .....	20
Obr. č. 14 Skelná tkanina.....	21
Obr. č. 15 Uhlíková tkanina.....	21
Obr. č. 16 Aramidová tkanina .....	21
Obr. č. 17 Čedičová tkanina .....	22
Obr. č. 18 Schéma postupu.....	23
Obr. č. 19 Souřadný systém kompozitu.....	23
Obr. č. 20 Záznam zkoušky tahem kompozitu sklo-epoxid .....	24
Obr. č. 21 Způsoby porušení při tahovém namáhání    Obr. č. 22 vzorky po zkoušce tahem .	26
Obr. č. 23 Způsoby porušení při tlakovém namáhání.....	27
Obr. č. 24 Vzorky po zkoušce tlakem .....	27
Obr. č. 25 Vzorek po zkoušce tahem s vychýlením vláken o 10° .....	27
Obr. č. 26 Souřadný systémem kompozitu.....	28
Obr. č. 27 Kritérium hlavních napětí.....	29
Obr. č. 28 Neodpružená náprava tříkolky AZUB.....	31
Obr. č. 29 Varianta s čepy .....	32
Obr. č. 30 Varianta s vetknutím.....	33
Obr. č. 31 Model geometrie.....	35
Obr. č. 32 Model okrajových podmínek.....	35
Obr. č. 33 Model zatížení pro stav klid, brzdění (vlevo) a stav zatáčka (vpravo).....	36
Obr. č. 34 Porovnání kritéria pevnosti hlavních orthotropních napětí .....	37
Obr. č. 35 Materiálové varianty.....	38
Obr. č. 36 Porovnání průhybu nápravy.....	39
Obr. č. 37 Tvarová úprava .....	42

Obr. č. 38 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav klid .....	45
Obr. č. 39 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav zatačka.....	45
Obr. č. 40 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav brzda.....	45
Obr. č. 41 Rozložení listových per a .....	46
Obr. č. 42 Schéma výroby kompozitu .....	47
Obr. č. 43 Foto z výroby kompozitní desky .....	48
Obr. č. 44 Ohybová zkouška kompozitu .....	49
Obr. č. 45 Záznam ohybové zkoušky pro vzorky $\pm 45^\circ$ .....	50
Obr. č. 46 Detail hysterezních smyček .....	51
Obr. č. 47 Záznam ohybové zkoušky pro vzorky $0/90^\circ$ .....	52
Obr. č. 48 Model geometrie a okrajových podmínek .....	54
Obr. č. 49 Průhyb vzorku $0/90^\circ$ .....	55
Obr. č. 50 Průhyb vzorku $\pm 45^\circ$ .....	55
Obr. č. 51 Nádrh .....	56
Obr. č. 52 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí - shell.....	58
Obr. č. 53 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí – solid.....	58
Obr. č. 54 Graf závislosti hmotnosti jezdce na průhybu nápravy.....	59
Obr. č. 55 Foto prvního prototypu odpružené tříkolky.....	60
Obr. č. 56 Nové geometrie listových per.....	61
Obr. č. 57 Detail uchycení listového pera .....	61
Obr. č. 58 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav zatačka - rovná .....	62
Obr. č. 59 Kritérium pevnosti hlavních orthotropních napětí pro zátěžný stav zatačka – zahnutá.....	62
Obr. č. 60 Detail vetknutí listů - zatačka .....	63
Obr. č. 61 Záznam ohybové zkoušky pro čedičovou výztuž.....	64
Obr. č. 62 Druhý proutyp odpružené tříkolky .....	65
Obr. č. 63 Detail odpružené nápravy druhého prototypu .....	65

## 19. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Materiálové charakteristiky .....	34
Tabulka 2 Velikosti zátěžných sil.....	36
Tabulka 4 Materiálové charakteristiky .....	43
Tabulka 5 Srovnání listových per s různým objemovým podílem.....	44
Tabulka 6 Tabulka tloušťek vzorků.....	53
Tabulka 7 Tabulka upřesněných materiálových charakteristik .....	57

## 20. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN

FEA		konečněprvková analýza
MKP		metoda konečných prvků
KM		kompozitní materiál
<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Význam veličiny</b>
b	[mm]	šířka vzorku
d	[mm]	průhyb vzorku
h	[mm]	tloušťka vzorku
k	[-]	bezpečnost vůči meznímu stavu pevnosti hlavních orthotropických napětí
$m_f$	[-]	hmotnostní podíl vláken
$m_m$	[-]	hmotnostní podíl matrice
$t_v$	[mm]	tloušťka vrstvy
$v_f$	[-]	objemový podíl vláken
$v_m$	[-]	objemový podíl matrice
$E_i$	[MPa]	modul pružnosti v tahu v hlavních materiálových směrech
$E_f$	[MPa]	modul pružnosti v tahu vláken
$E_o$	[MPa]	modul pružnosti v ohybu
$E_m$	[MPa]	modul pružnosti v tahu matrice
F	[N]	zátěžná síla
$F_{Di}$	[N]	dostředivá síla
$F_G$	[N]	tíhová síla
$F_{Ti}$	[N]	třecí síla
$F_{Ni}$	[N]	normálová síla
$F_S$	[N]	setrvačná síla -zátáčka
$F_{SZ}$	[N]	setrvačná síla – brzdění
$G_i$	[MPa]	modul pružnosti ve smyku v hlavních materiálových směrech
$G_f$	[MPa]	modul pružnosti ve smyku vláken
$G_m$	[MPa]	modul pružnosti ve smyku matrice
L	[mm]	vzdálenost podpor
$M_c$	[kg]	hmotnost kompozitu
$M_f$	[kg]	hmotnost vláken
$M_m$	[kg]	hmotnost matrice

---

$\epsilon_{krit,d,L}$	[-]	podélné kritické přetvoření v tlaku
$\epsilon_{krit,d,T}$	[-]	příčné kritické přetvoření v tlaku
$\epsilon_{krit,t,L}$	[-]	podélné kritické přetvoření v tahu
$\epsilon_{krit,t,T}$	[-]	příčné kritické přetvoření v tahu
$\gamma_{krit,LT}$	[-]	kritický zkos
$\mu_i$	[-]	Possionovo číslo v hlavních materiálových směrech
$\mu_f$	[-]	Possionovo číslo vláken
$\mu_m$	[-]	Possionovo číslo matrice
$\rho_c$	$[g \cdot cm^{-3}]$	hustota kompozitu
$\rho_f$	$[g \cdot cm^{-3}]$	hustota vláken
$\rho_m$	$[g \cdot cm^{-3}]$	hustota matrice
$\sigma_o$	[MPa]	ohybové napětí
$\sigma_{m,ef\ krit}$	[MPa]	napětí v matrici odpovídající stavu, kdy praská vlákno
$\sigma_{pf}$	[MPa]	mez pevnosti vláken
$\sigma_{pi}$	[MPa]	mez pevnosti v hlavních materiálových směrech
$\sigma_{pm}$	[MPa]	mez pevnosti matrice
$\sigma_{pd,L}$	[MPa]	podélná pevnost v tlaku
$\sigma_{pd,T}$	[MPa]	příčná pevnost v tlaku
$\sigma_{pt,L}$	[MPa]	podélná pevnost v tahu
$\sigma_{pt,T}$	[MPa]	příčná pevnost v tahu
$\sigma_{1d}$	[MPa]	maximální hlavní napětí v tlaku
$\sigma_{1t}$	[MPa]	maximální hlavní napětí v tahu
$\tau_{12}$	[MPa]	maximální hlavní smykové napětí
$\tau_{p,LT}$	[MPa]	smyková pevnost