



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH KOMPOZITNÍHO POHLCOVAČE NÁRAZU DLE PRAVIDEL SOUTĚŽE FORMULA STUDENT

DESIGN OF A COMPOSITE SHOCK ABSORBER ACCORDING TO THE RULES OF THE FORMULA
STUDENT COMPETITION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Janečka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Šplíchal, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Jiří Janečka**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Šplíchal, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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

Návrh kompozitního pohlcovače nárazu dle pravidel soutěže Formula Student

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte rešerši na téma absorbéry nárazu využívané ve Formuli Student/motorsportu. Na základě této rešerše navrhnete konstrukční provedení deformačního členu pro monopost Formule Student vyhovující pravidlům soutěže, proveďte vybrané simulace, vyhodnoťte výsledky a zhodnoťte navržené řešení.

Cíle bakalářské práce:

- provedte rešerši na téma absorbéry nárazu využívané ve Formuli Student/motorsportu;
- navrhnete konstrukční provedení deformačního členu pro monopost Formule Student vyhovující pravidlům soutěže;
- provedte vybrané simulace;
- vyhodnoťte výsledky;
- zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

Mahmood Husein Dattoo, Mechanics of Fibrous Composites, ISBN 1-85166-600-1, Elsevier Science Publishers, 1991

Middelton, D. H., Composite materials in aircraft structures, 1st ed., London, Longman Grup, 1990, ISBN: 0-582-01712-2

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá jednou z možností vylepšení stávajícího řešení absorberu nárazu pro monopost Dragon e3 týmu TU Brno Racing. První část práce obsahuje řešerši věnující se využití kompozitů při absorpci energie, mechanismům a poruchám probíhajícím při samotné absorpci. Dále jsou zmíněny a popsány nejpoužívanější koncepty pohlcovačů nárazu. Ve druhé části je proveden návrh a realizace technického řešení kompozitního absorberu nárazu dle pravidel soutěže Formula Student. Toto řešení bylo poté otestováno na padostroji a změřena potřebná data. Na závěr byly vyhodnoceny výsledky pádových zkoušek, ty byly poté porovnány s daty simulovanými a byly provedeny korekce výpočtového modelu. Proběhlo i srovnání s předchozí generací absorberu a byly popsány hlavní rozdíly. Pozornost byla věnována i poruchám vznikajícím při pádové zkoušce. Technické řešení bylo zhodnoceno a byly navrženy úpravy pro budoucí generace deformačních členů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Absorbér nárazu, kompozit, specifická absorpce energie, Formula Student, pádové zkoušky

ABSTRACT

The thesis deals with one of the possibilities of improving the existing impact absorber solution for the Dragon e3 monopost of the TU Brno Racing team. The first part of the thesis contains a research on the use of composites in energy absorption, mechanisms and failures occurring during the absorption itself. Then the most used concepts of impact absorbers are mentioned and described. In the second part, the design and implementation of the technical solution of a composite impact attenuator according to the rules of the Formula Student competition is carried out. This solution was then tested with drop test and the necessary data were measured. Finally, the crash test results were evaluated, these were then compared with the simulated data and corrections were made to the computational model. Comparisons with the previous absorber generation were also made and the main differences were described. Attention was also paid to the failures occurring during the crash test. The technical solution was evaluated and modifications for future generations of impact attenuators were proposed.

KEYWORDS

Impact attenuator, composite, specific energy absorption, Formula Student, drop tests

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANEČKA, Jiří. *Návrh kompozitního pohlcovače nárazu dle pravidel soutěže Formula Student*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149124>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.
Vedoucí práce Jan Šplíchal.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Jana Šplíchala a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Jiří Janečka

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce za ochotu a pomoc při testování vzorků.

Rád bych poděkoval i firmám, bez kterých by nebyla tato práce možná. Konkrétně děkuji firmě Fiberpreg za poskytnutí uhlíkového prepregu pro výrobu, firmě Forklim s.r.o. za možnost obrození pozitivních forem a firmě KTG za otestování vzorků absorbérů na padostroji. Firmě SVS FEM s.r.o. děkuji za rady při nastavení simulace.

Děkuji také týmu TU Brno Racing za motivační prostředí a získané znalosti, především pak kolektivům chasis sekce Dragon X, Dragon e1, Dragon e2 a Dragon e3.

Hlavní poděkování pak patří mé rodině a přátelům za vytrvalou podporu při studiu.

OBSAH

Úvod	11
1 Stanovení konvencí značení	12
2 Formula Student	13
2.1 Bezpečnostní předpisy pro Formuli Student	13
3 Kompozitní materiály	16
3.1 Používané typy vláken	16
3.2 Používané typy maticí	17
3.3 Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti	18
3.4 Sendvičové konstrukce	18
4 Přehled možných konceptů	19
4.1 Absorbéry v motorsportu	19
4.2 Absorbéry ve Formuli Student	20
4.2.1 Standardní FSAE pohlcovač	20
4.2.2 Pěnové pohlcovače	20
4.2.3 Voštinové pohlcovače	21
4.2.4 Kovové pohlcovače	21
4.2.5 Kompozitní pohlcovače	21
4.3 Absorbér nárazu monopostu Dragon e2	23
4.4 Kritéria pro volbu vhodného konceptu	24
5 Specifická absorpce energie	25
5.1 Kvazi-statické testy	25
5.2 Nárazové testy	25
5.3 Výpočet SEA	25
5.4 Experimentální stanovení SEA	27
5.4.1 Iniciační poruchy	28
6 Poruchy pod dynamickým zatížením	31
6.1 Katastrofální porucha	31
6.2 Progresivní porucha	31
6.3 Charakteristické typy progresivních poruch kompozitu	32
6.3.1 Příčný smyk nebo fragmentace	32
6.3.2 Ohyb nebo štěpení laminy	33
6.3.3 Křehká fragmentace	33
6.3.4 Lokální vzpěr nebo progresivní ohýbání	34
6.4 Kritické poruchy	34
6.5 Charakteristické typy poruch sendvičů	35
6.5.1 Vrásnění a vrásnění s delaminací	35
6.5.2 Vzpěr a zvlnění smykem	35
6.5.3 Zvlnění potahu	35

7	Návrh pohlcovače	36
7.1	CAD model.....	36
7.2	Volba materiálu	36
7.3	Předběžný návrh skladby.....	37
7.4	MKP analýza	38
7.4.1	Materiálové modely	38
7.4.2	Vysíťování	38
7.4.3	Modelování kompozitů	39
7.4.4	Okrajové podmínky.....	40
7.4.5	Výsledky simulace	40
7.5	Výpočet minimálního přesahu.....	40
7.6	Návrh nepropustné přepážky (AIP).....	41
8	Výroba absorberu	42
8.1	Návrh a výroba forem.....	42
8.2	Laminace absorberů	43
9	Pádové zkoušky	45
9.1	Zpracování dat.....	45
9.2	Vzorek ED3-V2.....	46
9.3	Vzorek ED3-V3.....	47
9.3.1	Mechanismy poruchy doprovázející pohlcení nárazu.....	47
10	Vyhodnocení pádových zkoušek	51
10.1	Porovnání reálných a vypočítaných hodnot.....	51
10.2	Porovnání reálných a simulovaných hodnot.....	52
10.3	Možné úpravy pro budoucí generace pohlcovačů	54
10.4	Porovnání s předchozím konceptem	55
	Závěr	56
	Použité informační zdroje	58
	Seznam použitých zkratek a symbolů	62

ÚVOD

Při konstrukci závodních vozidel je cílem vyvinout co nejrychlejší vůz, to s sebou nese i rostoucí nebezpečí nehody při vysokých rychlostech. S tím, jak závodní vozy v průběhu let zrychlovaly, vzrůstaly i požadavky na bezpečnostní zařízení jak ve vozidlech, tak i na trati.

V případě nárazu do pevné překážky je lidské tělo vystaveno přetížení, které je tím větší, čím kratší je doba, za kterou se pohyb zastaví. Proto se začaly objevovat struktury, které sloužily k pohlcení energie a rozložení nárazu po delší časový úsek, čímž snižovaly přetížení působící na pilota.

Pro historický vývoj lze použít Formuli 1, jelikož obvykle udává trend pro ostatní závodní série. V prvopočátku šlo především o rychlost, například bezpečnostní pásy a nehořlavé oblečení byly doporučeny v roce 1968. V roce 1983 byl poprvé představen monokok z uhlíkových vláken. [1] První povinné nárazové testy byly zavedeny až v roce 1985 [2], jednalo se pouze o čelní nárazy. V současné době musí monoposty projít sérií testů. Jedná se o statické testy dokazující pevnost chasis a dynamické testy dokazující splnění pravidel pro nárazové struktury. Všechny testy jsou prováděny za dozoru FIA [3], [4]

Deformační prvky jsou i nedílnou součástí monopostů soutěžících v soutěži Formula Student. Tým TU Brno racing vznikl v roce 2010. Od té doby v něm studenti postavili deset formulí se spalovacím motorem a dvě s elektrickým pohonem. [5] Všechny monoposty však měly společný cíl, a tím bylo být lepší než předchozí generace. Tato bakalářská práce se tedy zabývá vývojem absorbéru pro třetí generaci monopostu soutěžícím v elektrické kategorii. Tento absorbér by měl rozšířit znalosti týmu v oblasti využití kompozitních materiálů pro absorpci energie a přinést řešení, které posune výkonnost monopostu.



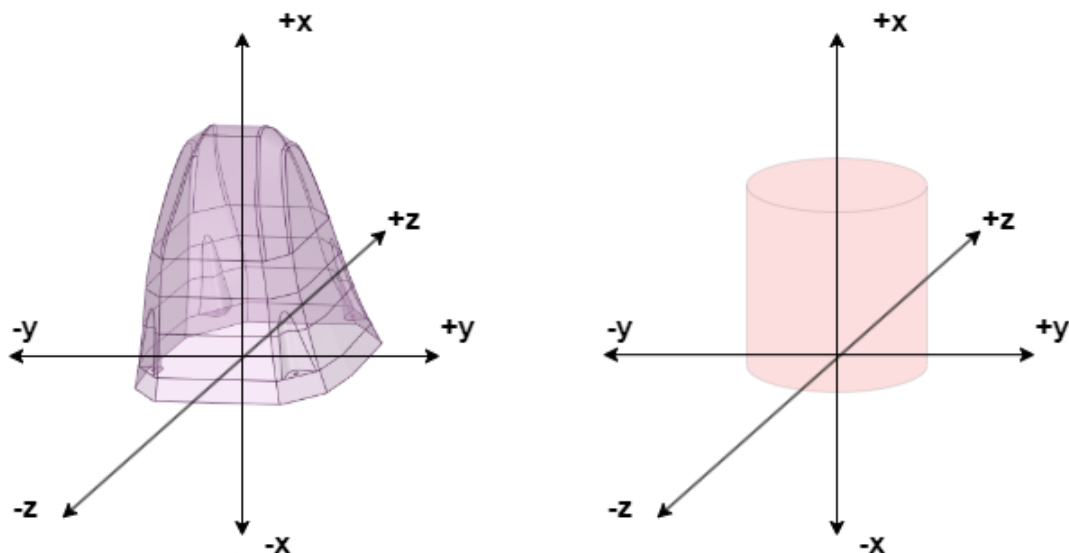
Obr. 1 Monopost Brabham při crash testu [6]

1 STANOVENÍ KONVENCÍ ZNAČENÍ

V následující kapitole jsou definovány základní konvence a vymezeny některé pojmy této bakalářské práce.

Pro značení násobků tíhového zrychlení bude použit symbol g , $1 g$ je rovno tíhovému zrychlení $9,81 \text{ m/s}^2$. Symbol malé g je převzat z oficiálních pravidel soutěže Formula Student [7].

Kladné směry působících sil a zrychlení na absorbér i dopadající závaží odpovídají kladným směrům os v obrázku (Obr. 2). Podstatné jsou především směry na padajícím závaží, jelikož právě na něm je umístěn akcelerometr. Rychlost bude vynášena kladně, pokud bude směřovat v záporném směru osy x . Je to především z důvodu přehlednosti grafů. Totéž platí pro deformaci. Její nulová hodnota je stanovena jako první dotek závaží a absorbéru.



Obr. 2 Stanovení kladných směrů os pro absorbér a závaží

Směry y a z nejsou pro vyhodnocení zkoušek podstatné, proto budou udávány veličiny pouze v hlavním směru a tím je osa x .

2 FORMULA STUDENT

Formula Student je mezinárodní soutěž pro univerzity. Cílem je za jeden rok vyvinout, vyrobit a otestovat monopost formulového typu dle pravidel soutěže. Důraz není kladen pouze na výkonnost monopostu na trati při dynamických disciplínách, důležité jsou také statické disciplíny, ve kterých se před odbornou komisí obhazuje jak inženýrský návrh monopostu (Engineering design), tak i porozumění finanční stránce výroby (Cost and manufacturing). V neposlední řadě je disciplína Business plan presentation, kde se prezentuje fiktivní marketingová strategie s cílem prodat daný monopost nebo jeho část. [8]

Dynamické disciplíny se skládají z akcelerace (sprint na 75 m), autonomní akcelerace (sprint na 75 m, kde se monopost sám ovládá bez zásahu člověka), skidpad (disciplína zjišťující maximální rychlost v ustáleném stavu zatáčení), autonomní skidpad, autocross (jedno měřené kolo na vytyčené trati) a endurance (vytrvalostní závod na trati podobné trati z autocrossu, cílem je zdolat přibližně 22 km). [7]

Soutěže se účastní celosvětově přibližně 800 týmů. TU Brno Racing se po pouhých dvou sezónách v elektrické kategorii řadí mezi světovou špičku a patří mezi 30 nejlepších týmů ve světovém žebříčku elektrické kategorie. [9]



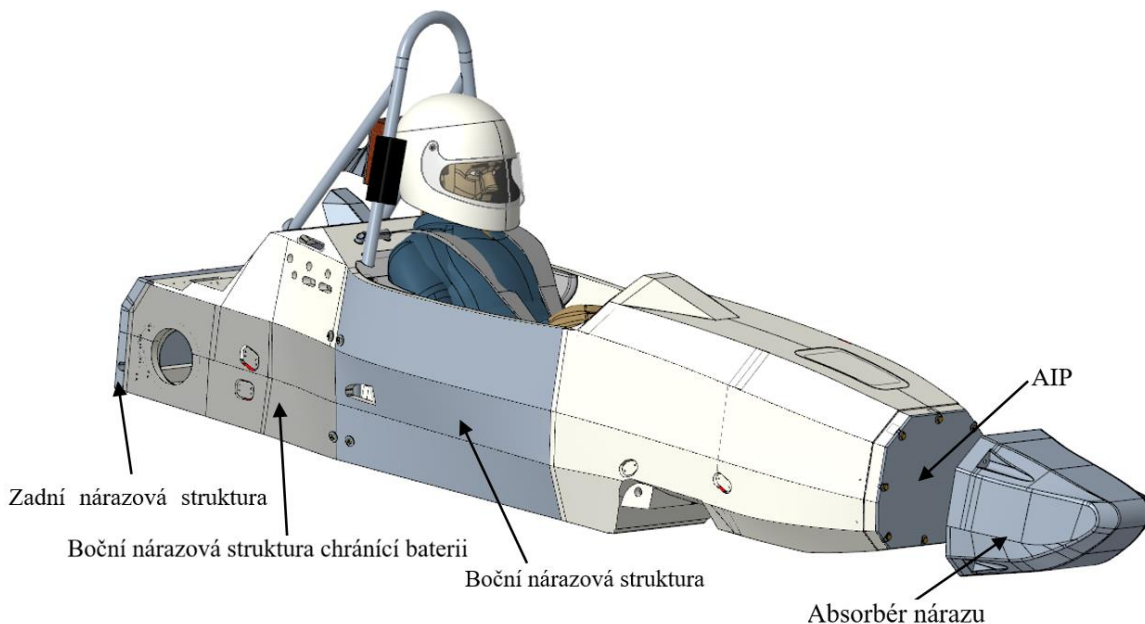
Obr. 3 Skupinová fotografie ze závodů FS EAST 2022 [10]

2.1 BEZPEČNOSTNÍ PŘEDPISY PRO FORMULI STUDENT

Pravidla a předpisy ve Formuli Student jsou cíleny především na zajištění bezpečnosti jak pilota, tak i okolí. Část pravidel je věnována i ochraně v případě nárazu. Hlavními prvky ochrany řidiče jsou bezpečnostní šesti- nebo sedmi-bodové pásy dle homologace SFI 16.1, SFI 16.5, SFI 16.6 nebo FIA 8853/2016. U bezpečnostních pásů jsou předepsány pevnosti bodů uchycení, které je nutno testovat na reálných reprezentativních vzorcích. Další součástí ochrany je opěrka hlavy a obal ochranných oblouků (padding) o předepsaných rozměrech a materiálu. Ty chrání především hlavu řidiče. V neposlední řadě je to výstroj řidiče

samotného, tzn. helma, nehořlavá balaklava, boty, rukavice, overal a spodní prádlo. Veškerá výstroj musí být v perfektním nepoškozeném stavu a musí být homologovaná dle daných předpisů. Týmy mají i možnost využít zařízení HANS pro ochranu krční páteře pilota. [7]

Jelikož tým TU Brno Racing vyvíjí v současné době třetí monopost s elektrickým pohonem [11], následující řádky se zaměří na tuto podkategorii. Oproti monopostům se spalovacím motorem musí být před nárazem chráněn nejen řidič, ale i baterie monopostu. Ochrana je předepsána při čelním nárazu (pohlcovačem nárazu – *Impact attenuator* a nepropustnou přepážkou – *Anti-intruzion plate* neboli *AIP*), při bočním nárazu (boční nárazová struktura – *Side impact structure*) a při nárazu zezadu (struktura musí mít stejné vlastnosti jako boční nárazová struktura – *Rear impact structure*). Společným rysem pro tyto struktury je minimální předepsaná absorbovaná energie. U předního pohlcovače nárazu je to 7350 J. U boční a zadní nárazové struktury se energie stanovuje testem vzorku na trojbodý ohyb a musí být stejná jako u trojbodého ohybu dvou předepsaných ocelových trubek. Ochranné struktury na monopostu Dragon e3 jsou znázorněny na obrázku níže (Obr. 4). [7]



Obr. 4 Nárazové struktury na monopostu Dragon e3

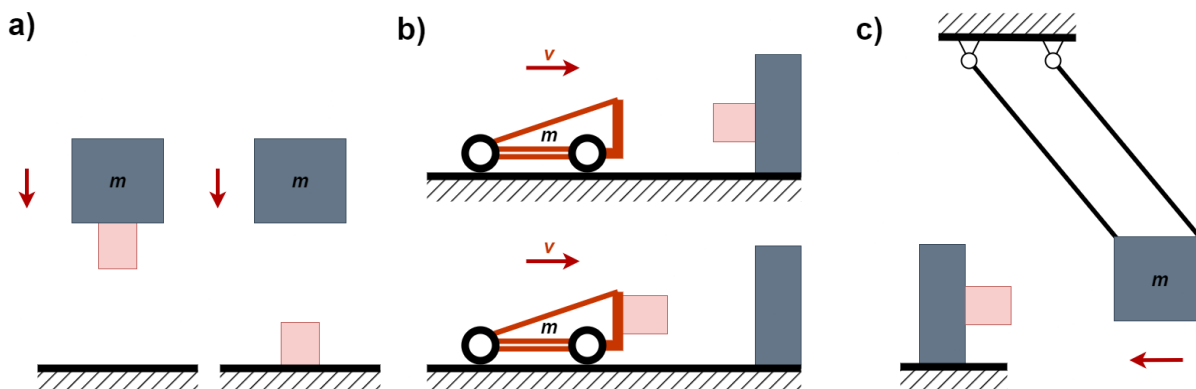
Přední absorbér nárazu musí být testován dynamicky, předepsaná je nejen absorbovaná energie, ale také minimální rozměry ($200 \times 100 \times 200$ mm), maximální hodnota zrychlení 40 g, průměrná hodnota zrychlení 20 g, maximální výška od vozovky (celý minimální objem se musí nacházet pod 350 mm) a předepisuje i testy, kterými se tyto hodnoty stanoví. [7]

Pravidla soutěže nepředepisují přesný druh testu, předepisují pouze doporučené okrajové podmínky. Možností je proto několik.

První z nich je pádová zkouška. Při této zkoušce je hlavní hnací silou tíhové zrychlení, absorbér je buď připevněn na padající závaží, nebo je závaží pouštěno na absorbér. Závaží může být buď umístěno ve vedení, které zabraňuje jakémukoliv vybočení, nebo padat volně. U volně padajícího závaží hrozí především vybočení nebo úhlové pootočení, kvůli kterému může dojít k mimoosovému namáhání pohlcovače.

Další možností je řešení bližší automobilovému průmyslu, kdy se pohlcovač připevňuje na pojezdový vozík/saně, který narazí do pevné zdi. Těmito zařízeními disponují především zkušební testující automobily.

Posledním možným řešením je nárazové kyvadlo. Toto řešení je nejméně vhodné především vzhledem ke kruhové trajektorii závaží a z ní plynoucí možnosti vybočení absorbéru vlivem sil vznikajících posuvem dopadajícího závaží i v jiné ose, než je osa x .



Obr. 5 a) Pádová zkouška, b) Náraz pomocí vozíku/saní, c) Nárazové kyvadlo

Okrajové podmínky specifikují hmotnost m , ta se rovná 300 kg a reprezentuje monopost s pilotem. Druhá podmínka je dopadová rychlost v , ta se rovná 7 m/s. Co se týče okrajových podmínek, je možno je upravit tak, že výsledná energie v okamžik dopadu musí být větší nebo rovna 7350 J. Zařízení pro testování absorbéru musí být provozováno a obsluhováno specializovaným pracovištěm, není možné, aby si je studenti vytvořili sami. Zařízení však může být součástí univerzity. [7]

Absorbér musí být upevněn k reprezentativní geometrii monopostu. Zde musí být minimálně 50 mm vůle mezi AIP a uchycovací deskou. AIP se nesmí zdeformovat o více jak 25 mm. Nutno je prokázat, že i uchycení absorbéru je schopno přenést dané síly bez poškození. [7]

Co se týče dílů, které by náraz ovlivňovaly (například přední křídlo s jeho uchycením), lze pádové zkoušky provést buď s nimi (nebo s reprezentativními náhradami), nebo je možno výpočtem prokázat, že při jejich selhání nebude překročena maximální možná působící síla, a to 120 kN. Výpočtem je pak obvykle střížná síla pro body uchycení, ta se kombinuje s maximální silou z dynamického testu. [7]

Každý tým pak musí odevzdat dokument, který obsahuje naměřená data, údaje o konstrukci absorbéru, AIP i uchycení, dále pak výpočty dokazující splnění dalších pravidel, například pro uchycení aeropaketu. V neposlední řadě musí týmy doložit doklady o nákupu použitých materiálů a potvrzení od zkušebny, kde byla zkouška provedena, o pravdivosti údajů. [7]

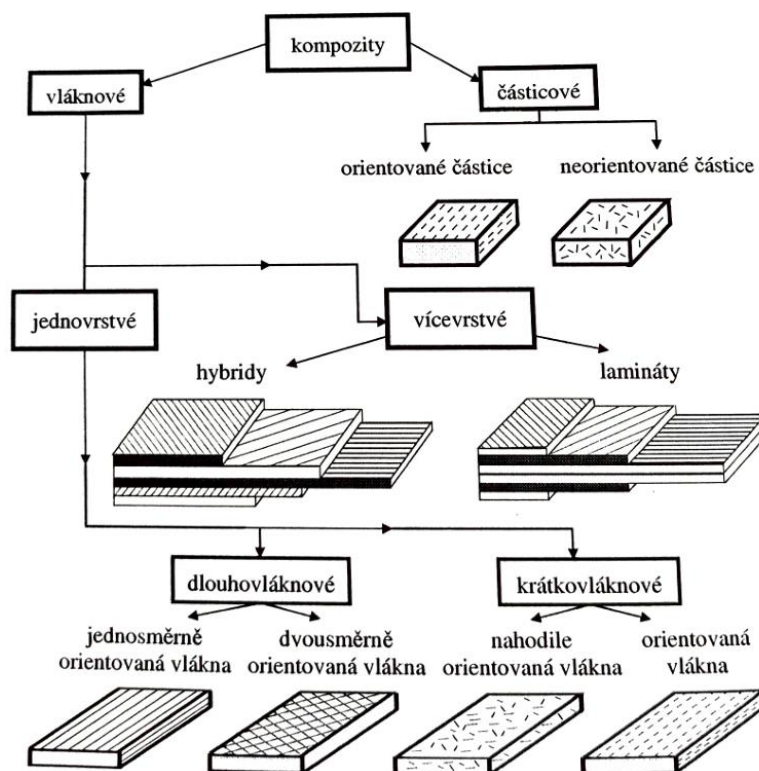
3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozit je materiál, který se skládá ze dvou a více navzájem odlišitelných složek jak mechanicky, tak chemicky. Tyto rozlišnosti chápeme z hlediska makrostruktury. Složky mají jasně rozlišitelné rozhraní. Důležitou vlastností kompozitů je vysoký poměr tuhosti ku hmotnosti a jejich anizotropní vlastnosti, které umožňují vyrobit materiál požadovaných vlastností v daných směrech. [12]

Kompozity jsou téma velice obsáhlé, z toho důvodu budou následující řádky popisovat pouze úzký okruh materiálů vztahujících se k tématu bakalářské práce.

Složky tvořící kompozit se nazývají matrice a výztuž, matici je možno chápat jako pojivo, které slouží ke spojení výztuže a přenášení namáhání na ni. Výztuž má pak dominantní vliv na chování kompozitu z hlediska pevnostního. [13]

Hlavní rozdělení je podle druhu výztuže na částicové a vláknové kompozity, patrné z obrázku (Obr. 6). Vláknové kompozity se dále dělí podle množství vrstev, délky vláken vzhledem k rozměrům součásti a podle orientace vláken. Částicové kompozity se dělí podle orientace částic.



Obr. 6 Rozdělení kompozitů, [12]

3.1 POUŽÍVANÉ TYPY VLÁKEN

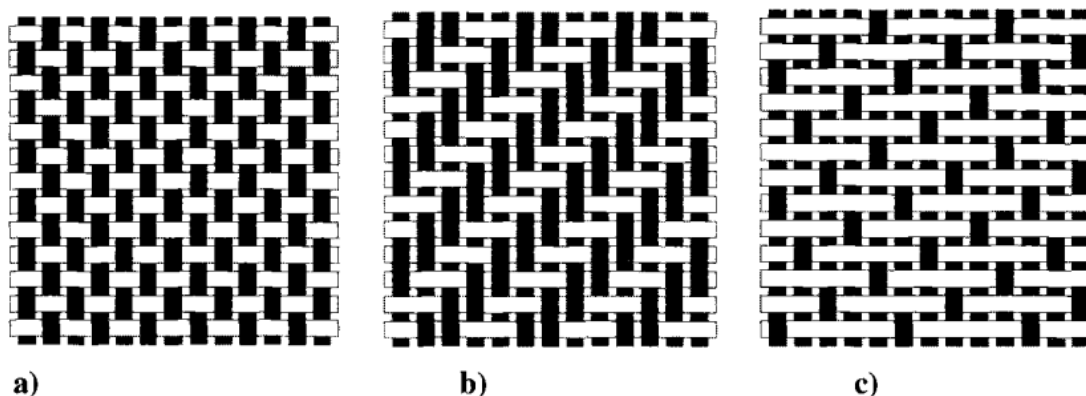
Pokud se omezíme na vláknové kompozity, podstatnou vlastností je použitý druh vláken. Nejběžnějšími vlákny používanými jak v motorsportu, tak v letectví jsou vlákna skleněná, aramidová a uhlíková. Z hlediska vlastností jsou uhlíková obvykle nejperspektivnější, na trh jsou dodávána ve verzi s vysokou pevností (high strength – HS) nebo s vysokým modulem (high module – HM). [13]

Volba použité výztuže závisí na aplikaci, požadovaných vlastnostech a ceně. Přehled základních materiálových hodnot je v tabulce (Tab. 1).

Tab. 1 Přehled vlastností vybraných materiálů [13]

Vlastnosti	E-sklo	Kevlar 49	Grafit (Thorel 300)
Objemový podíl vláken (%)	46	60-65	63
Hustota ($\cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$)	1,8	1,38	1,61
Pevnost v tahu, 0^0 (MPa)	1104	1310	1725
Modul pružnosti v tahu, 0^0 (GPa)	39	83	159
Pevnost v tahu, 90^0 (MPa)	36	39	42
Modul pružnosti v tahu, 90^0 (GPa)	10	5,6	10,9
Pevnost v tlaku, 0^0 (MPa)	600	286	1366
Modul pružnosti v tlaku, 0^0 (GPa)	32	73	138
Pevnost v tlaku, 90^0 (MPa)	138	138	230
Modul pružnosti v tlaku, 90^0 (GPa)	8	5,6	11
Pevnost ve smyku (MPa)	-	60	95
Modul pružnosti ve smyku (GPa)	-	2,1	6,4
Poissonovo číslo v podél. směru v_{LT}	0,25	0,34	0,045
Interlaminární pevnost ve smyku (MPa)	31	39	113

Jednotlivá vlákna jsou spojena v pramence, ty následně tvoří tkaniny. U tkanin rozlišujeme různé typy vazeb (Obr. 7). Rozdílem u různých vazeb může být například přizpůsobivost tvarům formy, zde je saténová vazba nejlepší. Setkat se můžeme i s jednosměrnými tkaninami, existuje i možnost tkanin pletených přímo „na míru“.



Obr. 7 Základní typy vazeb, a) plátno, b) kepr, c) satén, [14]

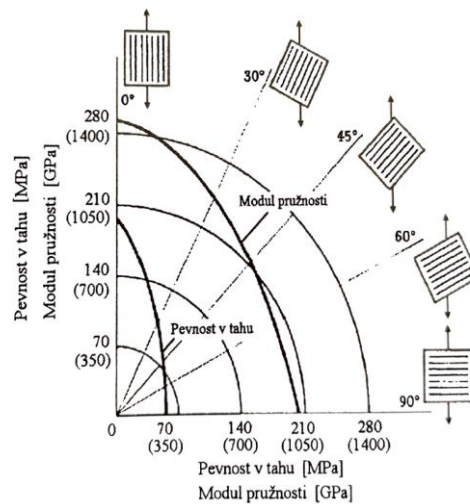
3.2 POUŽÍVANÉ TYPY MATRICÍ

Matrice (pojivo) slouží ke spojení vláken a přenášení zatížení mezi nimi. Obecně se využívají termoplasty, termosety, keramika, ale i jiné materiály, například kovy. Pryskyřice se řadí mezi termosety. [13] Matrice slouží i k ochraně výztuže před vnějšími vlivy. Základním požadavkem na ni je dobrá soudržnost s vyztužující fází bez chemických reakcí a s dobrou smáčivostí. [15] Další požadavky mohou být pevnostní, případně požadavky na teplotní odolnost, odolnost vůči UV záření nebo estetické požadavky.

Zvláštní kategorii z hlediska výroby tvoří prepregy, jedná se o předprosyčenou tkaninu vytvrzovanou teplem. Hlavní výhodou prepregu je přesně dodržovaný poměr matrice a výztuže, což usnadňuje jak návrh samotných dílů, tak i výrobu. [13]

3.3 VLIV ORIENTACE VLÁKEN NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI

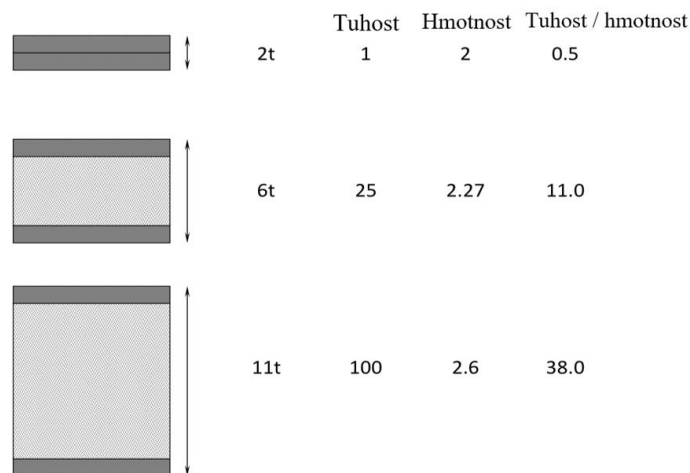
Jelikož jsou kompozity anizotropním materiálem, mechanické vlastnosti se liší v závislosti orientaci, především pak u vláknových kompozitů s orientovanými vlákny. Vliv orientace u kompozitu tvořeného jednosměrnými vlákny je vidět na grafu (Graf - 1). Při zatížení v ose vláken určují pevnost mechanické vlastnosti vláken (vlastnosti se určí pomocí směšovacího pravidla), v případě zatížení kolmo na osu vláken určuje mechanické vlastnosti kompozitu pouze matrice. [12]



Graf - 1 Vliv orientace vláken na vlastnosti kompozitu (Ti-Borsic), [15]

3.4 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

Jedná se o konstrukci, kde se kompozit skládá ze dvou vnějších vrstev (potahů) a jádra. Jádro má obvykle násobně větší tloušťku než potahy. Potahy jsou tvořeny laminátem (uhlíkový kompozit, aramidový kompozit, ...) případně deskami z jiných materiálů, jádra tvoří obvykle pěny (PVC nebo PMI) nebo voštiny (Nomexové a hliníkové), případně dřevo. Předností sendvičů je především velké zvýšení ohybové tuhosti bez velkého nárustu hmotnosti. Tento vliv je možno pozorovat na obrázku (Obr. 8). Hlavní veličinou ovlivňující pevnost sendvičových panelů je smyková pevnost jádra. [13], [16]



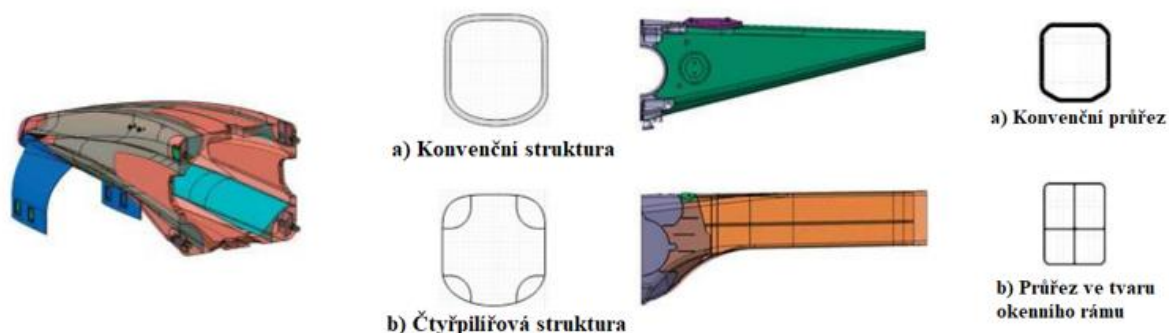
Obr. 8 Efekt použití sendvičové struktury na tuhost panelu, [17]

4 PŘEHLED MOŽNÝCH KONCEPTŮ

V následujících podkapitolách je umístěn výčet těch nejpoužívanějších konceptů, které sloužily pro volbu konceptu pro tuto bakalářskou práci.

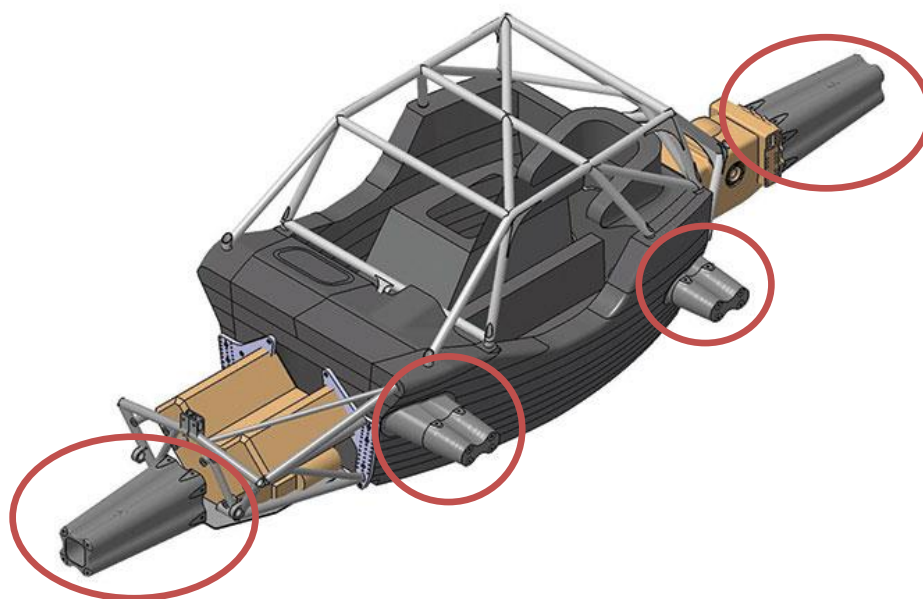
4.1 ABSORBÉRY V MOTORSPORTU

Ve Formuli 1 jsou absorbéry nárazu umístěny jak na čelní straně monopostu, tak po stranách a v zadní části. Z dostupných zdrojů se zde využívají sendvičové konstrukce pro čelní absorbér. Pro absorbéry bočního nárazu se používají kompozitní skořepiny trubkového tvaru. Pro zadní pohlcovač se používají skořepinové i sendvičové prvky, mohou být vyztuženy vnitřní strukturou. [18]



Obr. 9 Přední a zadní deformační prvky monopostu Honda (Formule 1), upraveno dle [18]

Pro soutěže cestovních vozů, například DTM, se používají struktury podobné bočním a zadním nárazovým zónám z formulových sérií. Rozdílem je pouze to, že jsou všechny tyto struktury ukryty po karosérii, proto je možné navrhnout jejich tvar čistě účelně a není z velké části ovlivněn požadavky na aerodynamické vlastnosti vozidla. [19]



Obr. 10 Rozložení nárazových struktur na vozidle kategorie DTM z roku 2014, upraveno dle [19]

4.2 ABSORBÉRY VE FORMULI STUDENT

Ve Formuli Student existuje celá řada konceptů, některé vycházejí z výše zmíněných. Jejich výhody a nevýhody jsou popsány na následujících řádcích.

4.2.1 STANDARDNÍ FSAE POHLCOVAČ

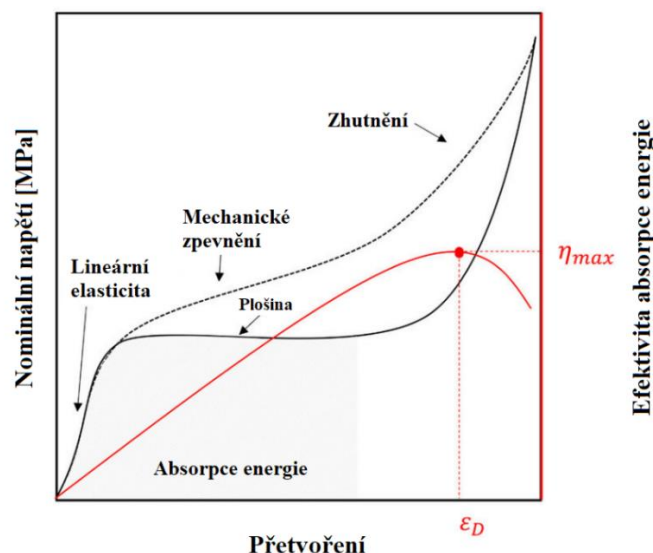
Zde se jedná o pohlcovač, který si mohou týmy zakoupit od oficiálních organizací a je určen přímo pro Formuli Student. Je tvořen pěnou Dow Impaxx 700. Největší výhodou tohoto řešení je, že jej není nutné testovat, takže je často využíván začínajícími týmy. Nevýhodou je pak vysoká hmotnost, v porovnání například s voštinovými pohlcovači, a vyšší cena. [20]



Obr. 11 Standardní FSAE pohlcovač [21]

4.2.2 PĚNOVÉ POHLCOVAČE

Pěnové pohlcovače mají konstrukci podobnou výše zmíněnému standardnímu pohlcovači. Materiálem bývají pěny (často se jedná o Rohacell – různé druhy [22], výše zmíněný Dow Impaxx, ...), lze použít i hliníkovou pěnu (velmi vysoká hmotnost) [23]. Výhodou je snadný návrh z hlediska izotropie materiálu. Hustoty se pohybují od 50 kg/m^3 do 110 kg/m^3 . Průběh pohlcení energie, napětí a deformace, je vidět na následujícím grafu (Graf - 2).

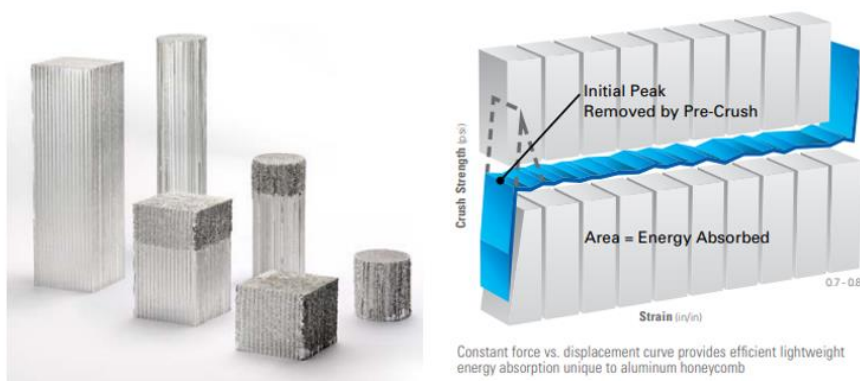


Graf - 2 Typický průběh absorpce energie pěnovým materiálem, upraveno dle [24]

V první části grafu dochází k lineárnímu nárůstu napětí, následně začíná progresivní porucha s ustálenou hodnotou napětí (odtud střední nárazová síla). Na konci grafu dochází ke zhutnění. Tento děj nastává po vyčerpání absorpčních vlastností pěny.

4.2.3 VOŠTINOVÉ POHLCOVAČE

Jedná o velmi rozšířený typ, který je velice populární mezi týmy soutěže Formula Student. Používají se hliníkové a Nomexové voštiny [25]. Absorpce nastává borcením stěn buněk v důsledku vzpěru stěn a následné plastické deformace. Díky pre-crushed typu je odstraněn prvotní nárůst napětí a následný pokles. [26]



Obr. 12 Voštinové absorbéry [26]

4.2.4 KOVOVÉ POHLCOVAČE

U kovových pohlcovačů se využívá ohýbaných a svařovaných konstrukcí z ocelového nebo hliníkového plechu. V těchto konstrukcích bývá velmi často umístěn koncentrátor napětí, který slouží jako spouštěč poruchy. Výhodou je nižší náročnost konstrukce a jednoduchá a rychlá výroba, nevýhodou je pak obvykle vyšší hmotnost.

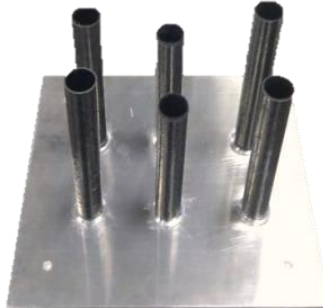


Obr. 13 Hliníkový absorbér nárazu týmu ULM racing [27]

4.2.5 KOMPOZITNÍ POHLCOVAČE

Pro kompozitní pohlcovače je možno použít několik konceptů. Nejjednodušším konceptem z hlediska návrhu i výroby je využití kompozitních trubek, případně kuželů. U trubek je výhodná především možnost zakoupení již hotových, strojně navíjených, trubek, u kterých lze předpokládat stále stejné mechanické vlastnosti. Jejich hodnoty střední nárazové síly a absorpce energie se velice neliší od kvazi-statických testů. Problémem je však velké zatížení

AIP v místech uchycení a možnost vybočení ze směru působící síly. [28] Hlavním konstrukčním prvkem je pak iniciátor poruchy, který navodí správný mód plastických deformací. Obvykle se jedná o zkosení nebo podobný tvar na vrchní straně jednotlivých trubek / kuželů.



Obr. 14 Absorbér tvořen kompozitními trubkami, [28]

Druhou možností je pak vytvořit absorbér, který je umístěn na AIP, podobně jako pěnové a voštinové pohlcovače. U této možnosti je výhoda volného návrhu tvaru absorbéru, na rozdíl od strukturálních nosů. Nevýhodou je pak vyšší hmotnost tohoto řešení v porovnání se strukturálními nosy. Toto řešení v minulosti využil například pražský tým eForce. [28]



Obr. 15 Kompozitní sendvičový absorbér, [28]

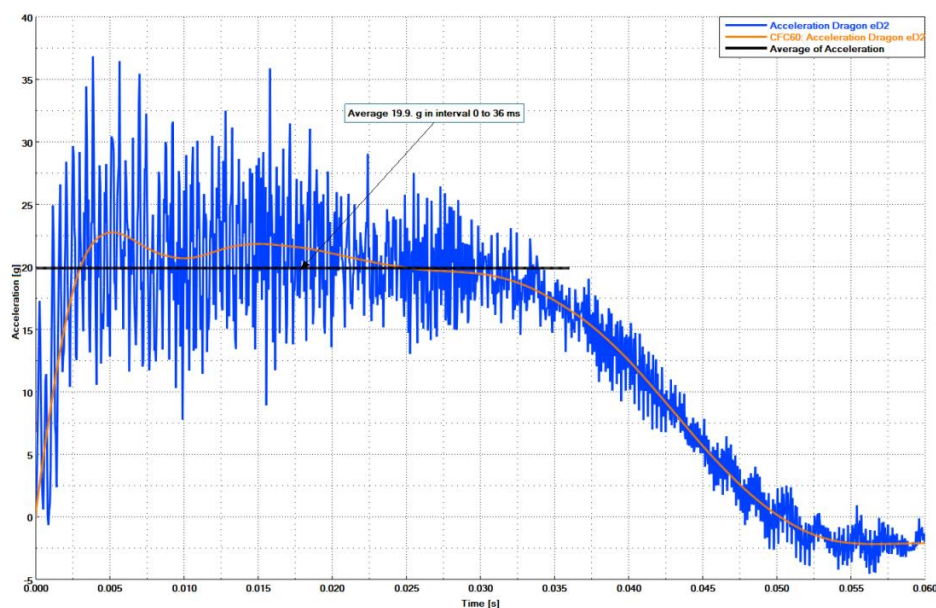
Nejsložitější variantou z hlediska návrhu je využití nosu monopostu jako absorbéru nárazu (strukturální nos). Náročnost návrhu spočívá především ve složitosti tvaru a tím pádem i praktické nemožnosti analytických výpočtů. Proto jsou zde při návrhu dvě možnosti, první je využití metody konečných prvků, druhým je pak výroba většího množství vzorků a jejich úpravy podle výsledků nárazových zkoušek. Tato metoda je však časově i finančně velmi neefektivní. Vzhledem k náročnosti toto řešení používá jen malé množství týmů.



Obr. 16 Strukturální nos týmu NTNU Revolve, [29]

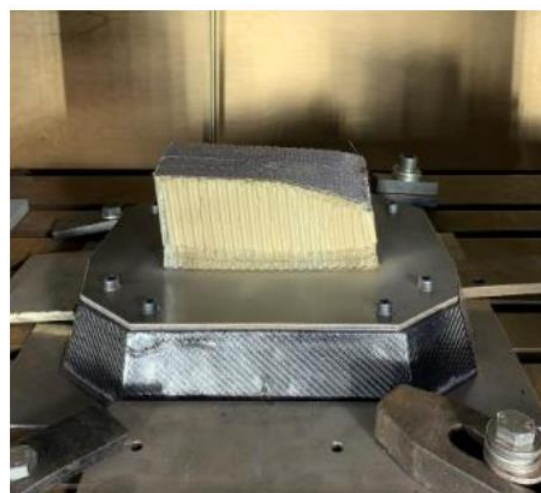
4.3 ABSORBÉR NÁRAZU MONOPOSTU DRAGON E2

Na monopostu Dragon e2 ze sezóny 2021/2022 bylo použito řešení absorbéru pomocí hliníkové voštiny. Ta byla přilepena ke kompozitní nepropustné přepážce. Absorbér byl umístěn uprostřed AIP, což zabraňovalo možnému vybočení v průběhu nárazu vlivem deformace AIP. Průměrné zrychlení bylo 19,9 g, což bylo na hranici pravidel. Maximální zrychlení pak bylo 36,8 g. [30] Typický průběh pohlcení nárazu lze vidět na grafu níže (Graf - 3) Po nárůstu síly se její hodnota ustálí až do pohlcení nárazu, pak postupně klesne. Problémem těchto pohlcovačů jsou relativně vysoké hodnoty průměrného zrychlení.



Graf - 3 Průběh zrychlení v závislosti na čase voštinového absorbéru, [30]

Tento absorbér měl nízkou hmotnost a minimální rozměry, proto bude brán jako hlavní porovnání pro návrh nového absorbéru na monopost Dragon e3 pro sezónu 2022/2023.



Obr. 17 Absorbér monopostu ED2 před a po pádové zkoušce, [30]

4.4 KRITÉRIA PRO VOLBU VHODNÉHO KONCEPTU

Kritéria pro volbu konceptu byla volena dle zkušenosti autora a dle provedené rešerše. Atraktivita konceptu zohledňuje i atraktivitu z hlediska disciplíny Engineering design. Koeficienty slouží k určení důležitosti parametru ve výsledném hodnocení. 1 je nejhorší, 10 je nejlepší.

Tab. 2 Kritéria pro volbu konceptu a jejich hodnoty

Druh absorbéru	Kritéria						Výsledek
	Hmotnost**	Obtížnost návrhu	Obtížnost výroby	Poloha těžiště	Cena	Atraktivita konceptu	
	1	0.8	0.5	1	0.7	0.8	
Standard FSAE	4	6	9	3	4	0	19.1
Hliníková voština	6	6	9	5	5	4	27
Plechový absorbér	3	6	5	2	9	1	19.4
Kompozitní trubky	6	5	5	6	4	6	26.1
Kompozitní pohlcovač na AIP	6	4	4	6	5	7	26.3
Kompozitní pohlcovač – nos	7	1	4	6	6	10	28

**hmotnost ovlivňuje i moment setrvačnosti a polohu těžiště monopostu

Z výsledků analýzy možných konceptů nejlépe vychází voštinový absorbér a kompozitní strukturální nos. Z důvodu snahy posunout monopost i znalosti týmu byl zvolen strukturální nos jako nejvhodnější koncept pro vývoj jako součást monopostu Dragon e3 pro sezónu 2023/2024.

5 SPECIFICKÁ ABSORPCE ENERGIE

Specifická absorpce energie (dále SEA – *specific energy absorption*) je hlavní charakteristikou materiálu při pohlcení energie. Jedná se o hodnotu absorbované energie na jednotku hmotnosti. Pro návrh absorbéru je vhodné využít materiál, který má tuto hodnotu nejvyšší. Přehled zvažovaných materiálů je v tabulce (Tab. 3). [31] Nejvyšší hodnotu má kompozit s výztuží tvořenou uhlíkovými vlákny. Z tohoto důvodu byla výztuž tvořena aramidovými vlákny zavržena již v počátku návrhu skladby.

Tab. 3 Hodnoty specifické absorpce energie pro různé materiály [31]

Materiál	SEA [kJ/kg]
<i>Uhlík – epoxy, skladba [0/±15]₃</i>	99
<i>Uhlík – epoxy, skladba [±45]₃</i>	50
<i>Aramid – epoxy, skladba [0/±15]₃</i>	60
<i>Aramid – epoxy, skladba [±45]₈</i>	9
<i>Sklo – epoxy, skladba [0/±15]₂</i>	30
<i>Sklo – epoxy, skladba [0/±75]₂</i>	53
<i>Ocel</i>	45
<i>Hliníková slitina 6061</i>	60

Ke stanovení SEA je možno využít buď kvazi-statické testování, anebo dynamické testování. Rozdíl v hodnotách mezi kvazi-statickým a dynamickým testováním se lišil v závislosti na zdrojích. Uváděny byly hodnoty poklesu o 20 až 30 procent při přechodu na dynamický test. [32]

5.1 KVAZI-STATICKÉ TESTY

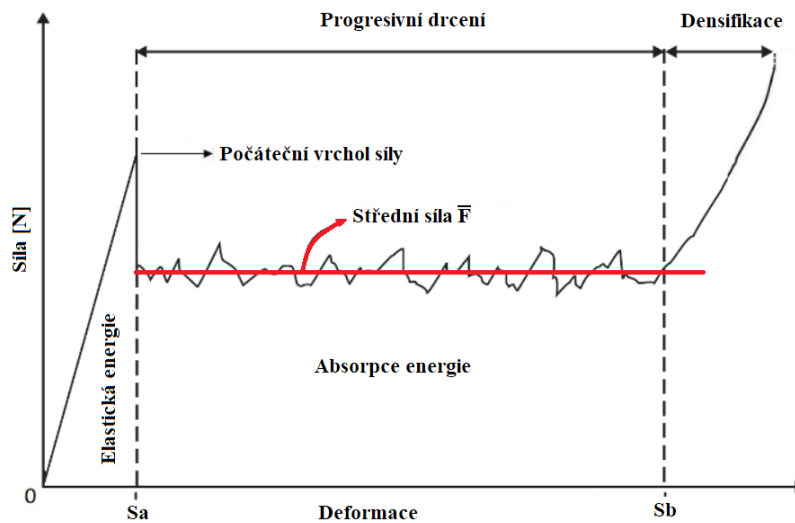
U těchto testů dochází k zatěžování vzorku konstantní rychlostí, v následku čehož se nejedná o skutečnou simulaci nárazu. Část materiálů má pohlcovací vlastnosti závislé na rychlosti nárazu, proto kvazi-statické testy nezaručují stejnou pohlcovací kapacitu materiálu při dynamickém zatížení. Při skutečném nárazu se rychlost mění od rychlosti maximální po zastavení. Výhodou však je méně náročné testování vzorků z hlediska vybavení pro testování. [32]

5.2 NÁRAZOVÉ TESTY

Nárazová rychlost se snižuje z počáteční rychlosti nárazu až po zastavení vlivem absorbování energie. Výhodou je, že tento druh testování reprezentuje skutečný náraz. Nevýhodou je, že při potřebě studia poruchy materiálu v průběhu nárazu je zapotřebí nákladné vybavení, jako je například vysokorychlostní kamera nebo akcelerometr. [32]

5.3 VÝPOČET SEA

SEA se udává u materiálů vykazujících progresivní mód poruchy. Graf ukazuje typickou křivku napětí a deformace pro takový materiál. Tuto křivku získáme testováním popsáním v předchozích odstavcích.



Graf - 4 Typický průběh progresivní poruchy, upraveno dle [33]

Křivka se dělí do několika částí. V první části dochází k nárůstu síly až k prvnímu maximu síly, kde dojde k poruše materiálu. Následně následuje pokles síly a její ustálení okolo střední hodnoty. V poslední části křivky dochází ke ztuhnutí (densifikaci), materiál už se nemá kam deformovat a dochází opět k nárůstu síly. Tento graf ukazuje kvazi-statickou zkoušku. U dynamické zkoušky by došlo ve třetí části grafu k poklesu síly (ovšem pouze za předpokladu, že se dopadající závaží zastaví dříve, než dojde k rozdrčení celého vzorku). SEA se počítá z oblasti vymezené body S_a a S_b (zde dochází k absorpci energie plastickými deformacemi).

Celková energie absorbovaná při drcení vzorku. [32]

$$W = \int_0^{S_b} F dS \quad (1)$$

Energie pohlcená progresivním módem poruchy je lépe charakterizovaná z vymezené oblasti, kde S_a a S_b jsou hranice oblasti a \bar{F} je průměrná hodnota zatěžující síly. [32]

$$W = \int_{S_a}^{S_b} F dS = \bar{F}(S_b - S_a) \quad (2)$$

SEA se pak vypočítá jako podíl energie pohlcené při progresivní poruše a hmotnosti, která danou energii pohltila. [32]

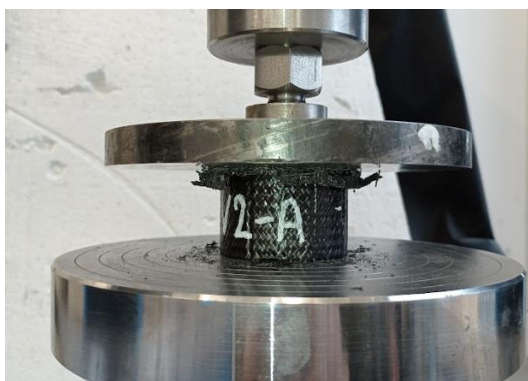
$$E_s = \frac{W}{m} \quad (3)$$

Vzorec se dá úpravou rozšířit. [32]

$$E_s = \frac{W}{m} = \frac{\bar{F}(S_b - S_a)}{V * \rho} \quad (4)$$

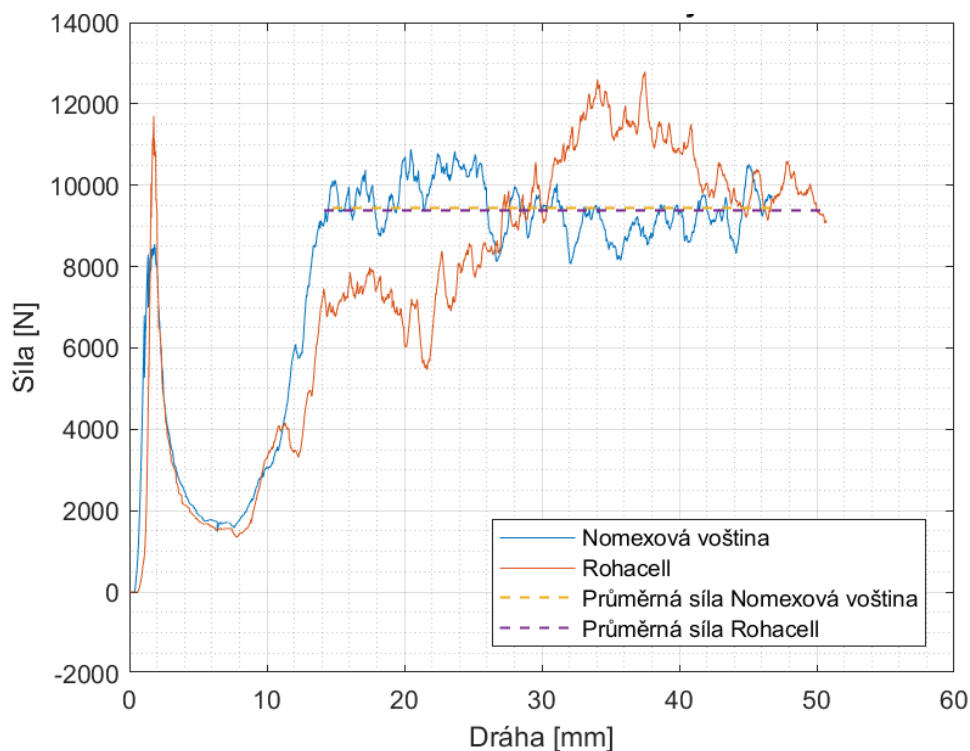
5.4 EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ SEA

Pro velice přibližný výpočet absorbované energie bylo potřeba stanovit hodnoty SEA pro jednotlivé skladby použité na strukturálním nose. Při prvním testování vzorků došlo k porušení vzpěrné pevnosti vzorku, které bylo způsobeno nevhodně zvoleným obdélníkovým tvarem. To vedlo ke změně tvaru samotných vzorků a novému testování. Novým tvarem byla trubka s iniciátorem poruchy ve vrchní části. Tyto vzorky byly použity i pro určení vhodného jádra. Skladba laminátu byla na obou vzorcích stejná, lišily se pouze materiálem jádra. Prvním materiálem byla Nomexová voština, druhým byla pěna Rohacell 71 IG-F. Průběh testu lze vidět z grafu (Graf - 5)



Obr. 18 Vzorek při průběhu tlakové zkoušky

Veškerá data z kvazi-statických zkoušek byla naměřena na kalibrovaném zařízení LabTech LabTest 6.500 Leteckého Ústavu Fakulty Strojního inženýrství VUT v Brně.



Graf - 5 Průběhy síly při experimentálním stanovení SEA



Obr. 19 Vzorky po zkoušce (za povšímnutí stojí úlomek v horní části vzorku s pěnou)

Průběhy byly velice podobné, u vzorku s voštinovým jádrem docházelo k rovnoměrnému pohlcování energie, u vzorku s pěnou došlo k odlomení velkého kusu laminátu při inicializaci poruchy, to mělo za následek počáteční nižší hodnoty síly. U obou vzorků docházelo k progresivnímu módu poruchy. Výsledné hodnoty jsou umístěny v tabulce (Tab. 4).

Tab. 4 Výsledné hodnoty z tlakové zkoušky

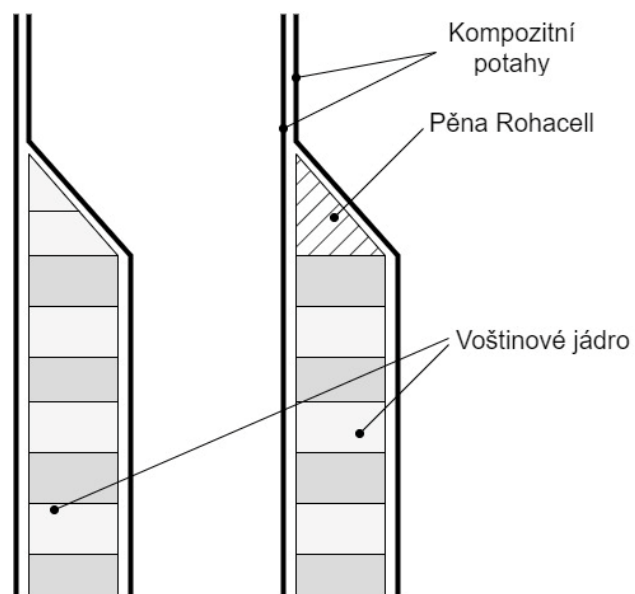
	Nomexová voština	Rohacell 71
<i>Hmotnost vzorku [g]</i>	18,9	19,9
<i>SEA [J/g]</i>	31,64	30,88
<i>Průměrná síla [N]</i>	9440,7	9380,8

Z výsledků je patrné, že se hodnoty pohybovaly hodně blízko, lépe vycházela Nomexová voština, to byl i hlavní důvod jejího použití při návrhu pohlcovače. Dalším důvodem bylo i rovnoměrné absorbování energie a stabilní šíření poruchy.

Výše popsané měření sloužilo i k nastavení a ověření materiálových charakteristik ve výpočtovém modelu pro simulaci samotného absorbéru.

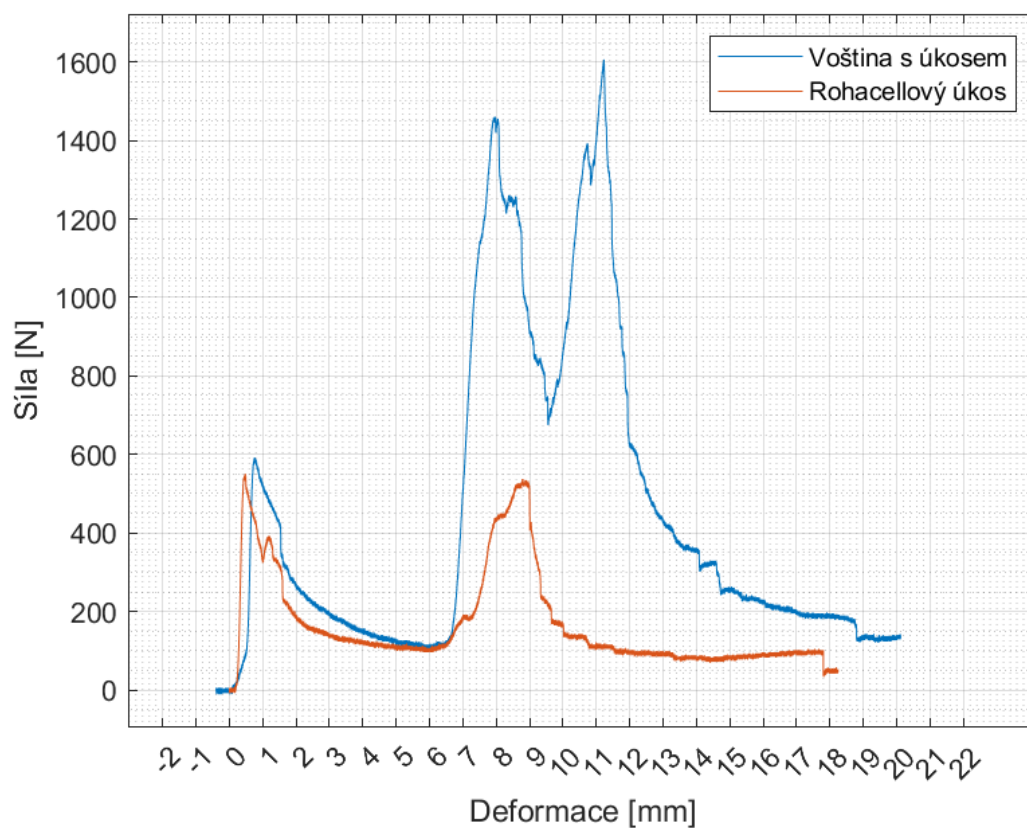
5.4.1 INICIACE PORUCHY

Iniciátor poruchy se nachází v místě přechodu mezi první a druhou částí pohlcovače. Je to místo, kde začíná voština. Jako iniciátor poruchy byly testovány dva koncepty. Prvním z nich bylo pouze zkosení voštiny pod úhlem 45°, druhým byl úkos vytvořený pěnou Rohacell. Geometrie vzorku je patrná z obrázku (Obr. 20). Pozorován byl především průběh poruchy. Takový přechod mezi laminátem bez jádra a jádrem je vhodný především pro zamezení vzniku vzduchových kapes v napojení vnějšího a vnitřního potahu.



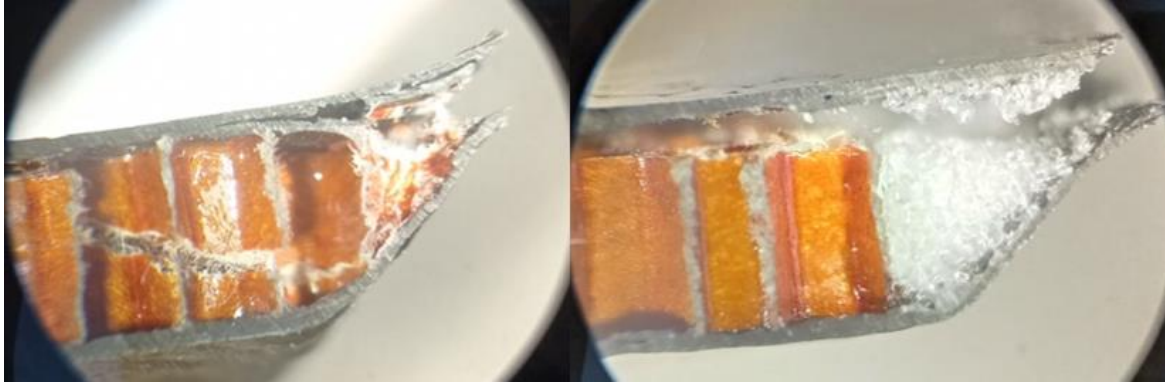
Obr. 20 Řez vzorkem

Část grafu do deformace okolo 6 mm je pro oba vzorky velice podobná, jedná se o první část vzorku před samotným přechodem na část s jádrem. Jelikož byla na obou vzorcích stejná, je zřejmé, že bude stejná i porucha a průběh síly.



Graf - 6 Vykreslení dat ze zkoušky inicializace poruchy

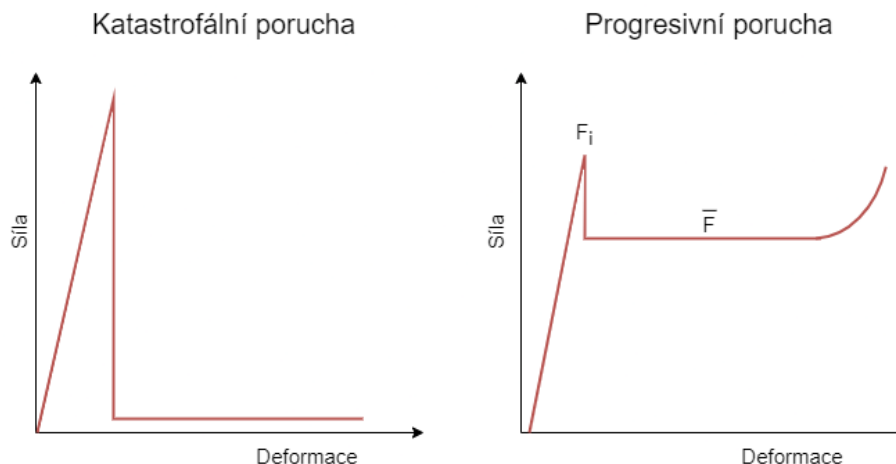
Vzorek, kde byla pouze voština s úkosem, vykazoval mnohem větší hodnoty síly. Porucha, která nastala, byla šíření trhliny ve voštině vlivem smykového namáhání v ní. U Rohacellového úkosu došlo k prasknutí Rohacellu a následné delaminaci voštiny od potahu, to bylo doprovázeno mnohem menší silou při šíření poruchy. Delaminace potahu od jádra byl nechtěný jev. V návaznosti na provedené testy, a i z hlediska jednodušší výroby, byla zvolena varianta bez pěnového přechodu.



Obr. 21 Mikroskopický snímek vzorků po testu

6 PORUCHY POD DYNAMICKÝM ZATÍŽENÍM

Poškození důsledkem nárazu můžeme rozdělit na dva základní druhy, a to katastrofální a progresivní poruchu.



Graf - 7 Porovnání katastrofální a progresivní poruchy, upraveno dle [34]

6.1 KATASTROFÁLNÍ PORUCHA

Zde se jedná o nestabilní poruchu. Při této poruše dojde k absorpci pouze zlomku energie nárazu (v porovnání s progresivní poruchou) a absorbér tudíž nesplní svou funkci.

Nastávají v důsledku několika možných příčin:

- Celková ztráta vzpěrné stability (převážně u štíhlých prutů)
- Intralaminárního nebo interlaminárního šíření trhlin (u kompozitů)

Tato porucha je charakterizována vysokým nárůstem síly a následným prudkým poklesem. Absorbovaná energie je mnohem menší a vrchol zatížení je příliš velký, v následku čehož je zatížení na pasažera/pasažéry příliš velké. Struktury navrhované na vzdorování této příčině poruchy mívají většinou vysokou hmotnost v porovnání s absorbéry, které pohlcují energii pomocí progresivní poruchy, již se věnuje kapitola 6.2.

6.2 PROGRESIVNÍ PORUCHA

Druhou možností je progresivní mód poruchy, mechanismy při tomto módu se liší v závislosti na tvaru a konstrukci absorbéru. Je to žádaný mód poruchy při konstrukci absorbéru. Tato porucha bývá obvykle vyvolána spouštěčem, který je tvořen vhodně navrženým koncentrátorem napětí, který iniciuje poruchu. Příkladem může být předdeformování na voštinových absorbérech.



Obr. 22 Předdeformovaný voštinový pohlcovač [26]

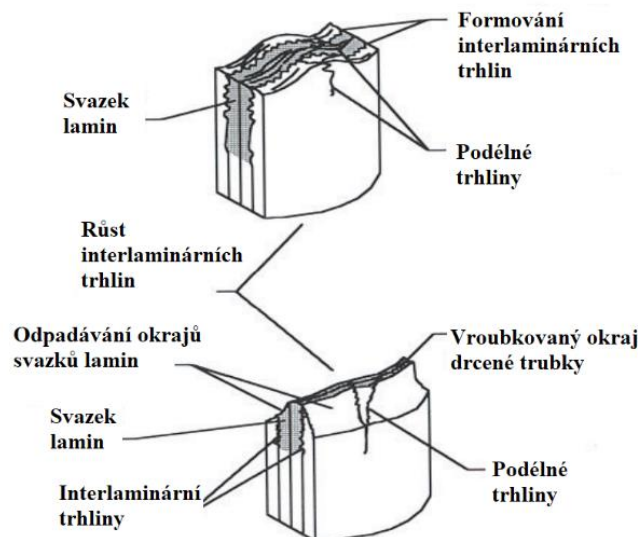
Výhodou takto navržených absorbérů je nižší hmotnost a vyšší hodnota pohlcené energie než u absorbérů z kapitoly 6.1.

6.3 CHARAKTERISTICKÉ TYPY PROGRESIVNÍCH PORUCH KOMPOZITU

V následujících odstavcích jsou popsány různé módy progresivní poruchy laminátů [32]. Vybrány byly především typické poruchy, v realitě se poruchy mohou měnit a nemusí odpovídat přesně konkrétnímu typu, případně se může jednat o kombinaci více módů.

6.3.1 PŘÍČNÝ SMYK NEBO FRAGMENTACE

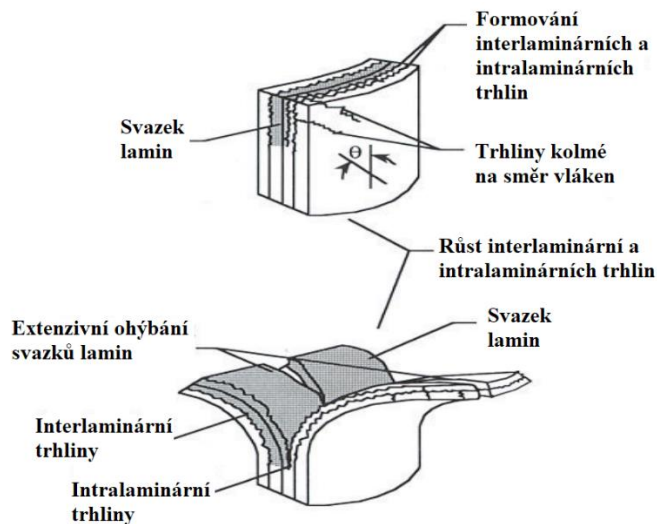
- Bývá charakterizován ostrou špičkou lomu
- Pohlcování nastává pomocí mnoha interlaminárních i podélných trhlin
- Délky interlaminárních a podélných trhlin jsou menší než délka laminy
- Tato porucha se vyskytuje u křehkých laminátů



Obr. 23 Průběh poruchy příčným smykem, upraveno dle [32]

6.3.2 OHYB NEBO ŠTĚPENÍ LAMINY

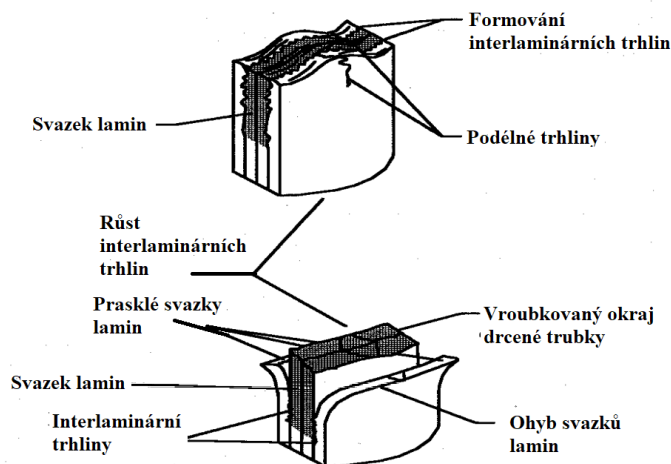
- Trhliny bývají dlouhé, interlaminární, intralaminární a rovnoběžné s vlákny
- Hlavním mechanismem absorpce energie je šíření trhliny v matrici, sekundárním je tření mezi fragmenty a závažím, fragmenty a úlomkovým klínem a tření mezi fragmenty samotnými
- Tato porucha se často vyskytuje u kompozitních trubek, u nich vzniká charakteristická koruna



Obr. 24 Průběh poruchy ohybem a štěpením laminy, upraveno dle [32]

6.3.3 KŘEHKÁ FRAGMENTACE

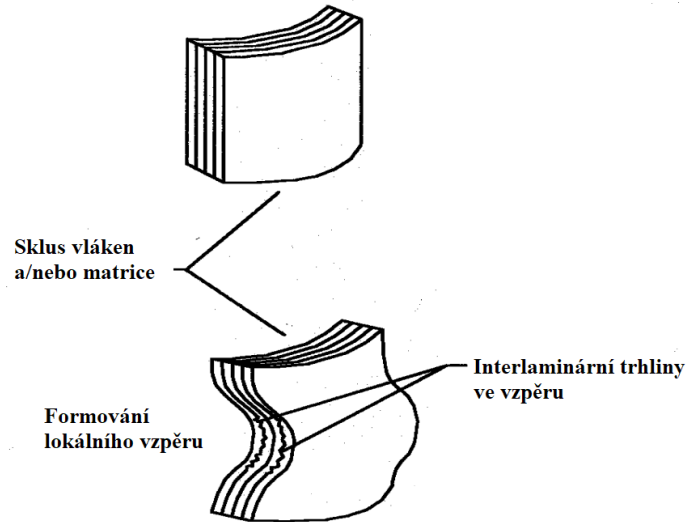
- Často nastává u velmi tuhých kompozitů
- Je kombinací fragmentace a štěpení
- Při této poruše je délka interlaminárních trhlin 1 až 10 tloušťek laminátu
- Velké množství energie je pohlceno iniciací krátkých delaminačních trhlin



Obr. 25 Průběh poruchy křehkou fragmentací, upraveno dle [32]

6.3.4 LOKÁLNÍ VZPĚR NEBO PROGRESIVNÍ OHÝBÁNÍ

- Zde se jedná o poruchu, která je typická spíše pro materiály jako je hliník nebo ocel, nejvhodnějším příkladem je voštinový absorbér
- U kompozitu nastává především u houževnatých laminátů



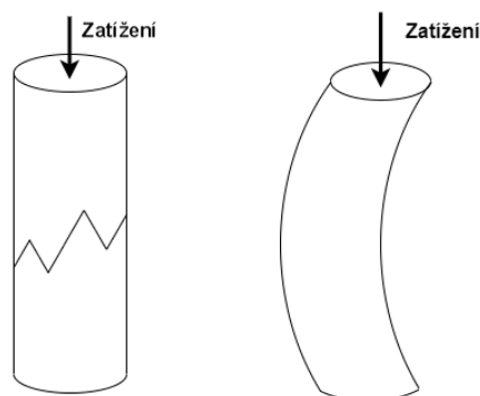
Obr. 26 Průběh poruchy lokálním vzpěrem, upraveno dle [32]

6.4 KRITICKÉ PORUCHY

Obvyklé poruchy sendvičového panelu v tlaku jsou ovlivněny především štíhlostí panelu a vlastnostmi materiálu.

Katastrofální poruchy se objevují především [32]:

- V případě nestabilního šíření interlaminární nebo intralaminární trhliny
- V dlouhých tenkostěnných trubkách při ztrátě stability
- V trubkách složených z křehkých vláken, v případě, že se svazky lamin neohýbají nebo nelámou, protože mezilaminární trhliny jsou menší než tloušťka vrstvy



Obr. 27 Možné kritické poruchy, vlevo nestabilní šíření trhliny, vpravo ztráta vzpěrné stability

6.5 CHARAKTERISTICKÉ TYPY PORUCH SENDVIČŮ

Jelikož pro konstrukci absorberu bylo použití sendvičové konstrukce zvažováno od počátku vývoje, v této kapitole budou popsány charakteristické poruchy pro sendvičové panely zatížené tlakem. [28]

6.5.1 VRÁSNĚNÍ A VRÁSNĚNÍ S DELAMINACÍ

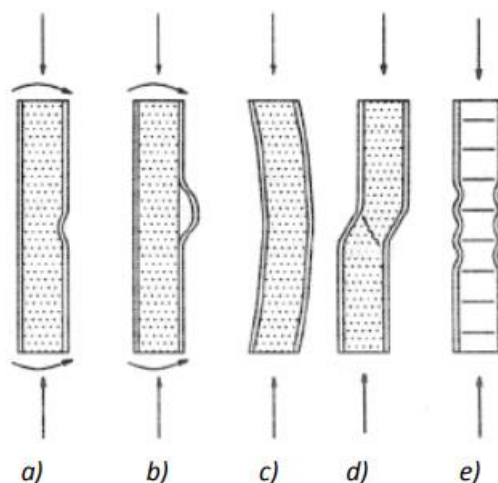
Při zatížení dochází k vybočení potahu vlivem ztráty vzpěrné stability. Pokud dojde k vybočení směrem od jádra, dochází k delaminaci (odlepení potahu od jádra) z důvodu vyššího napětí na rozhraní laminy a jádra, než je schopen tento spoj přenést. [28]

6.5.2 VZPĚR A ZVLNĚNÍ SMYKEM

Poruchy způsobené porušením vzpěrné pevnosti se řadí spíše mezi kritické poruchy. Ke zvlnění smykem dojde při porušení smykové pevnosti jádra. [28]

6.5.3 ZVLNĚNÍ POTAHU

Nastává u kompozitů, jejichž jádro tvoří nesouvislý materiál (například voština). V místech, která nejsou podepřena stěnou buňky voštiny, může dojít ke zvlnění potahu. [28]



Obr. 28 Charakteristické poruchy sendvičů, a) vrásnění, b) vrásnění s delaminací, c) vzpěr, d) zvlnění smykem, e) zvlnění potahu, [28]

7 NÁVRH POHLCOVAČE

7.1 CAD MODEL

Tvar absorbéru byl podřízen pravidlům, hlavní změnou v sezóně 2022/2023 byla přesná definice pozice minimálního objemu předepsaného pro pohlcovač. Zde bylo stanoveno, že musí být celý umístěn do výšky 350 mm nad vozovkou (pravidlo T 3.17.2). [7] Odtud vycházel tvar spodní strany absorbéru, zvednutí v přední části je především z důvodu nasměrování proudícího vzduchu okolo monopostu do spodní části a na boční podlahy formule, díky čemuž se zvyšuje přitlačná síla.

Zbylé tvary vycházely z tvaru monokoku, na kterém je absorbér připevněn, ve strukturální části bylo snahou se co nejvíce přiblížit tvaru kruhu, čímž se zvýšila vzpěrná stabilita. Snahou bylo i natvarovat strukturální část, pokud možno, symetricky. To mělo zamezit možnému vyhnutí padajícího závaží z osy dopadu v následku nerovnoměrných sil při drcení kompozitu.

Podstatné bylo se vyhnout koncentrátorům napětí na nežádoucích místech, které by mohly způsobit kritickou poruchu a znemožnit tak optimální absorpci energie.



Obr. 29 Render pohlcovače

7.2 VOLBA MATERIÁLU

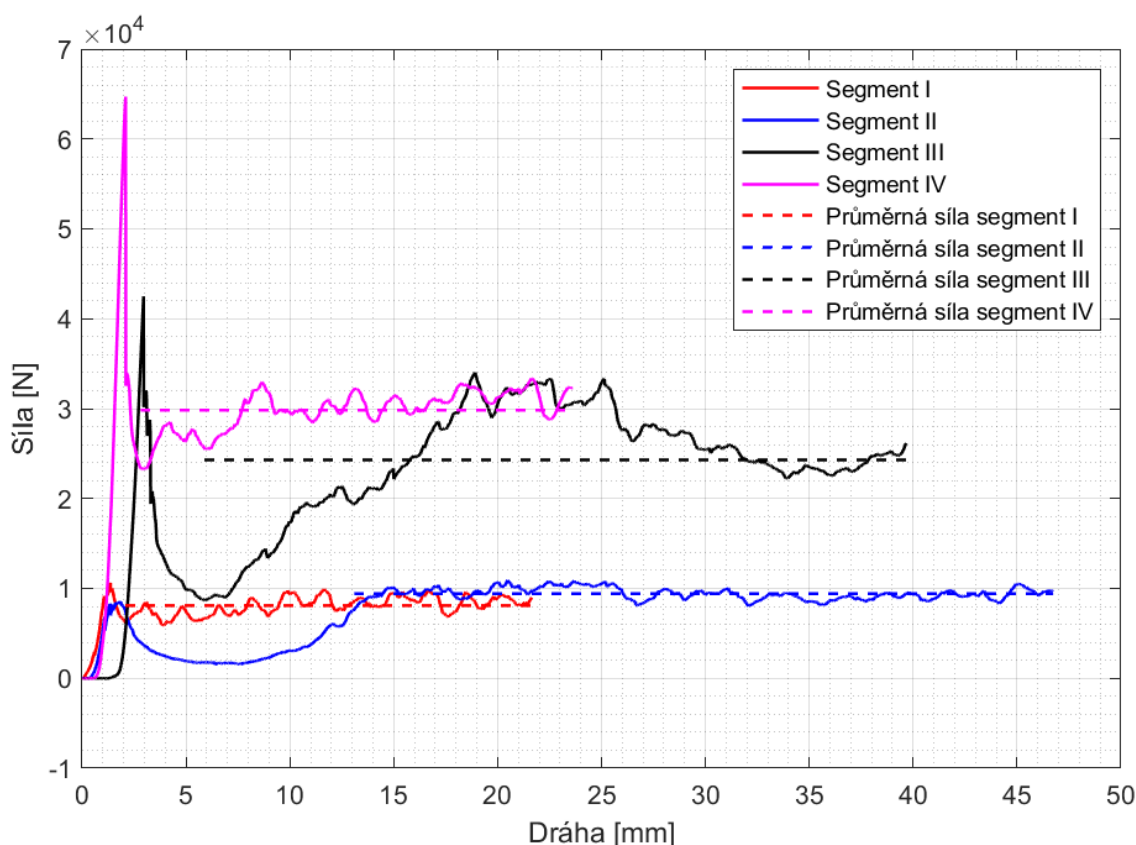
Výztuž tvořila vlákna T300 od firmy Toray [35]. Zvolena byla především z důvodu zkušeností týmu s těmito vlákny a z důvodu nižší ceny. Tato vlákna byla součástí prepregu syceného matricí EP4.5. Důvodem použití prepregu bylo především dodržení přesného poměru matrice/vlákna, a tím pádem i zachování materiálových vlastností.

Jádro tvořila Nomexová voština od firmy Plascore [36]. Volba je zdůvodněna v kapitole 5.4.

7.3 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH SKLADBY

V návaznosti na předchozí testování a dat z něj získaných byly navrženy jednotlivé skladby, které byly testovány pro získání odhadu celkové pohlcené energie absorbéru. Ty byly následně testovány stejně jako v kapitole 5.4. Výpočty pak byly stanoveny absorpce jednotlivých segmentů a následně celého absorbéru. Výsledné hodnoty určené z kvazi-statických testů bylo nutné upravit pro test dynamický (popsáno v kapitole 5), to znamená, že byly výsledné hodnoty sníženy o 30 %. Přesný výpočet je prakticky nemožný, proto byla i ponechána rezerva vůči minimálním, pravidly definovaným, hodnotám.

Skladby byly navrženy dvě, vzorky absorbérů byly pojmenovány ED3-V2 a ED3-V3.



Graf - 8 Data ze zkoušek jednotlivých segmentů pro skladbu ED3-V3

Předložená data v grafu jsou ze skladeb vzorku ED3-V3 (Graf - 8). U všech vzorků byla navozena progresivní porucha. Vzorek pro segment I se svými hodnotami velmi vzdaluje od předpokladů na průběhy poruchy a především hodnoty působící síly. Na absorbéru má segment velice vzdálený tvar tvaru vzorku, tyto hodnoty tedy nebyly uvažovány pro absorpci především z pokračujícího předpokladu nízkých sil očekávaných při drcení tohoto segmentu. Naměřené hodnoty jsou v tabulce (Tab. 5).

Tab. 5 Výsledné hodnoty určené pomocí tlakových zkoušek

	Segment I	Segment II	Segment III	Segment IV
<i>Hmotnost vzorku [g]</i>	7,2	18,9	26	31,4
<i>SEA [J/g]</i>	59,1	31,6	45,8	47,6
<i>Průměrná síla [N]</i>	8 098,5	9 417,4	24 302,8	29 826,8

7.4 MKP ANALÝZA

Přesnější možností výpočtu je metoda konečných prvků. Výpočet probíhal pomocí programu ANSYS 2021 R2. Zde je na výběr více modulů simulujících dynamické děje, hlavní jsou Explicit dynamics a LS-DYNA. Zvolena byla LS-DYNA z důvodu jejího častějšího využití pro simulace crash testů. [37]

LS-DYNA je multifyzikální řešič, který umí řešit nelineární děje s velkými deformacemi. Umožňuje dokonce simulovat sypké hmoty, teplotní úlohy i například elektromagnetismus. [37]

7.4.1 MATERIÁLOVÉ MODEL Y

Materiálová data uhlíkového prepregu byla naměřena v minulosti kolegy z týmu [16], materiálová data voštiny byla dosazována pomocí technického listu [36].

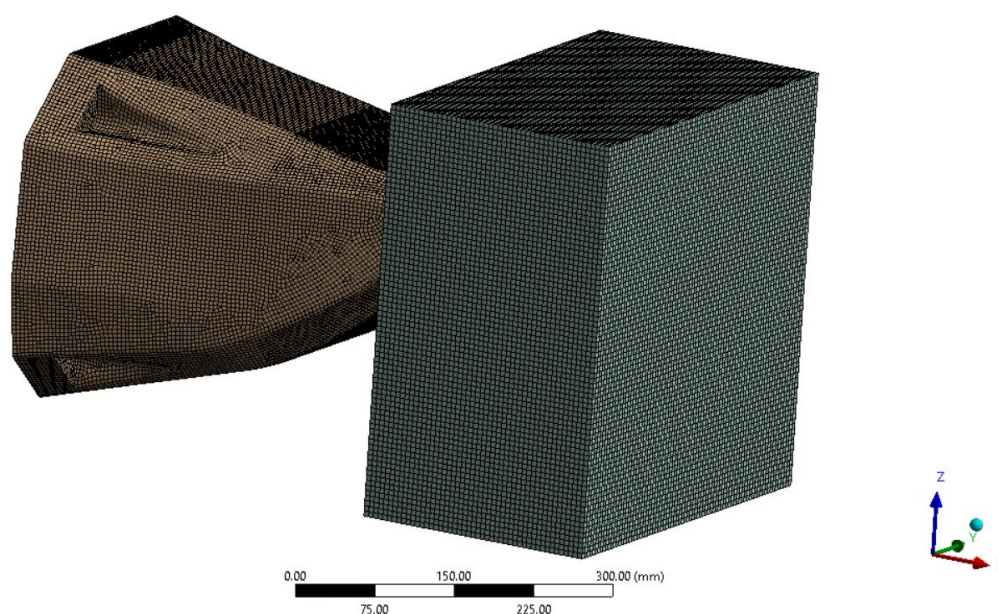
Pro padající závaží byl přiřazen materiál Structural steel, dle doporučení pana Řídkého z firmy SVS FEM byl změněn Youngův modul materiálu na 51 GPa, což byla stejná hodnota jako u kompozitu. Jelikož se jednalo o dokonale tuhé těleso (rigid), neovlivňovala tato změna výsledky a dopomohla lepšímu nastavení kontaktní tuhosti a tím i zlepšení chování v kontaktu. [38]

7.4.2 VYSÍŤOVÁNÍ

Délka výpočtu je při použití skořepinových prvků nejvíce ovlivněna charakteristickou délkou nejmenší buňky vysíťovaného modelu. [39] Proto bylo vytvoření kvalitní sítě věnována značná pozornost. Velikost prvků byla zvolena 5 mm, hodnota vycházela i částečně z prací N. A. Fellowse [40] a P. Záruby [28]. Po prvním vysíťování byla nejmenší charakteristická délka 0,03 mm, po úpravách sítě se zvýšila na 1,598 mm, což byla již přijatelná hodnota. Toto zvětšení znamená přibližně 53násobné zvýšení časového kroku a tím i 53násobné zkrácení délky výpočtu.

Použity byly prvky typu SHELL 181. [41] Snahou bylo snížit počet trojúhelníkových elementů na minimum. Jedná se o degenerované prvky, doporučeno je tyto prvky použít pouze na nezbytně nutných místech, jako jsou například vyplňující elementy.

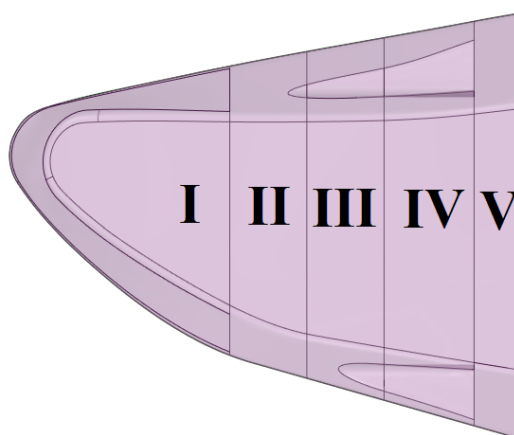
Z ACP Pre mají pak tyto prvky přiřazeny množství integračních bodů podle množství kompozitních vrstev. [38] Minimální množství pro stabilní výpočet je 3, čehož v místech, kde byly pouze dvě vrstvy laminátu, nebylo dosaženo. Řešením bylo rozdělit vrstvu na dvě s poloviční tloušťkou a stejnou orientací vláken.



Obr. 30 Vysíťovaný model absorbéru a závaží

7.4.3 MODELOVÁNÍ KOMPOZITŮ

Samotná geometrie byla vytvořena v programu Creo parametric a následně upravována v programu SpaceClaim, který je zabudován v ANSYSu. Zde byly připraveny jednotlivé plochy pro následné přiřazení materiálu, skladby a orientace jednotlivých vrstev sendvičové struktury. Pohlcovač je rozdělen na pět segmentů patrných z obrázku. První segment je určen především pro aerodynamické a estetické účely, jedná se o nestrukturální část. Druhý až čtvrtý segment slouží jako pohlcovač. U těchto úseků je odstupňována tuhost sendvičových panelů. Posledním segmentem je lem, který zajišťuje napojení na monokok monopostu.



Obr. 31 Jednotlivé segmenty absorbéru

Skladba laminátu je popsána v tabulce (Tab. 6), zvyšující se počet vrstev, a tím pádem i tuhost, zajišťuje, aby se absorbér bortil z vrchní strany (segment I, potažmo segment II) a nedocházelo k porušení strany spodní (segment IV), která zajišťovala i uchycení absorbéru k monokoku.

Tab. 6 Skladba laminátu na vzorku ED3-V3

					Jádro			
I	45°					0°		
II	45°	0°			5 mm	0°		
III	45°	0°	0°		5 mm	0°	0°	
IV	45°	0°	0°	0°	5 mm	0°	0°	0°
V	45°					0°		

7.4.4 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky byly voleny s ohledem na vybavení zkušebny, kde měla probíhat reálná pádová zkouška. Ta nebyla vybavena vedením pro padající závaží (což umožňuje vychýlení z trajektorie nárazu – vnáší více výzev při konstrukci absorbéru).

Nos byl uchycen k prostoru vazbou displacement (ve všech osách nulový). Pro boční stěny, kde byla voština, byl zamezen posuv směrem k AIP. Model AIP a monokoku nebyl ve výpočtu uvažován, a to především z důvodu zanedbatelných deformací, které by neovlivňovaly výpočet. Součinitel dynamického tření v kontaktu mezi absorbérem a dopadajícím závažím byl nastaven 0.245, volen byl dle měření provedeného v práci P. Záruby [28].

Pro padající závaží byla nastavena pouze rychlost 7 m/s, zamezení posuvů a natočení nemělo vzhledem k reálnému průběhu zkoušky smysl.

7.4.5 VÝSLEDKY SIMULACE

Hlavní počítané hodnoty byly závislost síly na čase a deformace absorbéru. Po otestování reálného absorbéru byly tyto hodnoty porovnávány a sloužily ke zpřesnění výpočtového modelu. Bez reálných dat nebylo možné prohlásit simulaci za přesnou. Deformace pak byla porovnávána vizuálně.

7.5 VÝPOČET MINIMÁLNÍHO PŘESAHU

Jelikož není technicky možné, aby celou vrstvu tvořil jeden kus, bylo třeba vypočítat optimální velikost přesahu mezi jednotlivými nářezy prepregu.

Výpočet minimálního přesahu vycházel z předpokladu, že délka přesahu musí kompenzovat přerušování vláken vzniklé napojením. Výchozí hodnoty byly mez pevnosti v tahu laminátu, smyková pevnost matrice a počet lepených spojů.

$$L = \frac{R_{m_kompozit} * t * \frac{n_{vrstev}}{2}}{\tau_{max_epoxy} * n_{lepených_spojů}} \quad (5)$$

Maximální hodnota minimálního přesahu vychází při spojení pouze jedné vrstvy na druhou, tzn. že je počet lepených spojů 1. Zde hodnota vychází 3,9 mm. V případě uvážení bezpečnosti a výrobních možností byla zvolena hodnota 8 mm pro celý absorbér.

7.6 NÁVRH NEPROPUSTNÉ PŘEPÁŽKY (AIP)

Nepropustná přepážka (AIP) je pravidly definována jako 1,5 mm tlustá ocelová nebo 4 mm tlustá hliníková deska. V případě použití kompozitu je nutné provést testy dokazující ekvivalenci k výše zmíněným. U absorbéru, který je přichycen přímo k AIP stačí dynamická zkouška absorbéru. U strukturálních nosů, u nichž se zatížení přenáší přímo na přední část monokoku je nutné provést ještě test dokazující to, že AIP vydrží zatížení 120 kN aplikované minimálními rozměry absorbéru (200 x 100 mm). [7]

Kompozitní AIP má výhodu především v nižší hmotnosti v porovnání s výše zmíněnými. Pro AIP pro monopost Dragon e3 byla zvolena kombinace uhlíkových a aramidových vláken spolu s Nomexovou voštinou tvořící jádro.

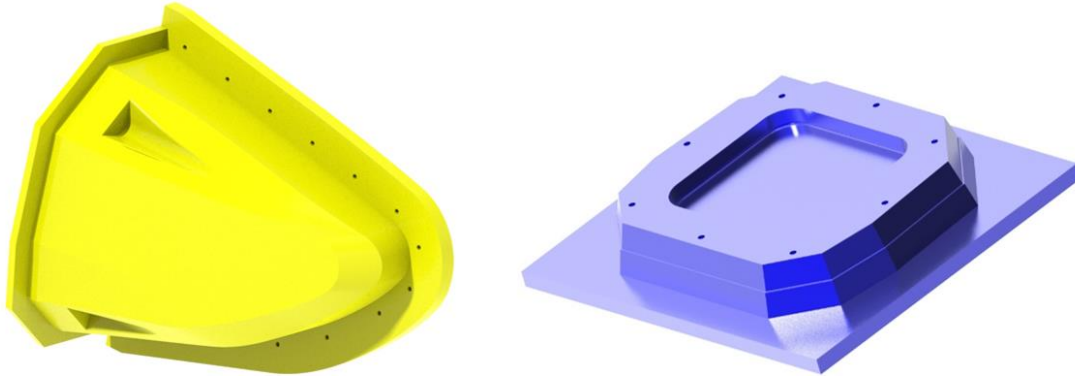


Obr. 32 Test nepropustné přepážky, [42]

8 VÝROBA ABSORBÉRU

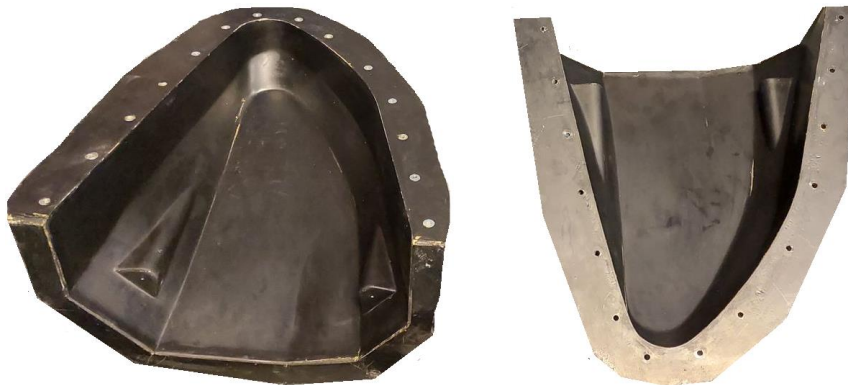
8.1 NÁVRH A VÝROBA FOREM

Pro výrobu absorbéru byly vyrobeny celkem tři formy. Jedna byla pro výrobu reprezentativní části geometrie monokoku, dvě tvořily formu na absorbér samotný. Dělicí rovina byla umístěna do roviny symetrie patrné z obrázků.



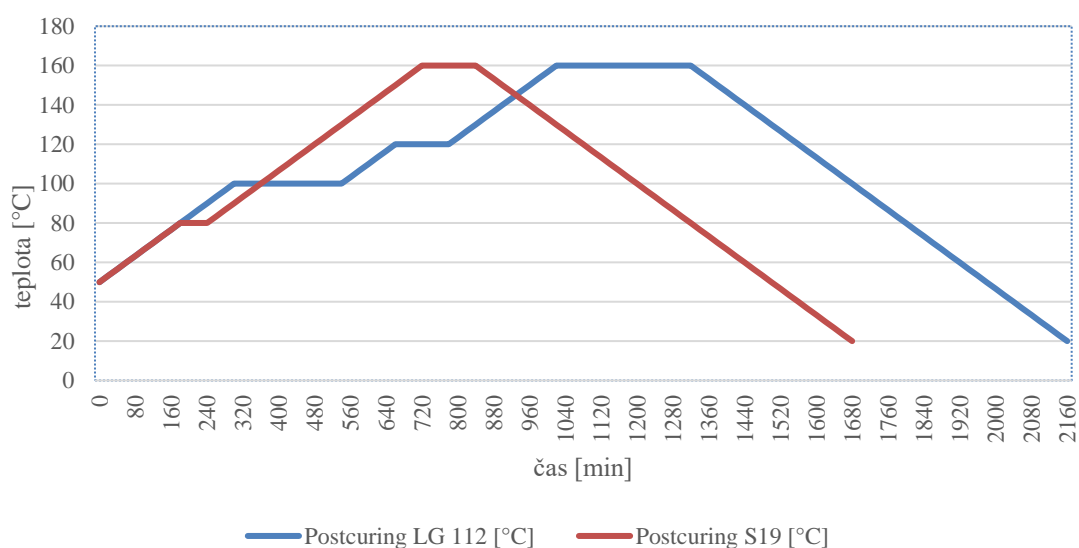
Obr. 33 Pozitivní formy, žlutá na absorbér a modrá na reprezentativní geometrii monokoku

Pozitivní formy byly frézovány z umělého dřeva (SIKA block), dělicí roviny byly vyřezány z MDF desek. Po prvním přebroušení následoval nátěr plničem pórů, následně pak nástřik stříkacím tmelem a jeho broušení a leštění pro požadovanou kvalitu povrchu. Negativní formy byly laminovány mokrou laminací, povrch formy tvoří gelcoat Biresin S19 [43], epoxid použitý na formy byl LG112. Po postcuringu tato pryskyřice nabízí vysokou teplotní odolnost (až do 140 °C) [44] a proto jsou vhodné pro použití pro formy na prepregové díly.



Obr. 34 Poloviny negativní formy na nos před spojením a vyleštěním

Postcuring byl upravován v závislosti na tepelném zpracování gelcoatu a pryskyřice, výsledný cyklus je stejný jako vytvrzovací cyklus Biresinu S19. Dlouhé výdrže na teplotě nižší, než maximální u pryskyřice LG112 slouží především pro správné prohřátí dílů v celé tloušťce a redukci tepelných namáhání v důsledku teplotní roztažnosti. Jelikož byly formy malé, prodlevy byly i po předchozích zkušenostech s formami na monokok a další díly vynechány. Obě poloviny formy byly před postcuringem spojeny, aby nedošlo k případné deformaci polovin formy. Rychlosti ohřívání a ochlazení byly voleny dle technických listů. [43], [44]



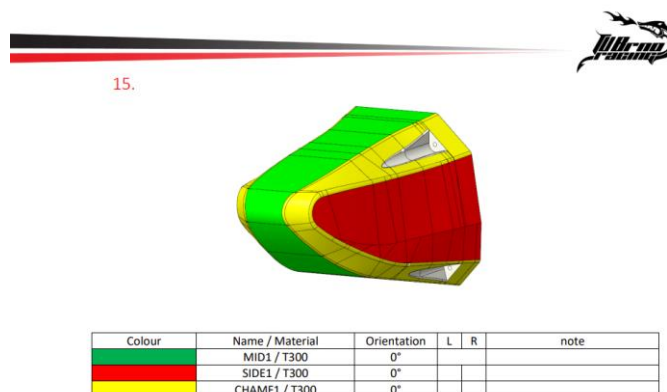
Graf - 9 Postcuring cyklus pro negativní formy

Výztuž laminátových forem tvořila uhlíková vlákna. Výhodou tohoto řešení je stejná teplotní roztažnost forem jako vyráběného dílu a vysoká tuhost formy, což zaručuje tvarovou stálost.

Pro vytvrzování dílů i forem byla využívána pec ve výrobních prostorách týmu TU Brno Racing. U této pece není možné využít přetlak jako u autoklávu, pro díl, který neobsahuje velké množství vrstev, je v případě správného výrobního postupu rozdíl zanedbatelný. Výhodou jsou nižší náklady a možnost vypékat v jakýkoliv čas. Drobnou nevýhodou je pak absence chladicího systému a z toho plynoucí delší časy ochlazení (zde se nejedná o nevýhodu z hlediska výrobního, ale spíš časového). [45]

8.2 LAMINACE ABSORBÉRŮ

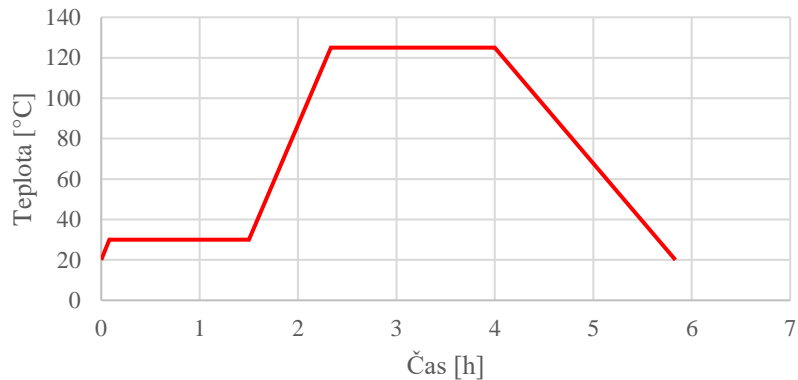
Laminace byla rozdělena do dvou částí. V první části byl vylaminován a vypečen vnější potah. V druhé části byla položena voština, vnitřní potahy a znovu vypečeno. Toto rozdělení zajistilo správné dotlačení vnějšího potahu. Pro zvýšení přehlednosti při laminaci byl vytvořen ply-book, ve kterém byla každá operace popsána. Jednotlivé díly byly nařezány pomocí rozvinů vytvořených v CADu.



Obr. 35 Ukázka operace z ply-booku

Pro separaci forem byl použit LOCTITE 700 NC ve třech vrstvách, aplikační teplota je do 135 °C, což plně vyhovuje teplotám vytvrzení prepregu [46].

Vytvrzovací cyklus začíná ohřevem na 30 °C a výdrží po dobu 1,5h, tato část slouží jako debulking laminátu před vytvrzením. Za tuto dobu dojde k vytlačení možných bublinek a k lepšímu spojení vrstev prepregu.



Graf - 10 Vytvrzovací cyklus prepregu

Vylaminované absorbéry, AIP a reprezentativní geometrie monokoku byly nakonec ořezány, složeny a připraveny pro testování. Každý vzorek byl označen jeho číslem, byly naznačeny přechody mezi jednotlivými segmenty (pro lepší orientaci při vyhodnocení) a nalepeno měřítko.

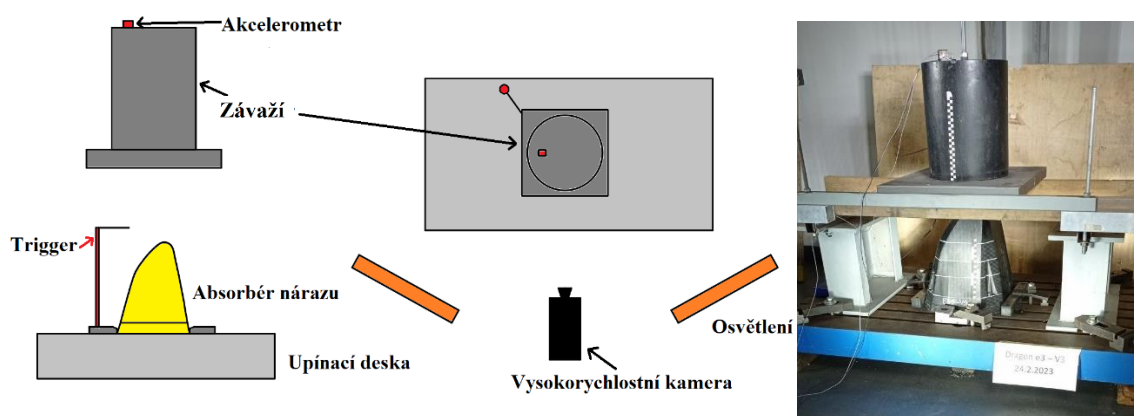


Obr. 36 Absorbéry připraveny pro pádové zkoušky

9 PÁDOVÉ ZKOUŠKY

Pádové zkoušky proběhly ve firmě KTG. Měření probíhalo akcelerometrem umístěným na padajícím závaží. Použit byl tříosý IEPE akcelerometr Bruel Kjaer Nexus Type 4504A 750g. Závaží mělo hmotnost 298 kg a mělo válcový tvar. Výška, z které padalo, byla 2,52 m nad vrcholkem absorbéru (aby bylo dosaženo potenciální energie 7350 J). [42] Tým TU Brno racing testoval celkem tři verze pohlcovačů. Pohlcovač s označením ED3-V1 tvořila hliníková voština. Největší pozornost z hlediska analýzy dat bude věnována vzorku ED3-V3, jelikož splňoval pravidla soutěže a měl nejmenší hmotnost ze všech testovaných vzorků.

Testovací zařízení lze vidět na obrázku (Obr. 37). Absorbér byl upnut k upínací desce s drážkami tak, aby bylo zamezeno pohybu do stran. Nad absorbérem byl umístěn spouštěč (Trigger), který po kontaktu s padajícím závažím spustil záznam vysokorychlostní kamery a měření akcelerace závaží. Pro lepší obraz byl absorbér nasvícen výkonným osvětlením.



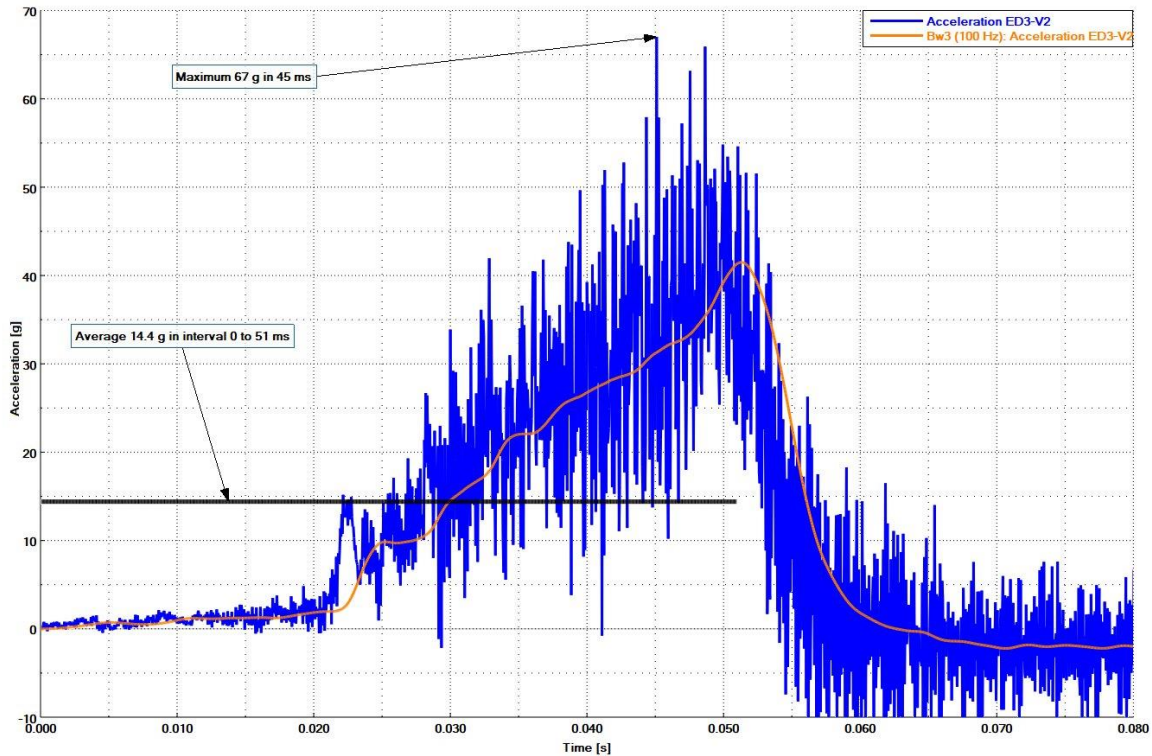
Obr. 37 Popis testovacího zařízení (vlevo) a fotografie absorbéru připraveného na test (vpravo)

9.1 ZPRACOVÁNÍ DAT

Dle pravidel soutěže [7] bylo průměrné zrychlení vypočítáno z nefiltrovaných dat, pro maximální hodnotu (z důvodu, že byla vyšší jak 40 g) byla data vyfiltrována pomocí Butterworthova filtru. Butterworthovy filtry jsou navrženy tak, aby měly co nejplošší odezvu v propustném pásmu. [47], [48] Pravidly jsou přesně definovány parametry filtru, a to 100 Hz Butterworthův filtr třetího řádu s dolní propustí [7]

9.2 VZOREK ED3-V2

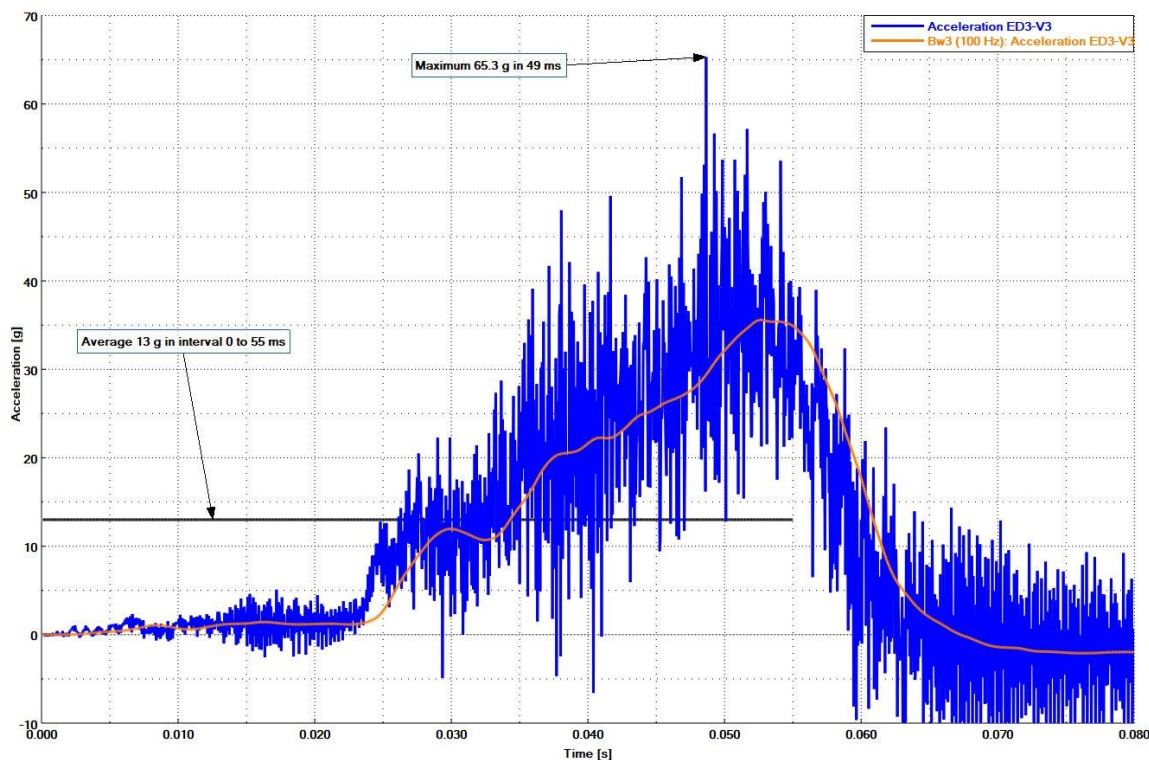
Vzorek ED3-V2 dopadovou energii sice pohltil, problémem však byla maximální hodnota zrychlení. Ta i po filtraci dat překračovala maximální mez danou pravidly soutěže. To bylo způsobeno tužší skladbou laminátu, který měl o jednu vrstvu více na vnitřním potahu. Orientace zde byla více homogenní symetrickým střídáním vrstev v 0° a 45° .



Graf - 11 Průběh akcelerace v závislosti na čase u verze ED3-V2 [49]

Z grafu (Graf - 11) je patrné maximální zrychlení z filtrovaných dat 42 g, to je o 2 g více než je limit daný pravidly, průměrné zrychlení je 14,4 g. Celkový průběh testu a mechanismy absorpce energie byly velmi podobné vzorku ED3-V3.

9.3 VZOREK ED3-V3

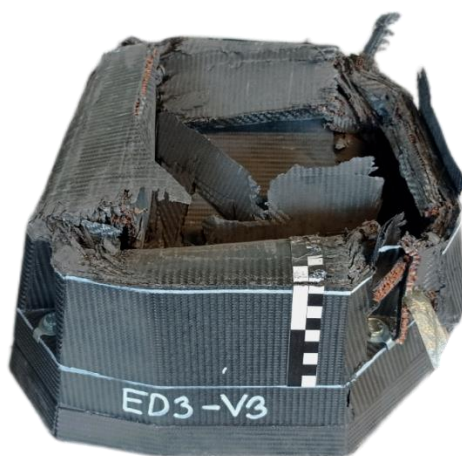


Graf - 12 Průběh akcelerace v závislosti na čase u verze ED3-V3 [49]

Čas 0 s je stanoven jako bod prvního kontaktu padajícího závaží s absorbérem. Z videa natočeného vysokorychlostní kamerou s rychlostí jeden snímek za jednu milisekundu byl proveden rozbor.

9.3.1 MECHANISMY PORUCHY DOPROVÁZEJÍCÍ POHLCENÍ NÁRAZU

U vzorku se nevyskytoval pouze jeden mechanismus poruchy (což bylo vzhledem ke složitosti a nepravidelnosti tvaru předpokládané). Mechanismy se lišily v závislosti na skladbě laminátu i na úhlu, který svírala stěna vůči působící síle.



Obr. 38 Vzorek ED3-V3 po pádové zkoušce

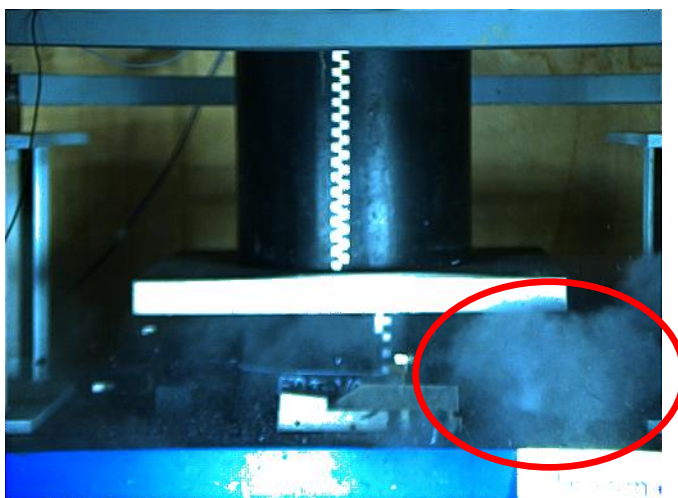
Porušování prvního segmentu probíhalo křehkým lámáním, porucha byla kritická a nedocházelo při ní k zásadnímu pohlcení energie, ostatně s takovým předpokladem byla i navrhována. Úlomky z prvního segmentu lze vidět na obrázku níže (Obr. 39).



Obr. 39 Úlomky z přední části absorberu (první segment)

Druhý segment se začal bortit v od 22 ms do 42 ms. V záznamu z vysokorychlostní kamery nelze přesně poznat, o jaký druh poruchy se jednalo, na otestovaném vzorku však ano.

Segment III a přibližně 10 mm ze segmentu IV se bortily v čase mezi 42. a 52. ms. V 52. ms čase došlo vytvoření dvou podélných prasklin. Ty byly způsobeny pravděpodobně nárůstem tlaku v důsledku nedostatku možností úniku vzduchu uzavřenému uvnitř absorberu. Toto tvrzení dokládá i obrázek (Obr. 40), na kterém lze vidět únik přetlaku po vytvoření podélných prasklin na absorberu. Tento děj byl doprovázen nejvyšší hodnotou zrychlení (u filtrovaných dat). U nefiltrovaných dat tato hodnota činila 65,3 g v čase 49 ms. Tato hodnota je vyšší, než je maximální povolená hodnota daná pravidly, pravidla však v tomto případě dovolují použít Butterworthův filtr. [7] Vyfiltrované maximální zrychlení je 35,3 g.



Obr. 40 Viditelný únik přetlaku po vzniku podélné praskliny

Po pohlcení energie a zastavení závaží došlo k jeho odskočení, což je patrné ze záporných hodnot zrychlení. K úplnému zastavení pak došlo v čase 334 ms od prvního dotyku (není vykreslen, neboť z hlediska pohlcení nárazu nejsou odskočení a následný dopad podstatné).

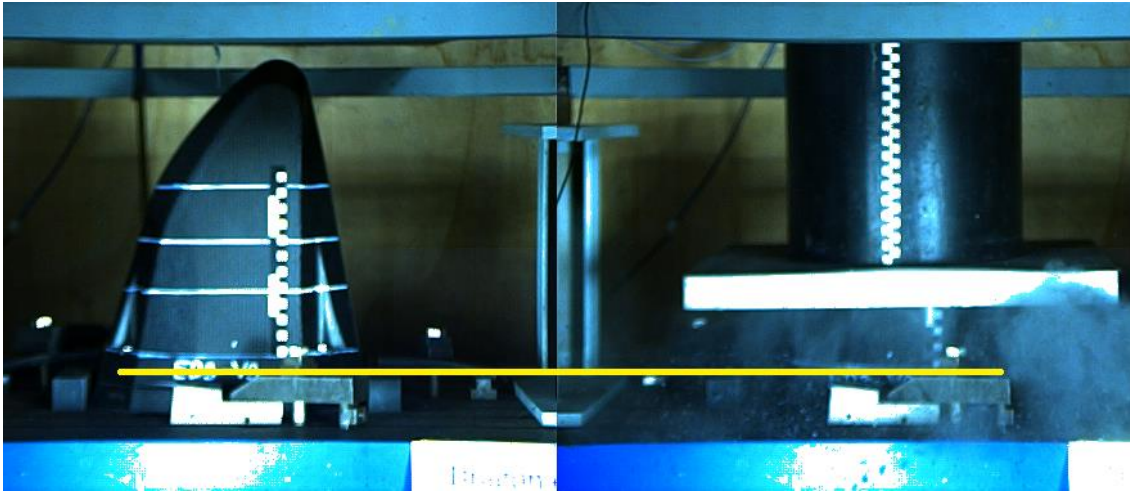
Segmenty II, III a IV měly poruchy velmi podobné. K pohlcení energie docházelo ohýbáním laminátu na bočních stěnách, u zkosení a u míst, kde jsou zahlobení pro šrouby, se jednalo spíše o křehkou fragmentaci. Důvodem tohoto rozdílu jsou rozdílné rozměry jednotlivých stěn a geometrické tuhosti ploch. Tuhost v místech uchycení šroubů je ještě zvýšena z důvodu vyskytujících se přesahů v laminátu. S určitostí nelze říct, která z výše zmíněných poruch se na pohlcení energie podílela více.

Velikost odlamovaných částí při ohýbání závisela na úhlu, který svírala stěna s padajícím závažím. Obecně čím více se úhel blíží k 90° , tím byly úlomky menší. Při pohledu z vnitřní strany absorberu po pádové zkoušce lze tyto úlomky pozorovat. Podélné praskliny se objevily dvě, jedna u horního uchycení absorberu k monokoku, druhá byla v geometrickém zlomu na boční straně absorberu. Druhá zmíněná nebyla na záznamu z kamery vidět, předpokládá se dá že k vytvoření prasklin došlo současně.



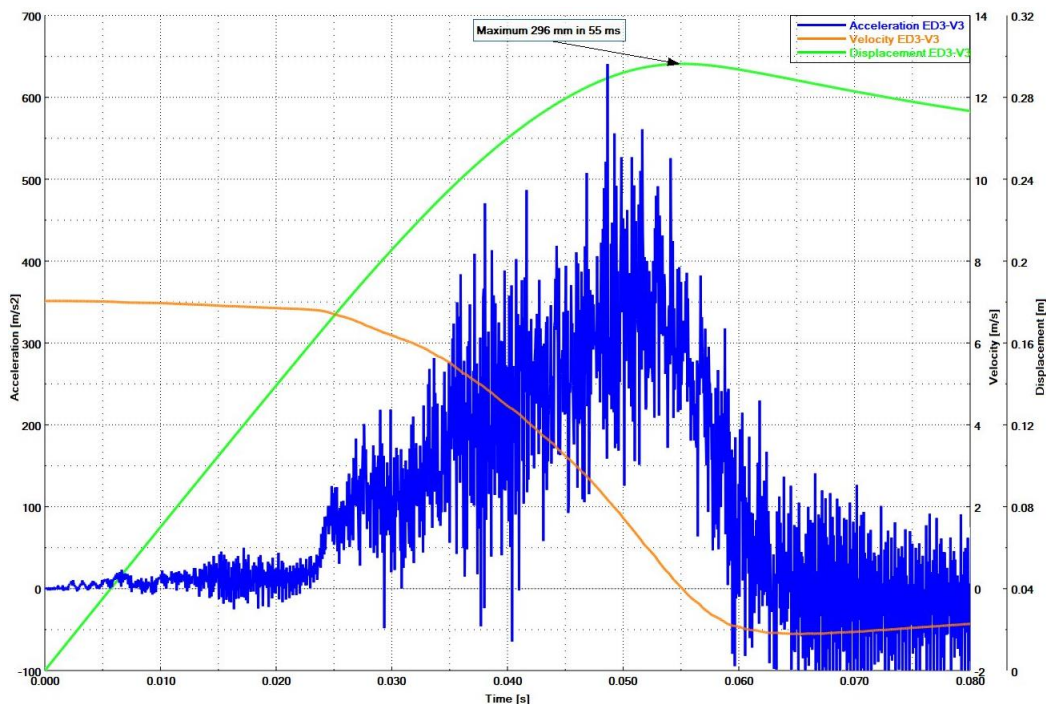
Obr. 41 Pohled na vnitřní stranu vzorku ED3-V3

Přenos zatížení na AIP byl primárně přes uchycení šroubů. Z viditelného poškození došlo ke smýknutí boční stěny a jejímu průhybu. Průhyb se objevil až těsně před zastavením závaží. Lze jej pozorovat díky vyznačeným čarám na hranicích jednotlivých segmentů.



Obr. 42 Smýknutí boční stěny přes okraj AIP při pádové zkoušce

Maximální deformace pohlcovače byla 296 mm v 55. milisekundě. Nulové rychlosti bylo poprvé dosaženo v čase 55 ms, směr rychlosti se poté změnil (již zmíněný odskok).

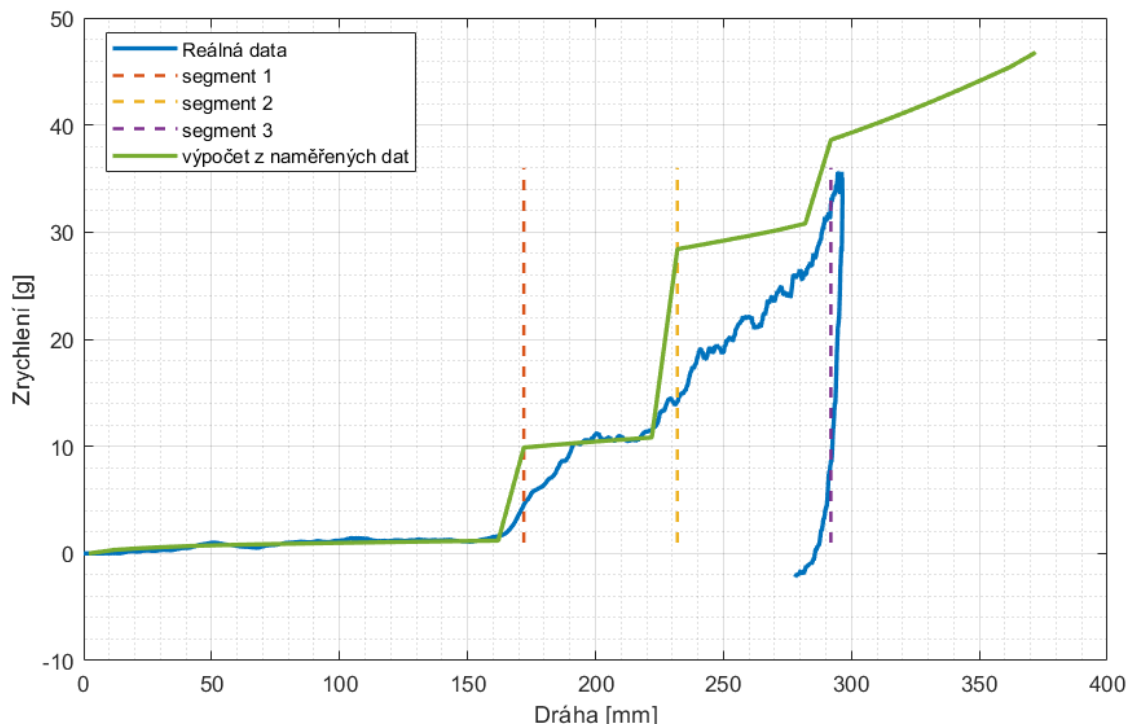


Obr. 43 Graf průběhu zrychlení (modré), rychlosti (oranžová) a deformace (zelená), [49]

10 VYHODNOCENÍ PÁDOVÝCH ZKOUŠEK

V předchozí kapitole byly popsány zkoušky a jejich průběh, v této kapitole pak budou reálná data porovnána s vypočítanými daty. Pro vyhodnocování budou použita již pouze vyfiltrovaná data z důvodu větší přehlednosti. Opět bude pozornost věnována pouze vzorku ED3-V3.

10.1 POROVNÁNÍ REÁLNÝCH A VYPOČÍTANÝCH HODNOT



Graf - 13 Porovnání skutečných dat a dat vypočítaných z naměřených vzorků

V prvním srovnání budou porovnána reálná data s daty experimentálně stanovenými pomocí tlakových zkoušek z kapitoly 5.4. K výpočtu byla použita naměřená střední síla pro jednotlivé segmenty. Z ní byla stanovena střední síla vztažená na obvod, díky níž bylo možné vypočítat sílu a zrychlení působící na závaží. Redukční součinitel α pro přechod z kvazi-statických na dynamická data byl použit 0,7 (snížení o 30 %). Výpočet je zřejmý z rovnice 6. Pro segment I byla nastavena menší hodnota síly, než byla otestována v kapitole 5.4, důvody byly popsány ve stejné kapitole. Závislost byla následně vynesena do grafu včetně vyznačení hranic jednotlivých segmentů (Graf - 13).

$$a = \frac{\bar{F}}{m_{\text{závaží}} * g} * \frac{o_{\text{absorbér}}}{o_{\text{vzorek}}} * \alpha \quad (6)$$

K absorbování energie 7350 J by dle výpočtu mělo dojít ve vzdálenosti 291,3 mm od prvního doteku závaží a absorbéru. Následně byly zjištěny hodnoty zrychlení v okamžiku pohlcení energie a vypočítáno průměrné zrychlení z oblasti od počátku děje do pohlcení energie. Výsledné hodnoty jsou v tabulce níže (Tab. 7).

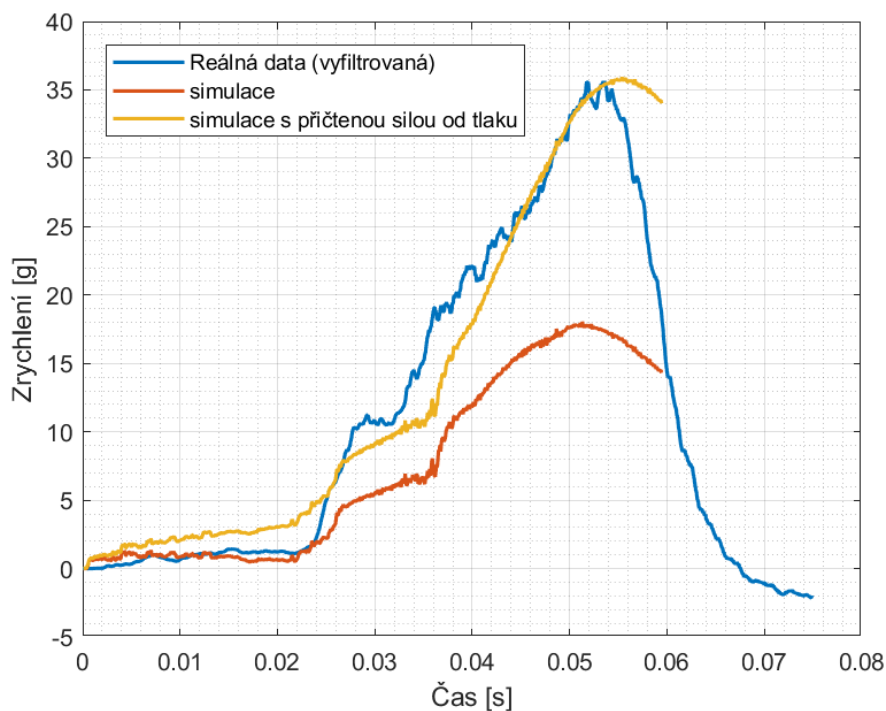
Tab. 7 Srovnání výsledků reálné a simulované pádové zkoušky

<i>Veličina</i>	Výpočet	Reálná data
<i>Maximální zrychlení [g]</i>	37,8	35,3
<i>Průměrné zrychlení [g]</i>	9,7	13
<i>Maximální deformace [mm]</i>	291,3	296

Metoda odhadu výsledných průběhů absorpce energie pomocí experimentálně naměřených dat se ukázala jako použitelná. Neumí úplně přesně odhadnout výsledné průběhy zrychlení, zato je velmi jednoduchá a přináší s sebou i ověření správnosti výpočtů pomocí MKP. Potvrzuje se i snížení působících sil při srovnání kvazi-statického a dynamického testu tak, jak bylo uvedeno v knize Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness [32], a to o horní hranici 30 %.

10.2 POROVNÁNÍ REÁLNÝCH A SIMULOVANÝCH HODNOT

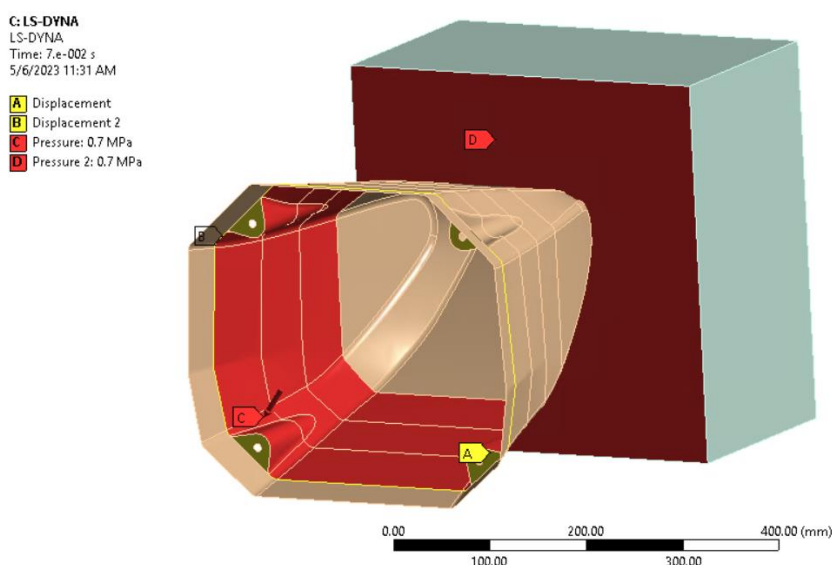
Jak zkoušky pohlcovačů ukázaly, důležitým jevem při absorpci byl nárůst tlaku. Do simulace byl tento nárůst zaveden v podobě okrajových podmínek (Obr. 44). Tlak působil jak na dopadající závaží, tak na vnitřní stěny absorbéru. Velikost byla dopočítána za pomoci adiabatického děje pro ideální plyn. Hodnoty sice nejsou úplně přesné, je to však rozumné přiblížení k reálným průběhům, jak lze vidět z grafu (Graf - 14). Křivka označená jako *simulace* jsou hodnoty síly v kontaktu mezi absorbérem a závažím, tento kontakt nezohledňoval působící sílu od přetlaku vznikajícího uvnitř absorbéru. Síla od přetlaku byla připočtena ve žluté křivce označené jako *simulace s přičtenou silou od tlaku*.



Graf - 14 Porovnání skutečných a simulovaných dat

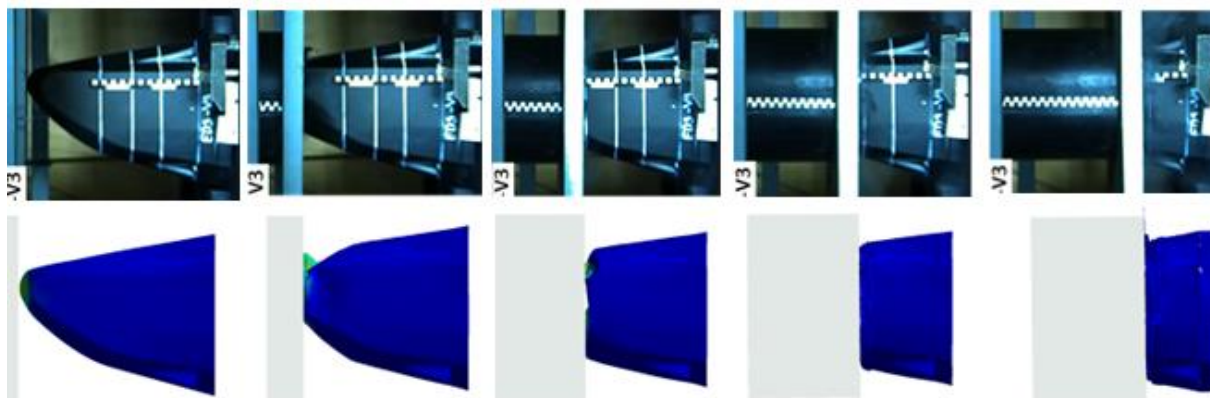
MKP tedy nabízí mnohem přesnější výpočet, než je v kapitole 10.1. Přesnost je však vykoupena delším časem optimalizace výpočtového modelu a celkovou náročností nastavení onoho modelu.

Pro budoucí testování by bylo vhodné změřit průběh tlaku uvnitř absorbéru, díky čemuž by bylo možné do simulací zavést reálné hodnoty. Dále by pak bylo možné posoudit, jaká část z přetlaku unikne do okolí a jaká se podílí na absorpci energie z dopadu závaží. Vhodným místem pro umístění tlakového senzoru by mohl být utěsněný otvor v prostřední části AIP. Ten by neovlivňoval pevnost absorbéru ani samotnou nárazovou zkoušku, neboť se zatížení přenáší přímo do monokoku monopostu. Přívodní kabeláž by bylo možné realizovat skrz drážku v upínacím stole.

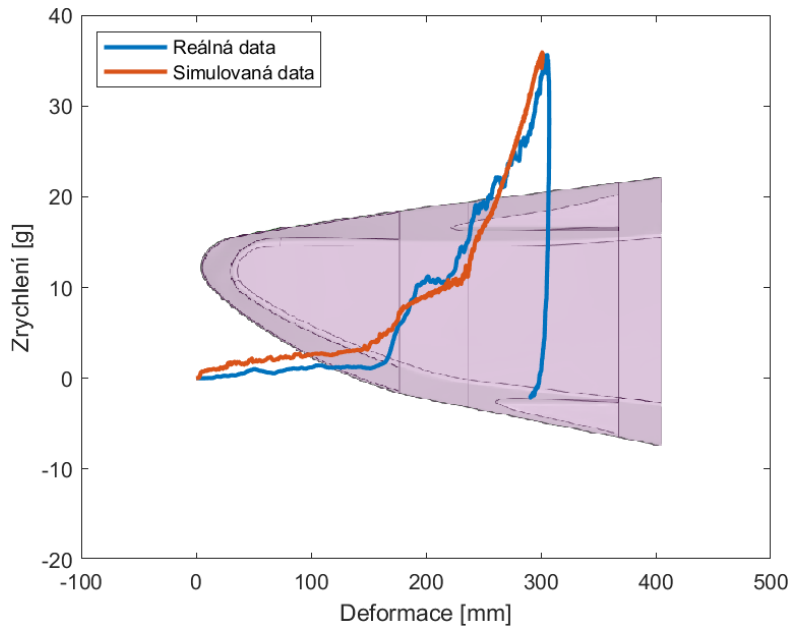


Obr. 44 Finální nastavení okrajových podmínek, dopadová rychlost zde není vidět

Z hlediska posouzení deformací na reálném vzorku a deformací simulovaných je patrné, že výsledky z velké části korespondují. Rozdíly se vyskytují pouze v první části větším vlněním prvního segmentu absorbéru, výsledek tímto nebyl ovlivněn. Praskliny, které se objevily ve spodní části absorbéru odpovídají místům poškození v simulaci, na funkci absorbéru však neměly zásadní vliv.



Obr. 45 Srovnání reálného a simulovaného průběhu nárazu



Graf - 15 Vykreslení průběhu zrychlení v závislosti na deformaci

Dobrou vizualizací absorpce nárazu je graf na obrázku (Graf - 15). Lze zde pozorovat nárůst zrychlení v závislosti na zvyšující se tuhosti použité skladby laminátu i tlaku uvnitř absorbéru.

Tab. 8 Srovnání výsledků reálné a simulované pádové zkoušky

<i>Veličina</i>	Simulace	Reálná data
<i>Maximální zrychlení [g]</i>	35,9	35,3
<i>Průměrné zrychlení [g]</i>	13,6	13
<i>Maximální deformace [mm]</i>	292	296

Specifická absorpce energie pro vzorek ED3-V3 je 42,8 J/g. Optimalizované kompozitní absorbéry mají obvykle hodnoty mezi 40 a 70 J/g. [4] To znamená že na absorbéru je stále prostor pro zlepšení, každopádně návrh samotný je kvalitní.

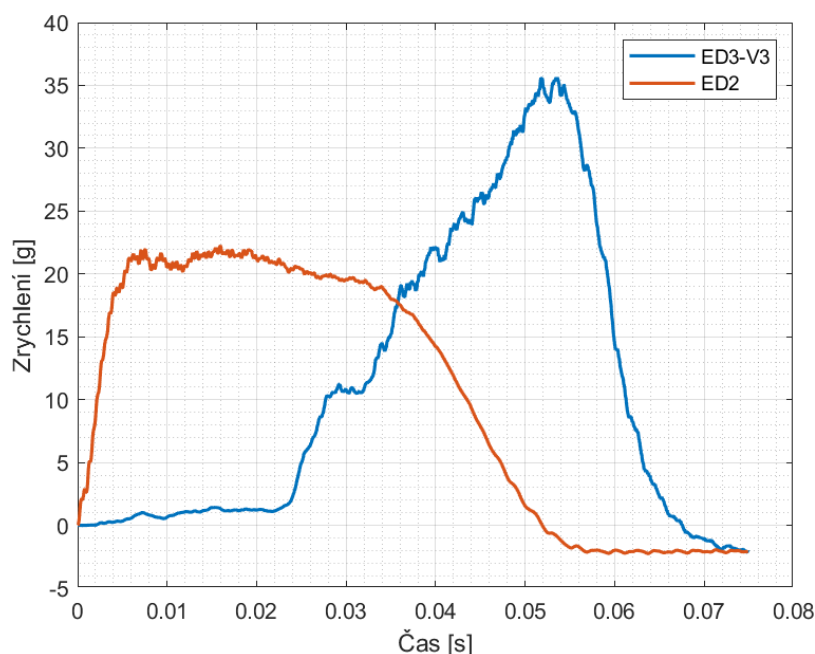
10.3 MOŽNÉ ÚPRAVY PRO BUDOUCÍ GENERACE POHLCOVAČŮ

U absorbéru vyvinutém v této bakalářské práci nedošlo k úplnému využití materiálu při absorpci energie. Zde se nabízí dvě možnosti. První je zkrácení segmentu IV, díky čemuž by se snížila hmotnost celého absorbéru. Druhou možností je úprava skladby laminátu. ANSYS nabízí možnosti optimalizace, což by pomohlo zajistit nejlepší možnou skladbu. Za zvážení by stálo i využití voštiny s větší tloušťkou v kombinaci s tenčími potahy. Další možností by bylo využití jednosměrných vláken, ty však přináší nebezpečí velkých podélných prasklin v případě, že nebudou využita správně. Došlo by pak ke katastrofální poruše s následkem nepohlčení dostatku energie. Nebezpečí by hrozilo v případě, že by všechna vlákna směřovala pouze v ose nárazu. Zde se nabízí použít skladbu $\pm 15^\circ$, případně jiný úhel v závislosti na naměřených datech a výsledných poruchách z tlakové zkoušky.

10.4 POROVNÁNÍ S PŘEDCHOZÍM KONCEPTEM

Jak již bylo zmíněno na začátku této práce, nový absorbér bude porovnán s řešením absorbérů z předchozího monopostu. Oba absorbéry byly navrženy a otestovány autorem této bakalářské práce.

Jak je patrné z grafu níže (Graf - 16) celková délka děje je od prvního doteku po zastavení absorbérů mnohem kratší u voštinového pohlcovače. Oproti rostoucí hodnotě zrychlení u strukturálního nosu se u voštiny ustálilo na přibližně konstantní hodnotě. To je jeden z hlavních rozdílů. Je dán odlišnou konstrukcí a filozofií návrhu. Voštinový absorbér má v celé délce konstantní průřez, odtud plyne i konstantní hodnota zrychlení v čase. Díky perforované konstrukci nebyl problém s rostoucím tlakem uvnitř voštinového absorbérů. Oproti tomu se u strukturálního nosu jak průřez, tak tuhost laminátu, zvětšuje, a tak roste i zrychlení. Jak ukázala kapitola 10.2, u kompozitního absorbérů bylo zvyšování tlaku nezanedbatelné.



Graf - 16 Srovnání průběhu nárazu voštinového a kompozitního pohlcovače

Při srovnání hodnot specifické absorpce energie kompozitní absorbér ukázal mnohem lepší výsledky (SEA je větší o 55 %). U voštinového absorbérů navíc není možné specifickou absorpci energie zvýšit, jelikož geometrie buněk i materiál jsou dané. Díky možnosti měnit skladbu i kombinovat více druhů vláken je možné hodnotu specifické absorpce energie ještě zvýšit.

Tab. 9 Hodnoty SEA pro jednotlivé koncepty absorbérů

<i>Veličina</i>	Kompozit	Voština
<i>Specifická absorpce energie [J/g]</i>	42,8	27,6

ZÁVĚR

Výsledkem této bakalářské práce je zcela nový druh absorbéru nárazu, který je kompozitní sendvičové konstrukce. Takový absorbér je prvním svého druhu v týmu TU Brno Racing.



Obr. 46 Monopost Dragon e3 vybavený absorbérem vyvinutým v této bakalářské práci [50]

Provedená rešerše ukázala, že nejvhodnějším konceptem je právě konstrukce kompozitního pohlcovače, který bude zároveň tvořit nos monopostu. Tento koncept je vývojově nejnáročnější, zato nabízí velký potenciál pro snížení hmotnosti, momentu setrvačnosti a těžiště vozidla, což jsou faktory, které nejvíce ovlivňují výsledný čas na kolo. Začátkem práce byly uvedeny základní typy poruch pro lamináty a sendviče, které bylo možné předpokládat při pohlčení nárazu a k nimž i cílil návrh pohlcovače. Představen byl i koncept z monopostu Dragon e2, který byl použit pro přímé srovnání.

Následně byly testovány vzorky pro zjištění hodnot specifické absorpce energie a navrženy skladby pro jednotlivé segmenty absorbéru. Testovány byly i vzorky, které sloužily ke zjištění chování materiálu při přechodu ze segmentu I bez jádra na segment II s jádrem. Hledán byl vhodný přechod pro navození správné poruchy.

Pádové zkoušky absorbérů proběhly v certifikované zkušebně. Jejich výsledky byly následně vyhodnoceny pro vzorek absorbéru ED3-V3. Analyzována byla především data zrychlení závaží. Díky těmto datům byl následně optimalizován výpočtový model, především jeho okrajové podmínky. Jako nezanedbatelný se ukázal nárůst tlaku uvnitř absorbéru vlivem nemožnosti vzduchu unikat do okolí. Ověřen byl i zjednodušený výpočet pomocí experimentálně naměřených kvazi-statických dat pro jednotlivé skladby. Ukázalo se, že je možno tuto metodu výpočtu použít, použití MKP je však přesnější a umí ukázat i kritická místa návrhu.

Srovnání s voštinovým absorbérem ukázalo hlavní odlišnosti při absorpci energie danými typy pohlcovačů, výsledným měřítkem pak byla hmotnost absorbéru. Oproti voštinovým

absorbérům netrpí strukturální nos na nesymetrické deformace nepropustné přepážky, ke které jsou voštiny přilepeny. Výhodou jsou i menší hodnoty průměrného zrychlení, a především pak mnohem větší hodnota specifické absorpce energie strukturálního nosu.

Absorbér splnil cíle návrhu, úspěšně splnil podmínky na maximální zrychlení a pohlcenou energii definovaných pravidly soutěže. V porovnání s modelem použitým na monopostu Dragon e2 byla hmotnost sestavy pohlcovače snížena o 251 gramů, což ukázalo potenciál využití kompozitních pohlcovačů nárazu do budoucna.

Možností zlepšení do budoucna je několik, s výpočtovým modelem, který se blíží realitě, je možné zabudovat optimalizační algoritmy pro návrh skladby laminátu, případně i využít materiálů s vyšší pevností. Za vyzkoušení by stálo i použití voštiny s vyšší tloušťkou. Díky těmto změnám by bylo možné specifickou absorpci energie absorbéru ještě zvýšit. Vhodným pokračováním ve vývoji by byl i hlubší výzkum nárůstu tlaku při stlačení objemu vzduchu nacházejícím se uvnitř absorbéru a jeho přesnější zavedení do výpočtového modelu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Technical F1 dictionary: Driver safety* [online]. In: . [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: https://www.formula1-dictionary.net/safety_drivers.html
- [2] *F1 rules and stats 1980-1989* [online]. [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://www.f1technical.net/articles/26>
- [3] SAVAGE, Gary. *Composite Materials Technology in Formula 1 Motor Racing*. Honda Racing F1, **2008**.
- [4] *Technical F1 dictionary: Crash test* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.formula1-dictionary.net/crash_test.html
- [5] *Web TU Brno Racing* [online]. Brno [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/>
- [6] *Crash test made by Brabham-BMW in the 80's* [online]. [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://www.carthrottle.com/post/9i8efB/>
- [7] *Formula Student Rules 2023 v1.1: FORMULA STUDENT GERMANY: competition: rules & documents: rules for FSG 2023*. In: . Dostupné také z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf
- [8] *Formula Student Germany: What is the Formula Student Germany competition?* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/concept/>
- [9] *Formula Student Electric - World Ranking List* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://fs-world.org/E/>
- [10] *East formula student: FS East 2022 // day #4* [online]. In: . [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/fseast/52309590417/in/photostream/>
- [11] *Webové stránky TU Brno Racing* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/>
- [12] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [13] JURAČKA, Jaroslav, Doc. Ing. PhD. *Kompozitní konstrukce v letectví*. Brno, 2017. revize č.:9. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.

- [14] BAKER, Alan A., Stuart DUTTON a Donald KELLY. *Composite materials for aircraft structures*. 2nd ed. Reston: AIAA American Institute of Aeronautics, 2004. ISBN 15-634-7540-5.
- [15] MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. Brno: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 80-903-3860-7.
- [16] HAGARA, Matej. *Konstrukční návrh kompozitního battery packu pro Formuli Student*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Michal Janoušek.
- [17] *Aerospace Engineering Blog: Fancy a Sandwich?* [online]. 2013 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://aerospaceengineeringblog.com/sandwich-panel/>
- [18] *Honda R&D Technical review F1 special: The Third Era Activities* [online]. 376 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.hondarandd.jp/summary.php?sid=23&lang=en>
- [19] *DTM / GT500 2014: The ultimate touring cars* [online]. [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/dtm-gt500-2014-the-ultimate-touring-cars/>
- [20] *Formula SAE Standard Impact Attenuator* [online]. [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=193613e4-fff1-4ea9-97ec-eb1c07fbe3c0>
- [21] *Standard Dow Impaxx 700 Foam Impact Attenuator* [online]. [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/standard-dow-impaxx-700-foam-impact-attenuator-for-formula-bharat-supra-saeindia-formula-student-19296580848.html>
- [22] SCHORMANS, J.M.J. *The design of a formula student front impact attenuator*. Eindhoven University of Technology. Eindhoven University of Technology. Vedoucí práce Dr. ir. Varvara Kouznetsova.
- [23] BILÍK, Michal, Bc. *Návrh předního deformačního členu vozidla Formule Student*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.
- [24] KIM, Jeong-Dae, Jeong-Hyeon KIM, Dong-Ha LEE, Dong-Ju YEOM a Jae-Myung LEE. Synthesis and Investigation of Cryogenic Mechanical Properties of Chopped-Glass-Fiber-Reinforced Polyisocyanurate Foam. In: *Materials*. 2021, . ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14020446
- [25] RUPČÍK, Jan, Bc. *Deformační člen formulového vozidla*. Brno, 2015, 65 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.

- [26] *Plascore CrushLite™: Lightweight, Constant Force Energy Absorber* [online]. [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: <https://www.plascore.com/honeycomb/energy-absorbers/crushlite/>
- [27] *ULM Formula Student Impact Attenuator Testing* [online]. 2013 [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=IHSuynf_gXY
- [28] ZÁRUBA, Petr, Bc. *Návrh a analýza deformačního prvku sendvičové konstrukce pro vůz Formula Student*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Michal Vašíček, Ph.D.
- [29] BROWNE, Eirik Monteagle. *Optimalisert karbonfiber krasjnese for høyytelses Formula Student racerbil*. Trondheim, 2016. Diplomová práce. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for produktutvikling og materialer. Vedoucí práce Nils Petter Vedvik.
- [30] JANEČKA, Jiří. *IAD TU Brno racing v1.1*. Brno, 2022.
- [31] ABRATE, Serge. *Impact Engineering of Composite Structures*. 1. Udine: Springer Vienna, 2011. ISBN 978-3-7091-0522-1.
- [32] JACOB, George, John FELLERS, Srdan SIMUNOVIC a J. STARBUCK. Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness. *Journal of Composite Materials*. 2002, **36**(7), 813-850. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:10.1177/0021998302036007164
- [33] LYKAKOS, Stavros, Protesilaos KOSTAZOS, Odysseas-Vasilios VENETSANOS a Dimitrios MANOLAKOS. Crashworthiness Performance of Aluminium, GFRP and Hybrid Aluminium/GFRP Circular Tubes under Quasi-Static and Dynamic Axial Loading Conditions: A Comparative Experimental Study. *Dynamics*. 2021, **1**(1), 22-48. ISSN 2673-8716. Dostupné z: doi:10.3390/dynamics1010004
- [34] JIMÉNEZ, M.A, A MIRAVETE, E LARRODÉ a D REVUELTA. Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles. *Composite Structures*. 2000, **48**(1-3), 107-111. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/S0263-8223(99)00081-1
- [35] *Technical Data Sheet: T300 standard modulus carbon fiber*. 6. 2018. Dostupné také z: <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T300-Technical-Data-Sheet-1.pdf>
- [36] *Technical Data Sheet: PN2 Aerospace Grade Meta-Aramid Fiber Honeycomb*. 2021. Dostupné také z: https://www.plascore.com/download/datasheets/honeycomb_data_sheets/PLA_PN2_4-6-2021.pdf
- [37] *SVS FEM: Ansys LS-DYNA* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/ansys-ls-dyna>

- [38] ŘÍDKÝ, Radek. SVS FEM S.R.O. *Simulace pádové zkoušky - dotaz*.
- [39] LS-DYNA Support: Time step size. In: *LS-DYNA Support* [online]. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.dynasupport.com/tutorial/ls-dyna-users-guide/time-step-size>
- [40] FELLOWS, Neil. Experimental Modeling of a Formula Student Carbon Composite Nose Cone. *Materials*. 2017, **10**(6). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma10060620
- [41] *4-Node Structural Shell: SHELL181 Element Description* [online]. In: . [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html
- [42] JANEČKA, Jiří. *IAD TU Brno racing*. Brno, 2023.
- [43] *PRODUCT DATA SHEET SikaBiresin® GC119 (Biresin® S19)*. První. 2020.
- [44] *Technický list: Vysokoteplotní systém LG 112 Tužidla HG 100, HG 120*. 2004.
- [45] *Easy composites: OV301 Precision Composites Curing Oven* [online]. [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/ov301-precision-curing-oven>
- [46] *Technical Data Sheet: LOCTITE® FREKOTE 700-NC™* [online]. Dostupné také z: <https://www.techsil.co.uk/media/pdf/TDS/HERA50003-tds.pdf>
- [47] *Butterworth Filters* [online]. In: . [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://tttapa.github.io/Pages/Mathematics/Systems-and-Control-Theory/Analog-Filters/Butterworth-Filters.html>
- [48] DOSTÁL, Tomáš a Vladimír AXMAN. *Elektrické filtry*. Vyd. 2. [i.e. Vyd. 3.]. Brno: Ústav radioelektroniky FEI VUT Brno, 1999. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-5634-5.
- [49] KOTAL, Miroslav a Tomáš PETROK. *Protokol Formule - 2023*. Praha, 2023.
- [50] *Studentská formule z VUT se poprvé objeví na závodech bez pilota* [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/vut/aktuality-f19528/studentska-formule-z-vut-se-poprve-objevi-na-zavodech-bez-pilota-d241077>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[m/s ²]	Zrychlení
ACP	[-]	Ansys Composite PrepPost
AIP	[-]	„ <i>Anti-intrusion plate</i> “ – nepropustná přepážka
CAD	[-]	„ <i>Computer aided design</i> “ – počítačová podpora konstrukce
DTM	[-]	„ <i>Deutsche Tourenwagen Masters</i> “ – Německé mistrovství cestovních vozů
Es	[J/g]	Měrná absorpce energie
F	[N]	Síla
\bar{F}	[N]	Střední hodnota síly
FIA	[-]	„ <i>Federation Internationale de l'Automobile</i> “ – Mezinárodní automobilová federace
FSAE	[-]	„ <i>Formula Society of Automotive Engineers</i> “ – Formula Student
g	[9,81 m/s ²]	Násobek tíhového zrychlení
HANS	[-]	„ <i>Head and neck support</i> “ – Podpora hlavy a krku
IA	[-]	„ <i>Impact attenuator</i> “ – absorbér nárazu
L	[mm]	Délka
m	kg	Hmotnost
MKP	[-]	Metoda konečných prvků
m _{závaží}	[kg]	Hmotnost závaží
n _{lepených_spojů}	[-]	Počet lepených spojů
n _{vrstev}	[-]	Počet vrstev
O _{absorbér}	[m]	Obvod absorbéru
O _{vzorek}	[m]	Obvod testovaného vzorku
PMI	[-]	Polymetakrylimid
PVC	[-]	Polyvinylchlorid
R _{m_kompozit}	[MPa]	Mez pevnosti v tahu kompozitu
S	[mm]	Oblast
S _a	[mm]	Hranice oblasti
S _b	[mm]	Hranice oblasti
SEA	[J/g]	Specifická (měrná) absorpce energie
t	[mm]	Tloušťka vrstvy
V	[m ³]	Objem
v	[m/s]	Rychlost

VUT	[-]	Vysoké učení technické
W	[J]	Práce
ρ	[kg/m ³]	Hustota
$\tau_{\max\text{epoxy}}$	[MPa]	Smyková pevnost epoxidu