

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**VÝVOJ KOMPOZITNÍ PROTIPRŮRAZOVÉ PŘEPÁŽKY  
A MODIFIKACE DEFORMAČNÍHO ČLENU  
VOZU FORMULA STUDENT**

DEVELOPMENT OF THE COMPOSITE ANTI-INTRUSION PLATE AND IMPACT  
ATTENUATOR MODIFICATIONS FOR FORMULA STUDENT VEHICLE

**Diplomová práce**

**Autor:** Bc. David Lukeš

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Vašíček, Ph.D.

**Studijní obor:** Dopravní, letadlová a transportní technika

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lukeš** Jméno: **David** Osobní číslo: **409534**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vývoj kompozitní protiprůrazové přepážky a modifikace deformačního členu vozu Formula Student**

Název diplomové práce anglicky:

**Development of the Composite Anti-Intrusion Plate and Impact Attenuator Modifications for Formula Student Vehicle**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte analýzu pravidel FSG pro danou konstrukci.
- 2) Navrhněte způsob návrhu konstrukce pomocí simulačních nástrojů.
- 3) Vytvořte návrh konstrukce, analyzujte ji a navrhněte způsob výroby a integrace.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Michal Vašíček, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**


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

Datum zadání diplomové práce: **19.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Michal Vašíček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24. 4. 2018  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## **Prohlášení o autorství:**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl v ni veškeré použité zdroje informací a obrázků v seznamu použité literatury.

V Praze dne 10.7.2018

.....

podpis

## **Poděkování:**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce Ing. Michalu Vašíčkovi, Ph.D. za užitečné rady především v oblasti MKP výpočtů. Dále chci poděkovat Ing. Karlu Doubravovi, Ph.D. za pomoc při realizaci tahových zkoušek. Velké dík také patří kolegům z týmu CTU CarTech, jmenovitě pak Bc. Filipu Tomaschovi a Bc. Lukášovi Pacoňovi za užitečné rady při návrhu a při samotné výrobě deformačního prvku s protiprůrazovou přepážkou. V neposlední řadě děkuji také firmě MECAS ESI s.r.o., která mi poskytovala neomezenou licenci pro program PAM-CRASH. Dále děkuji firmě KTG s.r.o, která zprostředkovala skutečnou nárazovou zkoušku s jejím kompletním měřením.

## **ANOTACE**

První část této práce stručně informuje o soutěži Formula student a týmu CTU CarTech. Práce se dále zabývá rešerší pasivní bezpečnosti jak u konvenčních automobilů, tak i u vozů nejpokrokovějších, jimiž jsou Formule 1. Dalším bodem je shrnutí vlastností kompozitních materiálů s vysvětlením rozdílu mezi výztuží a maticí. Podrobněji je probrána výztuž v podobě aramidových vláken.

Druhá část práce se zabývá již samostatným návrhem protiprůrazové přepážky. Ta je podrobena nejprve zatížením kvazistatickými zkouškami, kde je podrobněji popisován tříbodový ohyb. Následuje návrh nárazovým testem, kde se zprvu objasňují okrajové podmínky a poté přístup k samotným simulacím v programu PAM-Crash. Dále se práce zaměřuje na validaci materiálových vlastností aramidového kompozitu, který je následně použit v simulačních modelech.

Další část práce se věnuje technologii zpracování uhlíkového kompozitu a samotné výrobě protiprůrazové přepážky s deformačním prvkem, kde je detailně popsáno, jakým způsobem byla přepážka testována.

Závěr práce se zabývá návrhem deformačního prvku s ohledem na výhodnější namáhání přepážky. Ta je poté dle podmínek dimenzována a navržena.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Formula Student, CTU CarTech, Deformační prvek, Protiprůrazová přepážka, PAM-CRASH, Náraz, Kompozit, Aramid

## **ABSTRACT**

The first part of this diploma thesis briefly informs about the Formula student and the CTU CarTech team. The thesis also deals with passive safety searches for both conventional cars and the most advanced cars such as Formula 1. Another point is a summary of properties of composite materials with an explanation of the difference between the reinforcement and the matrix. Aramid filament reinforcement is discussed in more detail.

The second part of the thesis deals with a separate design of the anti-intrusion plate. This is first subjected to a quasi-static test load, where the three-point bend is described in more detail. This is followed by an impact test, where the boundary conditions are first explained and then access to the PAM-Crash simulations themselves. Further, the thesis focuses on the validation of material properties of the aramid composite, which is then used in simulation models.

Next part of the thesis deals with the technology of carbon composite processing and the production of a anti-intrusion plate bar with a deformation element, where it is described in detail how the plate was tested.

The conclusion of the thesis is concerned with the design of the deformation element with respect to the more advantageous stress of the partition. This is then dimensioned and designed according to the conditions.

## **KEWORDS**

Formula Student, CTU CarTech, Impact Attenuator, Anti intrusion plate, PAM-CRASH, Crash, Composite, Aramid

# OBSAH

---

ÚVOD.....	9
<b>1 SOUTĚŽ FORMULA STUDENT .....</b>	<b>10</b>
1.1 CTU CARTECH .....	11
1.2 PRAVIDLA .....	11
1.2.1 ROZDĚLENÍ PRAVIDEL .....	12
1.2.2 OBECNÝ NÁVRH ŠASI .....	14
<b>2 PASIVNÍ BEZPEČNOST VOZIDEL.....</b>	<b>16</b>
2.1 OSOBNÍ AUTOMOBILY .....	16
2.2 BEZPEČNOST MONOPOSTŮ F1 .....	18
2.3 KONKURENČNÍ TÝMY FORMULA STUDENT .....	19
<b>3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>20</b>
3.1 VLÁKNOVÉ VÝZTUŽE .....	21
3.2 MATRICE.....	24
3.3 ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITŮ VAKUOVACÍM ZPŮSOBEM .....	25
<b>4 NÁVRH PROTIPRŮRAZOVÉ PŘEPÁŽKY .....</b>	<b>26</b>
4.1 KONVENČNÍ PŘEPÁŽKY .....	26
4.2 PŘEPÁŽKY Z ALTERNATIVNÍHO MATERIÁLU .....	27
4.3 NÁVRH PŘEPÁŽKY KVAZISTATICKÝMI ZKOUŠKAMI.....	28
4.3.1 TŘÍBODOVÝ OHYB.....	28
4.3.2 OBVODOVÝ STŘIH.....	31
4.3.3 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ.....	31
4.4 NÁVRH PŘEPÁŽKY NÁRAZOVÝM TESTEM .....	32
4.4.1 DEFORMAČNÍ PRVEK .....	33
4.4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	33
4.4.3 SOFTWARE.....	34
4.4.4 POPIS MODELU .....	36
4.4.5 NÁVRH SAMOTNÉ PŘEPÁŽKY.....	40
4.5 PŘEPÁŽKA SE ZAHRNUTÍM ARAMIDOVÝCH VLÁKEN .....	45
4.5.1 VALIDACE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ ARAMIDU .....	45
4.5.2 SIMULACE S VRSTVAMI ARAMIDOVÉHO KOMPOZITU .....	52

<b>5</b>	<b>REALIZACE PROTIPRŮRAZOVÉ PŘEPÁŽKY .....</b>	<b>55</b>
5.1	VÝROBA .....	55
5.2	NÁRAZOVÁ ZKOUŠKA .....	59
<b>6</b>	<b>NÁVRH DEFORMAČNÍHO PRVKU .....</b>	<b>63</b>
6.1	OKRAJOVÉ PODMÍNKY .....	63
6.1.1	<i>NÁVRH ABSORPČNÍCH KUŽELŮ.....</i>	<i>63</i>
6.1.2	<i>POLOHA ŠROUBŮ.....</i>	<i>65</i>
6.1.3	<i>PROTIPRŮRAZOVÁ PŘEPÁŽKA .....</i>	<i>66</i>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>.....</b>	<b>69</b>



# SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

---

Veličina	Jednotka	Název
m	[kg]	Hmotnost
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
S	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
t	[m]	Tloušťka
n	[-]	Množství
Mt	[Nm <sup>2</sup> ]	Ohybová tuhost
E	[Pa]	Modul pružnosti v tahu
J	[m <sup>4</sup> ]	Kvadratický moment průřezu
b	[m]	Šířka
F	[N]	Zátěžná síla
R	[N]	Reakční síla
M <sub>o</sub>	[Nm]	Ohybový moment
x	[m]	Rameno ohybu
W <sub>o</sub>	[m <sup>3</sup> ]	Polární moment průřezu
R <sub>m</sub>	[Pa]	Mez pevnosti
z	[m]	Vzdálenost osy
e	[m]	Vzdálenost krajního vlákna
d	[m]	Průměr průbojníku
$\sigma$	[Pa]	Napětí
$\varepsilon$	[-]	Poměrné prodloužení
G	[Pa]	Modul pružnosti ve smyku
d <sub>12</sub>	[-]	Smykové poškození
Y <sub>12</sub>	[GPa <sup>0,5</sup> ]	Akumulovaná deformační energie
h	[m]	Výška impaktoru
E <sub>k</sub>	[J]	Kinetická energie
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Gravitační zrychlení
E <sub>p</sub>	[J]	Potenciální energie
v	[m/s]	Rychlost
l	[m]	Délka kužele
a	[m/s <sup>2</sup> ]	zpomalení

# ÚVOD

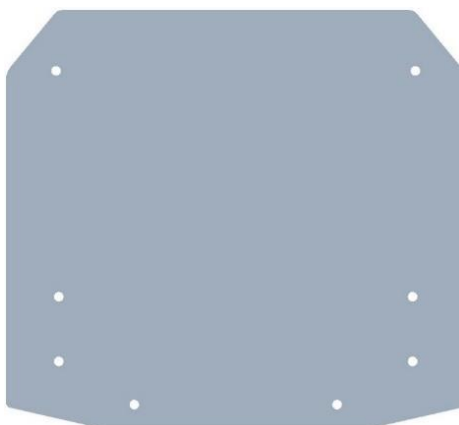
---

Od dob vzniku automobilů, mělo lidstvo potřebu soutěžit a předhánět se v pokrokových řešení svých vozů, pro dosažení co nejlepších výsledků. Postupem času, vznikaly rychlejší, výkonnější a lehčí vozy, které našly uplatnění v různých disciplínách a odvětví motorsportu. V roce 2009 byl zapojen do takových soutěží i tým CTU CarTech. Podmínkou pro účast na mezinárodních soutěžích Formula Student/SAE byla poté nutnost, každým rokem vyrobit nový prototyp. Na cestě je tedy již desátý vůz v řadě, s názvem FS.10, jehož inovacemi se tato práce zabývá.

V soutěži Formula Student se nehodnotí jen dynamické vlastnosti vozu, tedy dovednost přímo na dráze. Najdeme zde ale i hodnocení statických vlastností, které mimo jiné zohledňují inženýrský přínos v podobě vyspělosti řešení použitých dílů.

Jako každá soutěž, má i tato svá pravidla a to především omezující a bezpečnostní. Mezi ně patří i povinnost používat tzv. protiprůrazovou přepážku, oddělující přední deformační část vozu od nosného rámu. Tato přepážka v současnosti tvoří téměř 1 % z celkové hmotnosti vozu, která činí přibližně 190 kg. Materiál použitý pro tento díl je slitina hliníku a v podobě desky o tloušťce 4 mm, váží 1800 gramů.

V posledních letech tvoří kompozitní materiály čím dál větší část této formule, proto v tomto trendu budeme pokračovat a pokusíme se přepážku navrhnout z podobných materiálů. Potenciálem je tedy úspora hmotnosti, ale i zvýšení inženýrské hodnoty samotného vozu. Pozitivní výsledky umožní použít nové řešení na voze FS.10.



Obr. 1 – Současná přepážka ze slitiny hliníku

# 1 SOUTĚŽ FORMULA STUDENT

Soutěž Formula Student byla objevena na začátku 80-tých let v USA, na evropský kontinent se ale dostala až o necelých 20 let později. V současnosti se závodů účastní více než 500 univerzitních týmů z celého světa. Soutěž je určena pro studenty vysokých škol, kteří každoročně vytvářejí nový jednosedadlový vůz formulového typu. Vůz je členy týmu kompletně navržen a následně i vyroben. Většinu finančních nákladů je kryto od sponzorů, které si tým musí sám obstarat. [1]

K tomu, aby byl vůz připuštěn k jednotlivým závodům, musí splnit technickou přejímku. Během této činnosti jsou všechny systémy auta rozsáhle kontrolovány a zjišťuje se, zda jsou ve shodě s kompetentními pravidly. Pravidla jsou vytvořena především k zajištění řidičovi bezpečnosti a také fungují jako omezující opatření, které nutí tým během návrhu jejich koncepty nepřehánět. Příkladem je nutné použití restriktoru v sání u motorů spalující benzín. Tato trubka má průměr 20 mm a škrtí tak průtok vzduchu do motoru. Důsledkem je především omezení nejvyššího výkonu. Po úspěšné přejímce se soutěž následně skládá ze statických a dynamických disciplín. Každá část je obodována dle dané úspěšnosti a součet získaných bodů stanovuje výsledné pořadí mezi týmy.



Obr. 2 – Soutěž FS Německo [2]

## 1.1 CTU CARTECH

Tým CTU CarTech se skládá z přibližně 30 studentů, kteří studují především na Fakultě strojní a Fakultě elektrotechnické ČVUT. Ve školním roce 2017/2018 je vyvíjen již v řadě desátý vůz s názvem FS.10. Každý rok je přitom kladen důraz na inovace, které dopomohou k lepším výsledkům v soutěži. Společným jmenovatelem pro všechny disciplíny je výhoda v nízké hmotnosti. V současnosti jsou vozy z velké části vyrobeny z lehkých kompozitních materiálů a prostoru pro úsporu hmotnosti již tedy moc není. Oblast deformačního prvku ale zahrnuje protipřerazovou přepážku vyrobenou ze slitiny hliníku, která při hmotnosti 1800 gramů tvoří nemalou část výsledné hmotnosti. Cílem této práce bude návrh přepážky a oblasti deformačního prvku se zaměřením na úsporu hmotnosti. [1]



Obr. 3 – Vůz FS.10 [3]

## 1.2 PRAVIDLA

Pravidla jsou paušálně vydávána jednou za dva roky, kdy sebou přinášejí větší úpravy a změny znění dle nejnovějších trendů. Pro každý rok přichází mírné aktualizace znění, které ale obvykle nejsou radikální změnou.

## 1.2.1 ROZDĚLENÍ PRAVIDEL

Pravidla se člení do jednotlivých kapitol, kterými jsou administrativní ustanovení, technické ustanovení, pravidla upřesňující koncepce spalovacích či elektrických hnacích jednotek a v neposlední řadě pravidla naznačují průběh jednotlivých disciplín v samotné soutěži. V jediném dokumentu se tedy dá najít víceméně vše, co je potřebné znát k návrhu vozu až po reálnou účast na závodech.

Technická pravidla jsou rozdělena do dvanácti podskupin: [4]

### T 1 Obecné požadavky na návrh

-určuje základní proporce vozu, jeho odpružení, použité pneumatiky, parametry volantu apod.

### T 2 Obecný návrh šasi

-popisuje konstrukci nosné struktury, která obsahuje bezpečnostní prvky např. při převrácení nebo čelním nárazu

### T 3 Kokpit

-věnuje se samotné schránce řidiče, její velikosti a tvarovým proporcím, umístění sedačky nebo úchyťům bezpečnostních pásů

### T 4 Zadržné systémy řidiče

-předepisuje především možné použití bezpečnostních pásů a opěrky hlavy, jejich tvar, umístění apod.

### T 5 Brzdový systém

-určuje všechny potřebné informace ohledně brzdového systému, nevyjímaje pedálu i brzdového světla

T 6 Pohonná jednotka

-popisuje základní informace o druhu pohonné jednotky, převodovky, jejich možnosti chlazení a mazání

T 7 Aerodynamická zařízení

-věnuje se možnému použití aerodynamických prvků, jejich velikosti, tvaru ale i nutné pevnosti a stabilitě

T 8 Systémy stlačeného plynu a vysokotlaká hydraulika

-předepisuje možné použití stlačených médií pro akční členy vozidla

T 9 Spojovací prvky

-stanovuje normy pro šrouby, matice, podložky apod.

T 10 Elektrická zařízení

-věnuje se přepínačům, snímačům, baterii, jejich možnému použití a potřebného zabezpečení

T 11 Identifikace vozidla

-určuje způsob rozlišení vozidla dle jeho čísla, univerzitního jména apod.

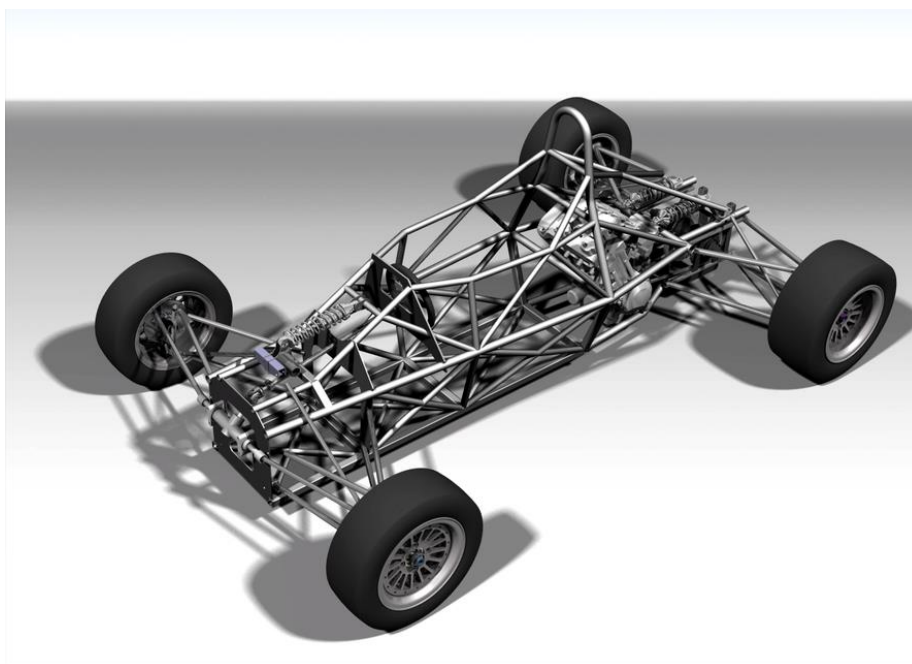
T 12 Vybavení řidiče a vozidla

-předepisuje použití držáků např. pro zvedání vozidla nebo umístění kamery, dále pak stanovuje druh helmy nebo použití hasicích přístrojů

Nás nejvíce zajímá podskupina s označením T 2, která mimo jiné zahrnuje veškeré informace pro návrh deformačního prvku a protiprůrazové přepážky.

## 1.2.2 OBECNÝ NÁVRH ŠASI

Šasi je označení pro nosnou strukturu, na které jsou umístěny veškeré systémy vozidla. Tato struktura zahrnuje dle koncepce buď trubkový rám nebo kompozitní monokok, ke kterým je mimo jiné připojen i deformační prvek. Hojně užívaným druhem šasi pro začínající týmy je prostorový ocelový rám. S nárůstem zkušeností týmů je od této koncepce většinou upouštěno s tím, že zachovaný je pouze ocelový rám v oblasti uchycení motoru a zadní nápravy. Zbylou část poté tvoří monokok z uhlíkového kompozitu. Tato koncepce je sice technologicky i finančně náročnější než běžný rám, přináší ovšem skvělé hmotnostní parametry.



Obr. 4 – Prostorový ocelový rám formulového vozu [5]

Pravidla stanovují, že deformační prvek musí být instalován před čelo monokoku tzv. *bulkhead*. Deformační prvek je tvořen sestavou samotného deformačního členu a protiprůrazové přepážky, která chrání končetiny řidiče před vniknutím těles do oblasti kokpitu. Velikost deformačního členu je omezena minimálními rozměry, kterými je 100 mm výška, 200 mm šířka a 200 mm délka od čela monokoku. Tento prvek musí být pevně připevněn k rámu nebo protiprůrazové přepážce, tzv. *Anti Intrusion Plate*. Tradiční materiál určený pravidly pro přepážku je ocel o tloušťce 1.5 mm nebo hliník o tloušťce 4.0 mm. Deska musí mít vnější rozměry stejné jako čelo monokoku za předpokladu, že je k monokoku přišroubována. Alternativní uchycení přepážky je možné přivařením, nebo i lepením. Pokud je ale přepážka k čelu monokoku šroubována, děje se tak minimálně osmi šrouby o velikosti M8 a jakosti alespoň 8.8. Minimální vzdálenost těchto šroubů je stanovena na 50 mm. [4]

Protiprůrazová přepážka může být vyrobena i z jiného materiálu, než stanovují pravidla a jsou dvě základní varianty, jak může být schválena. Dynamickou zkouškou, tedy nárazem deformačního prvku s přepážkou do tuhé bariéry nebo kvazistatickými zkouškami, třibodovým ohybem a obvodovým stříhem.

Dynamická zkouška ověřuje jak pevnost protiprůrazové přepážky, tak především funkčnost deformačního prvku. Při testu musí být deformační prvek připevněn k protiprůrazové přepážce, která je následně přišroubována ke struktuře reprezentující čelo monokoku. Sestava těchto komponentů musí být hmotnostně navýšena na celkových 300 kg. Při počáteční rychlosti 7 m/s poté narazí do nedeformovatelné zdi. Deformační prvek přitom musí být schopen pohltit vzniklých 7350 Joulů a zároveň nepřesáhnout průměrné zpomalení 20 g a špičkové zpomalení 40 g. Deformace přepážky po nárazu nesmí žádnou oblastí přesahovat 25,4 mm od původní pozice. Vozidla používající aerodynamické přitlačné křídlo na přední části, které je připevněno k oblasti deformačního prvku, musí být taktéž zahrnuty v nárazovém testu. [4]

Pokud tým používá deformační prvek implementovaný přímo do struktury nosu připevněného k monokoku, je nutné provést ještě přídavnou zkoušku. Ta má ověřit pevnost protiprůrazové přepážky pod zatížením 120 kN (300 kg zpomalováno 40 g) aplikovaného přes minimální rozměry deformačního členu. Podpora má při této zkoušce stejné rozměry jako čelo monokoku. [4]

Kvazistatické zkoušky jsou složeny z třibodového ohybu a obvodového stříhu. Ohyb má ověřit, že zkušební deska o stejném průřezu jako budoucí přepážka vydrží statické zatížení 120 kN. Vzdálenost podpor je přitom 400 mm a síla je roznášena do zkušební desky pomocí čtvercového tuhého tělesa o rozměrech 150 x 150 mm. Obvodovým stříhem je podrobena deska se stejným průřezem, jako budoucí přepážka. Střed desky je v testu protlačován pomocí tyče o průměru 25 mm, skrze díru o průměru 32 mm. Zkušební deska přitom musí vytvořit reakční sílu alespoň 20 kN. [4]

Veškeré parametry deformačního prvku a protiprůrazové přepážky, musí být zahrnuty ve formuláři tzv. *Impact Attenuator Data (IAD)*, který je následně zaslán ke schválení organizátorům daného závodu.



## 2 PASIVNÍ BEZPEČNOST VOZIDEL

---

Protiprůrazové přepážky všeho druhu se používají jak v různých odvětví motorsportu, tak i v běžných automobilech. Funkce přepážek je především bezpečnostní. Jak už z názvu vyplívá, zabraňuje vniknutí těles do pracovní oblasti řidiče, popřípadě spolucestujících. U automobilů se tento element nazývá motorová přepážka a nachází se rozhraní mezi motorovým prostorem a vnitřkem vozu.



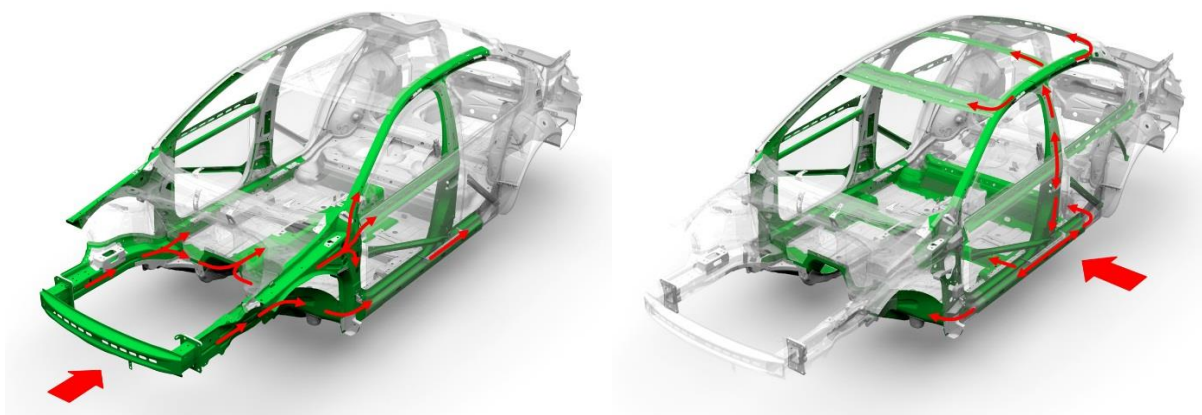
Obr. 5 – Struktura nosné karoserie [6]

### 2.1 OSOBNÍ AUTOMOBILY

Rozhodující při nárazu vozidla je způsob navržení deformačních zón karoserie, které musí být schopny postupně pojmout kinetickou energii tak, aby vzniklé přetížení nepřekročilo biomechanickou hranici lidského těla a nezpůsobilo větší poranění cestujících. Zároveň je ale potřeba navrhnout strukturu deformačních zón dostatečně tuhou, aby deformace karoserie nebyly příliš velké a nezasahovaly výrazně do prostoru cestujících. Je zřejmé, že tyto dva rozdílné požadavky nutí návrháře deformačních zón přistoupit k jistému kompromisu, aby byly vyhovující jak požadavky na velikost zpomalení, tak i požadavky na maximální deformace. [7]

Při nárazu se kinetická energie vozidla přeměňuje na deformační práci struktury karoserie. K pohlcení této počáteční nárazové energie se využívá deformačních prvků v podobě vlnovce nebo absorbérů nárazu, kde se energie maří vnitřním třením pracovní látky. Pokud jsou tyto prvky překonány, následuje řízená elasticko-plastická deformace nosných podélníků, které dále pokračují pod podlahou vozidla. Relativně tuhé díly nacházející se v přední oblasti vozu, jako je motor, převodovka nebo i přední náprava, mohou velmi nepříznivě ovlivňovat deformační zónu a nechtěně pronikat do prostoru pro cestující. Pro oddělení těchto komponent z motorového prostoru od prostoru pro cestující slouží, motorová přepážka. Tato část karoserie zaručuje, že veškeré deformující se části nebo cizí předměty budou do oblasti určeného pro cestující pronikat s co nejmenší pravděpodobností. [7]

Velmi častým následkem dopravní nehody je také boční náraz. Ten je kvůli malým deformačním zónám mezi překážkou a cestujícím mnohdy ještě více nebezpečný, než je tomu u čelního nárazu. Na cestující poté působí veliké zpomalení, překračující snadno jeho biomechanické limity. Zvyšuje se také riziko vniknutí cizích těles do prostoru posádky, které může zapříčinit přímé zranění. Konstrukteři karoserií jsou tedy nuceny navrhovat boční strukturu s dostatečným vyztužením. Silové zatížení vzniklé při bočním nárazu absorbuje především práh vozidla a B-sloupek. Síly jsou poté dále přenášeny na A-sloupek a rám střechy, který částečně zatěžuje i boční strukturu druhé strany vozidla. [7]

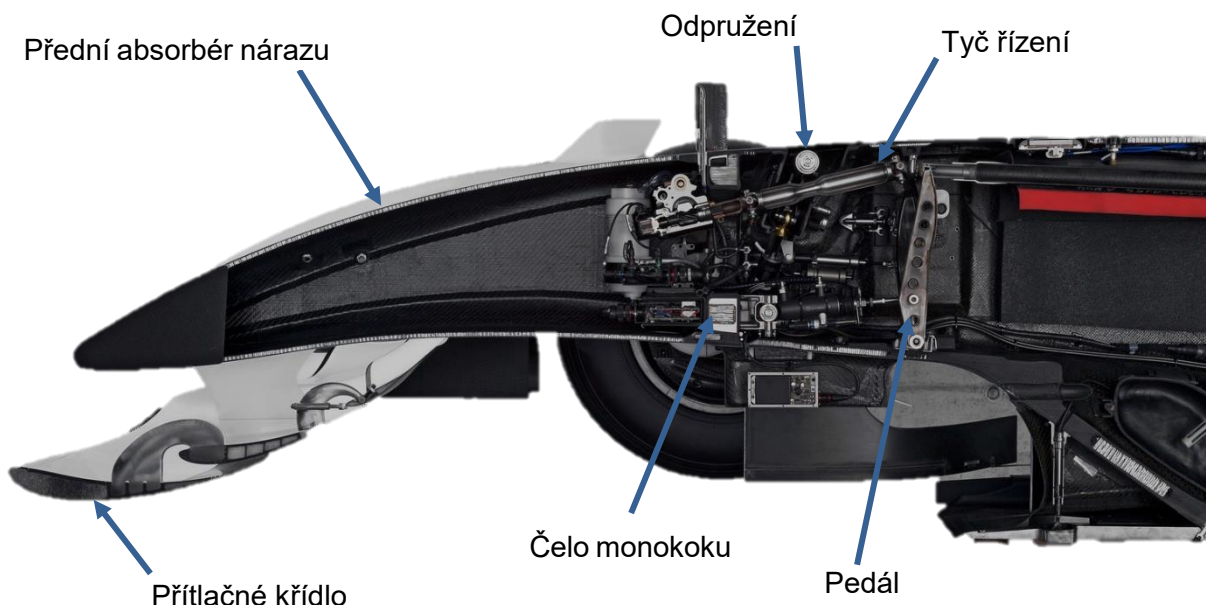


Obr. 6 – Podélné a boční zatížení karoserie [8]

## 2.2 BEZPEČNOST MONOPOSTŮ F1

Monoposty formule 1 musí plnit velmi přísná pravidla ohledně bezpečnosti, a proto podstupují několik zkoušek, kterými jsou podélné a boční nárazy různých konfigurací, silové zatížení, nebo průnikové zkoušky. Největší energii musí pohltit přední část vozu při přímém nárazu do tuhé bariéry. Je požadováno, aby kompozitní nos absorboval 76.4 KJ energie. Tato zkouška, je provedena na pohyblivých saní, které nesou část monopostu s deformačním prvem. Celková hmotnost činí 780 kg, což odpovídá váze plně zatíženého monopostu F1. Tato sestava je s počáteční rychlostí 14 m/s poslána proti tuhé bariéře. V testu se také simuluje síla od figuríny reprezentující tíhu pilota nebo např. síly od paliva v nádrži. Sleduje se mimo jiné funkce bezpečnostních pásů nebo únik obarvené kapaliny představující palivo. Struktura nosu musí absorbovat kinetickou energii a nepřesáhnout přitom průměrné zpomalení 25 g a zároveň špičku 60 g po dobu 3 ms. [9]

Na obrázku vidíme detailní pohled na rozpuštěný monopost Formule 1. Můžeme si povšimnout, že tyto vozy protiprůrazovou přepážkou vůbec nedisponují, jelikož síly generované deformačním prvem, jsou přenášeny přímo do nosné struktury vozidla. Případné intruze jsou potlačeny v oblast čela monokoku, kde se nacházejí především mechanické komponenty k řízení vozidla. Tento prostor je využit například pro umístění pedálů, částí odpružení či k mechanismu řízení předních kol.



Obr. 7 - Struktura přední části vozu F1 [20]

## 2.3 KONKURENČNÍ TÝMY FORMULA STUDENT

Pro návrh přepážky bude největším přínosem inspirace u ostatních týmů účastnících se soutěží Formula Student. Norský univerzitní tým NTNU dokázal pro svou elektrickou formuli roku 2016 úspěšně navrhnout protiprůrazovou přepážku z uhlíkového kompozitu. Její skladba byla tvořena čtrnácti vrstvami laminátu.



Obr. 8 – Protiprůrazová přepážka týmu NTNU [10]

Destrukci při nárazovém testu dokázala přepážka odolat především kvůli šikově navrženému deformačnímu prvku. Ten je totiž implementován přímo do struktury nosu a veškerá nárazová síla je tak přenášena do monokoku vozu. Hmotnost samotné přepážky o tloušťce 4 mm byla 780 gramů a po započítání tíhy nosu pak celkových 1660 gramů. [10]



Obr. 9 – Deformační prvek týmu NTNU [10]

Zdaleka nejčastěji používaným materiálem pro konstrukci protiprůrazové přepážky jsou ale stále hliníkové slitiny. Materiál je to snadno dostupný a jeho úprava pro přepážku spočívá v pouhém půdorysném ořezu na požadovaný geometrický rozměr. Taková přepážka obvykle nemá problémy s nárazovými testy a proto časová i finanční náročnost hledání jiného řešení obvykle není u týmů podstupována.

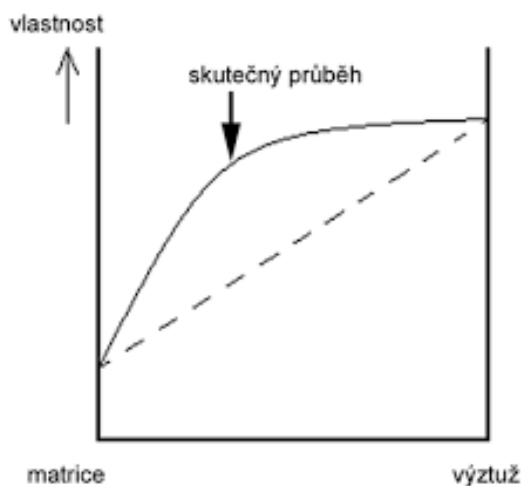
### 3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

---

Kompozit je název pro heterogenní materiály, které se skládají ze dvou nebo více fází. Ty se obvykle velmi liší svými mechanickými, fyzikálními ale i chemickými vlastnostmi. Fáze, která plní v kompozitu funkci propojovací, se nazývá matrice. Naopak fáze, která je v kompozitu strukturou nespojitou, nazýváme výztuž. Výztuž má obvykle mnohem lepší mechanické vlastnosti než matrice a funguje tak jako nosný prvek. Naopak matrice slouží jako propojovací prvek výztuže a vytváří kompozit spojitý. [11]

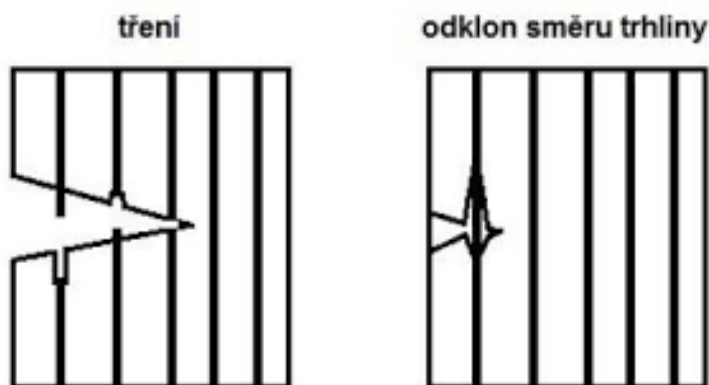
Výroba umělých kompozitních materiálů je charakterizována míšením nebo spojováním jeho jednotlivých fází. Naopak slitiny, se kterými se ve strojírenství hojně setkáváme, vznikají fázovými přeměnami za vysokých teplot. Tím se slitiny, které jsou také heterogenní, liší od kompozitních materiálů. [11]

U kompozitních materiálů se setkáváme s tzv. synergií, která je definována tím, že spojením dvou různých materiálů nedojde k prostému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. Dojde ale k vytvoření nového materiálu, který má výsledné vlastnosti lepší. [11]



Obr. 10 – Synergický průběh kompozitních materiálů [11]

Při nadměrném zatížení dokáže kompozitní materiál odolávat celkovému porušení mnohem déle, než by tomu bylo u jeho jednotlivých složek. Tento děj je způsoben pozastavením růstu trhliny na rozhraní matrice a výztuže. Navíc energie je částečně mařena třením mezi vytahujícími se vlákny a matricí. Kvalita spojení matrice a výztuže je tedy důležitým parametrem kompozitních materiálů. [11]

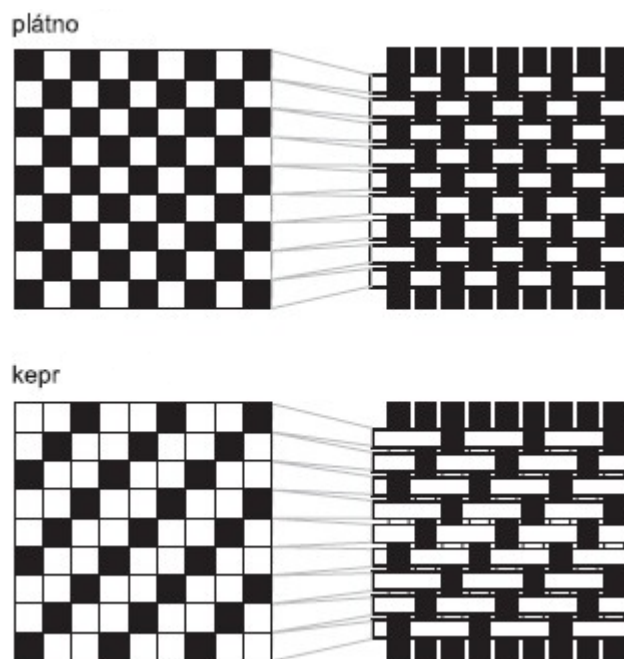


Obr. 11 – Poruchy kompozitních materiálů [11]

### 3.1 VLÁKNOVÉ VÝZTUŽE

Hlavní předností této výztuže je výrazně vyšší pevnost v tahu osy vlákna, než v jeho jiných směrech. Tyto rozdílné vlastnosti v různých směrech se nazývají anizotropie. Kompozit, který je takto vyztužený, má poté výrazně vyšší pevnost než u konvenčních materiálů. To je zapříčiněno především použitím velmi tenkých vláken o průměru jednotek mikrometru, u kterých je výrazně nižší výskyt mikrotrhlin a dutin zapříčiňující defekt výztuže. Vlákna se používají jako výztuž hlavně pro zvýšení pevnosti a tuhosti. [11]

Vláknová výztuž může mít formu od krátkých (sekaných) až po dlouhá kontinuální vlákna. Ta jsou poté kompletována v provedení netkaném nebo tkaném, kde se samotná tkanina vyznačuje různým druhem vazeb. Tou nejrozšířenější je však vazba plátňová nebo keprová. Keprová tkanina je charakterizována na pohled soustavou šikmých souběžných řádků. To je způsobeno tkaním podélného vlákna přes dvě vlákna příčná. Z tohoto důvodu je tkanina lépe přizpůsobivá při výrobě složitějších tvarů. Tato vazba vyniká také lepšími pevnostními vlastnostmi, jelikož samotná vlákna jsou vzájemně dvakrát méně ohýbána oproti běžné plátňové tkanině. [12]



Obr. 12 – Plátňová a keprová vazba [12]

Výroba uhlíkových vláken je charakterizována tepelným rozkladem organických vláken v inertní atmosféře (dusík, argon) při teplotě dosahující až 2000 °C. Organické vlákno vstupuje do tzv. reaktoru, ve kterém se nachází atmosféra z inertních plynů. Výstupem z reaktoru je poté samotné uhlíkové vlákno. Vstupní surovina pro výrobu uhlíkových vláken jsou využívána akrylová vlákna. [11]

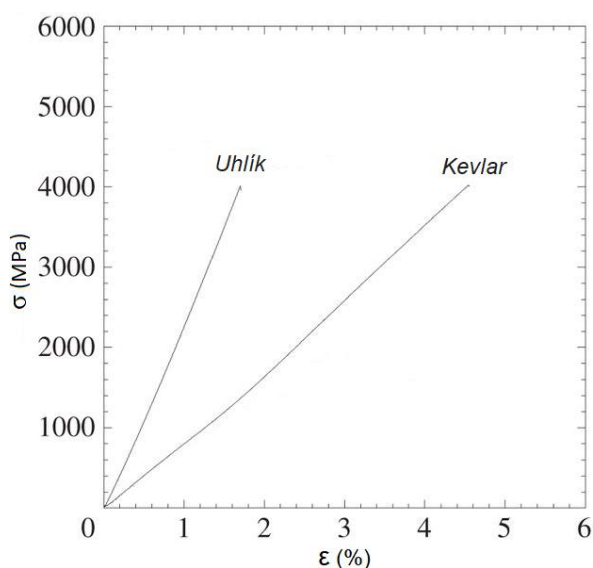
## Aramidová vlákna

Název aramid vznikl zkrácením názvu aromatický polyamid. Dělí se na meta-aramidy a para-aramidy, které nás zajímají více. Tento druh výztuže, známý také jako Kevlar, byl vyvinut firmou DuPont v roce 1965. Tento druh vlákna vyniká svou vysokou pevností v tahu dosahujícího napětí 4,1 GPa zároveň se zachováním nízké hustoty, která činí 1440 kg/m<sup>3</sup>. Nevýhodou aramidových vláken je nasákavost vody z vlhkého prostředí a citlivost na UV záření. Nejběžnější užívaná vlákna jsou typu K29 a K49. Své využití najde při výrobě ohnivzdorných oděvů, výztuží pneumatik, používá se při výrobě vysokopevnostních lan nebo slouží jako výztuž do kompozitů. [13]



Obr. 13 – Kevlarová výztuž v keprové vazbě [12]

Předností aramidových vláken je relativně malá hodnota modulu pružnosti ve smyku i tahu, který spolu s poměrným prodloužením dokáže i při malých napětích absorbovat mnoho energie. Toho se využívá především v konstrukci neprůstřelných vest, nebo jiných konstrukcí, kde je potřeba mařit rázovou energii.

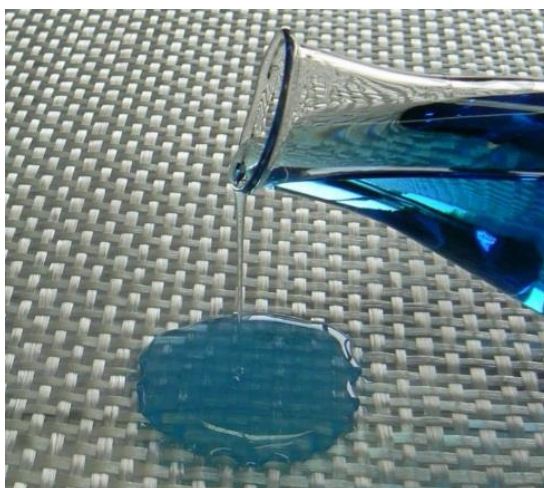


Obr. 14 – Elastické vlastnosti vláken [14]



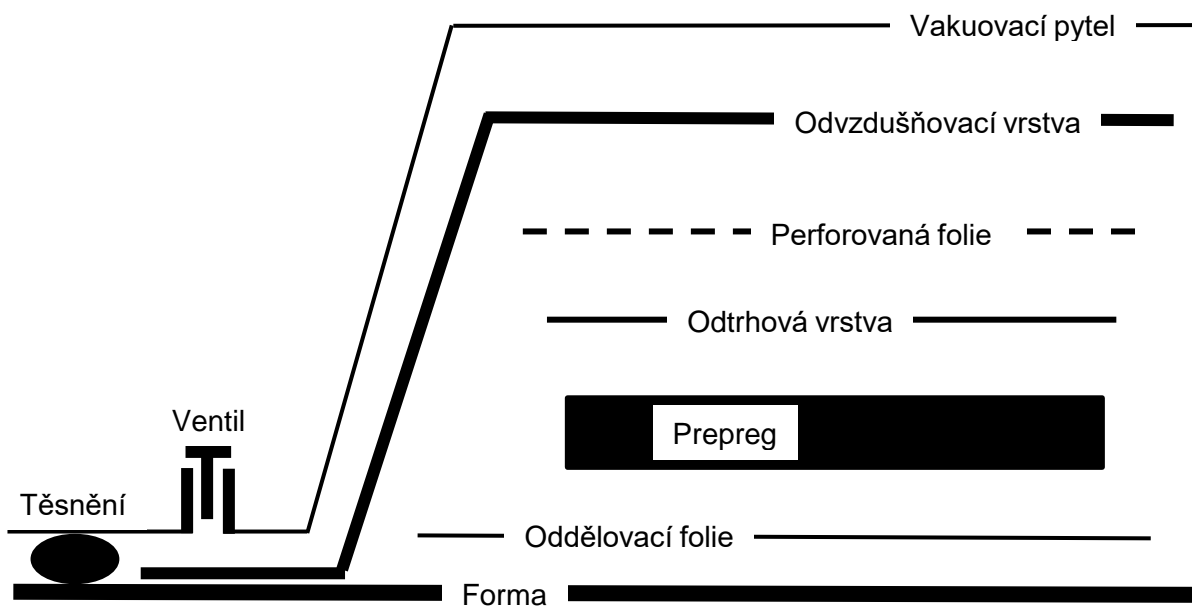
## 3.2 MATRICE

Matrice v kompozitech dělíme na polymerní, které jsou nejpoužívanější a vynikají svou nízkou hustotou, dále pak matrice kovové či keramické. Polymerní matrice se dále dělí nejčastěji na reaktoplastové a termoplastové. Reaktoplastové matrice jsou zdaleka nejpoužívanějším polymerem a jsou charakterizovány tím, že při pokojové teplotě se obvykle nachází v kapalném skupenství. Proto je možné vlákna jednoduše prosycovat a polymer tak bez větších potíží výztuž spojí. Pro získání potřebných vlastností je poté ale nutné nechat matici vytvrdit za vyšších teplot. Matrice z reaktoplastů jsou děleny na polyesterové, epoxidové pryskyřice apod. Existuje několik technologických způsobů, jak pryskyřicí tkaninu prosytit. Nejjednodušší metodou je kontaktní laminace, kdy se vlákna ručně prosycují maticí např. pomocí štětce. Je to levnější způsob výroby, ale není zaručen správný poměr aplikované pryskyřice a výsledné mechanické vlastnosti se mohou lišit od očekávaných. Další možnou variantou je použití od výrobce již předsycenou tkaninu ve formě polotovaru. V tomto případě se jedná o tzv. prepreg, což znamená, že výztuha je PŘED-impREGnovaná částečně polymerizovanou pryskyřicí. Takto předpřipravený kompozit má po vytvrzení mnohem lepší stálost mechanických vlastností, jelikož obsah a kvalita prosycení maticí je zaručena výrobcem. Nevýhodou je omezená trvanlivost v surovém stavu především při pokojové teplotě. Z tohoto důvodu se prepreg obvykle skladuje v chladicích zařízeních. [11] [15]



Obr. 15 - Epoxidová pryskyřice [16]

### 3.3 ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITŮ VAKUOVACÍM ZPŮSOBEM



Obr. 16 - Zpracování kompozitů vakuovacím způsobem

Při výrobě je základem většiny kompozitů forma, která vytváří budoucí tvar výrobku. Povrch formy je nutné velmi pečlivě připravit, aby k němu epoxidová pryskyřice po vytvrzení nepřilnula a dala se snadno oddělit. Velmi často se jedná o formy s jednou nebo více křivostmi a v těchto případech se používá tzv. separátor, který se nanáší v několika tenkých vrstvách na povrch formy. U forem rovinných, nebo s maximálně jednou křivostí, lze použít pouze oddělovací folii, která jde po vytvrzení jednoduše od prepregu oddělit. Dle požadovaných rozměrů je prepreg nastříhán a následně pečlivě kladen v jednotlivých vrstvách do formy. Prepreg je poté zakryt odtrhovou tkaninou, kterou lze po vytvrzení jednoduše oddělit od prepregu. Odrhová tkanina zároveň umožňuje částečně absorbovat přebytečnou pryskyřici a zbylou poté propouštět do dalších technologických tkanin. Další vrstvou je perforovaná folie, která funguje jako oddělující element, zároveň ale skrz malé díry dokáže odvádět přebývající pryskyřici do další vrstvy, kterou je odvzdušňovací tkanina. Ta má za úkol rozvést rovnoměrně podtlak po celé formě a zároveň do sebe pojmout většinu přebytečné pryskyřice odsáté z prepregu. Poslední vrstvou je vzduchotěsný pytel, který je na okrajích těsněním připevněn k rovinné formě. Následně je pomocí vývěvy a ventilu upevněném na pytli ze sestavy odsán vzduch a vytvořen tak podtlak. Ten dokáže laminát tlačit k formě tlakem až jedné atmosféry, kdy se pryskyřice dostane do každého koutu výztuže a prepreg natvaruje do požadovaného tvaru formy. Takto je sestava vložena do pece kde se několik hodin prepreg vytvrzuje. Pro dosažení ještě lepších výsledků při vytvrzování se využívá tzv. autoklávu. Jedná se o pec, která dokáže zároveň vytvářet přetlak několik atmosfér a laminát je tak ještě kvalitněji tlačěn k formě. [17]

## 4 NÁVRH PROTIPRŮRAZOVÉ PŘEPÁŽKY

---

Jak bylo již v úvodu zmíněno, plánem je vytvořit protiprůrazovou přepážku z kompozitního materiálu, kterým by se podařila zredukovat její dosavadní relativně vysoká hmotnost. Existují dvě standartní koncepce doporučené přímo pravidly. Jedná se buď o desku z ocelového plechu o tloušťce 1.5 mm nebo o desku s tloušťkou 4 mm tvořenou ze slitiny hliníku. Pokud je použita pro protiprůrazovou přepážku jedna z těchto koncepcí, je možné se, za určitých podmínek a předpokladu použití standardního deformačního prvku vyhnout jejímu dalšímu testování pro ověření pevnosti při extrémním zatížení. Tímto zatížením se stává nejčastěji nárazový test.

Tým CTU CarTech pro svou formuli používá protiprůrazovou přepážku ze slitiny hliníku s označením aw-7075. Přepážka slouží k oddělení prostoru mezi kokpitem a deformačním prvkem. Již několik let tým využívá koncepci absorpčních kuželů, jejichž funkčnost se musí ověřovat nárazovým testem. Podmínkou pro schválení je poté například nepřekročení průměrných a maximálních zpomalení. Při testu se ale sleduje i deformace protiprůrazové přepážky, která v jakékoli koncepci nesmí přesáhnout hodnotu trvalé odchylky 25,4 mm od původního stavu.

### 4.1 KONVENČNÍ PŘEPÁŽKY

Standardně používané přepážky jsou tvořeny 1,5 mm ocelovou deskou nebo 4 mm hliníkovou deskou. Pro představu si ukážeme, jakou hmotnost by tyto koncepce tvořily, při použití na voze týmu CTU CarTech. Plocha, kterou ohraničují obrysy čela monokoku, činí 0,1615 m<sup>2</sup>. Tato hodnota je jednou z větších v porovnání s konkurenčními týmy a důsledkem toho bude vždy vyšší hmotnost ať už jde o jakoukoli koncepci. Nevýhodou bude také i menší podpora přepážky v jejím středu a potenciálně tak větší ohybové namáhání od deformačního členu.

Hmotnostní bilance naznačuje, že kombinace hustot a tlouštěk obou druhů desek, povede vždy k o něco lepším hmotnostním parametrům v prospěch hliníku.

$$m_{ocel} = \rho_{ocel} \cdot S_{přep} \cdot t_{přep} = 7850 \cdot 0,1615 \cdot 0,0015 = 1,902 \text{ kg}$$

$$m_{hlinik} = \rho_{hlinik} \cdot S_{přep} \cdot t_{přep} = 2810 \cdot 0,1615 \cdot 0,004 = 1,815 \text{ kg}$$

Následujícím výpočtem si také můžeme objasnit, kolik hmotnosti tvoří spojovací prvky, které jsou součástí deformačního prvku s přepážkou. Počet podložek je dvojnásobný, jelikož jejich použití se uvažuje jak pod matku, tak i pod hlavu šroubu.

$$m_{spoj} = m_{šroub} \cdot n + m_{mat} \cdot n + m_{podl} \cdot n = 0,027 \cdot 8 + 0,006 \cdot 8 + 0,002 \cdot 16 = 0,296 \text{ kg}$$

Přepážka je při nárazu ve většině případech namáhána ohybově, můžeme si tedy ověřit ohybovou tuhost v počátečních elastických fázích obou materiálů a porovnat jejich hodnoty. Především tím, že přepážka z hliníku má větší tloušťku, při ohybu je více jak šestkrát tužší než deska z oceli.

$$Mt_{ocel} = E_{ocel} \cdot J_{ocel} = E_{ocel} \cdot \frac{b \cdot t_{ocel}^3}{12} = 210 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,426 \cdot 0,0015^3}{12} = 25,16 \text{ Nm}^2$$

$$Mt_{hlinik} = E_{hlinik} \cdot J_{hlinik} = E_{hlinik} \cdot \frac{b \cdot t_{hlinik}^3}{12} = 70 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,426 \cdot 0,004^3}{12} = 159,04 \text{ Nm}^2$$

Parametry hmotnosti i tuhosti naznačují, že dosavadně používaná hliníková přepážka byla správnou volbou. Jediná větší výhoda ocelového plechu je jeho lepší svařovatelnost a možnost tak tímto způsobem přepážku k ocelovému rámu připevnit.

## 4.2 PŘEPÁŽKY Z ALTERNATIVNÍHO MATERIÁLU

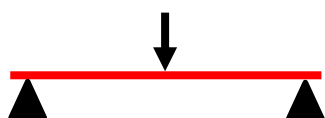
Pokud se rozhodneme pro použití kompozitní protiprůrazové přepážky, existují dva základní způsoby, jakými je možné přepážku dimenzovat a následně i validovat. Jeden z nich se skládá ze dvou kvazistatických zkoušek, přičemž zkoušený vzorek musí mít stejnou skladbu a průřez jako v budoucnu použitá přepážka. Za předpokladu, že tým použije standardní deformační prvek (který bude probrán v dalších kapitolách), další zkoušky již nejsou potřeba a celá sestava přepážky s deformačním prvkem je schválena. Tato varianta návrhu je tedy výhodná pro méně vyspělé týmy, kteří nedisponují takovým obnosem peněz a především času, ale zároveň by chtěly ušetřit nějakou hmotnost u relativně těžké protiprůrazové přepážky.

Druhá cesta, jak protiprůrazovou přepážku navrhnout, je pomocí dynamické zkoušky. U této zkoušky musí kompletní přední část vozu narazit do tuhé zdi. Testovaná část musí obsahovat protiprůrazovou přepážku, deformační prvek, obálku deformačního prvku (tzv. nos) a pokud je přední přítláčné křídlo uchyceno k deformující se části, je v testu potřeba zahrnout i tuto

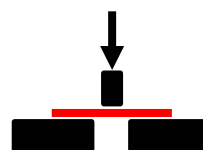
strukturu. Z hlediska protiprůrazové přepážky je její návrh schválen, pokud trvalá deformace nepřesáhne v žádném jejím směru hodnotu 25,4 mm.

### 4.3 NÁVRH PŘEPÁŽKY KVAZISTATICKÝMI ZKOUŠKAMI

Při dimenzování touto metodou je nutné splnit dvě zkoušky, kterými jsou tříbodový ohyb (obr. 17) a obvodový stříh (obr. 18). Ohyb bude jistě náročnějším kritériem, proto se v následujících odstavcích začneme zabývat právě ním.



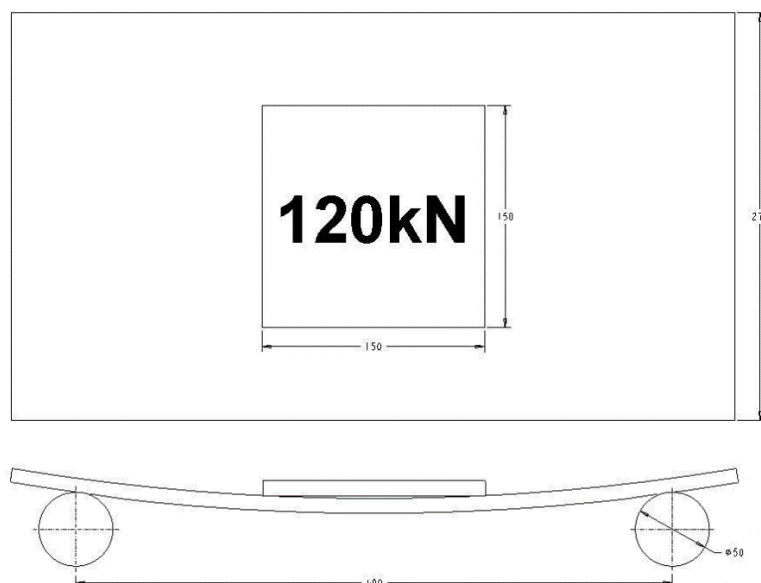
Obr. 17 - Tříbodový ohyb



Obr. 18 - Obvodový stříh

#### 4.3.1 TŘÍBODOVÝ OHYB

Pro splnění této zkoušky je nutné vytvořit zkušební desku o stejné skladbě materiálu a průřezu budoucí protiprůrazové přepážky. Zkušební deska o rozměrech 500 x 275 mm, je následně zatěžována tříbodovým ohybem, u které nesmí selhat pod statickou silou 120 kN. Síla je přitom do desky přenášena přes tuhé čtvercové těleso o půdorysných rozměrech 150 x 150 mm. Ve výsledku se tedy jedná spíše o ohyb čtyřbodový, který lépe rozvádí sílu do desky a nevytváří tak velký ohybový moment jako u klasického tříbodového ohybu. Vzdálenost podpor, je stanovena na minimální hodnotu 400 mm. Tvar podpor odpovídá válcům o průměru 50 mm a minimální délce 275 mm.



Obr. 19 – Konfigurace tříbodového ohybu

### 4.3.1.1 Přepážka z uhlíkového kompozitu

Všechny výše zmíněné parametry zkoušky naznačují, že deska bude muset být ohybově velmi odolná. Dle tradičních výpočtů se lze dobrat k maximálnímu ohybovému momentu, který působí na desku vlivem statické síly. Materiál desky budeme uvažovat z uhlíkového kompozitu, kde orientace vláken tkaniny bude shodně nastavena na  $0^\circ$  rovnoběžně s osami podpor. Ze známého maximálního napětí ve směru vláken, pod kterým kompozitní materiál z uhlíkových vláken praská lze získat minimální tloušťku desky, která bude schopna odolat zadanému zatížení 120 kN.

$$F = R = \frac{F_G}{2} = \frac{120000}{2} = 60000 \text{ N}$$

$$M_{O_{MAX}} = R \cdot x = 60000 \cdot 0,125 = 7500 \text{ Nm}$$

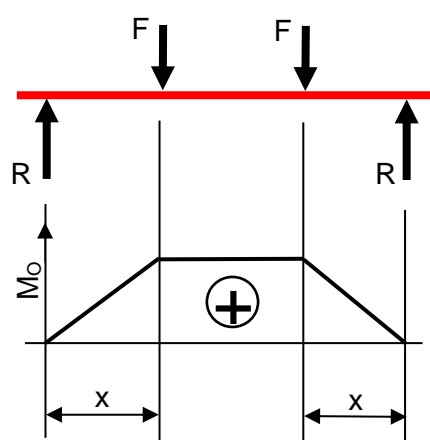
$$W_O = \frac{M_{O_{MAX}}}{R_m} = \frac{7500}{570 \cdot 10^6} = 13,158 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$t = \sqrt{\frac{6 \cdot W_O}{b}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 13,158 \cdot 10^{-6}}{0,275}} = 16,94 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$n_V = \frac{h}{t_V} = \frac{16,94 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-5}} = 67,8 \approx 68 \text{ vrstev}$$

$$h_{skut} = n_V \cdot t_V = 68 \cdot 25 \cdot 10^{-5} = 17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$m = \rho \cdot S \cdot h_{skut} = 1500 \cdot 0,1615 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 4,118 \text{ kg}$$

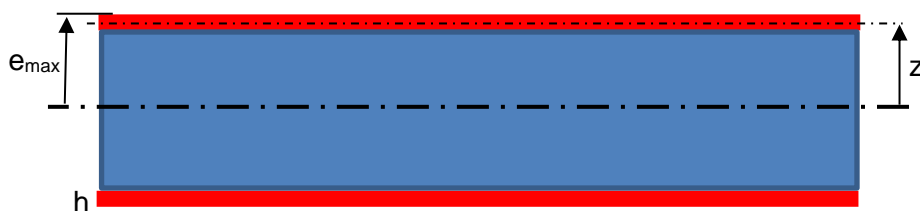


Obr. 20 – Průběh ohybového momentu

Výsledná hmotnost desky tvořená 68 vrstvami lamin by byla 4118 gramů. Je zřejmé, že dimenzování přepážky touto cestou by vedlo k navýšení hmotnosti, a to o více jak dvojnásobek oproti stávajícímu řešení ze slitiny hliníku.

### 4.3.1.2 Sendvičová kompozitní přepážka

Z předešlých výpočtů víme, že deska tvořená pouze uhlíkovým kompozitem je ohybově velmi málo odolná. Pro úsporu hmotnosti bude nejideálnějším řešením použití sendvičové přepážky, jejíž struktura se používá především pro ohybově namáhané díly. Sendvič bude tvořen potahy z uhlíkového kompozitu a jádrem z polyuretanové pěny. Pro zjištění odolnosti sendviče vystavenému ohybovému namáhání je potřeba znát polární a následně kvadratický moment setrvačnosti. Ty jsou vypočítány dle vztahu, do kterého vstupuje 10 vrstev lamin z každé strany a jádro o tloušťce 19 mm. Tento vztah předpokládá přenesení veškerého smykového napětí jádrem (bez jeho porušení) od potahů až do porušení uhlíkového kompozitu na mezi pevnosti. Směr vláken uhlíkového kompozitu je nastaven opět 0° rovnoběžně s osami podpor.



Obr. 21 -Sendvičová přepážka

$$J_y = 2 \cdot \left( \frac{b \cdot t^3}{12} + z^2 \cdot b \cdot t \right) = 2 \cdot \left( \frac{0,275 \cdot 0,0025^3}{12} + 0,01075^2 \cdot 0,275 \cdot 0,0025 \right)$$

$$J_y = 15,9615 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W_O = \frac{J_y}{e_{max}} = \frac{15,9615 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 10^{-3}} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\sigma_m = \frac{M_O}{W_O} = \frac{7500}{13,3 \cdot 10^{-6}} = 563,9 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$m = m_l + m_p = S \cdot (2 \cdot \rho_l \cdot t + \rho_p \cdot t_p) = 0,1615 \cdot (2 \cdot 1500 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} + 20 \cdot 19 \cdot 10^{-3})$$

$$m = 1,273 \text{ kg}$$

Výsledná hmotnost přepážky je 1273 gramů, což je potenciální úspora o více jak půl kilogram, oproti stávajícímu řešení ze slitiny hliníku.

### 4.3.2 OBVODOVÝ STŘIH

Test obvodovým stříhem musí být proveden na vzorku stejného průřezu, jakého bude budoucí přepážka. Půdorysné rozměry zkoušené desky jsou poté 100 x 100 mm. Desce je oporou tuhá stolice, která obsahuje středovou díru o průměru 32 mm. Struktura přepážky je z vrchu zatěžována průbojníkem o průměru 25 mm vystředěný s osou díry ve stolici. Ač se nejedná touto konfigurací o čistý stříh, limitní budeme brát menší průměr na průbojníku, okolo jehož obvodu budeme očekávat porušení laminátu. Zatížení, které dle pravidel musí pro splnění vydržet je 20 kN.

Do jednoduchého výpočtu vstupuje pouze jeden potah sendviče složený z deseti vrstev lamin, jelikož tak velkou kontaktní sílu která vznikne zatížením, nebude jádro schopné přenést do druhého potahu. Po porušení jednoho z potahů, je tak očekáváno selhání celé zkušební desky.

$$F_{střih} = \sigma_{12} \cdot S_{lam} = \sigma_{12} \cdot \pi \cdot d_{prub} \cdot t_{lam} = 175 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 0,025 \cdot 0,0025 = 34361 \text{ N}$$

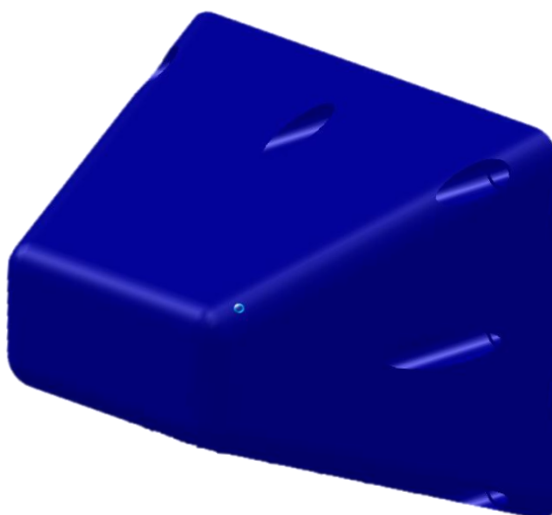
Potenciální síla, která by byla schopna být přenesena sendvičovým vzorkem v tomto testu, převyšuje s velkou rezervou požadované zatížení.

### 4.3.3 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ

Pokud bychom použili skladbu, která prošla výše uvedenými zkouškami v podobě sendvičové přepážky, výsledná hmotnost by byla 1272 gramů. Nutno ale podotknout, že takto by přepážka byla schválena pouze za předpokladu použití standartního deformačního prvku navrženého a schváleno přímo pravidly, jehož funkce se nemusí dále ověřovat.

Tento předpoklad v našem případě neplatí, jelikož jako deformační prvek se používají absorpční kužele a v této sestavě by tedy bylo nutné provést ještě nárazový test. Zmíněný deformační prvek schválený pravidly je tvořen z pěny Impaxx 700 a má hmotnost přibližně 700 gramů. Výsledná hmotnost přepážky a deformačního prvku by tedy činila 1972 gramů. Oproti stávajícímu řešení s absorpčními kuželi by to bylo hmotnostní zlepšení pouze o přibližně 100 gramů. Z tohoto důvodu se budu zabývat druhým způsobem návrhu protiprázové přepážky a to přímo přes samotný nárazový test.

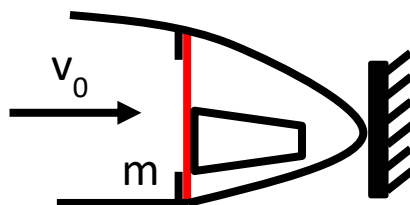




Obr. 22 – Standardní deformační prvek [18]

#### 4.4 NÁVRH PŘEPÁŽKY NÁRAZOVÝM TESTEM

Jedná se o dynamickou zkoušku, která ověří funkčnost jak deformačního prvku, tak i protiprůrazové přepážky. Deformační prvek musí absorbovat minimálně energii 7350 Joulů, což odpovídá nárazu tělesa o hmotnosti 300 kg do zdi při počáteční rychlosti 7 m/s. Těmito parametry je osazena testovaná sestava, jejíž struktura nesmí překročit maximální dovolené zpomalení 40 g a průměrné zpomalení 20 g. U přepážky se sleduje především její deformace, kde trvalá odchylka od původního stavu nesmí překročit 25,4 mm. Stěžejní pro tuto zkoušku je typ a tvar deformačního prvku, který je hlavním koncentrátorem sil působící na přepážku. Pokud je deformační prvek navrhnut nevýhodně, musí být přepážka zbytečně předimenzována.



Obr. 23 – Konfigurace nárazového testu

#### 4.4.1 DEFORMAČNÍ PRVEK

Pro návrh protiprůrazové přepážky je velmi důležitý tvar a umístění deformačního prvku. Již několik let je v týmu CTU CarTech používán deformační prvek z kompozitního materiálu. Jedná se o dva absorpční kužele vyrobené z uhlíkového kompozitu. Tato skladba je zatím nejlepším řešením, jelikož mechanismus tříštění uhlíkového kompozitu dokáže absorbovat velké množství energie při zachování relativně malé hmotnosti deformačního prvku. Používané kužele váží oba přibližně 270 gramů. Tento deformační prvek se tedy pokusíme zachovat.



Obr. 24 – Absorpční kužele

#### 4.4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Při návrhu protiprůrazové přepážky je nutné mít stanovené okrajové podmínky. Geometrické omezení je podmíněno tvarem čela monokoku takzvaného *bulkhead*. Pokud přepážka není přivařena k monokoku (což při skutečnosti, že monokok je vyroben z uhlíkového kompozitu není reálné), její rozměry musí být shodné s rozměry čela monokoku. Vnější rozměry přepážky jsou tedy pevně stanoveny. Pravidla dále říkají, že protiprůrazová přepážka musí být připevněna nejméně 8 šrouby velikosti M8 s jakostí alespoň 8.8. Hlavy šroubů se nacházejí z druhé strany čela monokoku, tedy uvnitř kokpitu. Polohy děr považujeme za již pevně stanovené z minulého roku.

Jak již bylo zmíněno, největší podíl na průběhu zatížení má deformační prvek, tedy absorpční kužele. Jejich polohu navrhne tak, aby co nejpříznivěji namáhala přepážku a zároveň respektovala okolní pevně stanovené polohy dílů. Polohu limitují vnější hrany přepážky, které jsou dány tvarem čela monokoku. Dalším omezením jsou šrouby, respektive matky přepážky, ke kterým je nutné mít přístup pro jejich utažení, případně povolení. Poslední hranicí pro polohu absorpčních kuželů je obálka nosu. Zde je omezením dotyk deformačního prvku s vnitřkem nosu formule. Omezení pro deformační prvek jsou nastíněny a je tedy možné se zabývat volbou samotné polohy absorpčních kuželů.

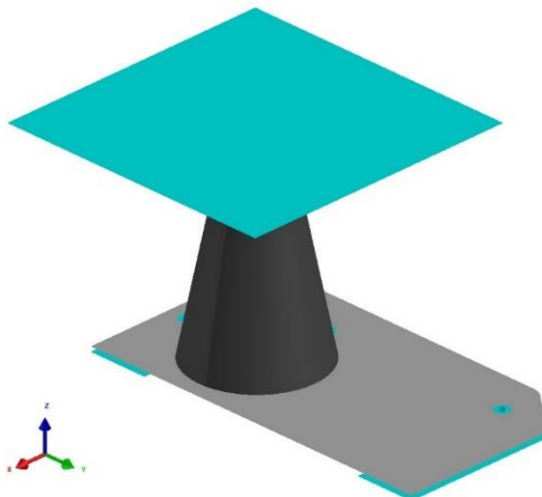
Jednoduchou úvahou lze usoudit, že nejméně příznivé zatěžování přepážky bude v blízkosti jejího středu, kde bude převládat ohybové napětí a deska se bude snadněji deformovat. Úkolem je tedy najít polohu, která se bude co nejvíce vyhýbat středu přepážky. Šroubové spoje, které mají svou pevně definovanou polohu, budou také promlouvat do výsledné pevnosti přepážky. Pro tuto skutečnost je tedy nutné volit polohu kuželů i s ohledem na rozmístěné šrouby.

#### **4.4.3 SOFTWARE**

Jelikož velikost působících sil a jimi vyvolanou deformaci na protiprůrazové přepážce při nárazu lze jen těžko predikovat dle tradičních pevnostních výpočtů, bude tato problematika řešena pomocí MKP programu PAM-CRASH od poskytovatele Virtual Performance. Tento explicitní řešič je vhodný pro výpočet nelineárních dynamických úloh a pro naše potřeby tak bude vhodným pomocníkem. K 3D návrhům bude využito CAD softwaru Creo Parametric od poskytovatele PTC. Tento program má výhodu ve velmi uživatelsky přívětivém prostředí a disponuje všemi potřebnými funkcemi pro snadné vytvoření geometrického modelu. Exportované modely ve formátu IGES mohou být poté dále zpracovávány v programu PAM-CRASH.

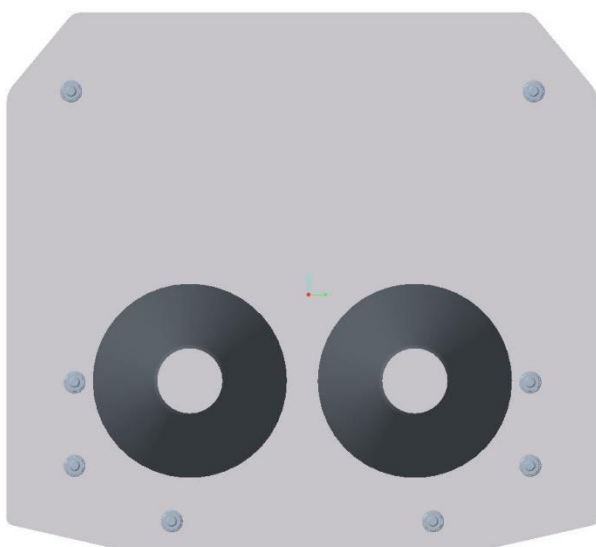
Pro zjištění nejvýhodnějšího umístění kuželů nám v modelu postačí použití současné přepážky užívané na formuli, kterou je 4 mm tlustá deska ze slitiny hliníku s označením aw-7075. Tento materiál má na hliník nadprůměrné mechanické vlastnosti, jimiž je například mez pevnosti 525 MPa. Podporou přepážky bude v simulaci použit tvar čela monokoku s absolutně tuhou strukturou. Dále je nutné nadefinovat šroubové spoje. Pro zjednodušení volím taktéž model šroubu a podložky bez možnosti porušení. Tato diskretizace by neměla mít veliký vliv na výsledek. Absorpční kužele jsou v modelu složeny ze tří vrstev, z nichž každá obsahuje reálně

dvě laminy uhlíkového kompozitu. Protože je sestava deformačního prvku symetrická podél její svislé roviny, postačí nám vytvořit poloviční model s tím, že v polovině přepážky vytvoříme okrajové podmínky symetrie. Konkrétně uzamkneme stupně volnosti posuvu v ose  $x$  a u natočení kolem osy  $y$  a  $z$ . Za pomoci těchto podmínek se přepážka bude chovat jako celistvá. Proti absorpčnímu kuželu bude vypuštěno 150 kilogramové tuhé těleso o počáteční rychlosti 7 m/s. Takováto sestava vytváří kinetickou energii, která po vynásobení dvěma (předpoklad použitého polovičního modelu) činí 7350 Joulů, což je minimální hodnota, kterou požadují pravidla.

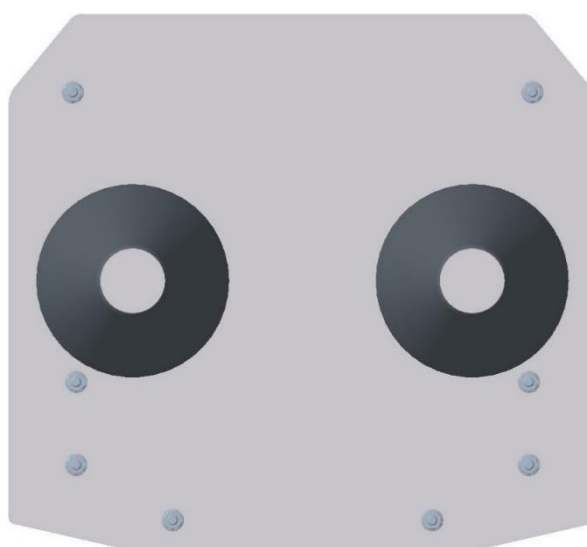


Obr. 25 – Model v PAM-CRASH

Výsledkem simulace jsou dvě uvažované polohy absorpčních kuželů, z nichž o něco méně namáhá přepážku varianta první (obr. 26). Všechny okrajové podmínky jsou tímto stanoveny a můžeme přejít na samotný návrh kompozitní přepážky.



Obr. 26 – Poloha kuželů varianta 1



Obr. 27 – Poloha kuželů varianta 2

#### 4.4.4 POPIS MODELU

Poté co máme díly geometricky připravené ve formátu IGES, můžeme s nimi dále pracovat v programu PAM-CRASH. Zde začínáme sekcí *MESH*, kde geometrický tvar vysítujeme. V programu převážně pracujeme se skořepinovými útvary, které jsou reprezentovány formou 2D elementů. Jednotlivé díly jsou po vysítování postupně vzájemně polohovány posuvy a rotacemi tak, aby výsledná sestava odpovídala reálnému tvaru deformačního prvku.



Obr. 28 - Strom kroků

Pro detailní definici vlastností sestavy pokračujeme v sekci PAM-Crash. Zde nalezneme strom všech našich kroků, které jsou postupně zaznamenávány a řazeny v následujícím pořadí. Balíček *Controls* skrývá informace o výstupních datech a informace pro post-processor. Setkáme se tu například s dobou trvání výpočtu. Další částí je skupina *Parts*, která obsahuje veškeré vysítované díly s jejich základními definicemi. Seskupení *Nodes* a *Elements* skrývá informace o jednotlivých uzlech a elementech. Veškeré materiálové vlastnosti jsou vztaženy do sekce *Materials*. V balíčku *Links* nalezneme definice propojení jednotlivých dílů mezi sebou. Tuto vlastnost využijeme především pro napodobení matrice pojící jednotlivé laminy k sobě. Část stromu s názvem *Contacts* vytváří vzájemné kontakty jednotlivých dílů, či sebe sama. Skupina *Constraints* v našem případě obsahuje díly, jejichž vzájemný pohyb uzlů je omezen. Těchto vlastností využijeme k definici absolutně tuhých těles. Následující seskupení *Loads* tvoří okrajové podmínky v podobě podpor, podmínek symetrie, či zátěžných stavů. Balíček *Output* obsahuje informaci o vybraných uzlech, jejichž výstupní data využijeme k analýze výsledků. Sledována je například jejich poloha, rychlost či zrychlení. Posledním seskupením ve stromu kroků je část s názvem *Auxiliaries*. Zde jsou uloženy různé funkce křivek, například pro definici zátěžných stavů, rychlostí nebo i plastických chování materiálů.

Následně detailněji probereme postup, jakým jsou v programu PAM-CRASH popsány mechanické vlastnosti jednotlivých dílů. Jejich definice je rozdělena do následujících tří úrovní:

1. Karta dílu – nalezneme v balíčku *Parts* u definice jednotlivých dílů.

<b>PART /</b>	<b>IDPRT</b>	<b>ATYPE</b>	<b>IDMAT</b>	<b>IDVAMAT</b>	<b>IDTHMAT</b>	<b>IDPMAT</b>
	6	SHELL	132	0	0	0
<b>NAME</b>	<b>TITLE</b>					
	layer_910					
<b>DTELIM</b>	<b>TSCALF</b>	<b>DTRATIO</b>				
<b>TCONT</b>	<b>EPSINI</b>	<b>COULFRIC</b>				
<b>H</b>	<b>NINT</b>	<b>OFFSET</b>	<b>NTDOF</b>			
0.5	5					
<b>IORT</b>	<b>BLANK</b>	<b>XDIR</b>	<b>YDIR</b>	<b>ZDIR</b>		
0			1.			

Obr. 29 – Karta dílu

Tato karta obsahuje základní informace o jednotlivých dílech sestavy. Parametr *IDPRT* určuje pořadové číslo dílu. O druhu sítě dílu nás informuje položka *ATYPE*. Odkaz na podrobnější definici materiálových vlastností je zprostředkován skrze parametr *IDMAT*. Tloušťku materiálu je možné zadat u položky *H*. Ve spodních řádcích se nastavuje směr lokálního nebo globálního vektoru. Například pro orientaci vláken ve směru y je globální vektor nastaven parametrem *IORT* na 0 se souřadnicemi 0,1,0.

2. Karta materiálu (*IMAT*) – nalezneme v sekci *Materials / Structural materials*

<b>MATER /</b>	IDMAT	MATYP	RHO	ISINT	ISHG	ISTRAT	IFROZ
<b>BLANK</b>	132	131	1.44E-6	0	3		
	AUXID1	AUXID2	AUXID3	AUXID4	AUXID5	AUXID6	QVM
	0	0	0	0	0	0	1.
	TITLE						
<b>NAME</b>	prepreg_AF						
<b>KSI</b>	Fo	NOPER	ILAY	HGM	HGW	HGQ	As
0.1	0.	2	0				
<b>IDPLY</b>	THKPL	ANGPL					
2	0.25	0.					
2	0.25	0.					
<b>BLANK</b>	NMIN	BLANK	GRUC_KW	GRUC_VAL	IFAIL	BLANK	ERATIO
	100		DMG		2		
<b>IDPLY1</b>	IDAUX1	IDPLY2	IDAUX2	IDPLY3	IDAUX3	IDPLY4	IDAUX4
<b>IDPLY9</b>	IDAUX9	IDPLY10	IDAUX10	IDPLY11	IDAUX11	IDPLY12	IDAUX12
<b>IDPLY17</b>	IDAUX17	IDPLY18	IDAUX18	IDPLY19	IDAUX19	IDPLY20	IDAUX20
<b>IDPLY25</b>	IDAUX25	IDPLY26	IDAUX26	IDPLY27	IDAUX27	IDPLY28	IDAUX28
<b>IDPLY33</b>	IDAUX33	IDPLY34	IDAUX34	IDPLY35	IDAUX35	IDPLY36	IDAUX36
<b>IDPLY41</b>	IDAUX41	IDPLY42	IDAUX42	IDPLY43	IDAUX43	IDPLY44	IDAUX44

Obr. 30 – Karta materiálu

V našem případě tato karta poskytuje základní informace o kompozitním materiálu nastavený parametrem *MATYP* na hodnotu 131. Počet vrstev v laminátu definuje položka *NOPLY*, kde pro každou laminu volíme číslo vrstvy *IDPLY*, tloušťku vrstvy *THKPL* a úhel vlákna *ANGPL*. Úhel vlákna respektuje definovaný globální vektor v kartě příslušného dílu. Parametry *IDAUX* dostupné ve spodních řadách karty, umožňují definovat speciální výstupní data (například napětí a poměrné prodloužení). Číslem vrstvy *IDPLY* určujeme, jaká lamina má být sledována. Pomocný referenční parametr *Aux 1-3* definuje vláknové poměrné prodloužení ve směru 11, 22 a 12 (smyk), parametr *Aux 6-8* slouží pro směrově odpovídající vláknová napětí.

3. Materiál vrstev (*IDPLY*) – nalezneme v sekci *Materials / Composites / Ply*

PLY /	IDPLY	ITYP	RHO	FAILINP	KSI		
	2	7	1.44E-6	1			
	TITLE						
NAME	aramid_fiber						
E01	E02						
30.2	30.2						
G012	G023	G013	NU012	KAPPA23	KAPPA13		
2.8	2.8	2.8	0.33	0.	0.		
Y12c	Y120	Y12R	D12max	Y11C	Y110	Y11R	D11max
0.0092	0.182	0.06335	0.8	0.01	0.101	0.073	0.5
ALPHA1	ALPHA2						
E0c1	E0c2	NU0c12	Y11cC	Y11c0	Y11cR	D11cmax	
30.2	30.2	0.33	0.025	0.101	0.1	0.3	
R0	BETA	m					
0.005	0.185	0.14					
ERATER11	D11	n11	LAWTYP11	ERATERc11	D11c	n11c	LAWTYP11c
0.	0.	0.	---				---
ERATER12	D12	n12	LAWTYP12				
0.	0.	0.	---				
ERATER0	DR0	nR0	LAWTYPR0				
0.	0.	0.	---				
FAILDAM	FAILTYP	NUSRALO	BLANK				
1	6						
EPSitu11	EPSitu22	EPSitu33	GAMMApu	GAMMApu	GAMMApu		
0.6	0.45	0.6	0.8	0.8	0.8		
EPSicu11	EPSicu22	EPSicu33	GAMMANu	GAMMANu	GAMMANu		
0.6	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8		

Obr. 31 – Materiál vrstev

Tato karta je podřazená kartě *IMAT* a obsahuje podrobné informace o mechanických vlastnostech laminátu. Parametr *ITYP* definuje typ vrstvy, v našem případě se jedná o tkaninu (číslo 7). Následují mechanické parametry (hustota, příslušné moduly a Poissonovo číslo), dostupné na prvních řádcích. Poté pokračujeme parametry mezního selhání, ve smyku, tahu a tlaku. Plastické chování je definováno na řádku počínaje parametrem *R0* a dále následují položky *strain-rate*, uvažující rychlost zatěžování. Ve spodní části karty nalezneme kritéria eliminace prvku.

S ohledem na posloupnost definovaných úrovní je výhodné určovat parametry v obráceném pořadí (3->2->1), kdy jako první určíme materiálové parametry vrstev a nakonec až finální díl.



## 4.4.5 NÁVRH SAMOTNÉ PŘEPÁŽKY

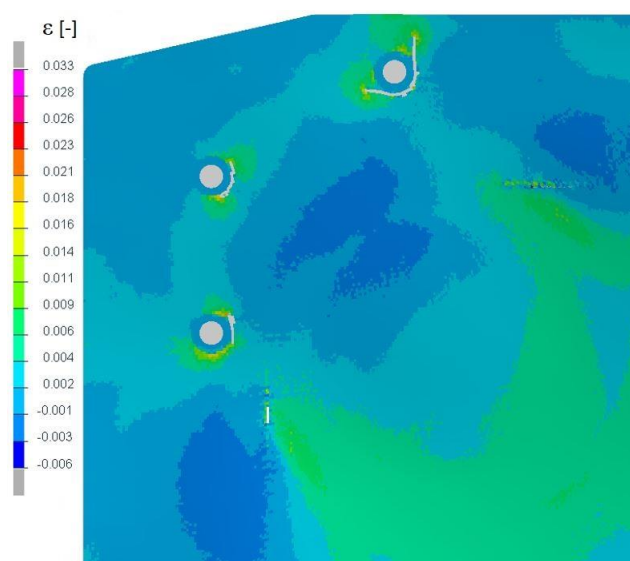
Nyní používaná přepážka je vyrobena ze slitiny hliníku s výrobním označením aw-7075. Tato deska o tloušťce 4 mm váží 1800 gramů. Tuto relativně velkou hmotnost by bylo možné zredukovat použitím jiného materiálu. Nabízí se struktura tvořená z uhlíkového kompozitu, kterou jsme použili i při návrhu přepážky kvazistatickými zkouškami. Materiálové vlastnosti jsou stejné jako u absorpčních kuželů a není tak problém tyto ověřené parametry v programu použít i pro návrh naší kompozitní protiprůrazové přepážky.

### 4.4.5.1 Přepážka z uhlíkového kompozitu

Jednoduchým výpočtem lze stanovit počet vrstev uhlíkového kompozitu, který bude odpovídat stejné hmotnosti slitiny hliníku o tloušťce 4 mm. Počet vrstev s hodnotami 29 a méně, tedy bude teoretickým zlepšením v celkové hmotnosti protiprůrazové přepážky.

$$n_{rov} = \frac{t_{al} \cdot \rho_{al}}{t_{lam} \cdot \rho_{lam}} = \frac{0,004}{25 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{2810}{1500} = 29,97$$

Pro protiprůrazovou přepážku v simulačním modelu bylo použito 24 vrstev lamin uhlíkového kompozitu. Orientace vláken zůstala u všech vrstev shodná a to 0° vůči svislé ose vozu. Bylo tak možné využito největšího potenciálu vláken, k přenesení reakčních sil od šroubů přepážky. Přesto ale simulační výsledky vykazují trhání přepážky převážně tahovým a smykovým mechanismem namáhání. Defekty nastávají především na vnitřních hranách čela monokoku a také mezi protiprůrazovou přepážkou a absorpčními kužely. Ze simulace je také patrné, že reakční síly vyvolané ve šroubovém spojení není uhlíkový kompozit schopný přenést skrze malou díru o průměru 9 mm.



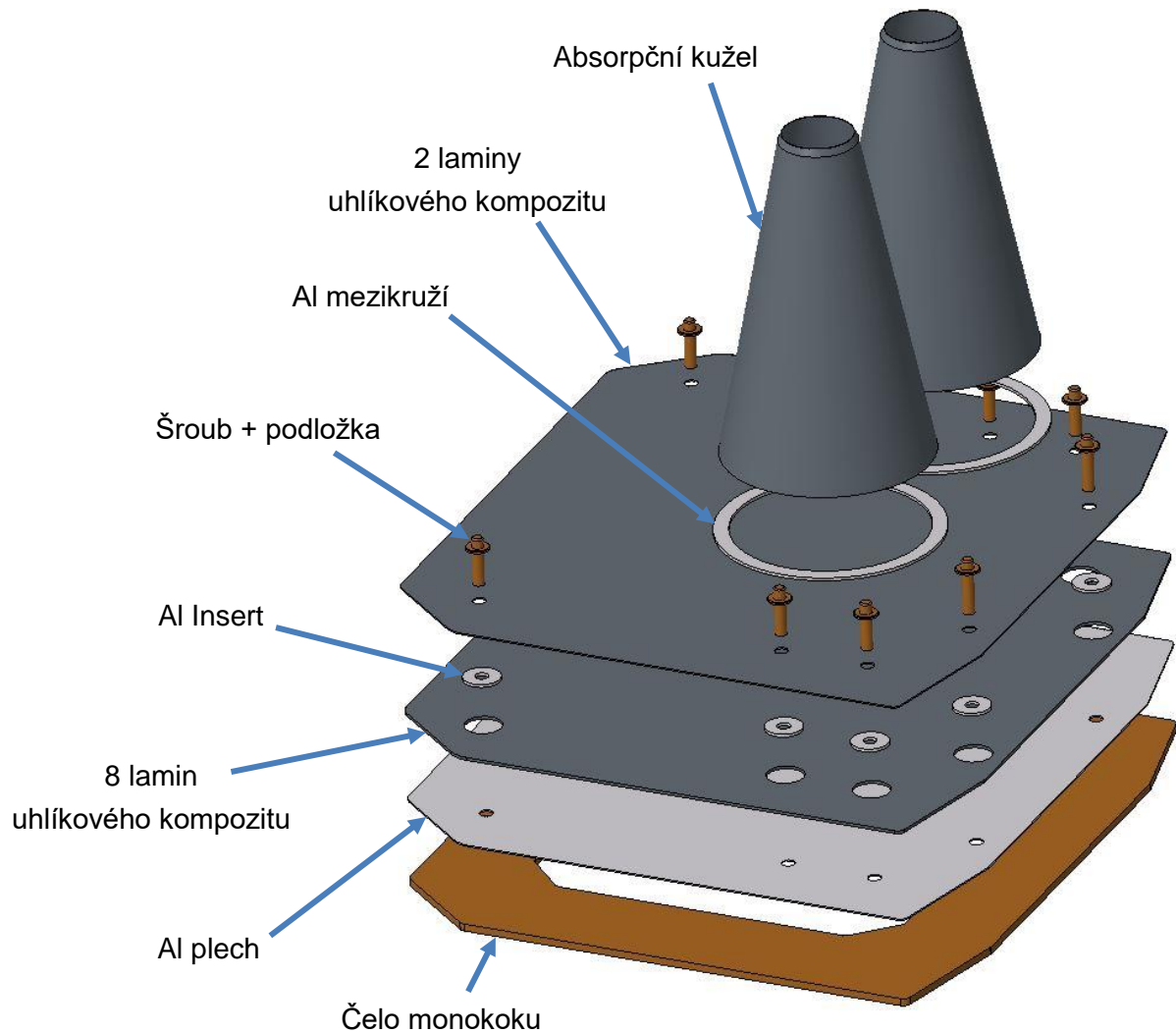
Obr. 32 – Poměrné prodloužení 24 lamin – spodní vrstva

#### 4.4.5.2 Přepážka z uhlíkového kompozitu a desky z hliníkové slitiny

Z předešlých simulací je známo, že namáhání generované absorpčními kužely není schopna přepážka tvořená pouze z uhlíkového kompozitu odolávat. Nejjednodušší cestou, jak odstranit menší odolnost kompozitu proti stříhu, je použití hliníkové vložky mezi čelo monokoku a vrstvy uhlíkového kompozitu. Využijeme tak dobrých houževnatých vlastností slitiny hliníku. Hliníkové vložky použijeme i mezi kompozitní desku a absorpční kužele ve tvaru mezikruží. Ty nám dopomohou k lepší distribuci sil koncentrující se na spodních hranách kuželů. Ač by pro nás bylo z hlediska hmotnosti výhodnější použít tyto vložky o tloušťce kolem 1 mm, plechy ze slitiny hliníku aw-7075 se vyrábí o minimální tloušťce 2 mm. Proto volíme tuto spodní mez.

K eliminaci problému s malými dírami průměru 9 mm, použijeme hliníkové inserty, které pomohou lépe přenést reakční sílu od šroubů do přepážky. Použitím insertů navíc odpadne problém s nasákavostí vlhkosti uhlíkového kompozitu v jeho syrově vrtaných dírách, jehož vlákna tímto typem znehodnocování trpí.

Skladba protipřerazové přepážky je tedy od čela monokoku následující. Spodní část je tvořena plechem ze slitiny hliníku o tloušťce 2 mm, na kterém je 8 vrstev uhlíkového kompozitu, s vyztužením z hliníkových insertů. Inserty jsou následně uzavřeny dalšími vrstvami uhlíkového kompozitu tvořeného ze dvou lamin. Všechny vrstvy lamin mají opět stejnou orientaci vláken, a to 0° ke svislé ose vozu. Skladba přepážky pokračuje i na jejím vrchu, kde jsou dvě hliníková mezikruží. Ty se zaslouží o lepší roznesení sil od absorpčních kuželů.



Obr. 33 – Skladba přepážky v simulačním modelu

Do celkové hmotnosti přepážky je započítány následující díly. Spodní deska ze slitiny hliníku, 8 vrstev uhlíkového kompozitu, 8 hliníkových insertů, 2 laminy uhlíkového kompozitu a dvě hliníková mezikruží. Celková teoretická hmotnost přepážky tedy bude 1559 gramů.

$$m_{al} = \rho_{al} \cdot S_{al} \cdot t_{al} = 2810 \cdot 0,1615 \cdot 0,002 = 0,908 \text{ kg}$$

$$m_{8CF} = \rho_{CF} \cdot S_{8CF} \cdot t_{8CF} = 1500 \cdot 0,158 \cdot 0,002 = 0,474 \text{ kg}$$

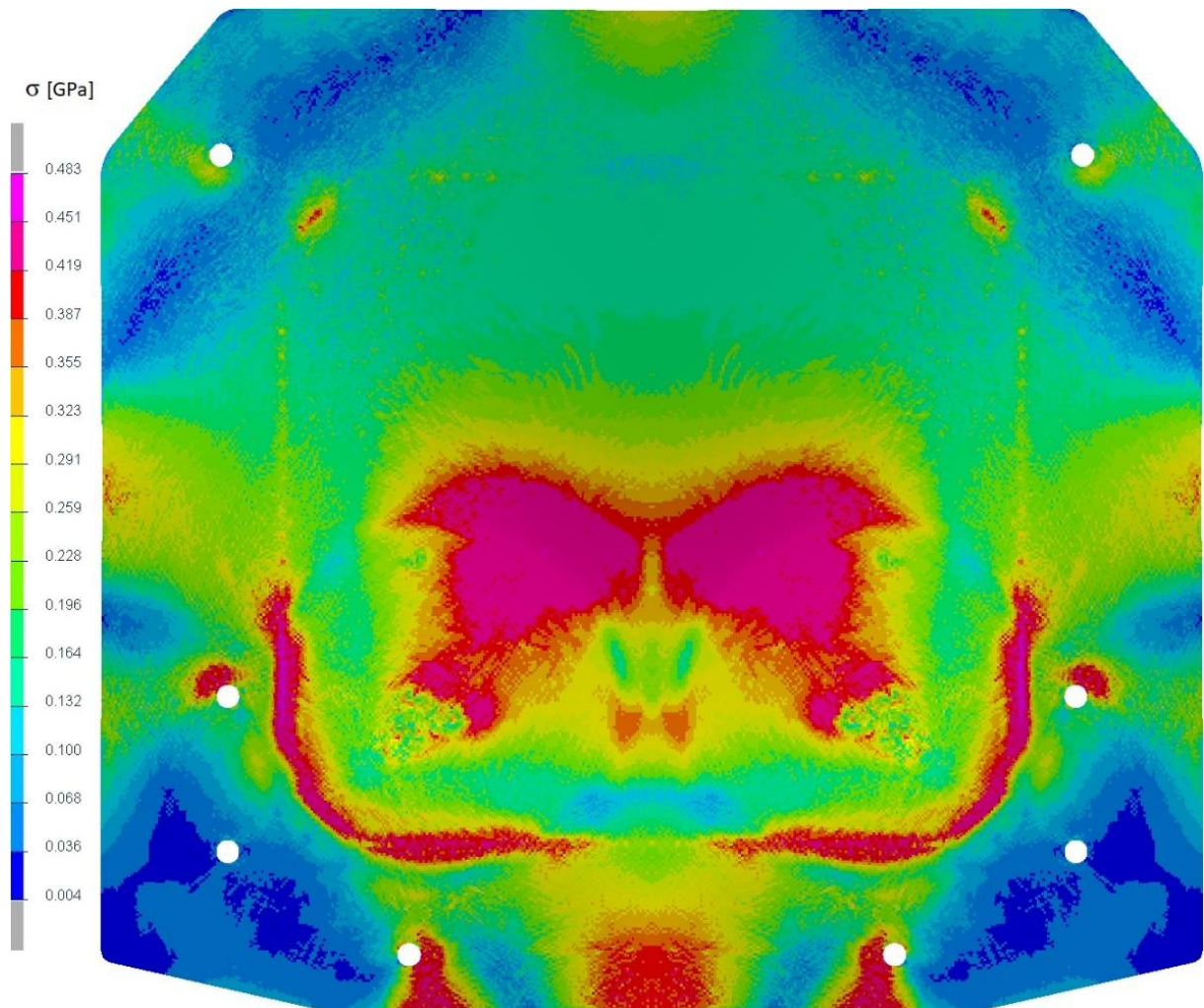
$$m_{ins} = \rho_{al} \cdot \frac{\pi}{4} (D_{ins}^2 - d_{ins}^2) \cdot t_{8CF} \cdot n = 2810 \cdot \frac{\pi}{4} (0,025^2 - 0,009^2) \cdot 0,002 \cdot 8 = 0,019 \text{ kg}$$

$$m_{2CF} = \rho_{CF} \cdot S_{2CF} \cdot t_{2CF} = 1500 \cdot 0,1615 \cdot 0,0005 = 0,121 \text{ kg}$$

$$m_{mez} = \rho_{al} \cdot \frac{\pi}{4} (D_{mez}^2 - d_{mez}^2) \cdot t_{CF} \cdot n = 2810 \cdot \frac{\pi}{4} (0,148^2 - 0,133^2) \cdot 0,002 \cdot 2 = 0,037 \text{ kg}$$

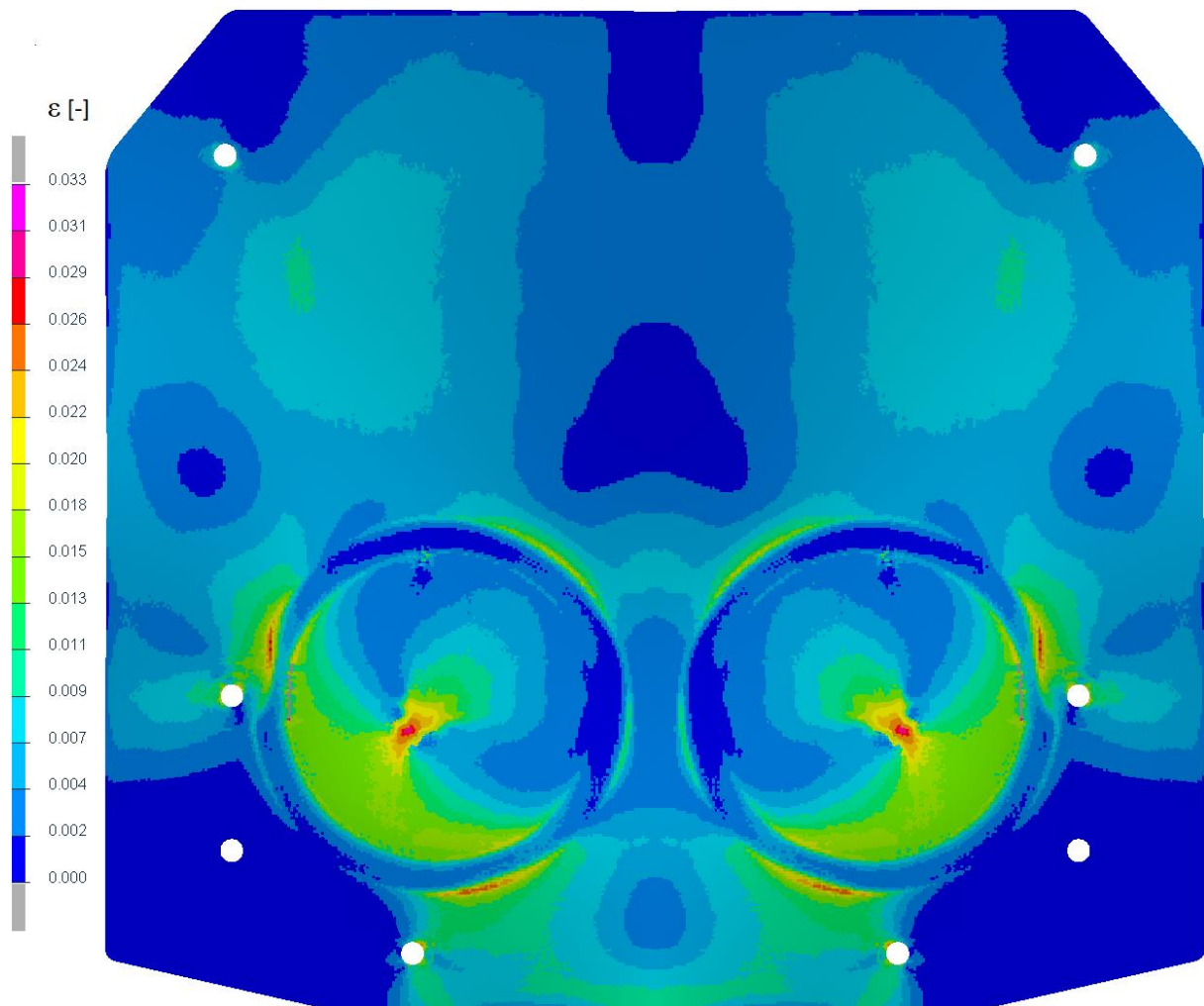
$$m_{celk} = \sum m = 0,908 + 0,474 + 0,019 + 0,121 + 0,037 = 1,559 \text{ kg}$$

Výsledky simulace ukazují, že při nejnejpříznivějším okamžiku nastane na spodní hliníkové desce napětí 483 MPa. Tato hodnota nasává při simulačním čase 47,5 ms, kterému odpovídá i největší silové zatížení přepážky (graf - Příloha 2). Naměřená hodnota maximálního napětí se sice nachází již v oblasti za mezí kluzu, nám ale postačí fakt, že napětí není blízké mezi pevnosti a přepážka se nezbortí.



Obr. 34 – Průběh napětí na hliníkové desce

Druhý obrázek demonstruje stav poměrného prodloužení na vrchní vrstvě uhlíkového kompozitu. Tato vrstva byla ze všech ostatních namáhána nejvíce. Můžeme si povšimnout, že v jednom místě zevnitř obtisknutého mezikruží nastala trhlinka. Ostatní vrstvy kompozitu ale tímto defektem netrpí a vrchní lamině tak dokáží být oporou. Z výsledků je také patrné, že ztuhlý materiál od zdeformovaných částí absorpčních kuželů namáhá horní vrstvu kompozitu.



Obr. 35 – Průběh poměrného prodloužení vrchní laminy

## 4.5 PŘEPÁŽKA SE ZAHRNUTÍM ARAMIDOVÝCH VLÁKEN

Alternativou k hliníkové vložce by mohl být kompozit s aramidovým vláknem. V porovnání s uhlíkovým kompozitem vyniká menším modulem pružnosti v tahu i smyku při zachování podobných pevnostních vlastností. Tyto charakteristiky bychom mohli využít při návrhu protiprůrazové přepážky a odstranit tak trhliny vzniklé v simulaci předešlého řešení.

### 4.5.1 VALIDACE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ ARAMIDU

Z předešlých prací materiálové vlastnosti aramidového vlákna nejsou známy a proto je nutné provést kalibraci, za pomoci reálných kvazistatických zkoušek. Získané vlastnosti při zatížení tohoto typu kompozitu poté využijeme k vypočtení vstupních materiálových parametrů pro program PAM-CRASH.

#### 4.5.1.1 Základní informace o vstupních datech

Pro kalibraci mechanických vlastností bude v programu PAM-CRASH použit jednoduchý element (obr. 36) s následujícími okrajovými podmínkami:

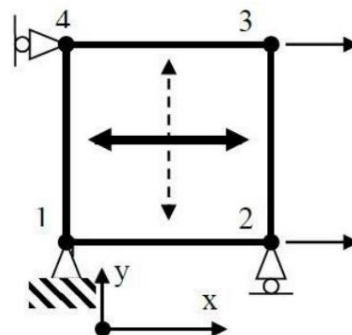
uzel 1 plně uzamčený

uzel 2 plně uzamčený, kromě volnosti ve směru osy x

uzel 4 plně uzamčený, kromě volnosti ve směru osy y

uzly 2 a 3 se zatížením konstantní rychlostí v kladném směru osy x  
(pro tahové namáhání vlákna)

Toto jednoduché nastavení zajišťuje řádné podepření elementu s čistým namáháním ve směru osy x a volnou kontrakcí ve směru osy y.



Obr. 36 – Okrajové podmínky jednoduchého elementu [19]

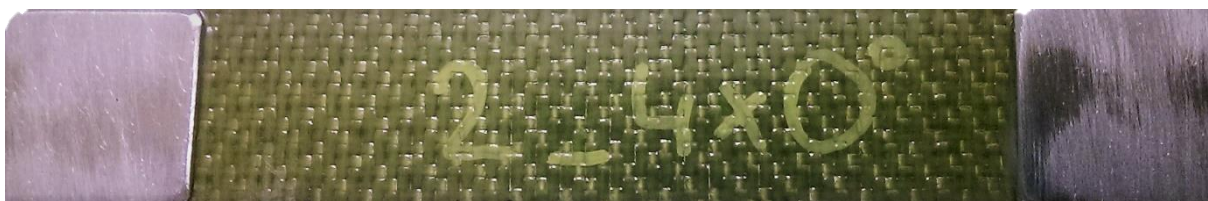
### 4.5.1.2 Stanovení elastických a plastických vlastností

V této části jsou nejprve uvedeny výsledky zkoušek, ze kterých jsou následně extrahovány potřebné vlastnosti materiálu. Model a vstupní data jsou ověřeny použitím jednoduchého skořepinového elementu (obr. 36). Pro kompozit z tkané látky je nutné udělat následující zkoušky: [19]

1. Tahová zkouška na  $0^\circ$  vzorku – elastické vlastnosti a mezní stavy
2. Tlaková zkouška na  $0^\circ$  vzorku – elastické vlastnosti a mezní stavy
- 3a. Smykové elastické vlastnosti (tahová zkouška na  $\pm 45^\circ$  vzorku)
- 3b. Konstanty šíření poškození ve smyku (cyklická tahová zkouška na  $\pm 45^\circ$  vzorku)
- 3c. Smykové plastické vlastnosti (cyklická tahová zkouška na  $\pm 45^\circ$  vzorku)

#### 1. Tahová zkouška na $0^\circ$ vzorku – elastické vlastnosti a mezní stavy

Jedná se o nečastější mechanickou zkoušku, při které se zaznamenává napěťová a deformační charakteristika. Zkušební zařízení obvykle vykresluje pracovní diagram se závislostí absolutního prodloužení na zátěžné síle. Na základě naměřených hodnot, se data přepočítají pro závislost poměrného prodloužení na smluvním napětí. Výsledkem je poté smluvní diagram, který je typickým reprezentantem tahové zkoušky. Modul pružnosti v tahu odpovídá směrnici přímkové oblasti, nacházející se obvykle v počáteční části smluvního diagramu. Chování materiálu v této oblasti odpovídá Hookova zákonu. K určení modulu pružnosti v tahu je nutné měřit velmi přesně poměrné prodloužení vzorku při jeho zatěžování. Pro tyto účely se používá přístroj měřící malé deformace, takzvaný extenzometr. Extenzometr se obvykle upíná přímo na zkoušený vzorek a kopíruje tak jeho okamžité deformace.



Obr. 37 – Zkušební vzorek 0/90°

Vlákna zkušební vzorku jsou orientována paralelně a příčně na směr zatěžování. Vzorek je vyroben ze čtyř lamin aramidového kompozitu, jehož konce jsou opatřeny hliníkovými příložkami, pro upevnění do čelistí zkušebního zařízení. Pro zajištění opakovatelnosti měření byly vyrobeny tři zkušební vzorky.

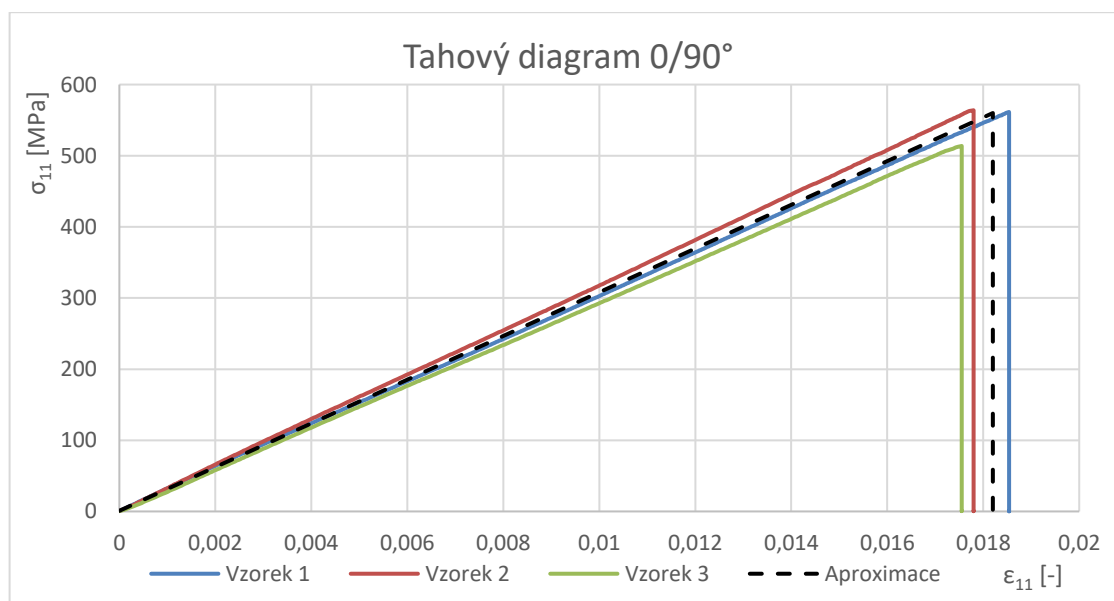
Zkouška byla uskutečněna na trhacím stroji FPZ/100, který je schopen zaznamenávat reakční sílu v čelistech. Velikost okamžité deformace byla sledována pomocí extenzometru MFA 2. Rychlost posuvu stroje byla nastavena na 2 mm/min.



Obr. 38 – Trhací stroj s extenzometrem

Naměřená data byla přepočtena a vyobrazena ve smluvním tahovém diagramu (graf 1). Aramidový kompozitní vzorek vykazoval lineární chování až do meze pevnosti, kde ztratil stabilitu a přetrhl se. V naměřených datech existuje jistý rozptyl, ale rozumným zprůměrováním lze získat jeden výsledný průběh, se kterým budeme nadále pracovat. Tím že byl po celou dobu zatěžování průběh lineární, není problém dopočítat modul pružnosti v tahu.

$$E_{11}^0 = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}}$$



Graf 1 - Tahový diagram aramidového kompozitu 0/90°



## 2. Tlaková zkouška na 0° vzorku – elastické vlastnosti a mezní stavy

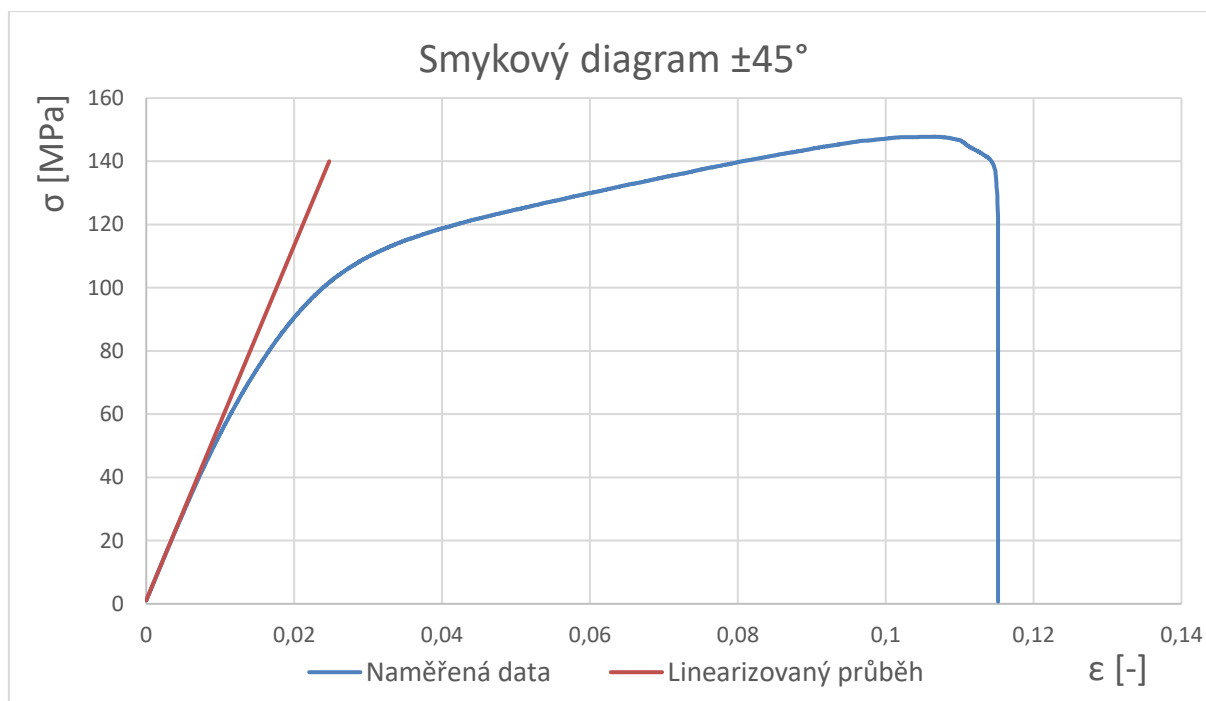
Vzhledem k proporcím testovaného vzorku je obtížné provést reálnou tlakovou zkoušku, především kvůli nízké vzpěrové tuhosti. Vláknové kompozity nicméně vykazují podobné tlakové vlastnosti jako ty v tahu, potřebné hodnoty tedy převezmeme z tahové zkoušky, popřípadě odhadneme.

### 3a. Smykové elastické vlastnosti (tahová zkouška na ±45° vzorku)

Dalším potřebným parametrem, který lze získat z kvazistatických zkoušek je modul pružnosti ve smyku. Při správné konfiguraci vláken v kompozitu lze pomocí tahové zkoušky vyvolat ve vzorku čistý smyk. Zkušební tělísko bylo opět vyrobeno ze čtyř vrstev aramidového kompozitu, nyní ale s orientací vláken 45° k ose zatěžování.



Obr. 39 – Zkušební vzorek ±45°



Graf 2 - Smykový diagram aramidového kompozitu ±45°

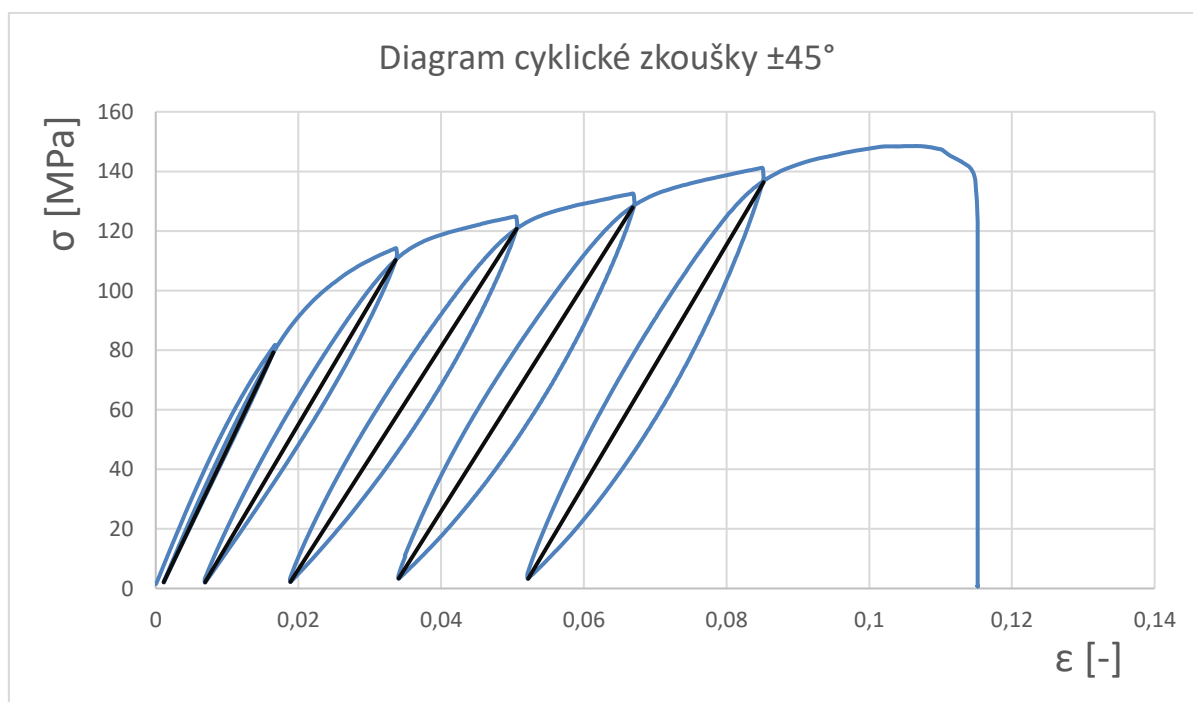
Po přepočítání dat je smluvní napětí v závislosti na poměrném prodloužení značně nelineární (graf 2). Nicméně v počáteční fázi zatěžování lze nalézt průběh bez plastických deformací a tato data nám poslouží k určení modulu pružnosti ve smyku. Ten je stanoven jako podíl napětí a zkosu v lineární části. Zkos je definován jako dvojnásobek poměrného prodloužení.

$$G_{12}^0 = \frac{\sigma_{12}}{2\varepsilon_{12}}$$

Zkouška končí překročením meze pevnosti, která je výrazně menší než u vzorku s vlákny orientovanými k ose zatěžování. To je dáno tím, že se vlákna přímo nepodílejí na přenosu sil od čelistí a výsledné vlastnosti ovlivňuje především kvalita matrice. To je také důvodem vzniku větších deformací, které končí přetržením vzorku pod úhlem 45°. Rychlost posuvu stroje byla nastavena na 5 mm/min.

### 3b. Konstanty šíření poškození ve smyku (cyklická zkouška na ±45° vzorku)

Pro získání parametrů vývinu poškození, plasticity a mezní smykové pevnosti je nutné provést cyklickou zkoušku ve smyku. Zkušební tělísko bude opět s vlákny natočenými 45° ke směru osy trhání, zatěžování ale bude odpovídat míjivým cyklům s rostoucí amplitudou. Deformace vzorku bude obdobná, jako při předchozím měření a proto můžeme předem naplánovat rovnoměrné rozmístění jednotlivých cyklů v závislosti na poměrném prodloužení. Tím že při smykovém namáhání nastávají plastické deformace, extenzometr zaznamená hysterezní chování při každém ze zatěžovacích a odlehčovacích cyklů. Hysterezních smyček by mělo být naměřeno alespoň pět. Rychlost posuvu byla nastavena na 2 mm/min.



Graf 3 - Diagramm cyklické zkoušky na vzorku ±45°

Spojením vrcholů hysterezních smyček lze získat úsečku, která po přepočtu reprezentuje modul pružnosti ve smyku v jednotlivých fázích zatížení. Změna sklonu úseček je dána vývojem poškození v každém zatěžovacím cyklu. [19]

V každém cyklu je ztráta tuhosti charakterizována snížením smykového modulu. Stupeň smykového poškození  $d_{12}$  je dán vztahem:

$$d_{12}^i = 1 - \frac{G_{12}^i}{G_{12}^0}$$

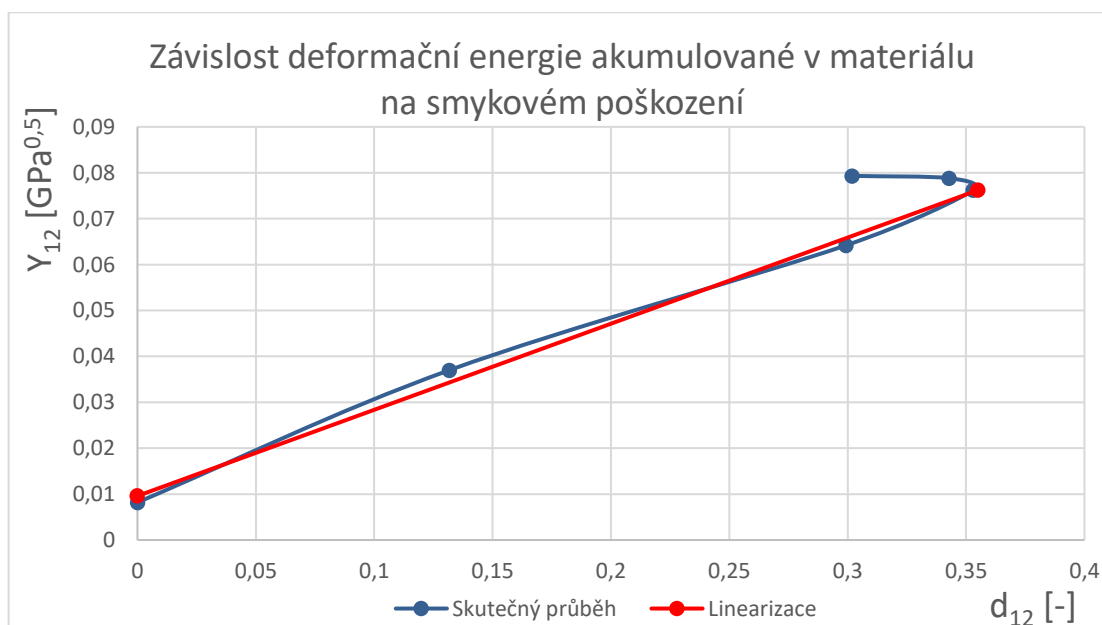
Další parametr, kterého se lze dopočítat, je deformační energie akumulovaná v jednotlivých fázích zatížení. Tu lze získat podle rovnice závislé na modulu pružnosti ve smyku a elastické deformaci z jednotlivých cyklů. [19]

$$Y_{12}^i = \sqrt{\frac{1}{2} G_{12}^0 (2\varepsilon_{12}^i)^2}$$

Vynesení průběhu  $Y_{12}$  v závislosti na poškození  $d_{12}$  do grafu získáme obecnou křivku. Porušení je zpočátku lineární (pro malé prodloužení a poté se rychle zvyšuje těsně před porušením). V programu PAM-CRASH je k dispozici několik možností k charakterizování vývoje poškození. Křivku lze vystihnout pomocí exponenciální funkce, funkce křivky nebo následující lineární funkcí porušení: [19]

$$Y_{12}^i = Y_c \times d_{12}^i + Y_0$$

Kde  $Y_0$  je počáteční hodnota a  $Y_c$  je sklon lineární funkce. Horní omezení této lineární funkce vytváří parametr  $YR$ , při kterém nastává trhлина a zhroucení materiálu. [19]



Graf 4 – Závislost akumulované deformační energie

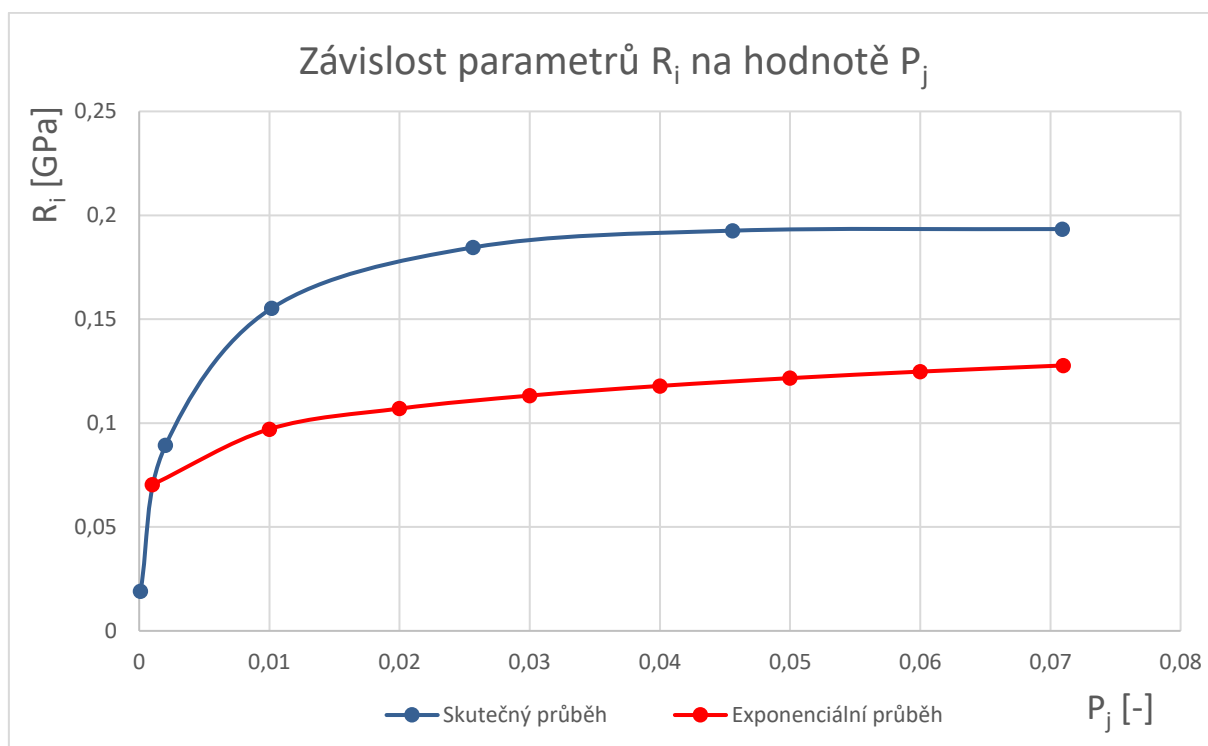
Je zřejmé, že tato linearizace není přesná, ale pro účely správného chování modelu, takového zjednodušení nebude mít příliš veliký vliv na správnost výsledku.

### 3c. Smykové plastické vlastnosti (cyklická zkouška na $\pm 45^\circ$ vzorku)

V pokročilé fázi jsou deformace popsány plastickým předpisem, který je určen příčným (22) a smykovým (12) prodloužením. Parametr  $p_i$  je založen na měření efektivního plastického prodloužení a parametr  $R_i$  určuje, jaká hodnota  $d_{12}$  ovlivňuje mez kluzu v každém cyklu. [19]

$$\left. \begin{aligned} p_i &= \int_{\varepsilon_{12}^{p_{i-1}}}^{\varepsilon_{12}^{p_i}} 2(1 - d_i) \varepsilon_{12}^p \\ P_j &= \sum_{i=1}^{i=j} p_i \\ R_i &= \frac{\sigma_{12}^i}{1 - d_i} - R_0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow R_i = \beta (P_j)^m$$

Kde  $\varepsilon_{12}^p$  je plastické prodloužení každého cyklu  $i$ . Podle rovnic sepsaných výše umožní parametr  $p_i$  spočítat hodnoty integrací v každém cyklu. Hodnoty pro  $P_j$  jsou poté vypočítané postupným sečtením hodnot parametru  $p_i$ .

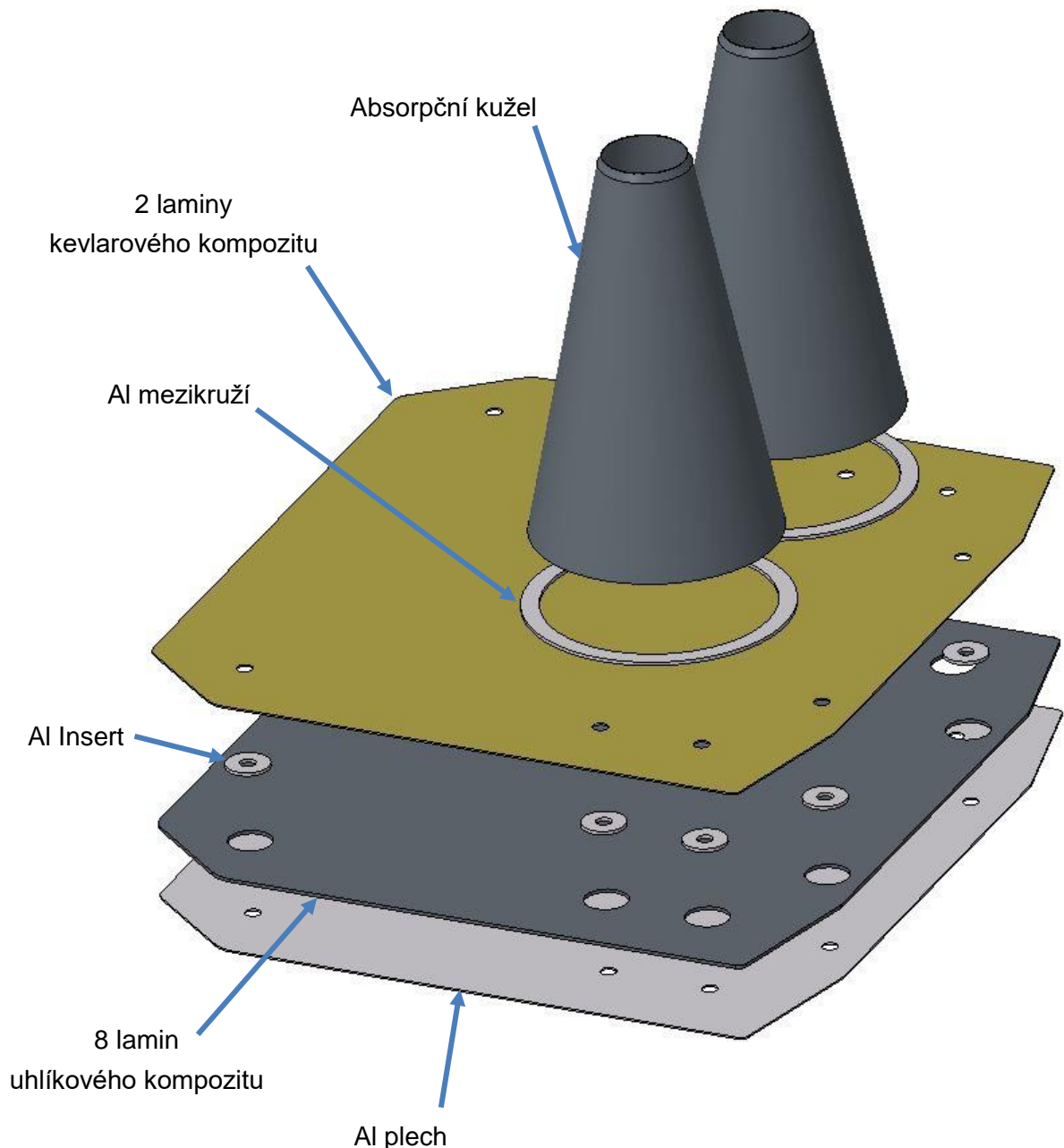


Graf 5 - Závislost parametrů  $R_i$  a  $P_j$

Zakřivení je provedeno tak, aby odpovídalo exponenciální plastické funkci (s parametry  $\beta$  a  $m$ ) křivky  $R_i$  versus  $P_i$ . Exponenciální průběh charakterizovaný parametry  $\beta$  a  $m$  byl při kalibraci upraven (graf 5) aby lépe kopírovala naměřenou křivku na trhacím stroji (viz. smykový diagram – Příloha 1).

## 4.5.2 SIMULACE S VRSTVAMI ARAMIDOVÉHO KOMPOZITU

Poté, co jsme získali potřebné hodnoty kevlarového kompozitu pro funkční materiálový model v programu PAM-CRASH, můžeme pokračovat s návrhem protiprůrazové přepážky. Skladba bude velmi podobná poslednímu řešení a jediná změna tak bude záměnou dvou vrchních vrstev uhlíkového kompozitu za kompozit kevlarový. Pokusíme se tak odstranit oblasti velkého namáhání pod mezikružemi absorpčních kuželů, které vedly k trhlinám u uhlíkového kompozitu.



Obr. 40 – Skladba přepážky s kevlarovým kompozitem

Hmotnostní bilance vlivem malých změn bude velmi podobná minulému řešení, jiná bude pouze hmotnost dvou vrchních lamin z kevlarového kompozitu. Celková teoretická hmotnost přepážky tedy bude 1554 gramů.

$$m_{al} = \rho_{al} \cdot S_{al} \cdot t_{al} = 2810 \cdot 0,1615 \cdot 0,002 = 0,908 \text{ kg}$$

$$m_{8CF} = \rho_{CF} \cdot S_{8CF} \cdot t_{8CF} = 1500 \cdot 0,158 \cdot 0,002 = 0,474 \text{ kg}$$

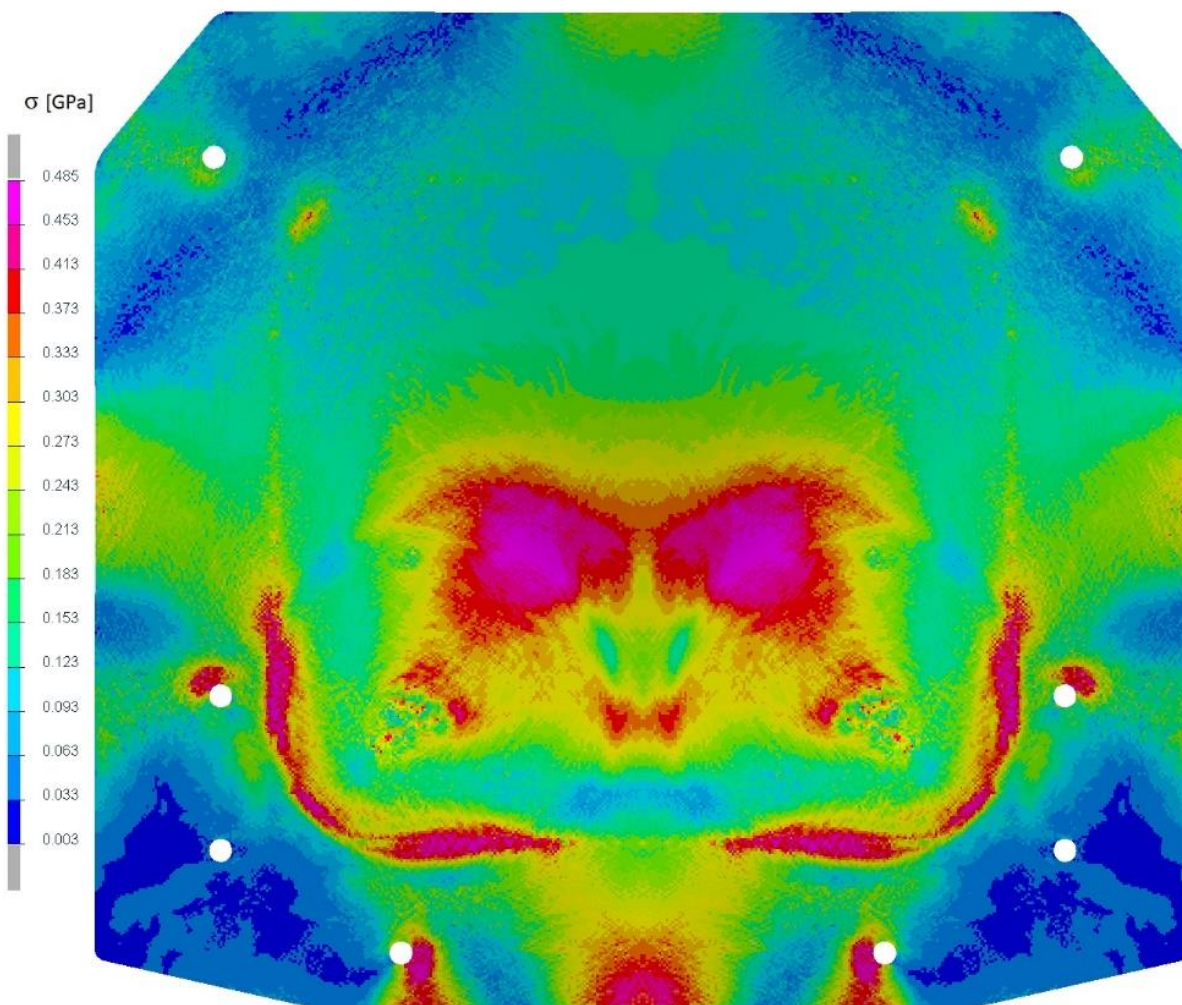
$$m_{ins} = \rho_{al} \cdot \frac{\pi}{4} (D_{ins}^2 - d_{ins}^2) \cdot t_{8CF} \cdot n = 2810 \cdot \frac{\pi}{4} (0,025^2 - 0,009^2) \cdot 0,002 \cdot 8 = 0,019 \text{ kg}$$

$$m_{2AF} = \rho_{AF} \cdot S_{2AF} \cdot t_{2AF} = 1440 \cdot 0,1615 \cdot 0,0005 = 0,116 \text{ kg}$$

$$m_{mez} = \rho_{al} \cdot \frac{\pi}{4} (D_{mez}^2 - d_{mez}^2) \cdot t_{CF} \cdot n = 2810 \cdot \frac{\pi}{4} (0,148^2 - 0,133^2) \cdot 0,002 \cdot 2 = 0,037 \text{ kg}$$

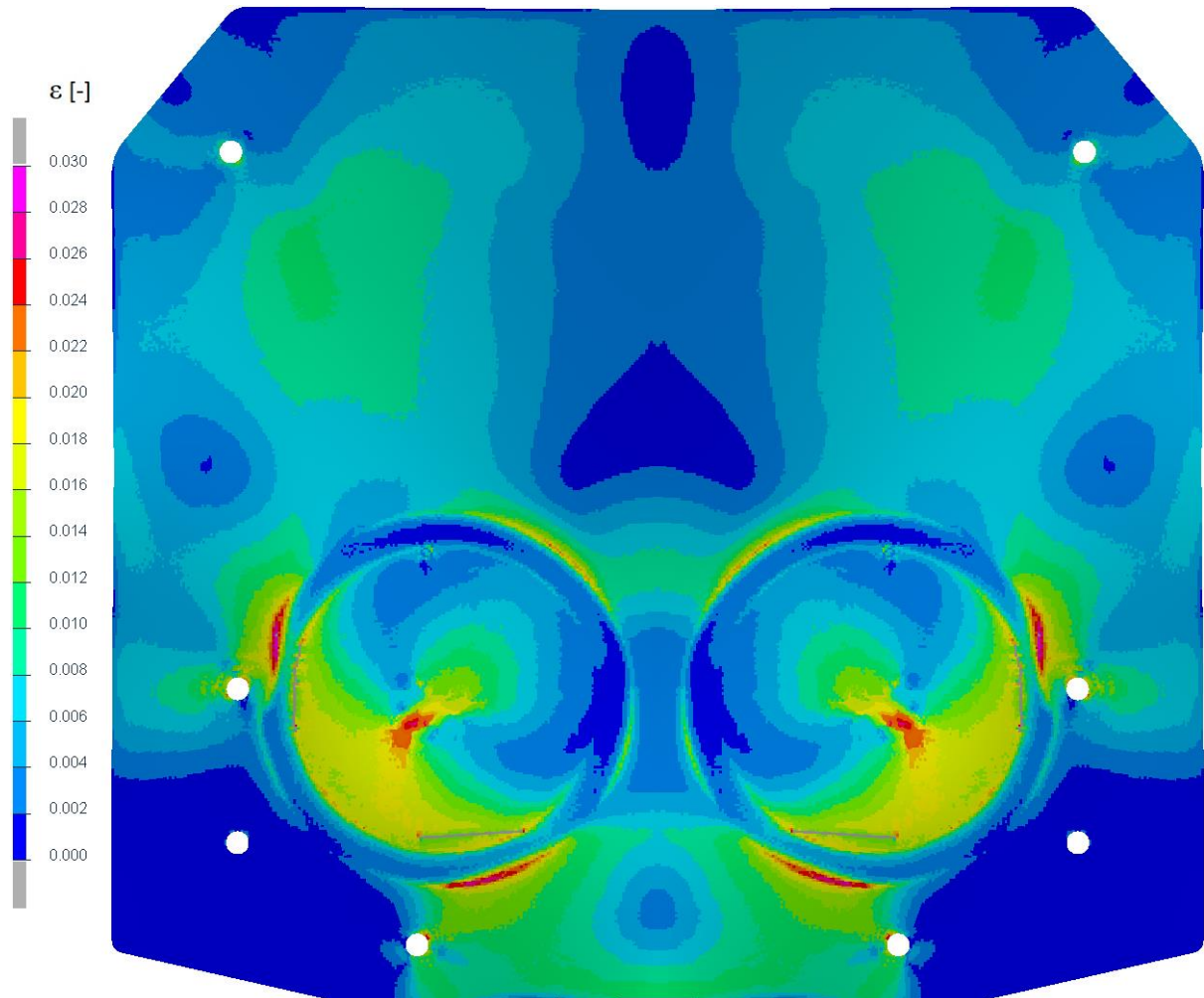
$$m_{celk} = \sum m = 0,908 + 0,474 + 0,019 + 0,116 + 0,037 = 1,554 \text{ kg}$$

Výsledky simulace s částečným zahrnutím aramidových kompozitních vrstev vycházejí velmi podobně v porovnání s předešlým řešením. Na hliníkové desce nastalo největší napětí 485 MPa a nachází se tedy v oblasti plastického přetvoření s rezervou 40 MPa od meze pevnosti.



Obr. 41 – Průběh napětí na hliníkové desce (verze 2)

Na vrchní lamině kevlarového kompozitu lze pozorovat dvě trhliny oproti jedné z minulého řešení. Trhliny nastávají kolmo na směr největšího zatížení od reakčních sil šroubů. Tak jako v předešlém řešení, ostatní vrstvy již netrpí tímto problémem a přepážka se tak nezhroutí.



Obr. 42 – Průběh poměrného prodloužení vrchní laminy (verze 2)

Při validaci aramidového kompozitu jsme získali očekávanou menší hodnotu modulu pružnosti ve smyku, v porovnání s validovanými hodnotami uhlíkového kompozitu. Nicméně modul pružnosti v tahu vyšel naopak vyšší v porovnání s uhlíkovým kompozitem a to mohlo zapříčinit tyto, o něco horší výsledky v oblastech, kde je aramidový kompozit zatěžován ve směru jeho vláken. Trhliny by se daly odstranit záměrným natočením horních lamin o 45° od původní hodnoty. Reakční síla od šroubů by se tak projevila více na spodnějších vrstvách kompozitu.

## 5 REALIZACE PROTIPRŮRAZOVÉ PŘEPÁŽKY

---

Tým CTU CarTech má již dlouholetou zkušenost s technologií výroby kompozitních dílů s vláknovou výztuží a proto by neměl být problém s výrobou relativně jednoduchého tvaru desky protiprůrazové přepážky. I přesto, že poslední simulace s částečným zahrnutím kevlarového kompozitu nevyšly dle představ, použijeme její skladbu k realizaci přepážky.

### 5.1 VÝROBA

Z plechu ze slitiny hliníku vytvoříme hlavní desku přepážky i mezikruží patřící pod absorpční kužele. K vypálení přesného geometrického tvaru využijeme laseru firmy Trumf. Další částí přepážky jsou vrstvy uhlíkového a kevlarového prepregu. Kvůli uchování syrové matrice jsou prepregy zamrazeny, proto je dobré je po vyndání nechat alespoň pět minut aklimatizovat při pokojové teplotě. Jelikož budoucí kompozitové nástřihy mají stejný vnější tvar jako již vypálená hliníková deska, využijeme ji k obkreslení. Dle čar poté vystřihneme celkem osm obrysů uhlíkového prepregu (obchodní název C-W200-E323) a dvě vrstvy kevlarového (STY285 ER450), u kterého pozorujeme větší střížný odpor. U osmi vrstev uhlíkového prepregu vystřihneme díry pro inserty o průměru 25 mm a u horních vrstev kevlaru vystřihneme menší otvory pouze pro šrouby, aby byly inserty při laminaci zakryty.



Obr. 43 – Deska ze slitiny hliníku



Hliníkové inserty vytvoříme z kruhové tyče o průměru 25 mm. Na soustruhu vyvrtáme díru o průměru 8,5 mm a následně upíchneme 8 mezikružích o tloušťce 2 mm. Protože je tloušťka insertů shodná s ostatními hliníkovými díly použitými v přepážce, můžeme si práci ulehčit a inserty vypálit na laseru spolu s nimi.



Obr. 44 – Hliníkové inserty

Dílní části protiprůrazové přepážky jsou připraveny a je možné začít s jejich postupným sestavením. Jako první odlaminujeme jednotlivé vrstvy prepregu. Na rovnou ocelovou desku připevníme lepicí páskou oddělovací folii, aby pryskyřice z prepregu nepřilnula k povrchu ocelové desky. Na folii poté pečlivě klademe jednotlivé vrstvy s tím, že první je kevlarový prepreg. Volíme toto pořadí, aby vrchní pohledová část z kevlaru byla co nejrovnější. Poté, co je deset lamin vyskládáno, do vzniklých osmi otvorů vložíme hliníkové inserty. Při vytvrzení se pryskyřice spojí s inserty a vytvoří jednotnou strukturu. Výška hliníkové vložky je napočítána tak, aby po vytvrzení splynula s okolním kompozitem. Na vyskládaný prepreg položíme vrstvu odtrhové tkaniny, poté perforovanou folii a nakonec odvzdušňovací tkaninu. Sestavu zakryjeme vakuovacím pytle a za pomoci tvárného těsnění připevníme ke spodní formě. Vývěvou poté ze sestavy odsajeme veškerý vzduch a následně vložíme do pece. Vytvrzení probíhá při 80 °C po dobu pěti hodin. Po vychladnutí opatrně odstraníme všechny vrstvy technologických textilií. Výsledek vidíme na obr. 45 a 46. Díry pro šrouby se částečně zalily pryskyřicí, z tohoto důvodu je nutné jejich tvar obnovit provrtáním.



Obr. 46 – Spodní povrch kompozitové desky



Obr. 45 – Vrchní povrch kompozitové desky

Dalším postupem je spojení hliníkového plechu s kompozitní deskou. Na snaze bylo řešení, odlaminovat vrstvy prepregu přímo s hliníkovým plechem. Problém by ale nastal při vytvrzování, respektive po následném ochlazení, kdy vlivem různých teplotních roztažností uhlíkového prepregu a hliníku, by nastalo mezi materiály pnutí a s tím spojená deformace (vypuknutí). Tento jev by byl nežádoucí, především kvůli poklesu pevnosti. Plech s kompozitem tedy spojíme až po jeho vytvrzení za pomoci vysokopevnostního dvousložkového lepidla Safran EA 9394 QT. Před tím ale musíme připravit hliníkovou desku, jejíž lesklý povrch by nezajistil dostatečnou adhezi pro lepidlo. Pomocí rotační brusky s brusným papírem o hrubosti 200, povrch pečlivě zdrsňíme.



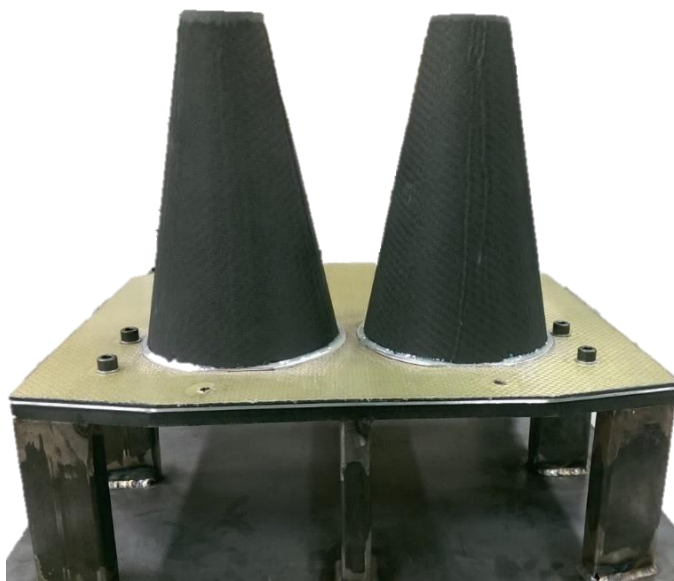
Obr. 47 – Zdrsňený povrch hliníkové desky

Strana desky z uhlíkového kompozitu má po vytvrzení povrch již dostatečně hrubý a tak ho stačí pouze odmastit acetonem. Stejnou proceduru uděláme i u hliníkové desky. Poté důkladně smícháme lepidlo s tužidlem v poměru 16:1 a v tenkých vrstvách nanášíme na povrch hliníkového plechu a kompozitní desky. Oba díly následně spojíme k sobě. Skrze díry za pomoci šroubů díly slícujeme a pevně sešroubujeme. Pro ještě lépe rozložený tlak, střed přepážky zatížíme závažím. Takto sestavu necháme 24 hodin vytvrdnout při pokojové teplotě.



Obr. 48 – Vrstva lepidla na hliníkové desce

Po vytvrzení přepážky zarovnáme její okraje od přebývajícího lepidla či zbytků pryskyřice po vytvrzení laminátu. Následně přichází na řadu finální kompletace absorpčních kuželů a mezikruží s protiprůrazovou přepážkou. Povrch obrysu mezikruží, i samotné mezikruží opět zdrsňujeme brusným papírem a odmastíme acetonem. Dvousložkové lepidlo Loctite EA 3450 naneseeme v přiměřené vrstvě na jednu stranu mezikruží a následně i na spodní hranu absorpčních kuželů. Všechny komponenty umístíme na svá místa a na kužele opatrně umístíme přibližně 20 kg závaží. Takto celou sestavu necháme 24 hodin vytvrdit, po jejichž uplynutí je deformační prvek s protiprůrazovou přepážkou připraven k montáži na vůz, respektive k realizaci nárazové zkoušky, která bude probрана v následující kapitole.

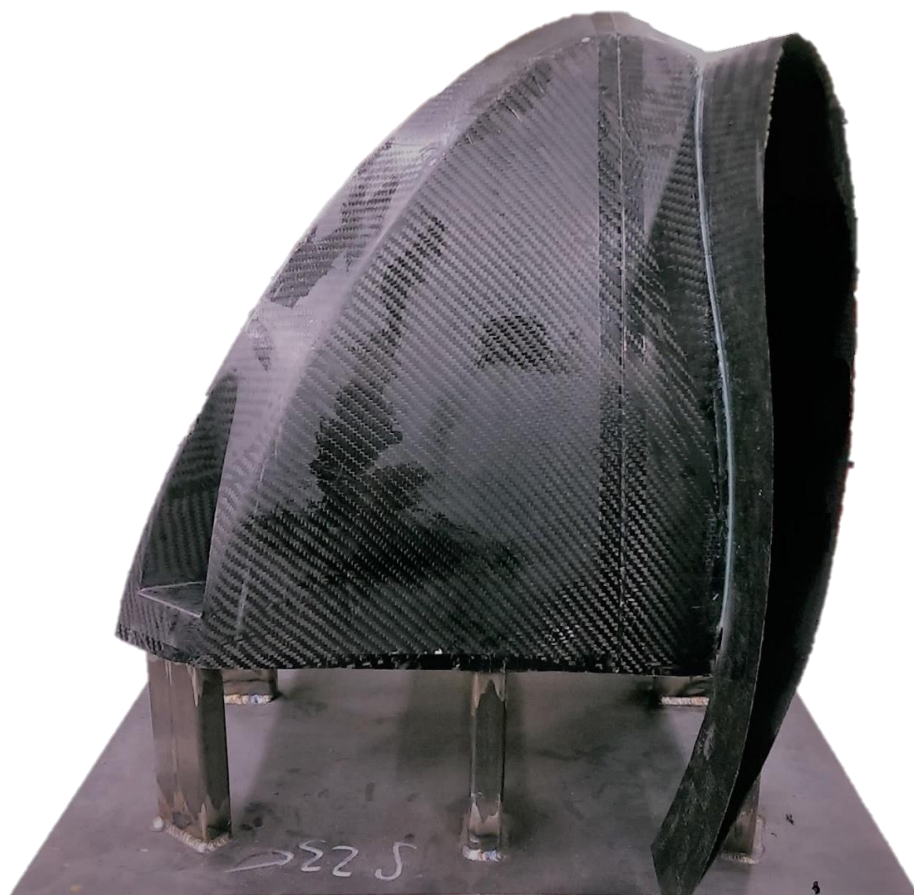


Obr. 49 – Hotová sestava absorpčních kuželů a protiprůrazové přepážky

## 5.2 NÁRAZOVÁ ZKOUŠKA

Ke schválení deformačního prvku a protiprůrazové přepážky pro soutěž Formula Student je nutná realizace nárazové zkoušky, a to nejlépe kompetentní organizací. Pro tento účel bylo poskytnuto zázemí od firmy KTG, vlastníci padostroj s akceleračními snímači a záznamem z vysokorychlostní kamery. Princip samotné zkoušky spočívá ve shození hmotného tělesa na deformační prvek připevněného k tuhé stolici. Hmotné těleso je následně zpomalováno deformační prací absorpčních kuželů. Takto je napodobován náraz vozu do tuhé zdi pouze s tím rozdílem, že iniciátorem energie není vůz, ale pohyblivá zeď. Objem energie, kterou deformační prvek musí pohltnout je ale stejný, proto je možné takto zkoušku provést.

Pro úspěšné schválení nárazové zkoušky musí být deformační prvek doplněn o aerodynamický obal a část předního přitlačného křídla, aby měla sestava co nejméně podobné vlastnosti podobné těm, jako při nárazu se skutečným vozem. Deformační prvek je poté upnutý na zkušební stolici, která demonstruje tvar přední části monokoku. Tuhost zkušební stolice není v pravidlech definována, a proto je pro tento případ předimenzována, aby byly eliminovány průhyby či trvalé deformace.



Obr. 50 – Přední struktura připravena na nárazový test

## Kalibrace výšky pádu

Hmotnost impaktoru:  $m=299,5$  kg

Požadovaná kinetická energie:  $E_K=7350$  J

Potřebná výška impaktoru nad deformačním prvkem:

$$h = \frac{E_K}{m \cdot g} = \frac{7350}{299,5 \cdot 9,81} = 2,502m$$

Dopčet skutečné potenciální energie:

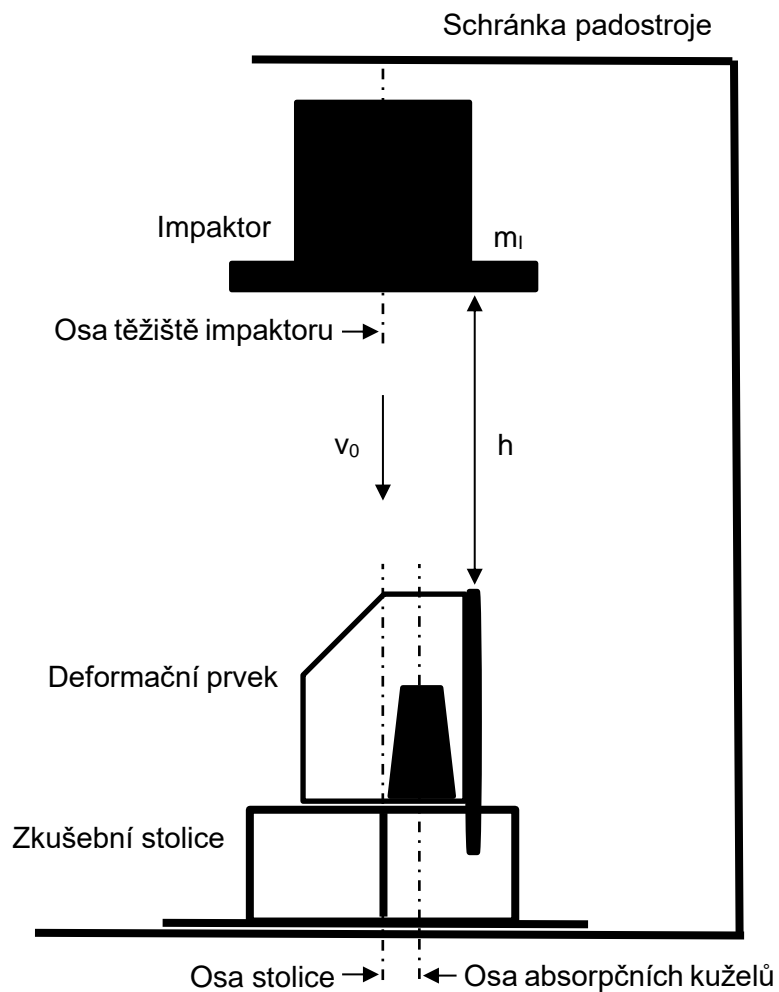
$$E_P = m \cdot g \cdot h = 299,5 \cdot 9,81 \cdot 2,502 = 7351,1J$$

Výpočet skutečné dopadové rychlosti:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_K}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7351,1}{299,5}} = 7,006m/s$$

Tento výpočtový model neuvažuje ztráty vyvolané odporem vzduchu či jiného tření, jelikož rychlosti impaktoru nedosahují vyšších hodnot a odchylky jsou tak zanedbatelné. Z tohoto důvodu prohlašujeme potenciální a kinetickou energii ve výpočtu sobě rovným. Ve skutečnosti je ale vhodné výšku pádu nepatrně zvýšit pro zajištění potřebné reálné kinetické energie.

Poté, co je sestava deformačního prvku připravena, je umístěna pod padostroj a přes plech zkušební stolice je aretována přímo k tělu padostroje. Hmotné těleso padostroje není při pádu úmyslně vedeno, aby nebyly výsledky zkresleny. Z tohoto důvodu je nutné před provedením zkoušky umístit středy absorpčních kuželů pod těžiště hmotného tělesa padostroje. Na tento aspekt při realizaci zkoušky naneštěstí nebyl brán zřetel a deformační prvek byl umístěn středem pomocné stolice (nikoliv středem kuželů) pod těžiště tělesa padostroje (obr. 51). Při samotné zkoušce bylo těleso padostroje zpomalováno absorpčními kužely a zároveň se vlivem nesymetrie postupně natáčelo. V poslední fázi zpomalení tak část tělesa vlivem vzniklého natočení dopadla na šrouby připevňující deformační prvek k testovací stolici, kde byla pohlcena zbylá kinetická energie. Touto skutečností vznikla na konci dopadu akcelerační špička, která ale nepřekročila maximální možné zpomalení a to zadaných 40 g. Deformační prvek tedy v rámci kritéria zpomalení vyhověl, a to i z hlediska jeho průměrného zpomalení.



Obr. 51 – Schéma padostroje

Druhou nutnou podmínkou pro schválení deformačního prvku, která nás především zajímá, je nepřekročení maximální dovolené deformace protiprůrazové přepážky. Limit je zde stanoven pravidly na 25 mm trvalé deformace. Nicméně na přepážce při dané konfiguraci pádu nebyly vyvolány žádné plastické deformace a tak po zkoušce nebyly změřeny žádné trvalé odchylky od původního stavu. Tento úspěšný výsledek byl zcela jistě podpořen faktem, že část kinetické energie pohltily zmiňované šrouby. Absorpční kužele tedy v průběhu své deformace neiniciovaly do přepážky tak velkou sílu, s jakou bylo v simulačních výpočtech počítáno. Je ale zřejmé, že i při správné konfiguraci pádové zkoušky by navrhnutá protiprůrazová přepážka byla schopna odolat vzniklému většímu zatížení.

Část naměřených hodnot ze zkoušky

Decelerační špička ( $\leq 40$  g) = 37,8 g

Průměrné zpomalení ( $\leq 20$  g) = 12,5 g

Rozměry deformačního prvku:

Šířka ( $\geq 200$  mm) = 430 mm

Výška ( $\geq 100$  mm) = 388 mm

Délka ( $\geq 200$  mm) = 340 mm



Obr. 52 – Deformační prvek po nárazové zkoušce

## 6 NÁVRH DEFORMAČNÍHO PRVKU

---

Z předchozích kapitol je nám známo, že protiprůrazová přepážka byla velmi omezena okrajovými podmínkami. V této kapitole se pokusíme navrhnout nejen přepážku, ale i okolní komponenty. Tím by mohlo být umožněno lepší transformaci nárazových sil a přepážka by tak mohla být méně zatěžována. Vhodným dimenzováním by tedy protiprůrazová přepážka měla mít menší hmotnost.

### 6.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Polohu 8 šroubů se pokusíme lépe rozmístit, aby více přidržely přepážku při jejím namáhání. Zároveň ale jejich pozici navrhne tak, aby respektovaly přednostní polohu deformačních kuželů. Rozměry a tvar monokoku s nosem zůstanou zachovány, už jen proto, že jejich změna by zasáhla mnoho souvisejících komponentů, jejichž modifikace není žádaná. Pro návrh protiprůrazové přepážky tedy máme následující okrajové podmínky. Hrany čela monokoku stejné jako vnitřní obrys nosu budou beze změn stejné jako v minulém návrhu. Tvar a velikost absorpčních kuželů můžeme dle situace změnit. Dle předchozích zkušeností je známo, že polohu deformačního prvku je nevýhodné navrhovat v okolí středu přepážky. Úkolem je tedy absorpční kužele rozmístit co nejbližší k vnějším okrajům monokoku. Pokud nebudeme brát v úvahu polohu šroubů k uchycení přepážky, prvním omezením polohy kužele bude nos, který vytvoří kolizi s horní hranou kužele. Pro ještě bližší posunutí k hraně monokoku a vytvoření tak lepšího namáhání přepážky zmodifikuji velikost absorpčních kuželů.

#### 6.1.1 NÁVRH ABSORPČNÍCH KUŽELŮ

Limitujícím parametrem pro usazení kuželů co nejbližší k hraně monokoku je horní průměr komolého kužele. Dosavadní hodnota je průměr 50 mm, navrhuji tedy průměr 20 mm s tím, že menší hodnota by už výrazně snížila pohlcování energie v počátku nárazu. Z předešlých simulací je patrné, že síla kterou kužele generují, s časem mírně roste. Tento průběh se pokusíme zredukovat snížením vrcholového úhlu kužele a tak snížením objemu kužele v pozdějších fázích nárazu oproti předešlému řešení. Výšku absorpčních kuželů navrhne tak, aby se průměrné zpomalení blížilo maximálním hodnotám stanovených pravidly, jimiž je zpomalení 20 g. Dle jednoduchých vztahů a kritéria maximálního průměrného zpomalení lze dopočítat minimální výška kužele. Avšak skutečnou výšku navýšíme o prostor pro tříštění



kompozit, který při deformaci zůstává uvnitř kužele. Vyhneme se tak nepříznivému zhutnění, souvisejícího s vyšším nárůstem zpomalení. K délce navíc připočítáme rezervní prostor tak, aby zpomalení bylo pod limitem 20 g.

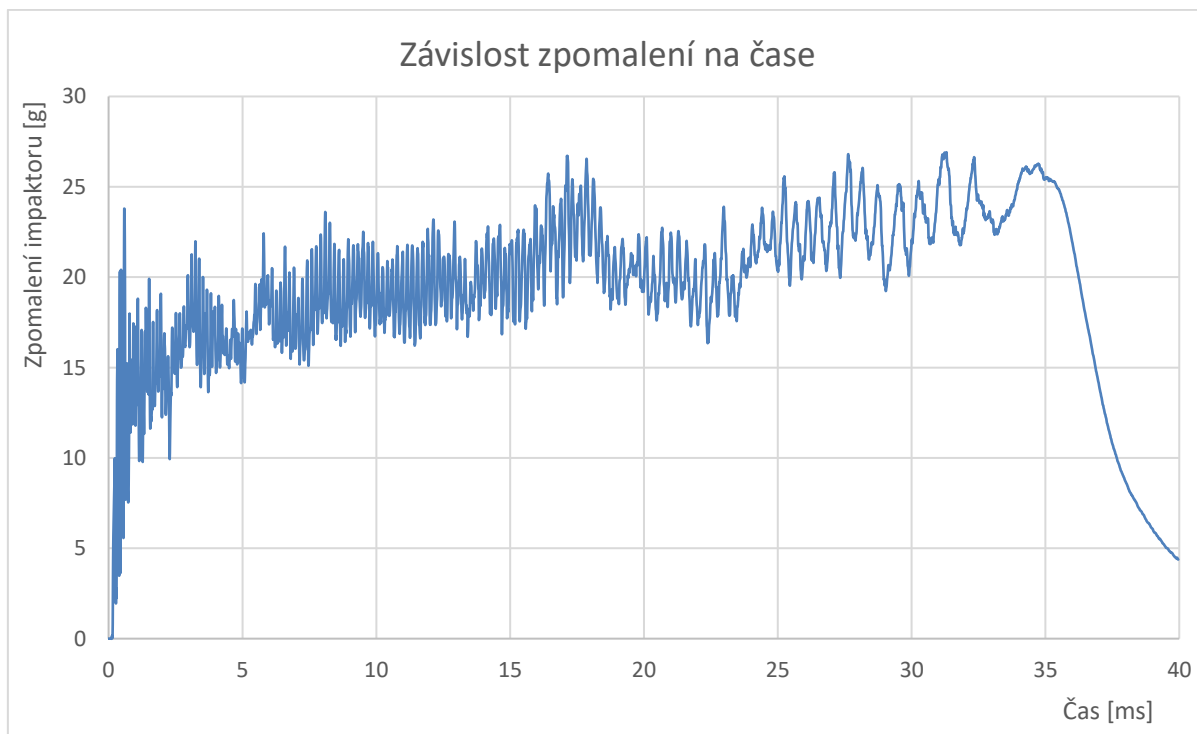
$$l_{min} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{a_{max}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{7^2}{196,2} = 0,1249 \text{ m}$$

$$l = l_{min} + l_{zhut} + l_{rez} = 0,1249 + 0,035 + 0,0101 = 0,17 \text{ m}$$

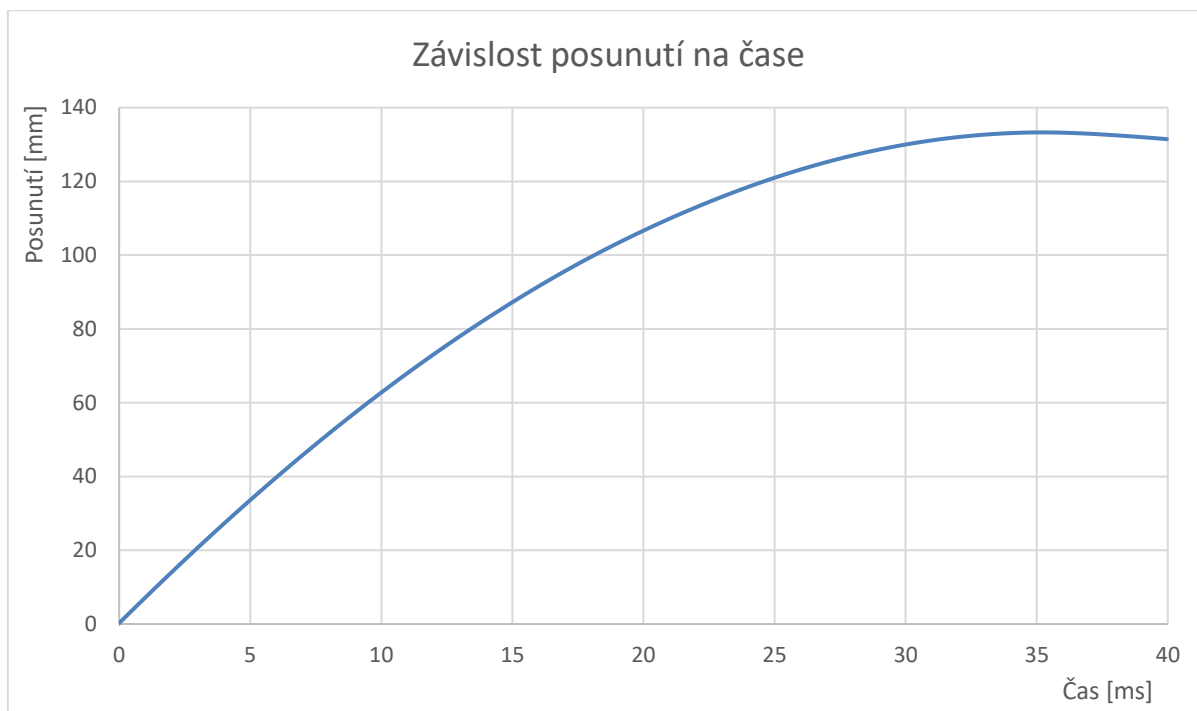
$$a_{teor} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{l_{min} + l_{rez}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{7^2}{0,1249 + 0,0101} = 181,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 18,5 \text{ g}$$

Ze změn parametrů je zřejmé, že nový kužel bude menší než původní. Pro potřebné pohlcení energie je tedy možné kužel odlaminovat z více vrstev uhlíkového kompozitu, nebo použít méně lamin, ale kužele čtyři. Tím, že má kužel menší podstavu, volím variantu čtyř kuželů kvůli lepší stabilitě.

Výsledky simulace ukazují, že maximální zpomalení jsou dosažena ke konci deformace a průměrné zpomalení činí 18,7 g. Absorpční kužel dokázal pohltit energii na délce 133 mm.



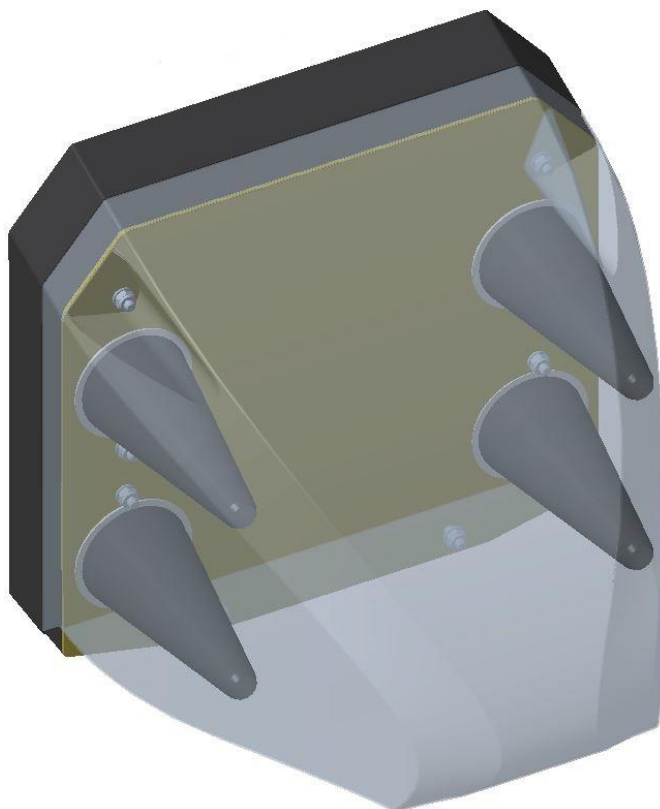
Graf 6 – Závislost zpomalení na čase



Graf 7 – Závislost posunutí na čase

### 6.1.2 POLOHA ŠROUBŮ

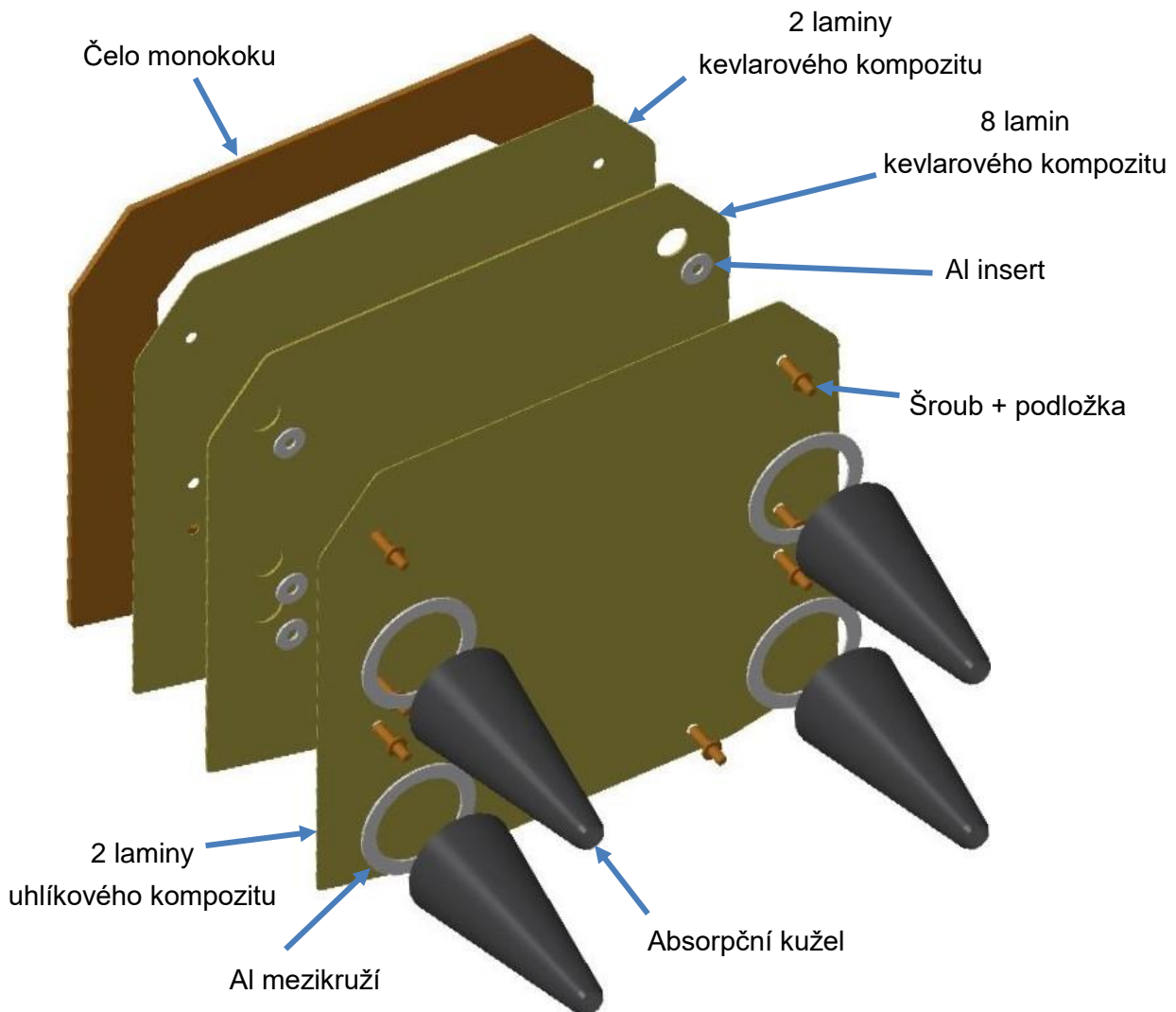
Velikost absorpčních kuželů je známa a zbývá určit polohu šroubů. V minulosti byly čtyři šrouby z celkových osmi použity pro upevnění pouze samotné protiprůrazové přepážky k monokoku a zbylými čtyřmi šrouby byl skrze přepážku připevněn i nos vozu společně s předním přítlačným křídlem. Toto řešení se pokusíme zachovat. Navíc horní dva šrouby se nacházejí na rozích monokoku a jejich poloha je tak pevně definována. Oproti tomu polohu spodních dvou šroubů pro připevnění nosu je možné mírně měnit ve vodorovném směru. Největší podíle na výsledné pevnosti přepážky mají čtyři šrouby schované podnosem, které mají možnost se nacházet v bezprostřední blízkosti absorpčních kuželů. Finální rozložení šroubů a absorpčních kuželů je naznačeno na obr. 53.



Obr. 53 – Poloha absorpčních kuželů a šroubů

### 6.1.3 PROTIPRŮRAZOVÁ PŘEPÁŽKA

Motivací pro modifikaci předchozího řešení, je úplné opuštění hliníkového plechu, který skoro svou dvounásobnou hustotou materiálu vytvářel většinový podíl hmotnosti protiprůrazové přepážky. U koncepcie nynějšího řešení vidíme, že síly jež jsou iniciovány absorpčními kužely, budou přenášeny z větší části přímo do těla monokoku. Působením na přepážku tak nebudou vytvářet skoro žádný ohybový moment. Skladbu proto volím pouze se zahrnutím vrstev aramidového kompozitu, a to o počtu celkem 12 lamin s tím, že z obou stran jsou dvě krajní vrstvy s menším průměrem děr. Roznesení reakčních sil tedy bude opět probíhat přes hliníkové inserty. Řešení s mezikružím pod absorpčními kužely zanecháme taktéž z minulých koncepcí, jelikož spodní dotyková plocha kuželů je relativně malá.



Obr. 54 – Skladba kevlarové přepážky

Potenciální hmotnost navržené kompozitní přepážky se zahrnutím hliníkových insertů a mezikruží je 762 gramů. Hmotnost všech čtyř kuželů je přibližně 250 gramů. Kompletní sestava tedy váží 1012 gramů.

$$m_{8AF} = \rho_{AF} \cdot S_{8AF} \cdot t_{8AF} = 1440 \cdot 0,158 \cdot 0,002 = 0,455 \text{ kg}$$

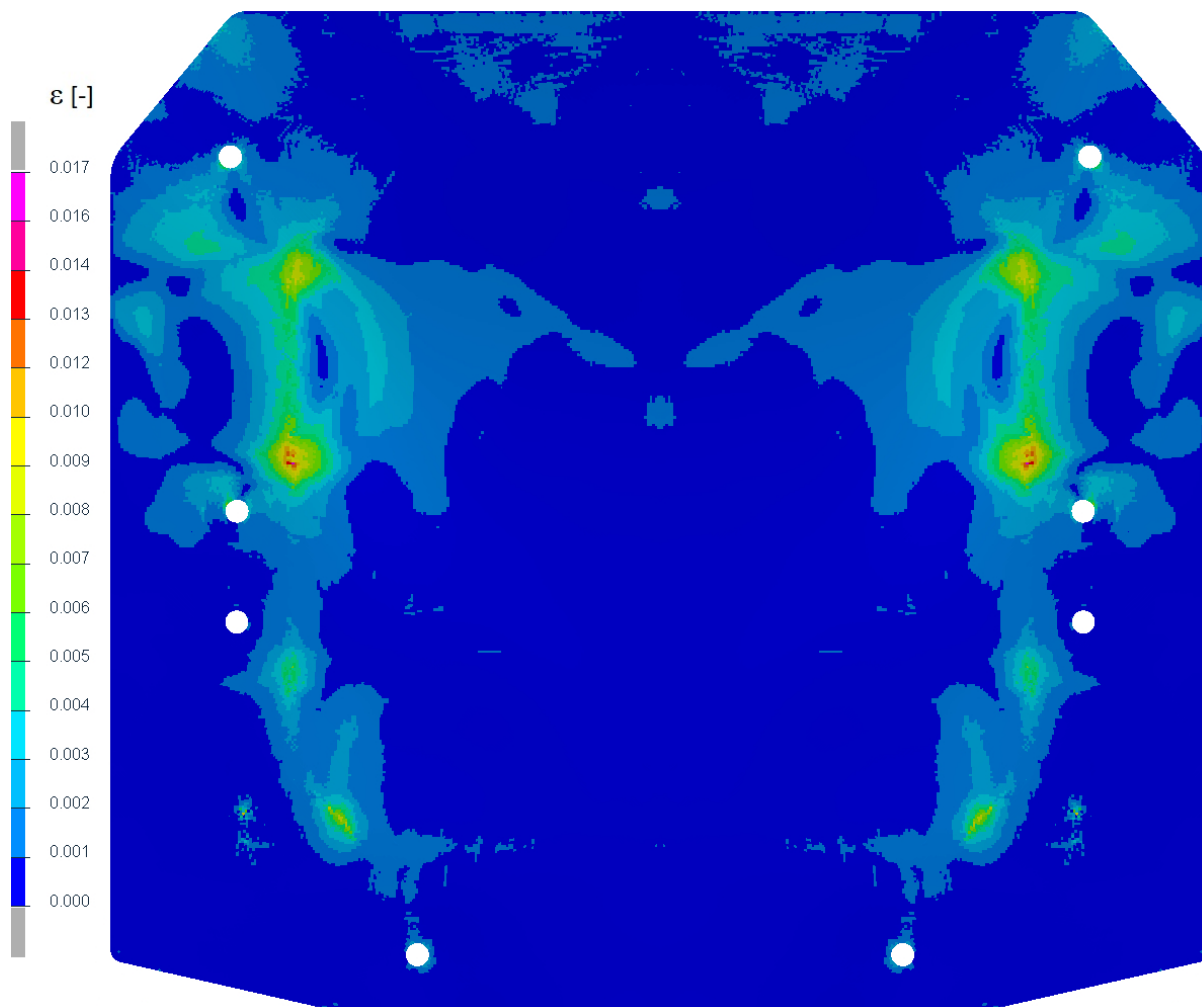
$$m_{ins} = \rho_{al} \cdot \frac{\pi}{4} (D_{ins}^2 - d_{ins}^2) \cdot t_{8AF} \cdot n = 2810 \cdot \frac{\pi}{4} (0,025^2 - 0,009^2) \cdot 0,002 \cdot 8 = 0,019 \text{ kg}$$

$$m_{4AF} = \rho_{AF} \cdot S_{2AF} \cdot t_{2AF} = 1440 \cdot 0,1615 \cdot 0,001 = 0,233 \text{ kg}$$

$$m_{mez} = \rho_{al} \cdot \frac{\pi}{4} (D_{mez}^2 - d_{mez}^2) \cdot t_{al} \cdot n = 2810 \cdot \frac{\pi}{4} (0,091^2 - 0,072^2) \cdot 0,002 \cdot 4 = 0,055 \text{ kg}$$

$$m_{celk} = \sum m = 0,455 + 0,019 + 0,233 + 0,055 = 0,762 \text{ kg}$$

Výsledky simulace naznačují příznivější průběh poměrného prodloužení oproti předešlým řešením. Přepážku více namáhají páry vrchních kuželů a to především u spodní vrstvy kevlarového kompozitu na hraně s čelem monokoku (obr. 55). Průběh zpomalení v závislosti na čase kompletní sestavy je dostupný v příloze 3.



Obr. 55 – Poměrné prodloužení spodní laminy

# ZÁVĚR

---

Hlavním cílem této práce bylo navržení kompozitní protiprůrazové přepážky pro vůz týmu CTU CarTech, účastníci se série soutěží Formula Student. Profit by spočíval v lepších dynamických vlastnostech, ale i vyšším hodnocení za inženýrský posun v konstrukci dílčích komponent. Po provedené rešerši pravidel soutěže, vplynuly dva způsoby, kterými se přepážka dala dimenzovat. Stručně je následně shrnuto, jakým způsobem se při nárazech vypořádávají osobní automobily, monoposty Formule 1 ale i konkurenční týmy Formula Student.

Další část práce je věnována problematice kompozitních materiálů, které jsou svými parametry vhodné pro redukci hmotnosti. Je probrána jak výztuž s detailnějším rozbohem aramidových vláken, tak matrice pojící tyto vláknové výztuhy. Podrobně je probrána následná problematika zpracování kompozitů vedoucí k vzniku výrobku.

Následuje již samotný návrh přepážky nejprve pomocí kvazistatických zkoušek. Tříbodovému ohybu, který je hlavním zátěžným stavem, byla nejdříve podrobena zkušební přepážka tvořená pouze vrstvami uhlíkového kompozitu. Hmotnost navržené přepážky byla ale příliš vysoká, přistoupilo se tedy k návrhu zkušební desky sendvičové konstrukce. Zde již hmotnost sestavy přepážky a standardního deformačního prvku dosáhla 100 gramové redukce oproti původnímu řešení. Předpoklad použití standardizovaného deformačního prvku by sebou ale nesl krok zpět v inženýrské hodnotě samotné formule, přistoupili jsme tedy k návrhu přepážky skrze nárazový test.

Zde jsme si nejprve určili okrajové podmínky, které nám odhalily možné varianty rozestavení absorpčních kuželů reprezentující deformační prvek. Práce dále popisuje způsob modelování v MKP programu PAM-CRASH, pomocí kterého simulujeme nárazovou zkoušku. Podrobena byla simulaci nejprve skladba přepážky tvořená pouze uhlíkovým kompozitem. Při této konfiguraci ale nebylo dosaženo zdárného výsledku. Další koncepcí byl uhlíkový kompozit podpořen hliníkovou deskou a mezikružními. Uhlíkový kompozit byl navíc zesílen hliníkovými inserty v oblasti šroubových spojení. Výsledky simulace byly již příznivé, kdy zatížením od nárazu přepážka až na malé trhliny vrchní laminy odolala. Dále byl vyzkoušen experiment se zahrnutím aramidového kompozitu ve skladbě přepážky. K tomu ale byla nutná kalibrace materiálové karty aramidu, k jejichž realizaci se podstoupily tahové zkoušky. Výsledky simulace s částečným zahrnutím aramidových vláken ale lepší výsledky nepřinesly.

Další část práce se poté věnuje samotné výrobě deformačního prvku a protiprůrazové přepážky, jejíž skladba byla numericky navržena. Realizovaná sestava byla následně připravena pro absolvování skutečné nárazové zkoušky, ve které následně úspěšně obstála.

Poslední část práce se věnuje modifikaci deformačního členu, který by výhodněji namáhal přepážku. Proporce absorpčních kuželů byly zmenšeny, aby jejich poloha mohla být blíže čelu monokoku. Z důvodu lepší stability byly navrženy čtyři kužele oproti dvěma původním. Přepážka poté mohla být složena pouze z aramidového kompozitu, jehož výsledná hmotnost činila přibližně 750 gramů. Úspora hmotnosti vztažená k původnímu řešení byla tedy 1050 gramů. Řešení s modifikovanými absorpčními kužely se ale v rámci soutěžního roku 2018 již nestihlo reálně otestovat nárazovou zkouškou a k realizaci na voze FS.10 tedy nedošlo.

K opětovné výrobě tedy bylo použito řešení protiprůrazové přepážky z kompozitu a hliníkových výztuží, aby se mohla stát součástí vozu FS.10. Hmotnostní úspora přepážky byla necelých 300 gramů.

# POUŽITÉ ZDROJE

---

- [1] CTU CarTech, [Online]. Dostupno z: <http://cartech.cvut.cz>.
- [2] GREEN TEAM, A short introduction, [Online].  
Dostupno z: <https://www.greenteam-stuttgart.de/en/formula-student>.
- [3] CTU CarTech, [Online]. Dostupno z: <https://www.facebook.com/ctucartech>.
- [4] FSG RULES, 2018, [Online]. Dostupno z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>.
- [5] GRAB CAD, Formula car full chassis, [Online]. Dostupno z: <https://grabcad.com/library/formula-car-full-chassis>.
- [6] BOSTIK INDUSTRIAL, Automotive body in white, [Online].  
Dostupno z: <http://bostik-industrial.com/tag/body-in-white>.
- [7] KOVANDA, Jan. Bezpečnostní aspekty návrhu dopravních prostředků, ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, 2016. ISBN 978-80-01-05893-0.
- [8] BEZPECNE CESTY, Karoserie, [Online]. Dostupno z:  
<https://www.bezpecnecesty.cz/cz/bezpecnost-automobilu/pasivni-prvky-bezpecnosti/karoserie>.
- [9] HUANG, Matthew. Vehicle crash mechanics, Boca Raton, Fla: CRC Press, 2002. ISBN 08-493-0104-1.
- [10] BROWNE, Eirik. Optimized carbon fiber energy absorber, Trondheim, 2016, [Online]. Dostupno z:  
[https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2404717/15862\\_FULLTEXT.pdf?sequence=1](https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2404717/15862_FULLTEXT.pdf?sequence=1).
- [11] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH, Úvod do studia materiálů, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [12] HAVEL COMPOSITES, Materiály při výrobě kompozitů, [Online]. Dostupno z: <http://www.havel-composites.com/clanky/0-74-Vseobecny-a-zakladny-popis-materialov-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitov.html>.
- [13] BRITANNICA, Man-made fibre, [Online].  
Dostupno z: <https://www.britannica.com/technology/man-made-fiber#toc82580>.
- [14] HERRAEZ, M., Strength and toughness of structural fibres for composite material reinforcement, [Online].  
Dostupno z: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/374/2071/20150274>.
- [15] WIKIPEDIA, Matrice vláknových kompozitů, 2017, [Online].  
Dostupno z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Matrice\\_vl%C3%A1knov%C3%BDch\\_kompozit%C5%AF](https://cs.wikipedia.org/wiki/Matrice_vl%C3%A1knov%C3%BDch_kompozit%C5%AF).
- [16] 5M, Kompozity a sendviče, [Online].  
Dostupno z: <https://www.5m.cz/produkty/epoxidove-pryskyrice/tekute-epoxidove-pryskyrice>.
- [17] TUCKER, Nick. a Kevin A. LINDSEY. An introduction to automotive composites, Shrewsbury, U.K.: Rapra Technology, 2002.
- [18] SAE INTERNATIONAL, 2015 - 2016 Formula SAE Standard Impact Attenuator, [Online].  
Dostupno z: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=193613e4-fff1-4ea9-97ec-eb1c07fbc3c0>.
- [19] PICKETT, Anthony. Model Calibration – Composite Global Ply Model 131 for Elastic, Damage and Failure. Stuttgart: 2012.
- [20] AUTOVIVA, [Online].  
Dostupno z: [http://autoviva.sapo.pt/news/sauber\\_comemora\\_popularidade\\_de\\_video\\_com\\_imagens\\_/5224](http://autoviva.sapo.pt/news/sauber_comemora_popularidade_de_video_com_imagens_/5224).



# SEZNAM OBRÁZKŮ

---

Obr. 1 – Současná přepážka ze slitiny hliníku.....	9
Obr. 2 – Soutěž FS Německo [2] .....	10
Obr. 3 – Vůz FS.10 [3] .....	11
Obr. 4 – Prostorový ocelový rám formulového vozu [5].....	14
Obr. 5 – Struktura nosné karoserie [6] .....	16
Obr. 6 – Podélné a boční zatížení karoserie [8] .....	17
Obr. 7 – Struktura přední části vozu F1 [10].....	18
Obr. 8 – Protiprůrazová přepážka týmu NTNU [10].....	19
Obr. 9 – Deformační prvek týmu NTNU [10] .....	19
Obr. 10 – Synergický průběh kompozitních materiálů [11] .....	20
Obr. 11 – Poruchy kompozitních materiálů [11].....	21
Obr. 12 – Plátňová a keprová vazba [12] .....	22
Obr. 13 – Kevlarová výztuž v keprové vazbě [14] .....	23
Obr. 14 – Elastické vlastnosti vláken [15].....	23
Obr. 15 – Epoxidová pryskyřice [17] .....	24
Obr. 16 – Zpracování kompozitů vakuovacím způsobem.....	25
Obr. 17 – Tříbodový ohyb .....	28
Obr. 18 – Obvodový střih .....	28
Obr. 19 – Konfigurace tříbodového ohybu.....	28
Obr. 20 – Průběh ohybového momentu .....	29
Obr. 21 – Sendvičová přepážka.....	30
Obr. 22 – Standardní deformační prvek [19] .....	32
Obr. 23 – Konfigurace nárazového testu.....	32
Obr. 24 – Absorpční kužele.....	33
Obr. 25 – Model v PAM-CRASH .....	35
Obr. 26 – Poloha kuželů varianta 1.....	35
Obr. 27 – Poloha kuželů varianta 2 .....	35
Obr. 28 – Strom kroků.....	36
Obr. 29 – Karta dílu .....	37
Obr. 30 – Karta materiálu.....	38
Obr. 31 – Materiál vrstev.....	39
Obr. 32 – Poměrné prodloužení 24 lamin – spodní vrstva.....	40
Obr. 33 – Skladba přepážky v simulačním modelu .....	42

Obr. 34 – Průběh napětí na hliníkové desce .....	43
Obr. 35 – Průběh poměrného prodloužení vrchní laminy .....	44
Obr. 36 – Okrajové podmínky jednoduchého elementu [20].....	45
Obr. 37 – Zkušební vzorek 0/90° .....	46
Obr. 38 – Trhací stroj s extenzometrem .....	47
Obr. 39 – Zkušební vzorek $\pm 45^\circ$ .....	48
Obr. 40 – Skladba přepážky s kevlarovým kompozitem .....	52
Obr. 41 – Průběh napětí na hliníkové desce (verze 2) .....	53
Obr. 42 – Průběh poměrného prodloužení vrchní laminy (verze 2) .....	54
Obr. 43 – Deska ze slitiny hliníku .....	55
Obr. 44 – Hliníkové inserty.....	56
Obr. 45 – Vrchní povrch kompozitové desky .....	57
Obr. 46 – Spodní povrch kompozitové desky .....	57
Obr. 47 – Zdrsněný povrch hliníkové desky .....	57
Obr. 48 – Vrstva lepidla na hliníkové desce .....	58
Obr. 49 – Hotová sestava absorpčních kuželů a protipřerazové přepážky .....	58
Obr. 50 – Přední struktura připravena na nárazový test.....	59
Obr. 51 – Schéma padostroje .....	61
Obr. 52 – Deformační prvek po nárazové zkoušce .....	62
Obr. 53 – Poloha absorpčních kuželů a šroubů.....	66
Obr. 54 – Skladba kevlarové přepážky .....	67
Obr. 55 – Poměrné prodloužení spodní laminy .....	68

# SEZNAM GRAFŮ

---

Graf 1 – Tahový diagram aramidového kompozitu 0/90° .....	47
Graf 2 – Smykový diagram aramidového kompozitu $\pm 45^\circ$ .....	48
Graf 3 – Diagram cyklické zkoušky na vzorku $\pm 45^\circ$ .....	49
Graf 4 – Závislost akumulované deformační energie .....	50
Graf 5 – Závislost parametrů $R_i$ a $P_j$ .....	51
Graf 6 – Závislost zpomalení na čase .....	64
Graf 7 – Závislost posunutí na čase.....	65

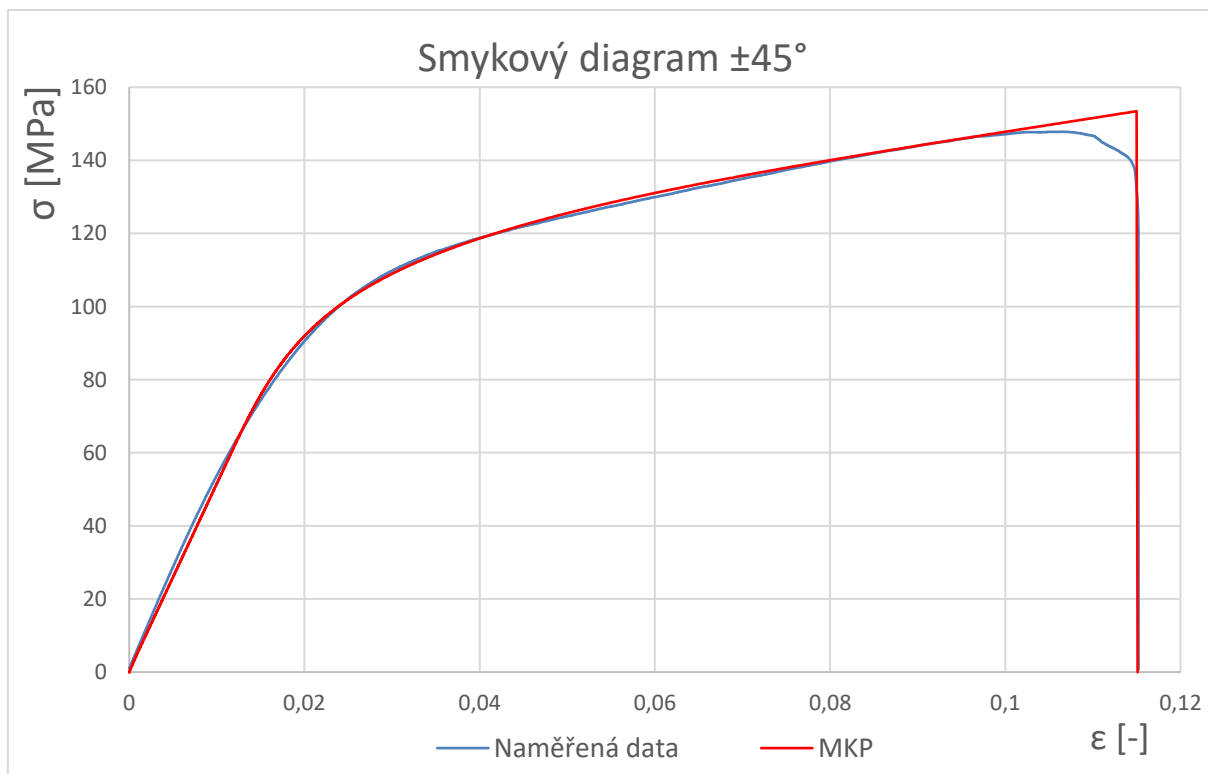
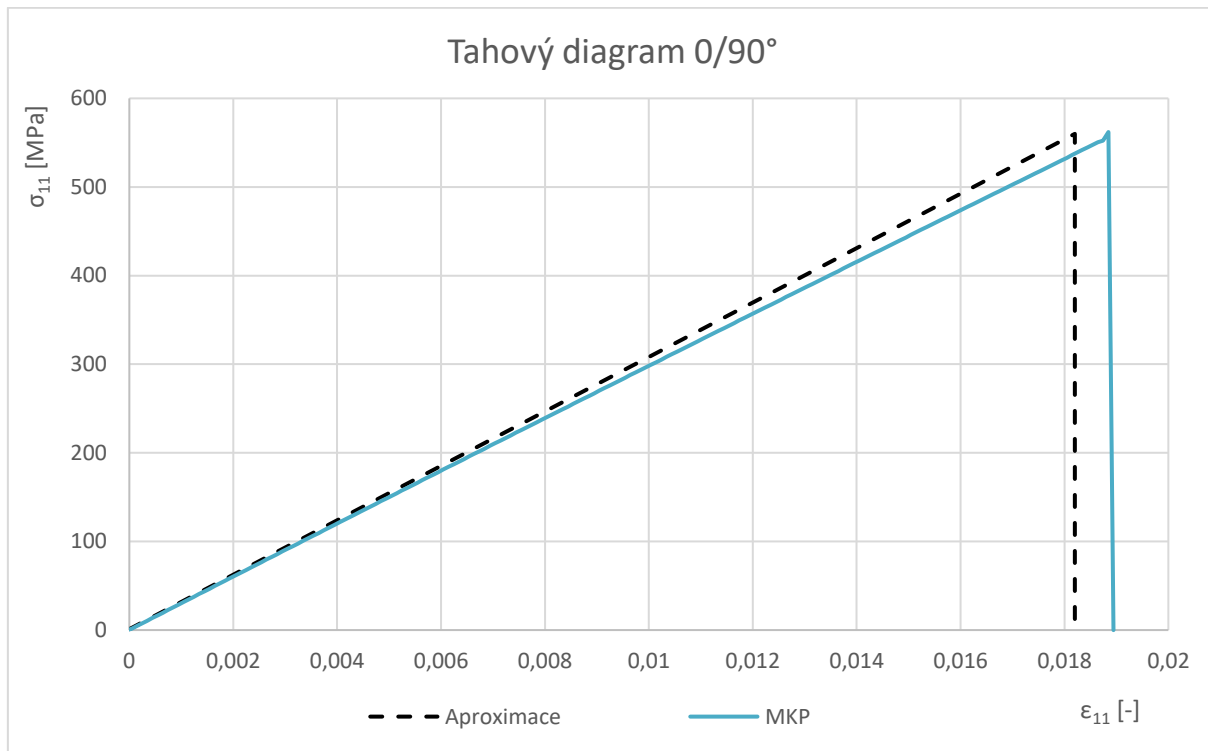
# SEZNAM PŘÍLOH

---

Příloha 1	Porovnání výsledků z reálných tahových zkoušek a příslušných numerických simulací
Příloha 2	Průběh nárazové síly v simulačního výpočtu protiprůrazové přepážky, tvořené hliníkovým plechem a uhlíkovým kompozitem
Příloha 3	Porovnání průběhů zpomalení navrženého menšího absorpčního kužele a celé sestavy s protiprůrazovou přepážkou
Příloha 4	Výkres 01_2018; Čelo monokoku
Příloha 5	Výkres 02_2018; Absorpční kužel, mezikruží a insert
Příloha 6	Výkres 03_2018; Protiprůrazová přepážka
Příloha 7	Výkres 04_2018; Absorpční kužele a protiprůrazová přepážka
Příloha 8	Výkres 05_2018; Deformační prvek
Příloha 9	Výkres 11_2018; Absorpční kužel, mezikruží a insert
Příloha 10	Výkres 12_2018; Protiprůrazová přepážka
Příloha 11	Výkres 13_2018; Absorpční kužele a protiprůrazová přepážka
Příloha 12	Výkres 14_2018; Deformační prvek

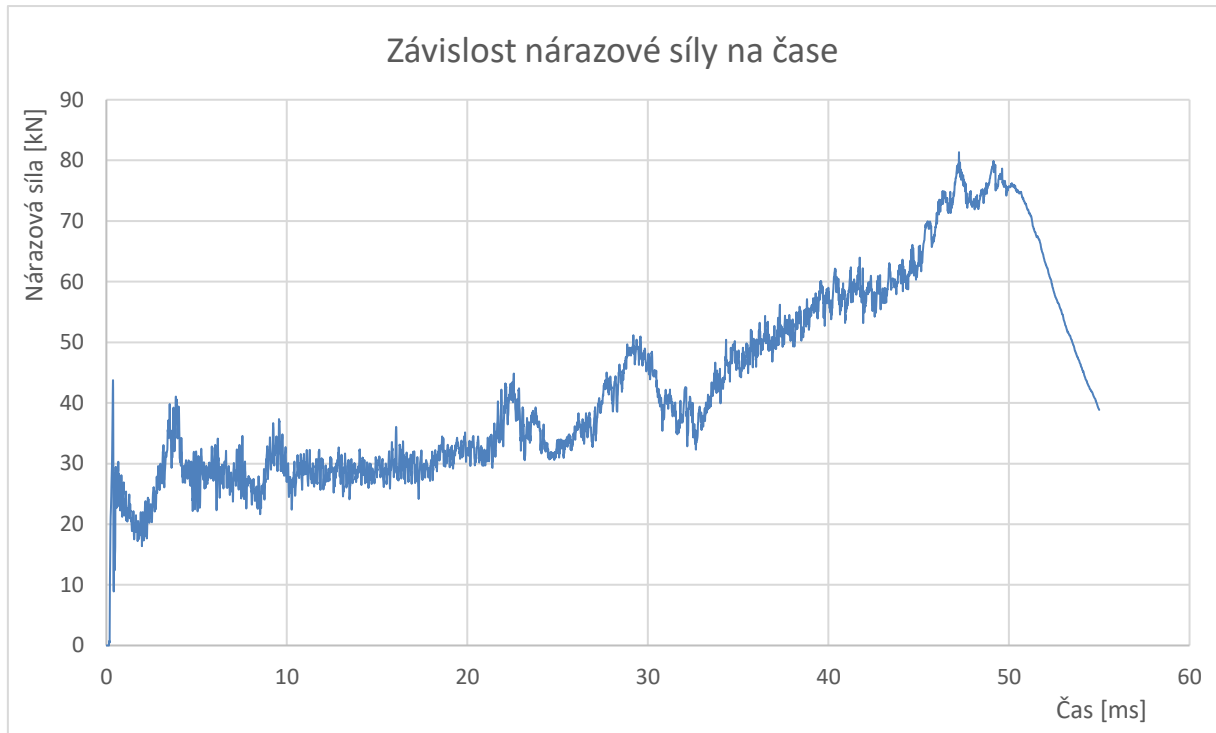
## Příloha 1

Porovnání výsledků z reálných tahových zkoušek a příslušných numerických simulací



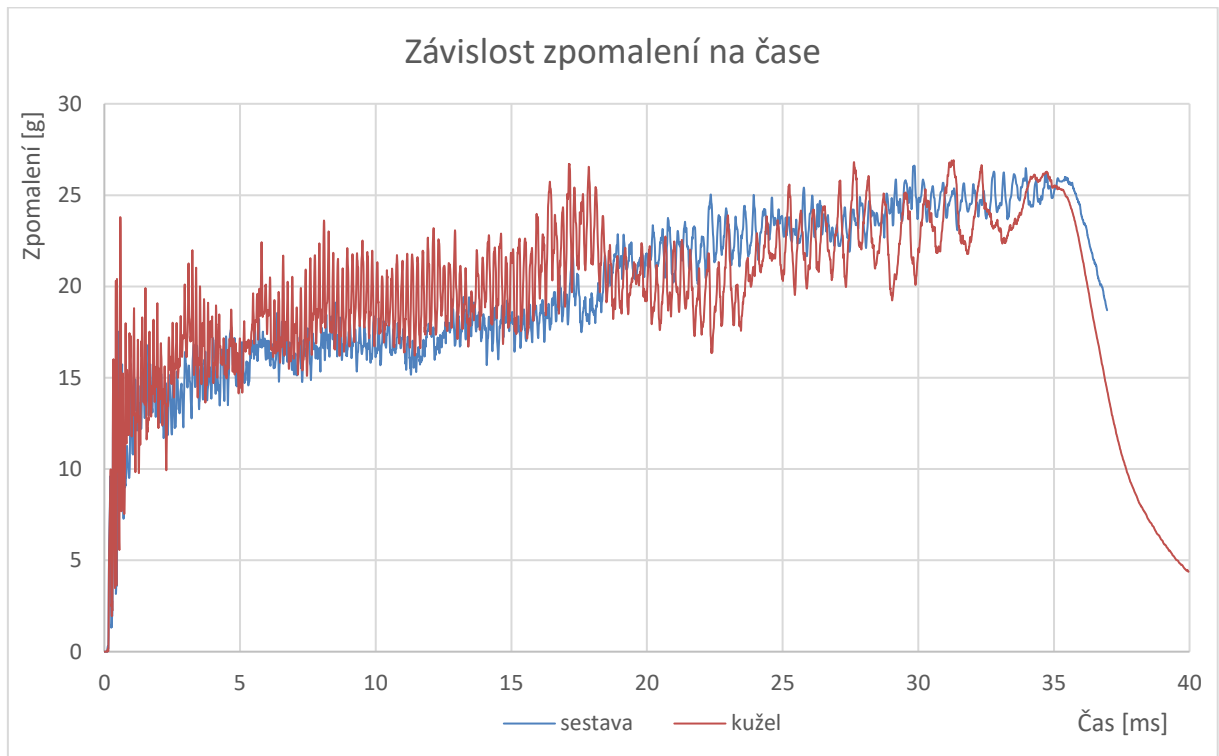
## Příloha 2

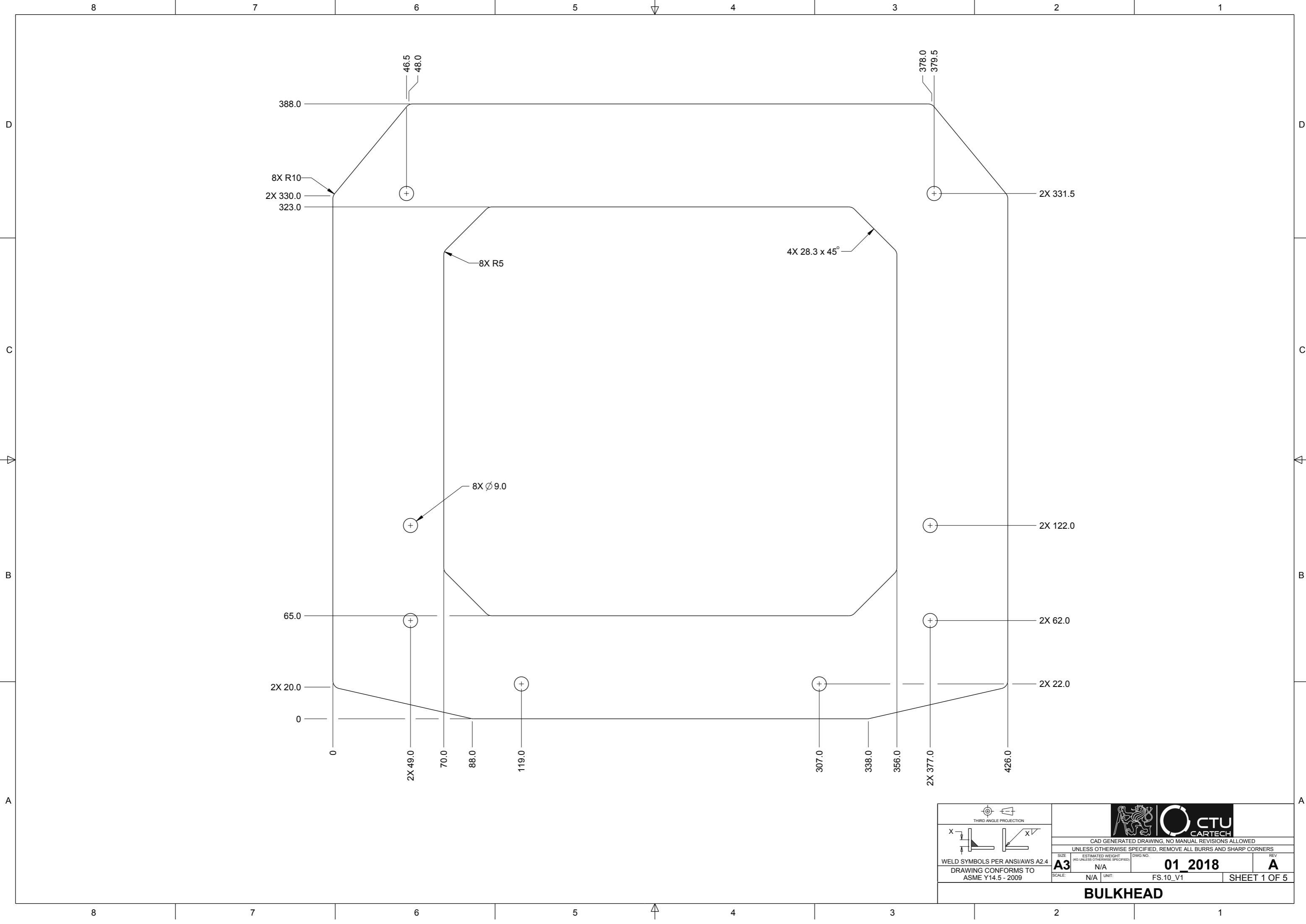
Průběh nárazové síly v simulačního výpočtu protiprůrazové přepážky, tvořené hliníkovým plechem a uhlíkovým kompozitem



### Příloha 3

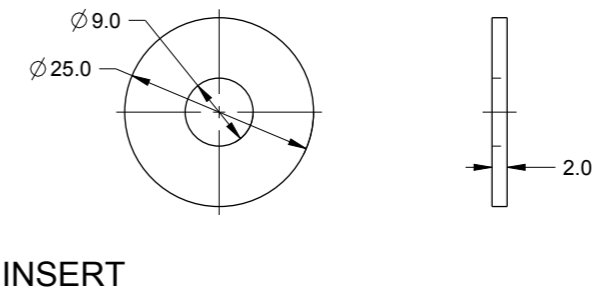
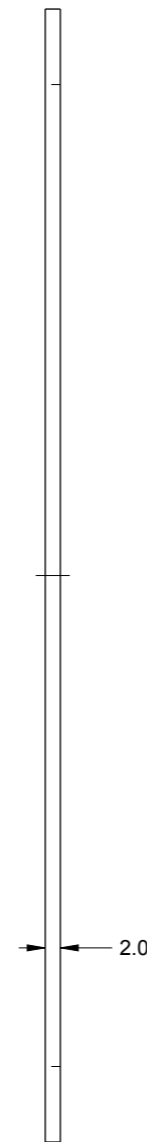
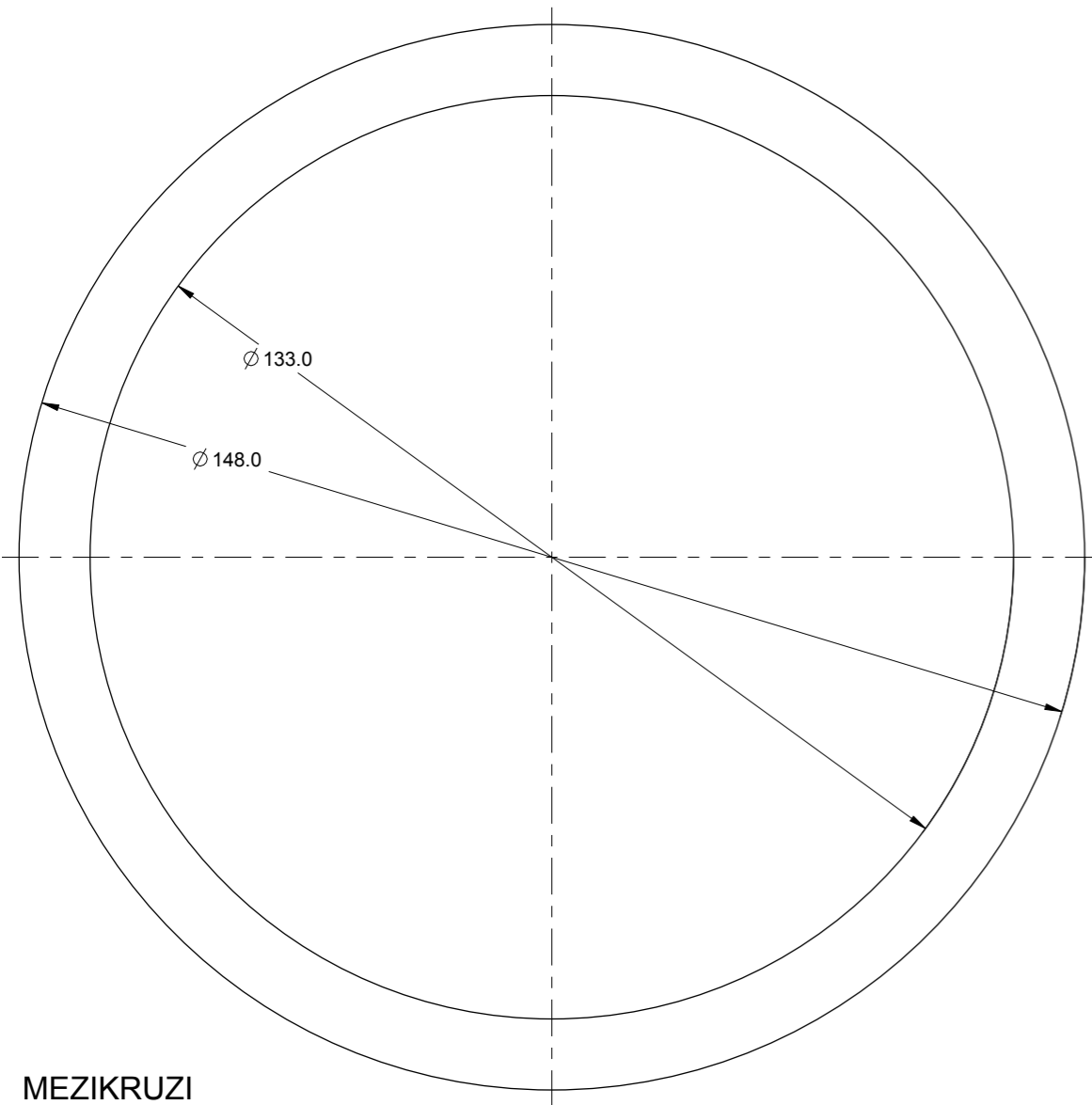
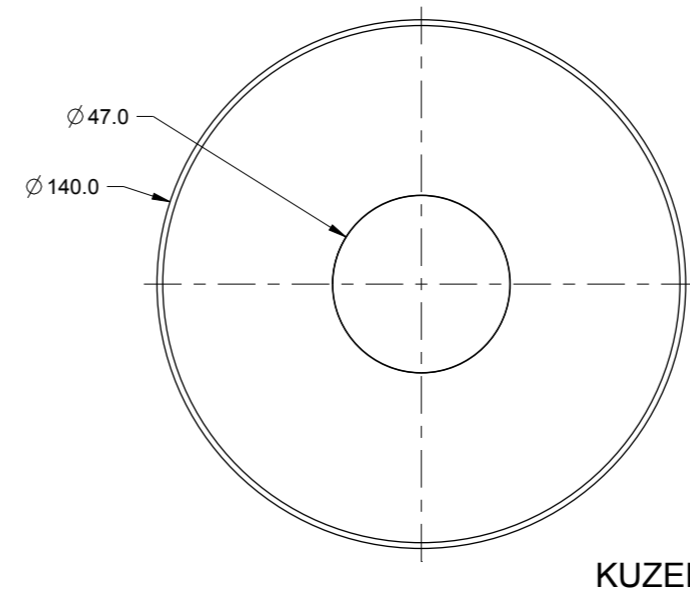
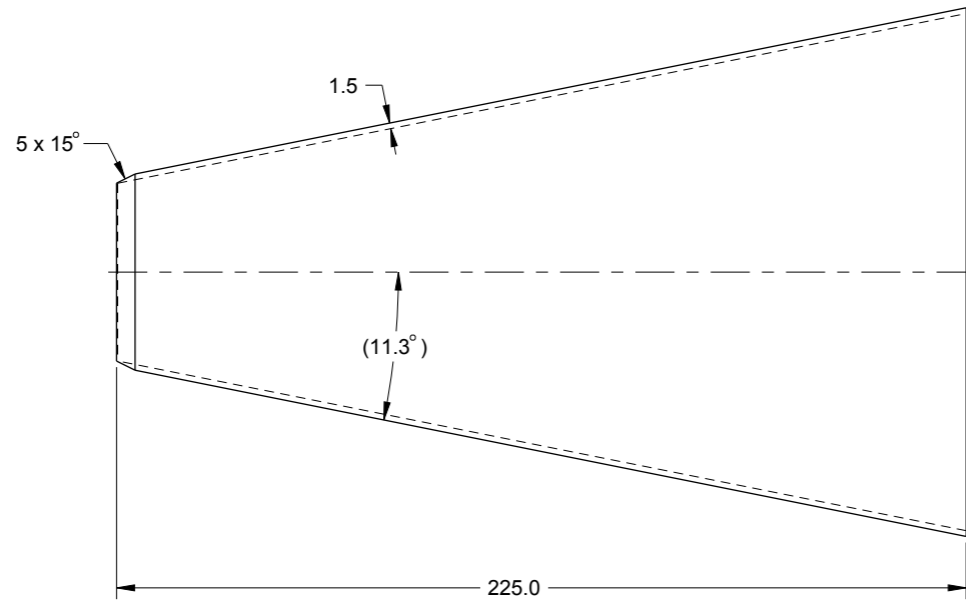
Porovnání průběhů zpomalení navrženého menšího absorpčního kužele a celé sestavy s protiprůrazovou přepážkou





<p>THIRD ANGLE PROJECTION</p>			
<p>CAD GENERATED DRAWING, NO MANUAL REVISIONS ALLOWED</p>			
<p>UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, REMOVE ALL BURRS AND SHARP CORNERS</p>			
<p>WELD SYMBOLS PER ANSII/AWS A2.4</p>	<p>SIZE: <b>A3</b></p>	<p>ESTIMATED WEIGHT: N/A</p>	<p>DWG NO: <b>01_2018</b></p>
<p>DRAWING CONFORMS TO ASME Y14.5 - 2009</p>	<p>SCALE: N/A</p>	<p>UNIT: FS.10_V1</p>	<p>REV: <b>A</b></p>
<p><b>BULKHEAD</b></p>			
		<p>SHEET 1 OF 5</p>	



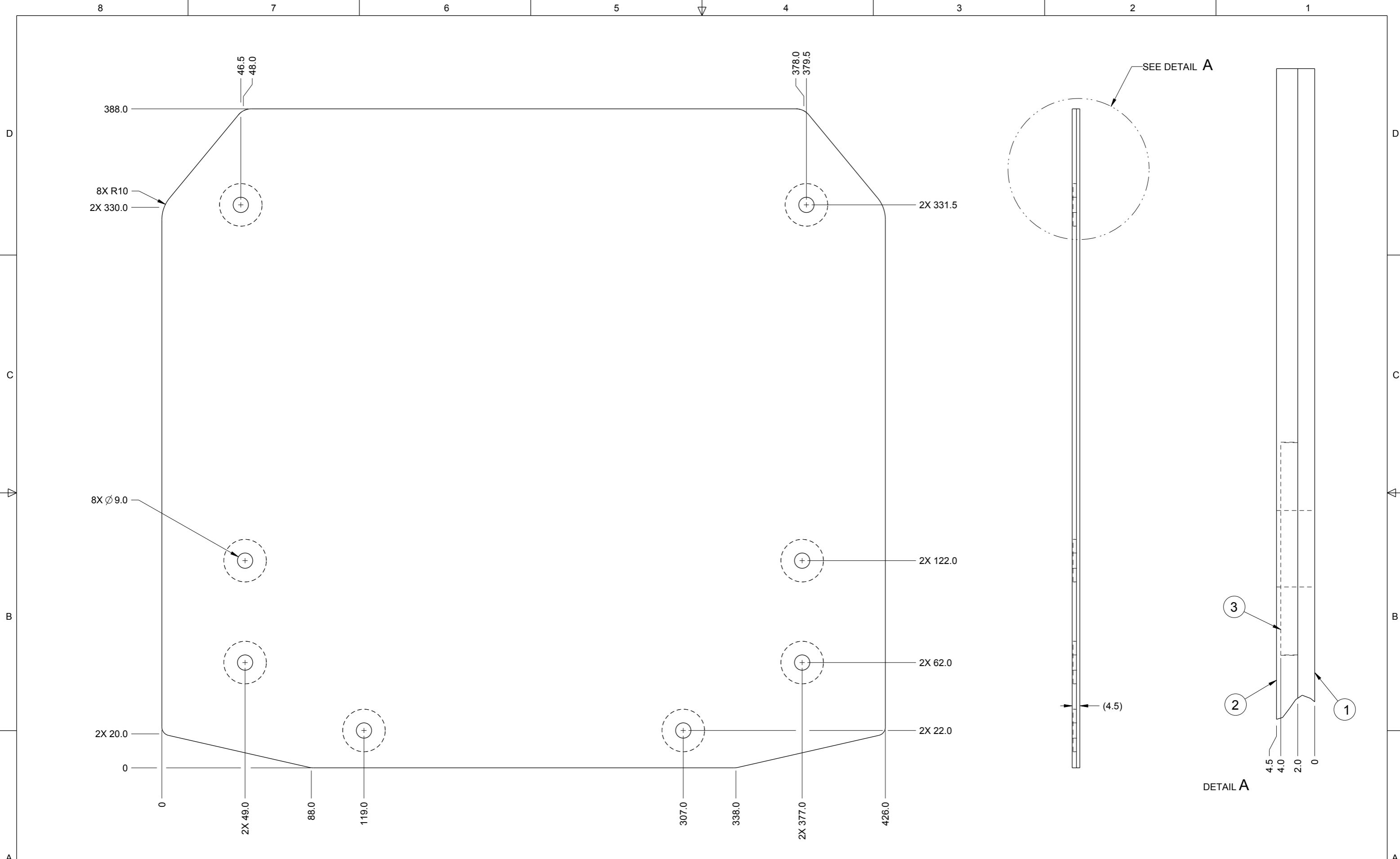


MEZIKRUZI

KUZEL

INSERT

 THIRD ANGLE PROJECTION		 CAD GENERATED DRAWING, NO MANUAL REVISIONS ALLOWED	
WELD SYMBOLS PER ANSI/AWS A2.4 DRAWING CONFORMS TO ASME Y14.5 - 2009		SIZE: <b>A3</b> <small>(NO UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)</small>	ESTIMATED WEIGHT: N/A DWG NO.: <b>02_2018</b> SCALE: N/A UNIT: FS.10_V1
		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, REMOVE ALL BURRS AND SHARP CORNERS	REV: <b>A</b> SHEET 2 OF 5
<b>KUZEL &amp; MEZIKRUZI &amp; INSERT</b>			



Položka	Název	Číslo výkresu	Množství
1	Hliníková deska	-	1
2	Kompozitová deska	-	1
3	Insert	02_2018	8

THIRD ANGLE PROJECTION

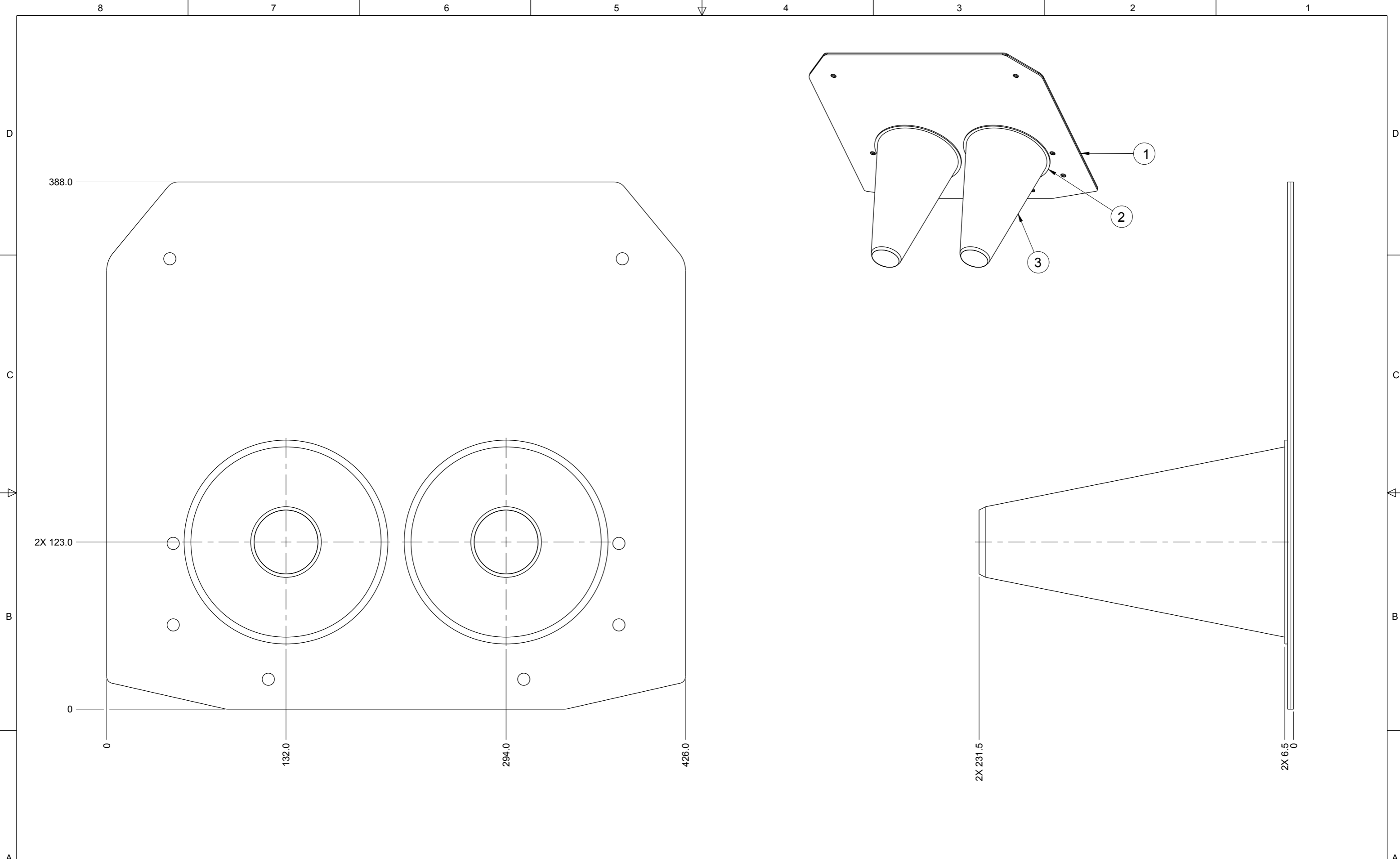
WELD SYMBOLS PER ANSIAAWS A2.4  
DRAWING CONFORMS TO ASME Y14.5 - 2009

CTU  
CARTECH

CAD GENERATED DRAWING, NO MANUAL REVISIONS ALLOWED  
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, REMOVE ALL BURRS AND SHARP CORNERS

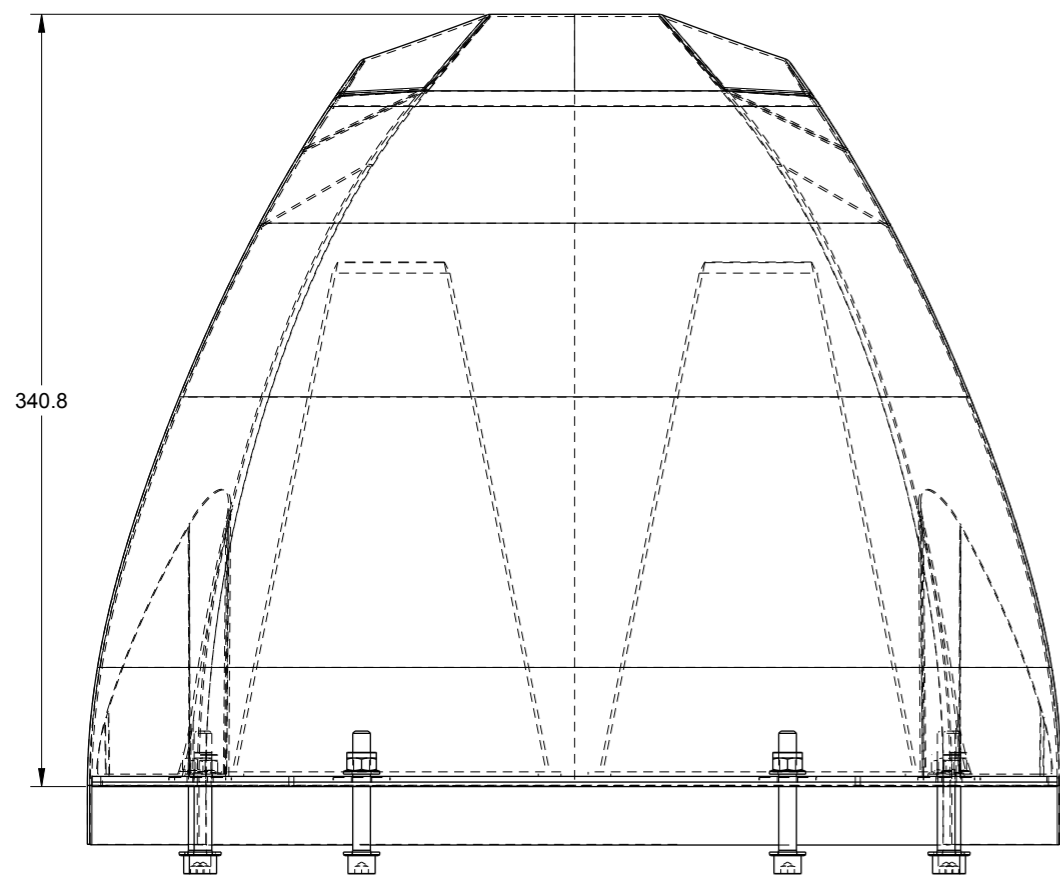
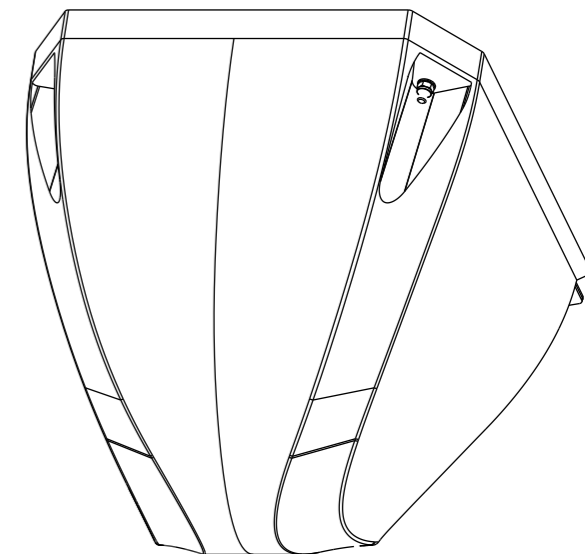
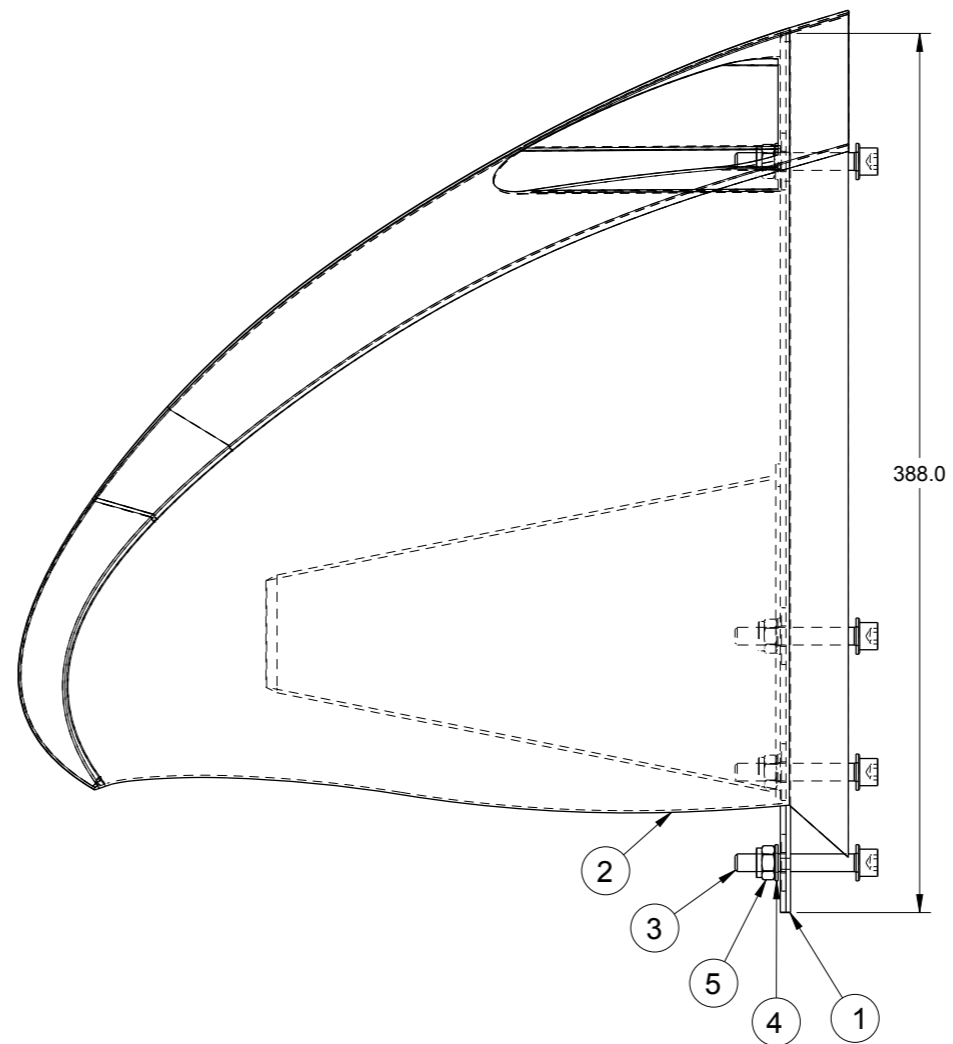
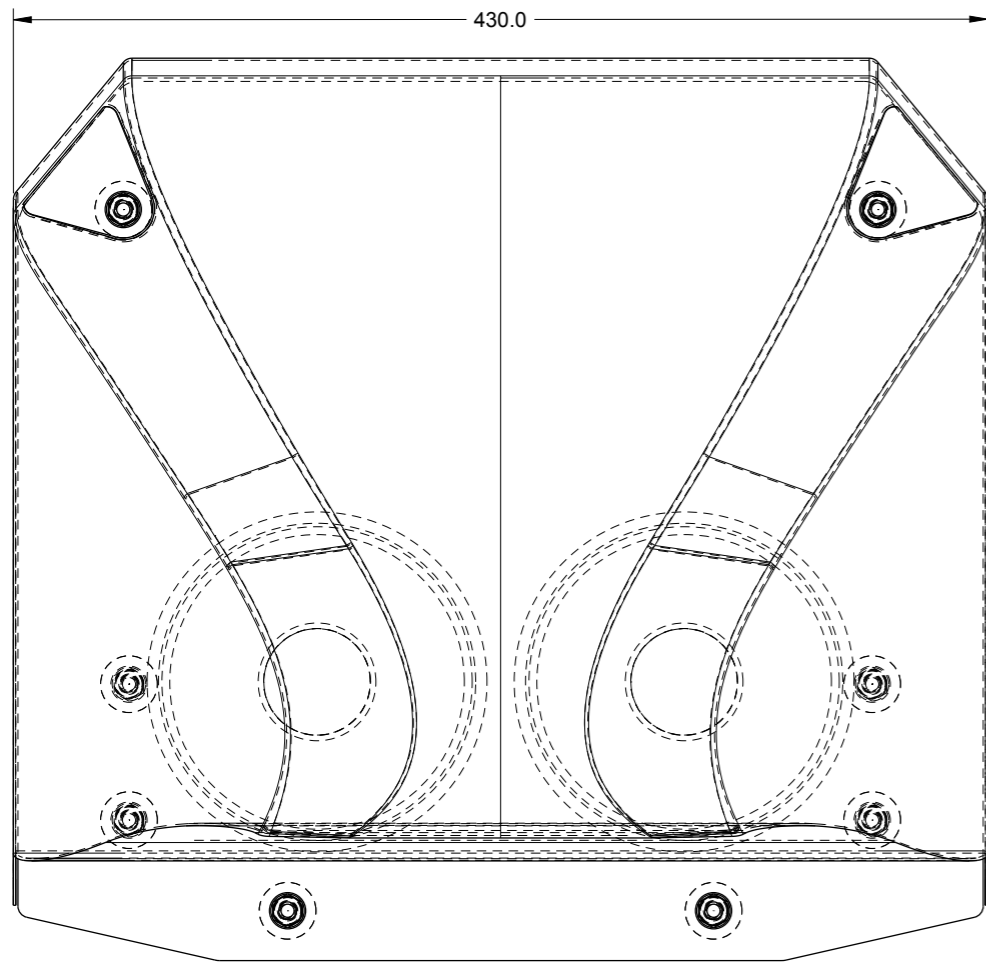
SIZE: A3	ESTIMATED WEIGHT: N/A	DWG NO.: 03_2018	REV: A
SCALE: N/A	UNIT: N/A	FS.10_V1	SHEET 3 OF 5

**PROTIPRURAZOVA PREPAZKA**



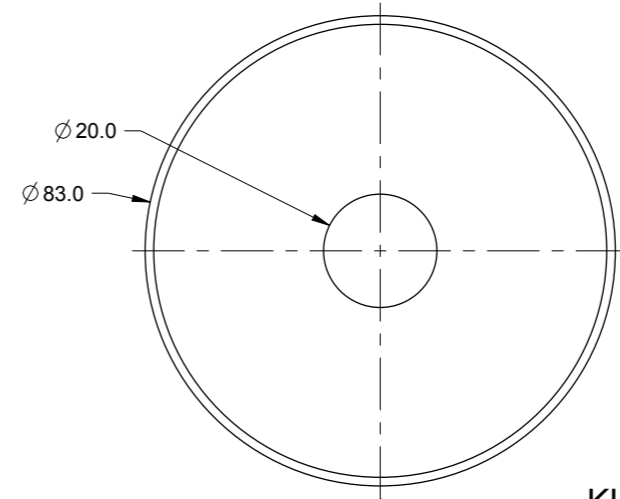
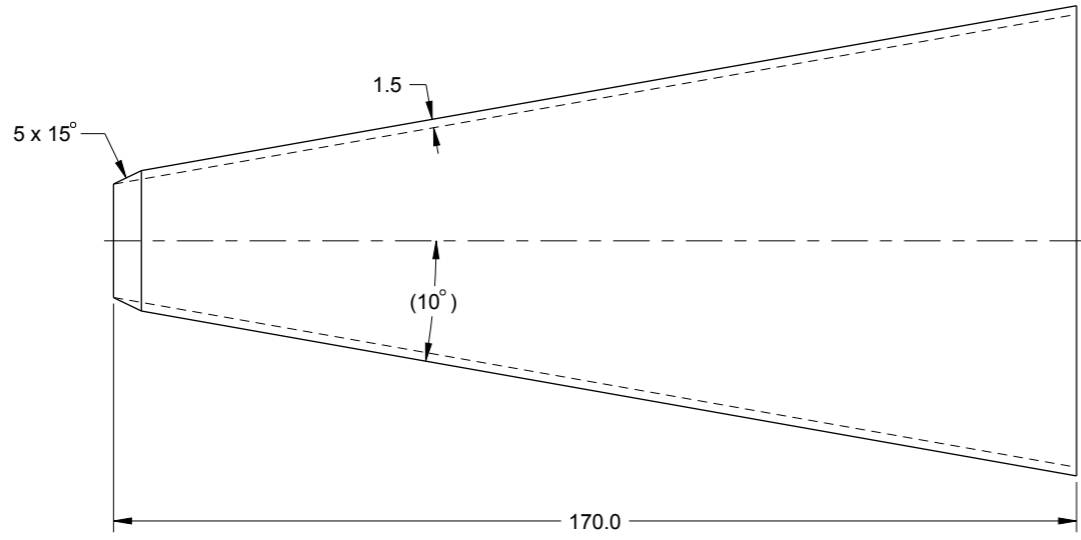
Položka	Název	Číslo výkresu	Množství
1	Protiprůrazová přepážka	03_2018	1
2	Mezikruží	02_2018	2
3	Absorpční kužel	02_2018	2

<small>CAD GENERATED DRAWING, NO MANUAL REVISIONS ALLOWED</small>			
<small>UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, REMOVE ALL BURRS AND SHARP CORNERS</small>			
<small>WELD SYMBOLS PER ANSI/AWS A2.4</small> <small>DRAWING CONFORMS TO ASME Y14.5 - 2009</small>	<small>SIZE: (NO UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)</small> <b>A3</b>	<small>ESTIMATED WEIGHT:</small> N/A	<small>DWG NO.:</small> <b>04_2018</b>
<small>SCALE:</small> N/A	<small>UNIT:</small> FS.10_V1	<small>REV:</small> <b>A</b>	<small>SHEET 4 OF 5</small>
<b>ABSORPCNI KUZELE &amp; PROTIPRURAZOVA PREPAZKA</b>			

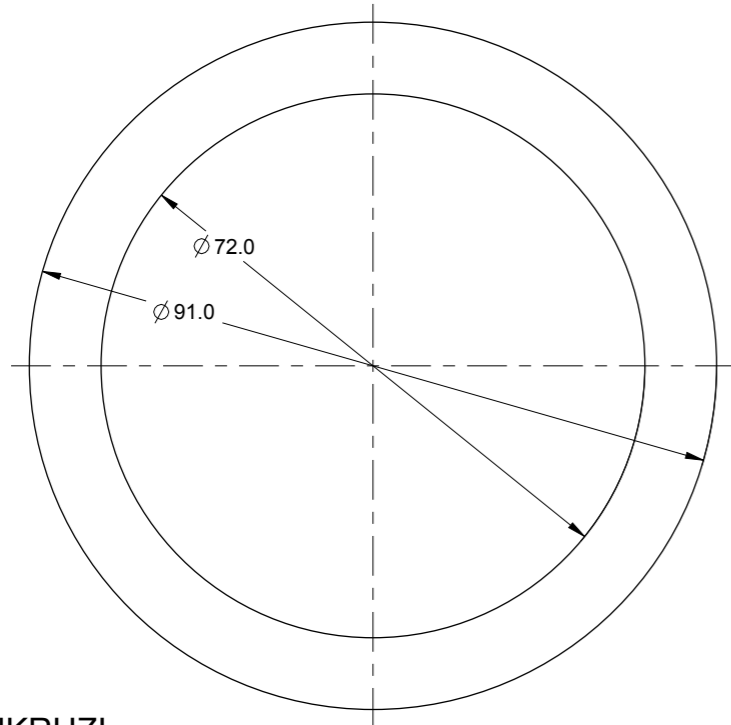


Položka	Název	Číslo výkresu	Množství
1	Kužele & Protiprůrazová přepážka	04_2018	1
2	Nos	-	1
3	Šroub M8 x 50	-	8
4	Podložka 8.4	-	16
5	Matice M8	-	8

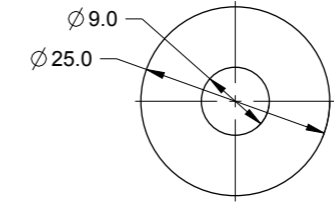
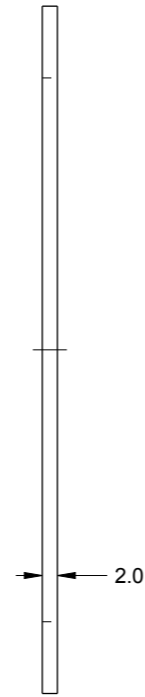
THIRD ANGLE PROJECTION			
CAD GENERATED DRAWING, NO MANUAL REVISIONS ALLOWED			
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, REMOVE ALL BURRS AND SHARP CORNERS			
WELD SYMBOLS PER ANSI/AWS A2.4	SIZE: <b>A3</b>	ESTIMATED WEIGHT: N/A	DWG NO. <b>05_2018</b>
DRAWING CONFORMS TO ASME Y14.5 - 2009	SCALE: N/A	UNIT: FS.10_V1	REV <b>A</b>
<b>DEFORMACNI PRVEK</b>			
		SHEET 5 OF 5	



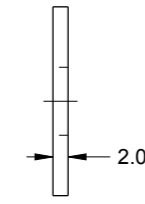
KUZEL



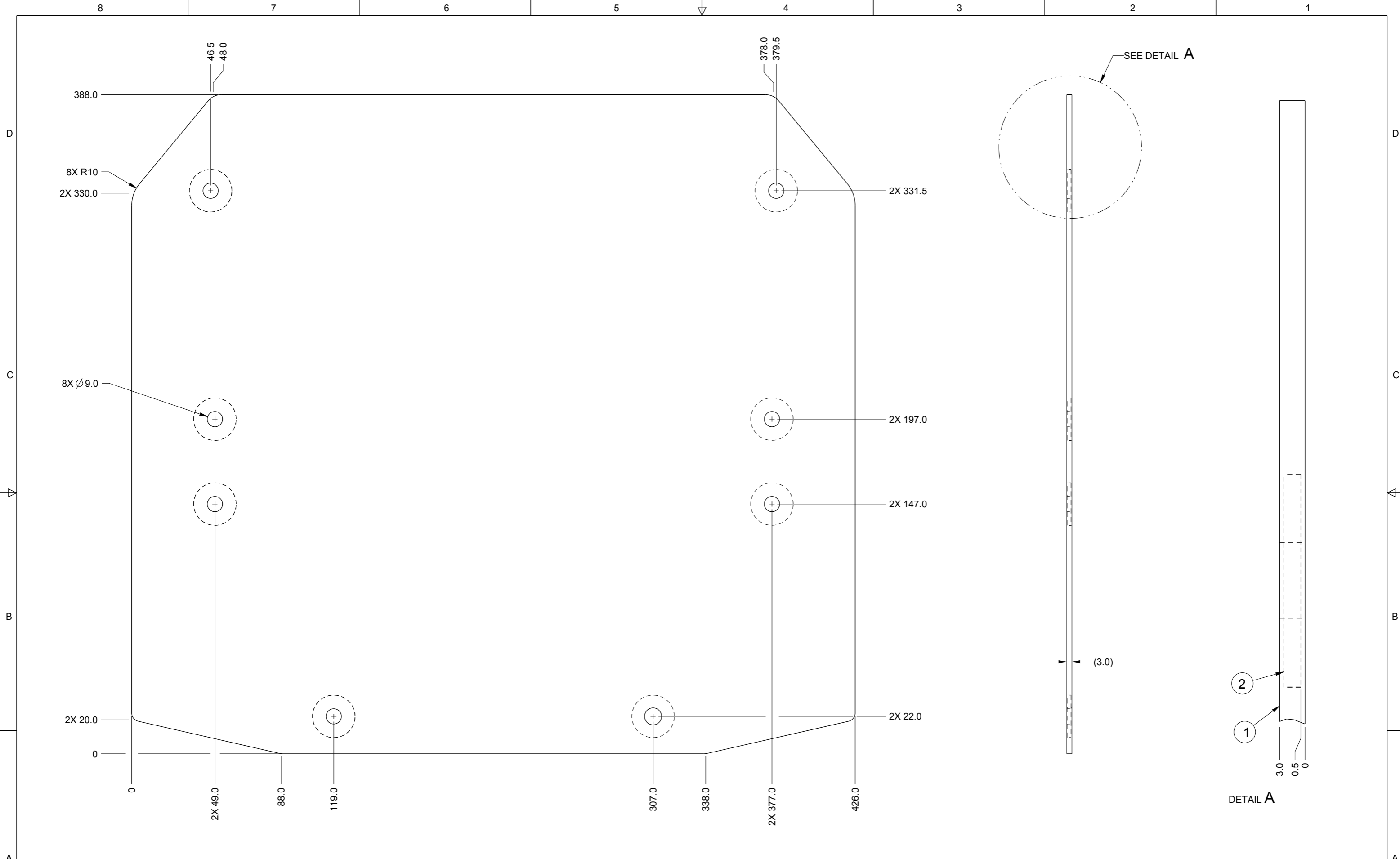
MEZIKRUZI



INSERT

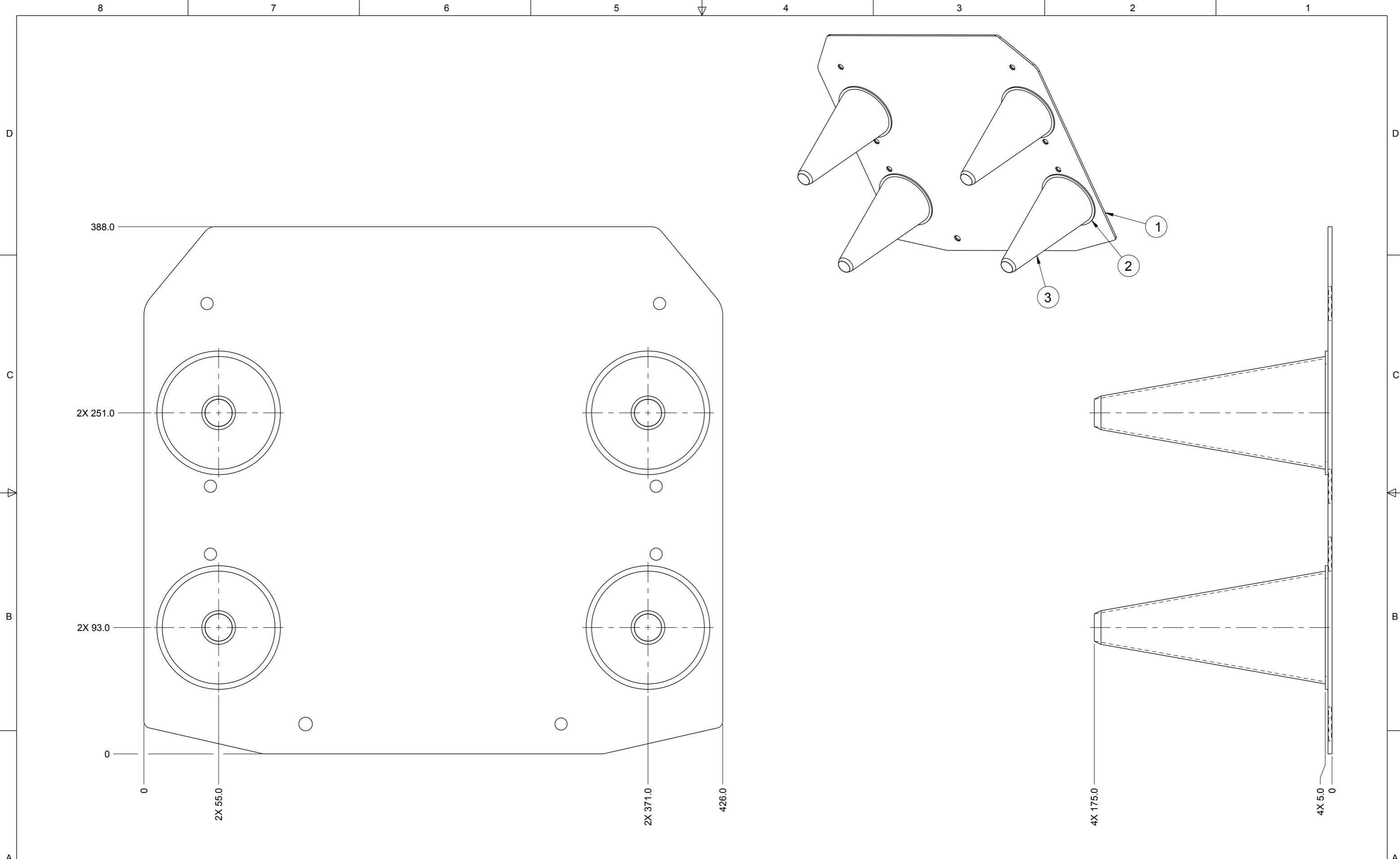


CAD GENERATED DRAWING, NO MANUAL REVISIONS ALLOWED			
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, REMOVE ALL BURRS AND SHARP CORNERS			
WELD SYMBOLS PER ANSI/AWS A2.4 DRAWING CONFORMS TO ASME Y14.5 - 2009	SIZE: <b>A3</b> <small>(NO UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)</small>	ESTIMATED WEIGHT: N/A DWG NO.: <b>11_2018</b>	REV: <b>A</b>
SCALE: N/A	UNIT: FS.10_V2	SHEET 1 OF 4	
<b>KUZEL &amp; MEZIKRUZI &amp; INSERT</b>			



Položka	Název	Číslo výkresu	Množství
1	Kompozitová deska	-	1
2	Insert	11_2018	8

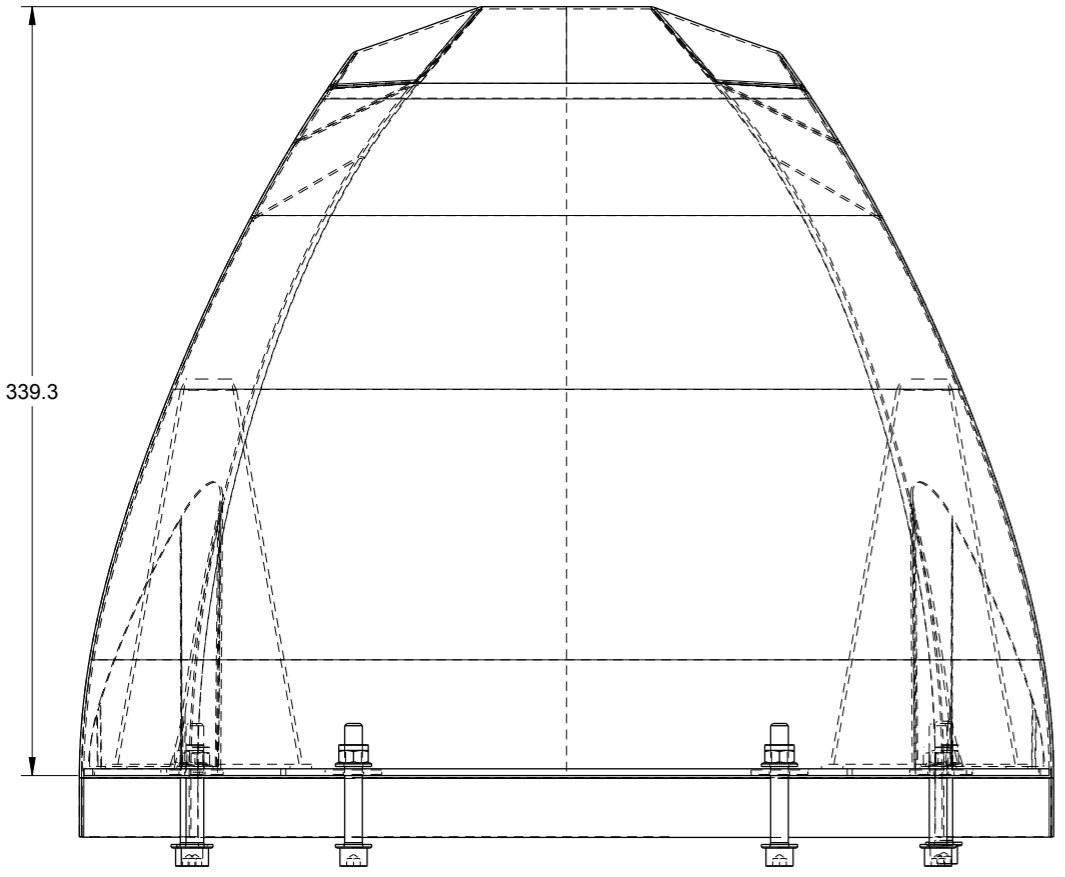
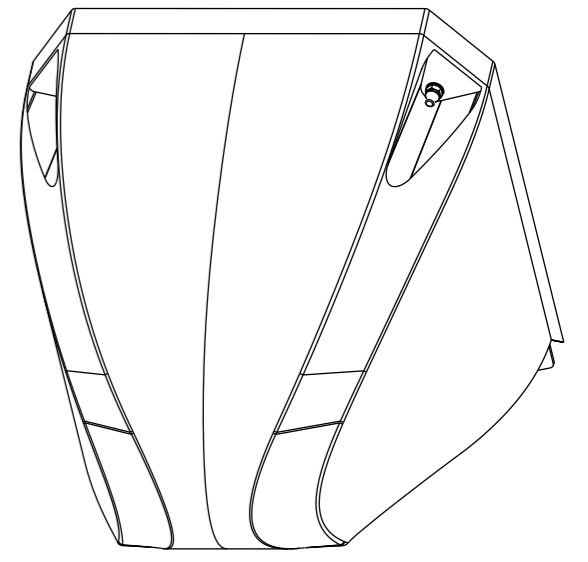
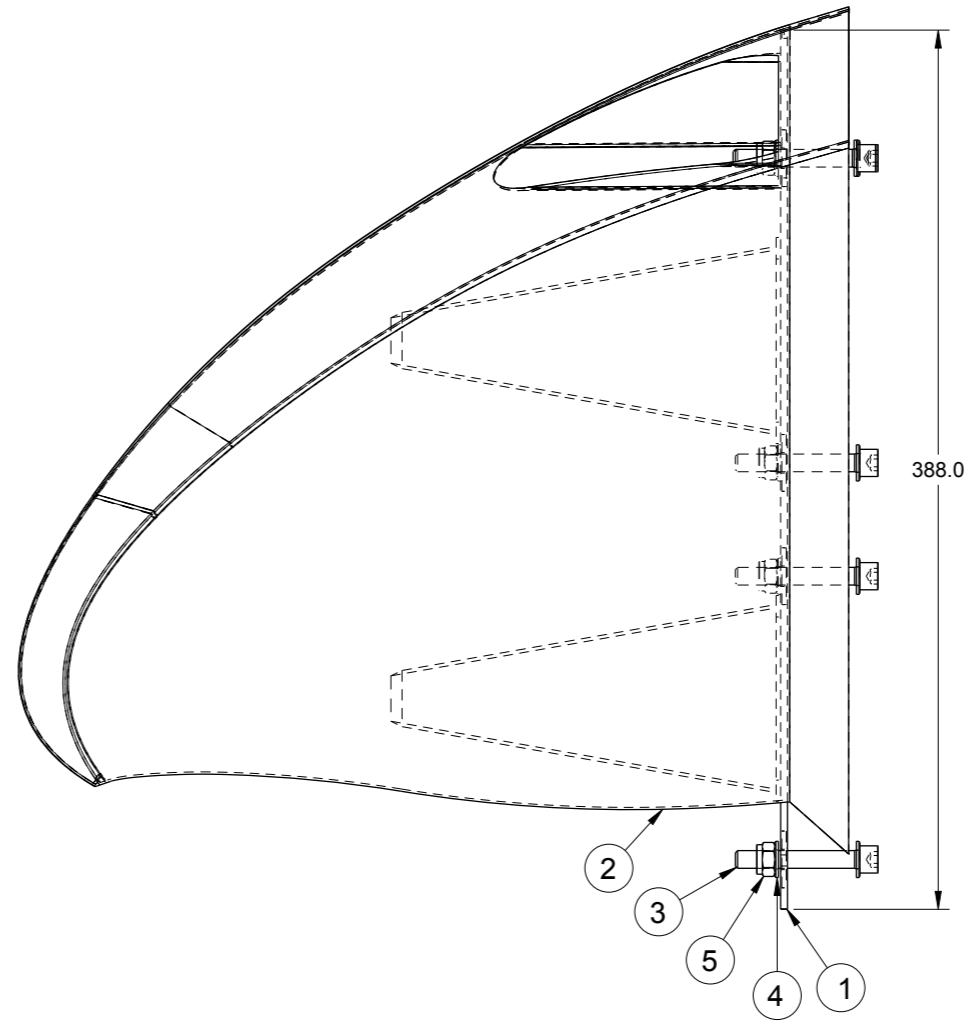
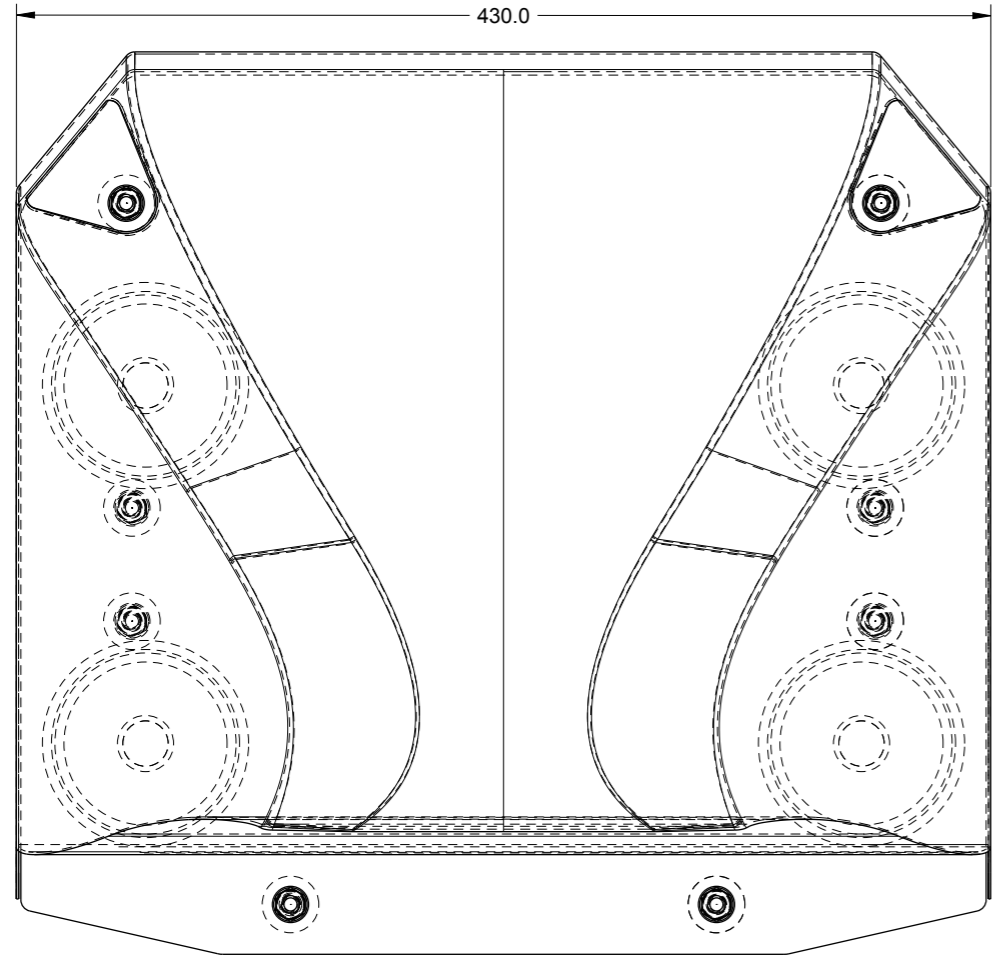
 THIRD ANGLE PROJECTION		 CAD GENERATED DRAWING, NO MANUAL REVISIONS ALLOWED	
WELD SYMBOLS PER ANSI/AWS A2.4 DRAWING CONFORMS TO ASME Y14.5 - 2009		SIZE: <b>A3</b> <small>(NO UNLESS OTHERWISE SPECIFIED)</small>	DWG NO.: <b>12_2018</b> SCALE: N/A UNIT: FS.10_V2
		ESTIMATED WEIGHT: N/A	REV: <b>A</b> SHEET 2 OF 4
<b>PROTIPRURAZOVA PREPAZKA</b>			



Položka	Název	Číslo výkresu	Množství
1	Protiprůrazová přepážka	12_2018	1
2	Mezikruží	11_2018	4
3	Absorpční kužel	11_2018	4

THIRD ANGLE PROJECTION			
CAD GENERATED DRAWING, NO MANUAL REVISIONS ALLOWED			
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, REMOVE ALL BURRS AND SHARP CORNERS			
WELD SYMBOLS PER ANSI/AWS A2.4	SIZE: <b>A3</b>	ESTIMATED WEIGHT: N/A	DWG NO. <b>13_2018</b>
DRAWING CONFORMS TO ASME Y14.5 - 2009	SCALE: N/A	UNIT: FS.10_V2	REV <b>A</b>
<b>ABSORPCNI KUZELE &amp; PROTIPRURAZOVA PREPAZKA</b>			SHEET 3 OF 4

8 7 6 5 4 3 2 1



Položka	Název	Číslo výkresu	Množství
1	Kužele & Protiprůrazová přepážka	13_2018	1
2	Nos	-	1
3	Šroub M8 x 50	-	8
4	Podložka 8.4	-	16
5	Matice M8	-	8

THIRD ANGLE PROJECTION

WELD SYMBOLS PER ANSI/AWS A2.4  
DRAWING CONFORMS TO ASME Y14.5 - 2009

CTU CARTECH

CAD GENERATED DRAWING, NO MANUAL REVISIONS ALLOWED  
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, REMOVE ALL BURRS AND SHARP CORNERS

SIZE: A3	ESTIMATED WEIGHT: N/A	DWG NO.: 14_2018	REV: A
SCALE: N/A	UNIT: N/A	FS.10_V2	SHEET 4 OF 4

**DEFORMACNI PRVEK**

8 7 6 5 4 3 2 1