

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** B0715P270003 – Strojírenství  
**Studijní specializace:** Specialista pro automotive praxi

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Technické řešení pro zlepšení absorbování energie při nárazu  
hlavou**

**Autor:** Jakub Starec  
**Vedoucí práce:** Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub STAREC**  
Osobní číslo: **S19B0030P**  
Studijní program: **B0715P270003 Strojírenství**  
Specializace: **Specialista pro automotive praxi**  
Téma práce: **Technické řešení pro zlepšení absorbování energie při nárazu hlavou**  
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

## Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce je technický návrh možností ve zlepšení absorbování energie při nárazu hlavou pro automobilové sedačky. Dále provést specifikaci požadavků s ohledem na správnou funkčnost. Konstrukční návrh by měl obsahovat rozbor používaných konstrukčních řešení, geometrie materiálu (geometrie žeber), rozbor technických možností jednotlivých řešení, splňovat požadavky technické jednoduchosti a respektovat bezpečnostní požadavky. U výsledného řešení provést komplexní hodnocení pro maximální možnou absorpci energie při dopadu impaktoru.

Rozsah bakalářské práce: **30-40**  
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] VALA, M. *Teorie a konstrukce silničních vozidel I*. Univerzita Pardubice, Pardubice, 2003
  - [2] VLK, F. *Stavba motorových vozidel*. Brno: Vlk, 2005
  - [3] ŘAŠA, J., ŠVERCL, J.: *Strojnické tabulky*. Scientia, Praha, 2004
  - [4] SHIGLLEY, J., E., MISCHKE, C., R., BUDYNAS, R., G. *Konstruování strojních součástí*. VUT v Brně, Brno, 2010
- Podkladový materiál, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. listopadu 2022

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Starec	<b>Jméno</b> Jakub	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715P270003 – Strojírenství		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Formánek, Ph.D.	<b>Jméno</b> Josef	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST – KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Technické řešení pro zlepšení absorbování energie při nárazu hlavou		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	45	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	40	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	5
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem komponentu pro zlepšení absorpce energie při nárazu hlavou zezadu do sedadla s uvážením všech zákonných požadavků. Dále shrnutím důležitých vlastností materiálů pro absorpci nárazové energie a jejich návrhem pro navrženou komponentu. Analýza návrhů pomocí řešičů v softwaru NX s vyhodnocením výsledků a stanovením závěrečných doporučení.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Osobní automobily, absorpce energie, metoda konečných prvků, pasivní bezpečnost, simulace, sedadlo, opěrka hlavy, normy</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Starec	Name Jakub	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715P270003 - Engineering		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Formánek, Ph.D.	Name Josef	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST – KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Technical solution to improve energy absorption during head impact		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKS	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	---------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	45	<b>TEXT PART</b>	40	<b>GRAPHICAL PART</b>	5
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The bachelor thesis deals with the structural design of a component to improve the energy absorption during a rear head impact on a seat, taking into account all legal requirements. Furthermore, it summarizes the important properties of materials for impact energy absorption and their design for the proposed component. Analysis of the designs using solvers in NX software with evaluation of the results and determination of final recommendations.
<b>KEY WORDS</b>	Passenger cars, energy absorption, finite element analysis, passive safety, simulation, seat, head restraint, standards

## Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek.....	11
Úvod .....	12
1 Automobilová sedadla.....	13
1.1 Konstrukce sedadla .....	14
1.1.1 H-bod .....	15
1.1.2 R-bod .....	15
2 Úvod do legislativy .....	16
2.1 Zákonné předpisy.....	16
2.1.1 Shrnutí UN R17 .....	17
2.2 Spotřebitelské testy .....	17
3 Norma ECE R17-10 – Hlavní požadavky .....	18
3.1 Rozdělení oblastí sedadla a zakřivení povrchů .....	18
3.1.1 Oblast 1 .....	18
3.1.2 Oblast 2.....	18
3.1.3 Oblast 3.....	19
3.1.4 Předpisy pro oblasti .....	20
3.2 Test absorpce energie.....	20
3.2.1 Průběh testu .....	21
3.3 Další podmínky normy blízké tématu.....	22
4 Biomechanická kritéria .....	24
5 Materiály pro absorpci energie.....	25
5.1 Vstříkovaná PU pěna .....	26

5.2	Pěnový expandovaný polystyren .....	26
5.3	Pěnový expandovaný polypropylen .....	27
5.4	Další používané materiály .....	28
6	Použitý software .....	29
6.1	Siemens NX .....	29
6.2	Granta EduPack .....	29
7	Specifikace a vyjasnění požadavků .....	30
8	Návrh materiálu .....	31
8.1	Srovnání vlastností materiálů .....	31
9	Konstrukční návrh .....	34
9.1	Hrubý konstrukční návrh .....	34
9.1.1	Analýza .....	35
9.1.1.1	Výsledek .....	37
9.2	Finální konstrukční návrh .....	39
9.2.1	Analýza .....	40
9.2.1.1	Výsledek .....	40
10	Finální shrnutí výsledků .....	42
11	Závěr .....	43
	Seznam použitých zdrojů .....	44



## Přehled použitých zkratk a symbolů

UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
ADR	Australian Design Rules
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards
ECE	Economic Commission for Europe
NCAP	New Car Assessment Programs
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
IP	Intersection Point
CP	Contact Point
HPC	Head Performance Criterion
NIC	Neck Injury Criterion
ThCC	Thorax Compression Criterion
TCFC	Tibia Compression force Criterion
FFC	Femur Force Criterion
EPS	Expanded Polystyrene
EPP	Expanded Polypropylene
PU	Polyuretan
PP	Polypropylen
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CAD	computer-aided design
CAM	Computer aided manufacturing
CAE	Computer-Aided Engineering
MPa	MegaPascal
HV	Vickers Hardness
N	Newton
ms	milisekunda
mm	milimetr
MKP	Metoda konečných prvků

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Doporučené průběhy měrných tlaků na automobilovém sedadle [1] .....	13
Obrázek 2 - Řez sedadlem [2] .....	14
Obrázek 3 - Třírozměrná normalizovaná figurína [1] .....	15
Obrázek 4 – Regulace týkající se nárazů: USA, OSN (UN), Evropa, Čína [3] .....	16
Obrázek 5 – Spotřebitelské testy ve světě [5].....	17
Obrázek 7 - Oblasti sedadla s opěrkou hlavy .....	19
Obrázek 6 – Vztažná čára, rozměry oblastí; podle [1] .....	19
Obrázek 8 – Oblasti sedadla bez opěrky hlavy.....	19
Obrázek 9 – Oblasti sedadla s integrovanou opěrkou hlavy .....	19
Obrázek 10 – příklad zkušebního zařízení [7].....	21
Obrázek 11 - Schéma zkoušky zadní strany sedadla.....	21
Obrázek 12 - Body CP a IP [4].....	22
Obrázek 13 - Určení výšky opěrky hlavy [4] .....	22
Obrázek 14 - Příklad vodorovných otvorů v opěrce [4].....	22
Obrázek 15 - Popis statické zkoušky (1 - nezatížený stav, 2a - stav po předběžném zatížení, 2b - stav po zatížení opěrky, 3 - stav po kontrolním zatížení) [4].....	23
Obrázek 16 - Charakteristické chování pěnových materiálů při kompresi [11].....	25
Obrázek 17 - Výplň dna zavazadlového prostoru [12].....	27
Obrázek 18 - Mechanismy porušování kompozitu [15] .....	28
Obrázek 19 – Porovnání vlastností Youngův modul – Hustota .....	31
Obrázek 20 – Srovnání vlastností Poměrné prodloužení – Hustota .....	32
Obrázek 21 - Srovnání vlastností Cena – Hustota.....	32
Obrázek 22 - Díry pro uchycení .....	34
Obrázek 23 - Rozložení žeber při hrubém návrhu.....	34

Obrázek 24 - Celková podoba hrubého návrhu .....	34
Obrázek 25 - Průběh decelerace při testu absorpce energie [17] .....	35
Obrázek 26 - Sestava připravena pro analýzu .....	36
Obrázek 27 – Deformace dílu, hrubý konstrukční návrh .....	37
Obrázek 28 – Rozložení napětí v dílu, hrubý konstrukční návrh .....	37
Obrázek 29 – Detail napětí v držáku a žebrech, hrubý konstrukční návrh.....	38
Obrázek 30 – Rozložení žebér finálního návrhu .....	39
Obrázek 31 – Provedená úprava uchycení .....	39
Obrázek 32 - Deformace dílu, finální konstrukční návrh.....	40
Obrázek 33 - Rozložení napětí v dílu, finální konstrukční návrh.....	41
Obrázek 34 - Detail napětí v držáku a žebrech, finální konstrukční návrh .....	41
Obrázek 35 - Komponenta na konstrukci sedadla .....	42

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 – Specifikace základních požadavků.....	30
Tabulka 2 – Rozsahy vlastností vybraných materiálů .....	33

## Úvod

Vývoj v celé oblasti automotive je v současné době stále rychlejší, s čímž jdou ruku v ruce zvyšující se nároky na jednotlivé produkty v tomto odvětví. Zejména se jedná o udržitelnost, praktičnost, celkový design, komfort a především také bezpečnost. Právě sedadla jsou produktem, který má na bezpečnost všech pasažérů vozidla zásadní vliv.

Ačkoli se na první pohled může zdát, že se jedná o vcelku samozřejmý prvek, dnešní sedadla patří v moderních automobilech, zejména s vyšší výbavou, k jedné z nejsložitějších součástí. Oproti jejich předchůdcům se základní myšlenka moc nezměnila, ale nová sedadla jsou, dalo by se říct, napěchovaná komfortními funkcemi. Například jde o polohování v mnoha směrech, elektrické ovládání, airbagy, masážní funkci, vyhřívání nebo dokonce ventilaci. Avšak i s těmito vymoženostmi musí splňovat mnohem přísnější nároky, z hlediska bezpečnosti a designu, než jejich dřívější verze. Výše zmíněné vytváří v této široké oblasti, kde některé požadavky mohou být mnohdy i protichůdné, spoustu zajímavých problémů, na které se lze zaměřit například právě v bakalářské práci.

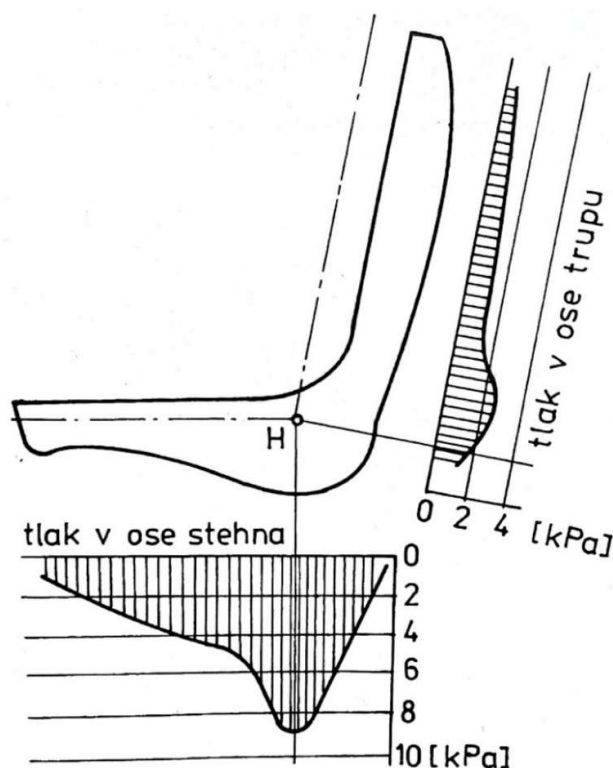
Tato bakalářská práce se bude zabývat tématem, které se jeví jako velmi podstatné. Jím je absorpce energie při nárazu hlavou do sedadla, což je velmi široká problematika. Z toho důvodu je důležité, se mimo základní konstrukci sedadel, zaměřit také na jednotlivé regulace, zákaznické požadavky, normy a testy pro které existuje celá řada standardů, jejichž cílem je zvýšit bezpečnost vozidel na maximální úroveň. Tohle vše je třeba řešit předtím, než může být vozidlo s takovým sedadlem uvedeno na trh.

Dále se tato práce ve své praktické části detailně zaměřuje na konstrukční řešení daného dílu zadní části předních a zadních sedadel, který slouží k absorpci energie. Za použití geometrických úprav konstrukce a různých druhů materiálů, jejichž dopad na absorpci energie bude odhadnut pomocí analýzy, bude mít za cíl najít možná řešení. Taková řešení, která, pokud možno se zachováním vyrobiteľnosti a nákladů, významně přispějí ke zvýšení bezpečnosti pasažérů vozidla.

## 1 Automobilová sedadla

Jedná se o prvek, který v poměrně velké stykové ploše podpírá tělo řidiče a nese velkou část tíhy, odpovídající hmotnosti lidského těla. Největší část přenáší sedák (64 až 72 %), dále opěradlo (4 až 16%) a zbytek je přenášen formou reakcí v místech opření chodidel (15 až 22%).

Při návrhu a výrobě sedadel je potřeba klást důraz na anatomické požadavky v podobě tvarování a měrných tlaků. Polstrování a tvarování by mělo být takové, aby byla zachována přirozená fyziologická poloha a tvar těla, zejména páteře. Měrné tlaky mají být největší na malé ploše pod sedacími výběžky pánevní kosti, ostatní plochy by měly být podepřeny o mnoho menšími měrnými tlaky. Je velmi důležité jemné podepření v podkolení části a také přiměřené podepření části bederní, kde musí být opěradlo uzpůsobeno přirozenému zakřivení páteře neboli takzvané lordóze. Dále jsou důležité fyziologické požadavky jako teplota a prodyšnost. Tyto vlastnosti mají vliv například na pocení nebo prochlazení sedadla před jízdou a mohou být ovlivněny především potahovým materiálem sedadla. Ač se to nemusí zdát, prodyšnost sedadla ovlivňuje fyzické i psychické pohodlí cestujících i řidiče a tak má přímý vliv na bezpečnost jízdy. V neposlední řadě musí také sedadlo zajistit tlumení vibrací. [1]



Obrázek 1 - Doporučené průběhy měrných tlaků na automobilovém sedadle [1]

## 1.1 Konstrukce sedadla

Názorný příklad konstrukce automobilového sedadla lze vidět na obr. 2. Rám sedadla je svařenec z ocelových plechů a drátů. Pro pěnové díly (polštářovací vložky) se jako materiál používá polyuretanová litá pěna. V závislosti na výbavě vozu jsou pak sedadla čalouněna různými druhy látek.

Přední sedadla se dají podélně posouvat v rozmezí několika poloh v případě mechanického řešení a v případě elektrického provedení přestavení se dá poloha měnit plynule motoricky. Mimo podélného posuvu lze často měnit také nastavení výšky sedáku, sklon sedáku, sklon opěradla a v některých případech vyduť opěradla v bederní oblasti páteře.[1][2]

Přední i zadní sedadla jsou vybavena opěrkami hlavy, které mohou být integrované nebo samostatné. Integrovanou hlavovou opěrku tvoří horní část opěradla sedadla, která však musí odpovídat definicím samostatných opěrek hlavy. Na druhé straně samostatná hlavová opěrka je tvořena prvkem, který lze od sedadla oddělit. Dále toto provedení umožňuje výškové stavení a opěrky u předních sedadel jsou často ještě sklápěcí v otočné ose. [1]



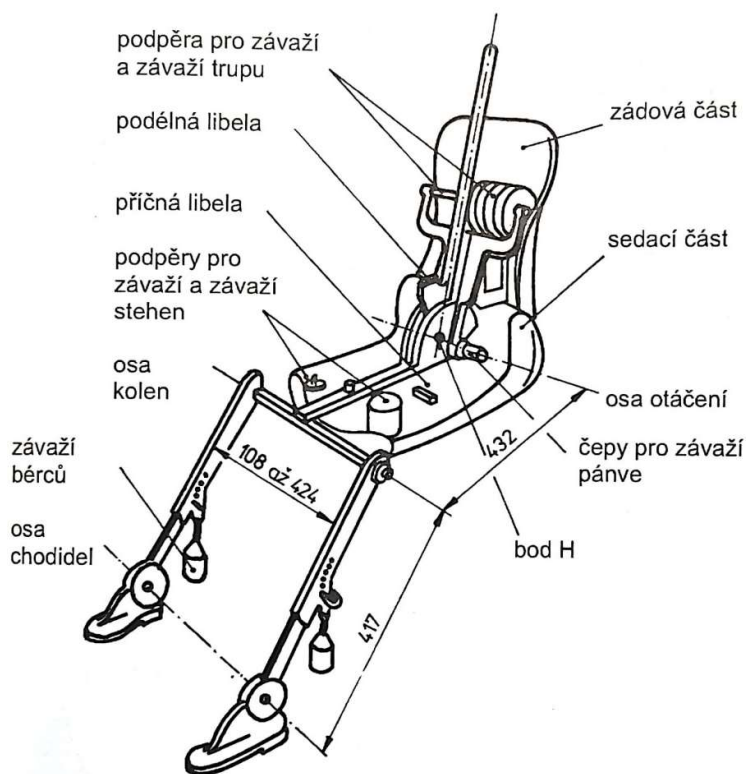
Obrázek 2 - Řez sedadlem [2]

### 1.1.1 H-bod

Bod H (Hip point) je střed otáčení trupu a stehna trojrozměrné figuríny, která je základem pro účely měření. To znamená, že se jedná o průsečík osy otáčení zádové a stehenní části s rovinou souměrnosti figuríny. Figurína se tedy používá pro stanovení skutečného bodu H na vozidle a dále slouží jako základní přístroj pro kontrolu parametrů sedění řidiče a cestujících na sedadle v dopravním prostředku.[1] Skutečný bod H by měl ležet uvnitř čtverce s vodorovnými a svislými stranami o délce 50 mm, jejichž úhlopříčky se protínají v R-bodě.[4]

### 1.1.2 R-bod

Jedná se o projektovaný vztažný bod sedění. Definuje ho výrobce vozidla v souřadné soustavě spojené s vozidlem a pro každou pozici sedění.[1]



Obrázek 3 - Třírozměrná normalizovaná figurína [1]

## 2 Úvod do legislativy

Od 60. let 20. století, měly regulace bezpečnostních parametrů vozidel zásadní vliv na jejich konstrukci a systémy jimiž jsou vozidla vybaveny. Vzhledem k tomu, že se celý automotive vyvinul v integrovaný globální systém, pochopení a schopnost předvídání právních požadavků se stalo obrovskou výzvou. Regulační orgány často spolupracují, ale i přesto se výsledky řešení politiky bezpečnosti silničního provozu mnohdy odlišují. Regulační změny na jednom trhu se mohou promítnout do globálních požadavků zákazníků, které se neustále vyvíjejí. Vystupují zde tedy nároky ve formě předpisů/regulací a spotřebitelských požadavků. V zájmu zvýšení bezpečnosti silničního provozu se opírají o dva základní aspekty bezpečnosti vozidla, kterými jsou předcházení nehodám neboli aktivní bezpečnost a odolnost proti nárazu čili pasivní bezpečnost. [3]

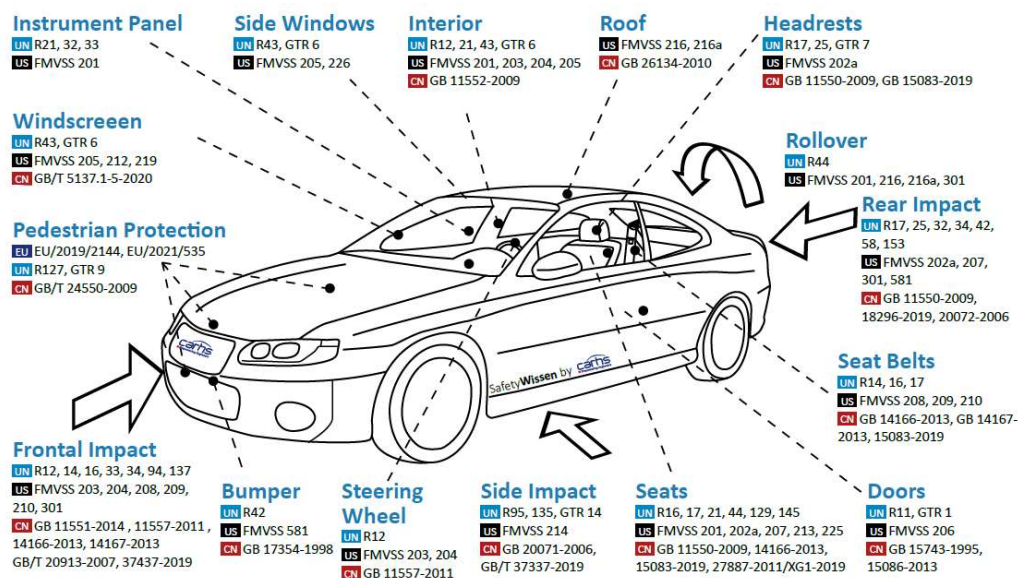
### 2.1 Zákonné předpisy

Jedná se o předpisy, které jsou dány regulačními orgány nebo vládami tak, aby vyvažovaly sociální a ekonomické benefity s vhodnými nároky na environmentální a bezpečnostní výkon. Tyto předpisy specifikují právní požadavky, jenž musí být splněny, aby mohlo být vozidlo v určité zemi uvedeno na trh.[3] Jedná se o tyto hlavní předpisy, které jsou platné ve světě:

**Evropa:** UNECE  
**USA:** FMVSS

**Austrálie:** ADR  
**Japonsko:** Trias

**Čína:** GB



Obrázek 4 – Regulace týkající se nárazů: USA, OSN (UN), Evropa, Čína [3]



### 2.1.1 Shrnutí UN R17

Na obrázku 3 si lze všimnout skutečnosti, že sedadla jsou jednou ze součástí podléhajících nejvíce požadavkům z hlediska norem a předpisů. Jednou z nich je právě norma ECE R17, která je pro účel této bakalářské práce nejdůležitější. ECE R17 stanovuje právní požadavky na sedadla, jejich ukotvení a hlavové opěrky. Jejím hlavním záměrem je zajištění bezpečnosti a snížení počtu možných zranění pomocí konstrukce sedadel, designu interiéru, kterým se ale především zabývá norma ECE R21 a následných fyzických zkoušek. Tato norma bude podrobněji rozebrána v pozdější části.

#### Nejdůležitější požadavky v ECE R17:

- Minimální výška hlavové opěrky
- Minimální šířka hlavové opěrky
- Minimální zaoblení povrchů sedadla
- Mezery mezi opěrkou hlavy a opěradlem, otvory v opěrkách hlavy a v opěradlech
- Statické, dynamické testování

## 2.2 Spotřebitelské testy

Spotřebitelské testování představuje v podstatě další vrstvu regulačních požadavků a oba systémy se doplňují. Spotřebitelské testy mohou být mnohdy náročnější než právní předpisy. Je tomu tak, protože zde neexistuje hodnocení typu "vyhověl/nevychověl". To znamená, že automobily nemusí být staženy z prodeje, pokud v přísnějších testech dopadnou špatně. Spotřebitelská hodnocení tedy dávají potenciálním zákazníkům informace o výkonnosti vozidla v různých oblastech a v porovnání s konkurencí. Umožňují tak spotřebitelům informovaný výběr a zároveň vyvíjí tlak na inovace ze strany výrobců.[6] Hlavní organizace provádějící spotřebitelské testy:

**Evropa:** Euro-NCAP  
**USA:** USNCAP, IIHS

**Austrálie:** Australian-NCAP  
**Japonsko:** Japan-NCAP

**Čína:** China-NCAP



Obrázek 5 – Spotřebitelské testy ve světě [5]

### **3 Norma ECE R17-10 – Hlavní požadavky**

#### **3.1 Rozdělení oblastí sedadla a zakřivení povrchů**

Na povrchu zadních částí sedadel se nesmí nacházet žádné nebezpečné nerovnosti nebo ostré hrany, které by mohly zvýšit nebezpečí poranění cestujících. Zadní části sedadel a přední strana hlavových opěrek, které mají být kontrolovány, se nachází ve třech definovaných oblastech. Pro tyto oblasti platí odlišné požadavky. Jedná se o zakřivení povrchů a nutnost splnění testu absorpce energie.[4]

##### **3.1.1 Oblast 1**

Pokud se jedná o jednotlivá sedadla bez opěrek hlavy, tak oblast zahrnuje zadní část opěradla nacházející se mezi svislými podélnými rovinami, které leží 100 mm na každou stranu od podélné střední roviny místa k sezení určeného výrobcem. Dále tato oblast leží nad rovinou, která je kolmá k vztažné přímce a prochází ve vzdálenosti 100 mm pod vrcholem opěradla sedadla.[4]

V rámci sedadel nebo lavicových sedadel vybavených opěrkami hlavy se oblast 1 nachází mezi svislými podélnými rovinami, které leží 70 mm na každou stranu od podélné střední roviny sedadla nebo daného místa k sezení. Dále tato oblast leží nad rovinou, která je kolmá k vztažné přímce a vzdálena 635 mm od R-bodu. Pokud je hlavová opěrka nastavitelná, nastavuje se během zkoušek do nejhorší pozice (zpravidla nejvyšší), jakou její systém seřízení umožňuje.[4]

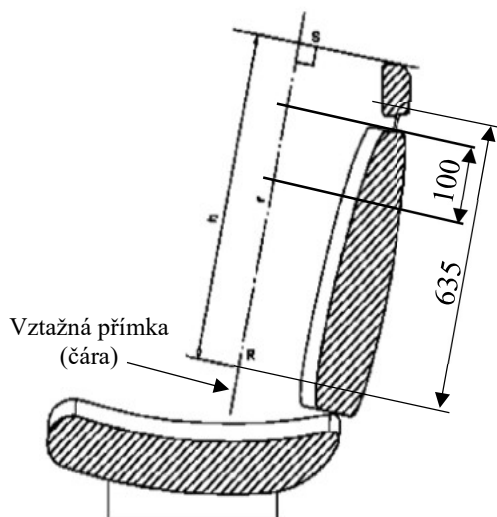
##### **3.1.2 Oblast 2**

V případě sedadel nebo lavicových sedadel postrádajících hlavovou opěrku a sedadel nebo lavicových sedadel se samostatnými hlavovými opěrkami se oblast 2 nachází nad rovinou, která je kolmá k vztažné přímce a leží 100 mm od vrcholu opěradla, kromě částí patřících do první oblasti.[4]

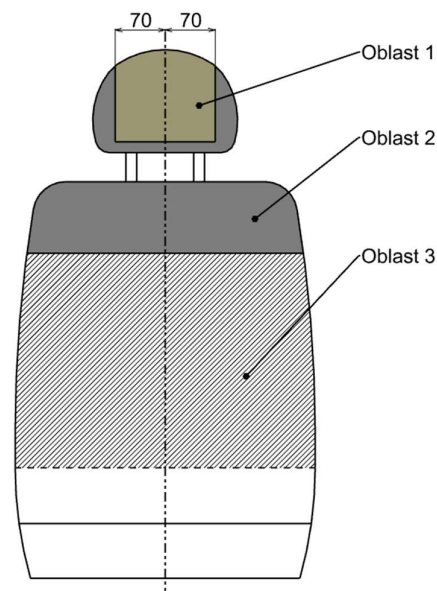
V případě sedadel nebo lavicových sedadel s hlavovými opěrkami, které jsou tvořeny horní částí opěráku sedadla, oblast 2 leží nad rovinou, která je kolmá k vztažné přímce a leží 440 mm od R-bodu sedadla nebo daného místa k sezení, kromě částí patřících do oblasti 1.[4]

### 3.1.3 Oblast 3

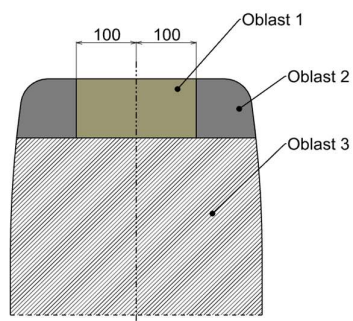
Jako třetí oblast je definována část opěradla sedadla nebo lavicového sedadla nacházející se nad vodorovnou rovinou procházející nejnižším R-bodem v každé řadě sedadel. Spodní hranice této oblasti je tedy určena souřadnicí R-bodu sedadla, umístěného bezprostředně za sedadlem vyšetřovaným. Do třetí oblasti nepatří části nalézající se v oblasti 1 nebo 2.[4]



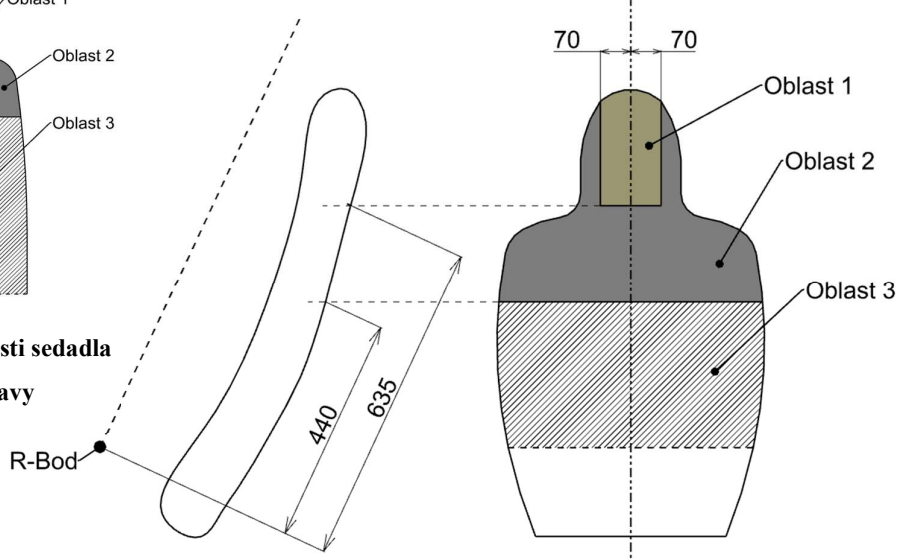
Obrázek 6 – Vztažná čára, rozměry oblastí;  
podle [1]



Obrázek 7 - Oblasti sedadla s opěrkou hlavy



Obrázek 8 – Oblasti sedadla  
bez opěrky hlavy



Obrázek 9 – Oblasti sedadla s integrovanou opěrkou hlavy

### 3.1.4 Předpisy pro oblasti

U sedadel s klasickou opěrkou hlavy, musí zadní části sedadla a přední a zadní části hlavové opěrky umístěné v oblasti 1 projít zkouškou absorpce energie. Dále zde musí být poloměry zakřivení všech povrchů, které by mohly přijít do kontaktu s hlavou, větší nebo rovno 2,5mm. V oblasti 2 jsou doporučené minimální poloměry zakřivení ploch 5 mm, avšak mohou být i menší, nikoliv však menší než 2,5 mm, za předpokladu, že vyhoví při zkoušce absorpce energie. Pro oblast 3 platí požadavek na nejmenší poloměr zakřivení povrchu 3,2 mm.[4]

Nároky kladené na minimální zakřivení povrchů, platí pro části sedadla, na které dosáhne koule o průměru 165 mm, když je sedadlo namontováno ve vozidle. Zároveň platí, že pokud jsou ve výše zmíněných oblastech části pokryté materiálem s tvrdostí menší než 50 Shore A, tak se zmíněné požadavky týkají jen tuhých částí s výjimkou požadavků týkajících se zkoušky absorpce energie. Předpisy pro zakřivení povrchů se také nevztahují na ty části v oblastech, které mají výstupky menší než 3.2 mm nad okolní povrch. Avšak výstupky musí mít ztupené hrany. Zmíněné ovšem platí pouze pokud výška výstupku není větší než polovina jeho šířky.[4]

## 3.2 Test absorpce energie

Již bylo zmíněno, že jak zadní části sedadla, tak přední a zadní část opěrky hlavy nacházející se v oblasti 1, musí splnit test absorpce energie. Hlavní podmínkou pro splnění testu je zpomalení zkušební hlavice, které nesmí být větší než 80 g po dobu delší než 3 ms. To znamená, že zpomalení může špičkově dosáhnout větší hodnoty, avšak nesmí na této vyšší hodnotě setrvat déle než tři milisekundy. Také nesmí v průběhu testu, ani po něm, dojít k tomu, že se objeví ostré nebo jinak nebezpečné hrany.[4]

Z těchto požadavků existují určité výjimky. Například se požadavky nevztahují na zadní části hlavových opěrek, které jsou určeny k montáži na sedadla, za kterými se již další sedadla nenalézají. Dále podmínky neplatí pro sedadla nejvíce vzadu, sedadla s opěradly směřujícími k sobě nebo sedadla která splňují požadavky normy ECE-R21.[4] Ta stanovuje podmínky pro vnitřní vybavení vozidla včetně uspořádání ovládacích orgánů, střechy, opěradel a zadní části opěradel. Definiuje takzvanou referenční oblast nárazu hlavy, zahrnující všechny nezasklené plochy vnitřního prostoru vozidla, které mohou přijít do styku s kulovou maketou hlavy o průměru 165 mm, která je částí zkušebního zařízení.[1]

### 3.2.1 Průběh testu

Sedadlo je namontováno stejným způsobem jako ve vozidle a pomocí připevňovacích součástí od výrobce pevně zajištěno na zkušebním zařízení tak, aby při nárazu nemohlo dojít k pohybu. Pokud má sedadlo opěrku hlavy, je tato opěrka na opěradle sedadla namontována a pokud je nastavitelná, tak je přestavena do nejnepříznivější polohy, kterou její nastavovací systém umožňuje (zpravidla nejvyšší poloha).[4]

Zkušební zařízení je sestaveno z kyvadla, jehož čep je uložen na kuličkových ložiskách a jehož redukovaná hmotnost ve středu nárazu je 6,8 kg. Okraj spodní části kyvadla je tvořen tuhoun maketou hlavy o průměru 165 mm. Střed nárazu kyvadla je se středem makety shodný. Jako další požadavek na zařízení se uvádí, že maketa hlavy a její přidružená základna musí mít takovou kombinovanou hmotnost, aby bylo při rychlosti 24,1 km/h v okamžiku nárazu, dosaženo energie 152 joulů. Na maketě hlavy jsou nainstalovány dva akcelerometry a snímač rychlosti, kdy tyto zařízení musí měřit hodnoty ve směru nárazu.[4]

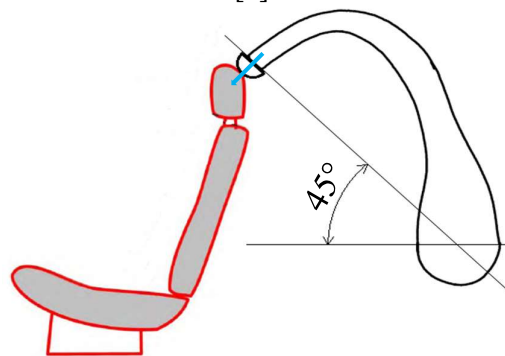
Vztah mezi redukovanou hmotností „ $m_r$ “ kyvadla k celkové hmotnosti „ $m$ “ kyvadla ve vzdálenosti „ $a$ “ mezi středem nárazu a osou otáčení a vzdáleností „ $l$ “ mezi těžištěm a osou otáčení je určen vzorcem:

$$m_r = m \frac{l}{a}$$

Při zkoušce jsou zkušební laboratoři vybrány body dopadu v první oblasti nebo v nezbytném případě také v druhé oblasti, ovšem pouze za podmínek již zmíněných v kapitole 3.1.4. Během testu opěradla nebo zadní strany opěrky hlavy naráží zkušební hlavice na zkoušenou plochu rychlostí 24,1 km/h, kdy směr nárazu leží pod úhlem 45° od svislice. Rychlosti je dosaženo buď energií samotného kyvadla nebo za pomoci doplňkového hnacího zařízení a za výslednou hodnotu zpomalení je považován průměr hodnot z obou akcelerometrů.[4]



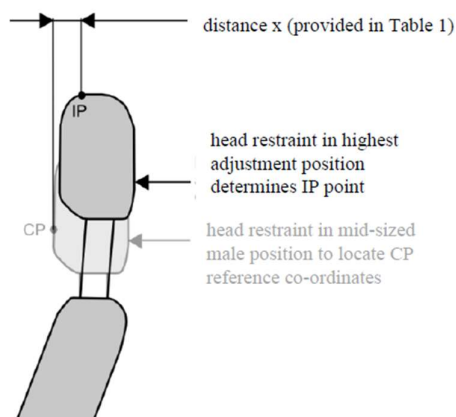
Obrázek 11 – příklad zkušebního zařízení [7]



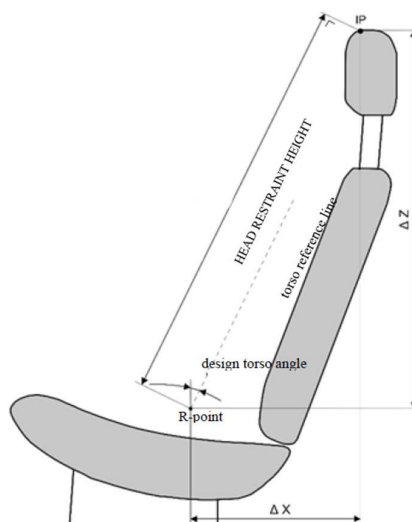
Obrázek 10 - Schéma zkoušky zadní strany sedadla

### 3.3 Další podmínky normy blízké tématu

Pro měření minimální možné instalační výšky opěrky hlavy od R-bodu je sedadlo nastaveno tak, aby R-bod a H-bod byly totožné a je nutné definovat body IP a CP. U předních sedadel musí být výška, alespoň v jedné nastavitelné poloze, větší než 830 mm a v jakékoliv poloze hlavové opěrky nesmí klesnout pod 720 mm. Pro zadní řadu sedadel platí také požadavek 720 mm, ovšem s výjimkou prostředního sedadla, pro které platí minimální výška 700 mm.[4]

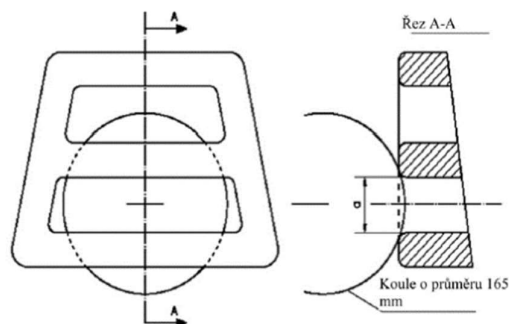


Obrázek 12 - Body CP a IP [4]



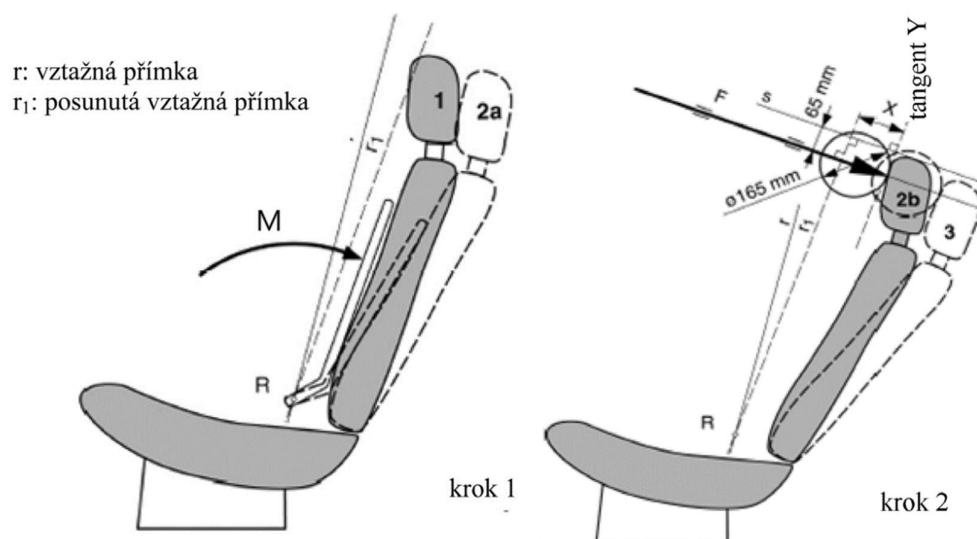
Obrázek 13 - Určení výšky opěrky hlavy [4]

Pro zjištění rozměrů samotné hlavové opěrky norma předepisuje přesný postup, ale její minimální rozměry by se daly zjednodušeně vyjádřit jako její šířka, která musí být větší než 85 mm na každou stranu od přímky torza a výška, jejíž minimální hodnota je 100 mm. Pokud je nastavena do nejnižší polohy, nesmí být mezera mezi opěrkou a opěradlem větší než 25 mm. Pokud má opěrka otvor jakéhokoliv tvaru o rozměru  $a \geq 60$  mm, maximální posunutí makety hlavy ve směru vzad musí být menší než 102 mm. Toto posunutí se zjišťuje pomocí testu statickým zatížením, reprezentujícím moment 373 Nm kolem R-bodu, aplikovaným kulovou maketou hlavy o průměru 165 mm, na každý otvor v opěrce.[4]



Obrázek 14 - Příklad vodorovných otvorů v opěrce [4]

Další důležitý požadavek je splnění již zmíněné statické zkoušky. Před jejím provedením je opěradlo sedadla nastaveno do polohy specifikované výrobcem. Hlavová opěrka je nastavena co nejvýše a její natočení je v nejzadnější možné poloze. V první části testu je na opěradlo sedadla, pomocí zařízení napodobujícího zádovou část trojrozměrné figuríny, aplikován moment, který roste rychlostí 2.5–3.7 Nm/s až do velikosti  $373 \pm 7.5$  Nm. Moment působí kolem R-bodu. Ve druhé fázi se po dobu 5 s, moment s velikostí  $373 \pm 7.5$  Nm kolem R-bodu, aplikuje pomocí makety hlavy o průměru 165 mm na hlavovou opěrku a následně se měří posunutí této makety. Ve třetí fázi se síla  $F$  zvětšuje rychlostí v rozmezí 5–200 N/s až na  $890 \pm 5$  N a na této hodnotě setrvává 5 s. Během testu nesmí dojít k žádnému porušení rámu, uchycení sedadla nebo mechanismu pro zajišťování poloh sedadla. Dále nesmí dojít k již zmíněnému vychýlení makety hlavy o více než 102 mm. [4]



**Obrázek 15 - Popis statické zkoušky (1 - nezatížený stav, 2a – stav po předběžném zatížení, 2b - stav po zatížení opěrky, 3 - stav po kontrolním zatížení) [4]**

## 4 Biomechanická kritéria

Předmětem biomechaniky je mechanická odolnost lidského těla a mechanismus poranění. Na základě biomechanických pokusů jsou zjišťovány všechny mezní hodnoty odolnosti člověka vůči různým formám dynamického zatížení a vytvářejí tak dobré podklady pro maximální pasivní bezpečnost při konstrukci automobilů. Tyto mezní hodnoty jsou tzv. Kritéria poranění, ze kterých jsou pak s jistou mírou bezpečnosti odvozena kritéria ochrany. Kritéria ochrany představují hraniční hodnoty mechanického zatížení (síly, zrychlení), které lze měřit na zkušebních figurínách a které nesmí být překročeny. [1]

Níže zmíněná kritéria a jejich maximální hodnoty byly převzaty z normy ECE R94-03, která uvádí pravidla pro schvalování vozidel z hlediska ochrany cestujících v případě čelního nárazu. Dále tato norma uvádí používaná zařízení a přesné postupy testů pro zjišťování níže uvedených veličin. Pravidla v případě bočního nárazu pokrývá norma ECE R95, avšak ta vzhledem k náplni této práce není podstatná.

Mimo již zmíněnou podmínku pro zpomalení hlavy při nárazu se pro oblast hlavy používá kritérium HPC, které slouží pro posouzení rizika zranění hlavy. Toto kritérium nesmí přesáhnout hodnotu 1000. Velikost tohoto kritéria je určena výpočtem z naměřených hodnot zrychlení hlavy v čase. [13] Pro HPC platí vztah:

$$HPC = \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_r dt \right]^{2.5} * (t_2 - t_1)_{max}$$
$$a_r = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

Kde  $a_r$  [g] je výsledná hodnota zpoždění hlavy,  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  je zpoždění ve směrech os x, y, z. Časy  $t_1$  a  $t_2$  [s] jsou doby, mezi kterými se nachází maximum HPC.

Důležité je také kritérium šíje neboli poranění krku NIC, které je určeno tlakovou a tahovou osovou silou a smykovými silami na rozhraní hlavy a krku vyjádřenými v kN a dobou trvání těchto sil v ms. Dále se vyhodnocuje také ohybový moment na krku vyjádřený v Nm kolem příčné osy na rozhraní osy hlavy a krku. Ohybový moment kolem této osy nesmí překročit hodnotu 57 Nm.[13]

Mezi další kritéria, které tato norma zmiňuje, patří například kritérium stlačení hrudníku (ThCC), které nesmí přesáhnout 42 mm. Kritérium tlakové síly na holenní kost (TCFC), jenž musí být menší než 8 kN nebo kritérium síly na stehenní kost (FFC).[13]

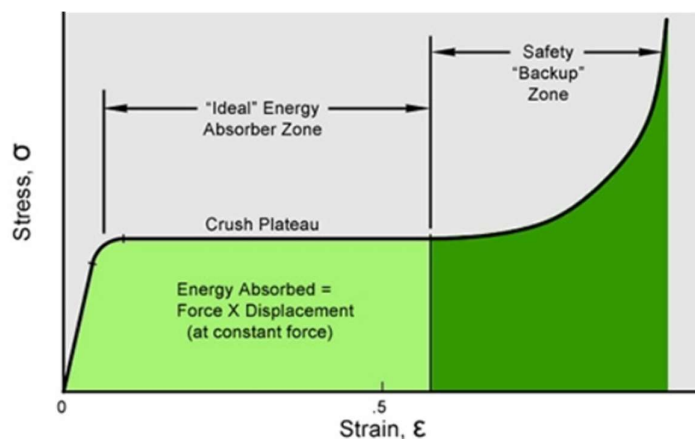


## 5 Materiály pro absorpci energie

Jedním z faktorů pro splnění zákonných předpisů a dobrých výsledků v testu absorpce energie je výběr správného materiálu. Mezi základní požadavky na absorbéry patří dostatečná energetická kapacita pro daný typ nárazu a také schopnost pohlcení energie v krátkém časovém intervalu a na dlouhé dráze. Z tohoto důvodu je nutné pochopení charakteristik absorpce energie u jednotlivých materiálů, které zároveň tvoří základní stavební kámen pro následnou optimalizaci výkonu ochrany proti poranění hlavy. Ovšem nejedná se jen o absorpci energie, ale je třeba zvážit také ostatní důležité faktory. Jedná se například o vyrobitelnost dílu z daného materiálu a celkovou cenu. Zmíněné skutečnosti budou velice důležité v dalších částech práce.

Pro absorpci nárazové energie existuje poměrně široké spektrum používaných materiálů, od kovových, přes polymerní, až po kompozitní materiály. Avšak vzhledem k použití absorbérů na sedadlech se používají především pěnové polymerní materiály. Typickým představitelem pěnového absorbéru je polyuretanová pěna (PU), která se míchá a následně lije nebo vstřikuje do formy. V dalších případech může být jako surovina použit například expandovaný polystyren (EPS) nebo expandovaný polypropylen (EPP).

Z buněčných struktur pěn vyplývá jejich reakce na tlakové namáhání, která se rozděluje na tři stupně. V prvním stupni, při tlakových deformacích menších než 5 %, je odezva materiálu lineární a lze jeho chování přirovnat k chování pružiny. Pokud je tlak dále zvyšován, nastává druhý stupeň, během kterého dochází ke kolabování buněk a napěťová odezva materiálu je téměř konstantní. Třetí stupeň představuje náhlý nárůst napěťové odezvy v důsledku ztuhnutí materiálu, při němž je většina buněk již zhroutilena. To dává materiálu tuhou odezvu při malých deformacích. Z těchto stupňů je pro účely absorpce energie důležitá především druhá fáze.[9]



Obrázek 16 - Charakteristické chování pěnových materiálů při kompresi [11]

V následujících kapitolách jsou uvedeny jednotlivé příklady, obecně shrnuty podle materiálu a technologie zpracování, spolu s jejich výhodami a nevýhodami.

## 5.1 Vstříkovaná PU pěna

Jednou z hlavních výhod tohoto řešení je flexibilita konstrukce výsledného dílu, kdy zde nezasahují přílišná omezení kvůli výrobnímu procesu. Bohužel výrobky a produkty ze vstříkovaného polyuretanu nemají izotropickou strukturu, a tak musí být jejich charakteristiky přizpůsobeny scénáři nárazu. Mezi další nevýhody patří, ve srovnání s ostatními, omezené tlakové zatížení a náklady na změnu formy při modifikaci dílu. [8] Tento materiál má širokou škálu vlastností, kterých lze dosáhnout malými úpravami použitého složení. Mezi hlavní patří jeho nízká hmotnost a skvělé tepelné i zvukové izolační vlastnosti. Tohle vše z Polyuretanu dělá všestranně využívaný materiál nejen v oblasti automotive, kde se využívá převážně v interiéru vozidel například pro sedáky, opěradla nebo hlavové opěrky sedadel.

## 5.2 Pěnový expandovaný polystyren

Pěnový polystyren (EPS) se používá v široké škále aplikací, mezi které patří obaly, ochranné díly, tepelné izolace a stavební konstrukční prvky. Pro tento typ aplikací je EPS hojně využíván díky svým vlastnostem, jako je nízká hustota, snadná výroba a dobrá absorpce energie, která je právě tím zajímavým parametrem pro oblast automobilového průmyslu. Zde se využívá zejména pro schopnost absorpce kinetické energie, a tak zvýšení bezpečnosti cestujících.[9]

Nejčastěji používaný postup zpracování je výroba bloků, řezání na desky a následné řezání finálních dílů. Tato výroba tedy není nákladná z hlediska nástrojů a cena jednoho dílu závisí především na tom, kolik dílů se z jedné desky nebo bloku vyřeže. Počet vyřezaných dílů pak závisí na rozměrech a geometrii dílu, která, vzhledem ke způsobu zpracování, nemůže být příliš složitá.[8] Druhý způsob výroby je přímo lití do formy. Dutina formy v požadovaném tvaru se zcela vyplní předpěněnými perlemi a znovu se vystaví působení syté vodní páry. Perle změkknou a dále expandují působením pentanu a vzduchu v buňkách. V uzavřeném prostoru formy se vzájemně natahují a dojde k jejich spojení do výsledného tvaru. Po relativně krátké době a ochlazení jsou vylisky vyjmuty z formy. Tento způsob je nákladnější, ale umožňuje větší flexibilitu konstrukce.[10]

### 5.3 Pěnový expandovaný polypropylen

Tento materiál vypadá podobně jako polystyren a vnitřní struktura dílů z něj vyrobených se zdá na první pohled také skoro stejná. Vlastnosti jsou ovšem rozdílné. Expandovaný polypropylen je příjemnější, hladší na dotek a oproti polystyrenu je soudržnější a pružnější. Právě jeho vynikající mechanické vlastnosti jsou jeho hlavní výhodou. Jedná se o dobrou pevnost v tlaku, zmíněnou pružnost a schopnost dobře absorbovat energii. Dále má výbornou odolnost proti ropným produktům, akustickou a tepelněizolační schopnost, také dobrou ekologickou šetrnost (100% recyklovatelnost) a snáší teploty do 110 °C. Ovšem nejedná se o primárně pohledový materiál i když již lze v poslední době nalézt aplikace splňující estetické požadavky.

V automobilovém průmyslu je to díky uvedeným vlastnostem velice žádaný materiál, avšak jeho aplikací je mnoho. Patří mezi ně stavebnictví, výroba obalů pro potravinářský průmysl a neposlední řadě také nábytkářský průmysl. Díky konstrukci z uzavřených pěnových buněk je chování materiálu izotropní, tak má bez ohledu na směr nárazu ve všech směrech stejné vlastnosti, a proto jsou jeho typickou aplikací v automotive prvky pasivní bezpečnosti. Může se jednat například o nárazníky nebo bezpečnostní výplně bočních dveří, hlavové opěrky, sluneční clony nebo výplně zavazadlového prostoru s ohledem na ochranu proti zadnímu nárazu.

Výroba finálních dílů spočívá ve stlačení dodávaného granulátu ve formě a zahřátí párou na zhruba 130 °C, čímž jsou jednotlivé granule navzájem svařeny. Poté přichází na řadu ochlazení a odformování. V porovnání s klasickým vstřikováním je výrobní cyklus velice efektivní a také je velmi krátký.[12]



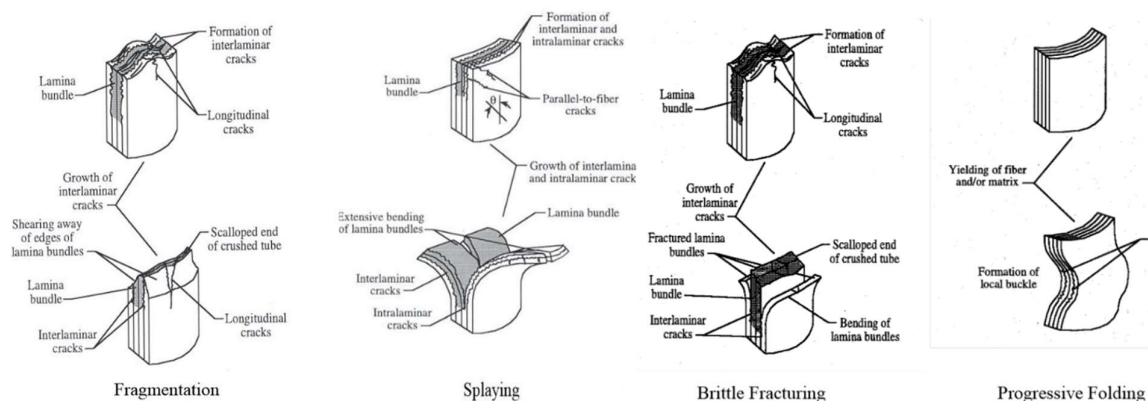
Obrázek 17 - Výplň dna zavazadlového prostoru [12]

## 5.4 Další používané materiály

V této skupině se nachází především kovové a kompozitní absorbéry. Tyto typy absorbérů, by však vzhledem k místu využití, bylo složité geometricky optimalizovat tak, aby při nárazu hlavou nedošlo například k výskytu ostrých hran. Dále jsou některé z těchto typů méně ekonomicky výhodné, a proto zde oblast těchto absorbérů bude popsána pouze krátce.

V případě kovových absorbérů se využívá plasticity kovové konstrukce, díky níž dochází k pohlcení kinetické energie nárazu. Pro konstrukci takovýchto prvků se nejčastěji využívá materiálů jako je hliník nebo ocel a jejich řízené deformace pomocí různých tvarových prvků a změny tloušťky. Často používaným deformačním prvkem z této skupiny jsou například hliníkové voštiny.[14]

Absorbéry z vláknových kompozitních materiálů s polymerní matricí vykazují většinou sice křehké chování, ale právě oblast, kdy dochází k porušování se využívá pro pohlcování kinetické energie nárazu. Vlastní porušování se skládá z různých mechanismů, které přispívají k absorpci energie. Jedná se o mechanismy jako je fragmentace, delaminace, křehké lámání nebo postupné skládání. Otázkou tedy je, jak tyto mechanismy vyvolat a vhodně je kombinovat pro nejlepší absorpci energie. Výhodou těchto prvků je jejich nízká hmotnost a možnost kombinace různých mechanismů porušování, ovšem nevýhody zde tvoří především vysoká cena a složitější výrobitelnost.[14] [15]



Obrázek 18 - Mechanismy porušování kompozitu [15]

## 6 Použitý software

Pro vypracování zadaného úkolu byl použit program Siemens NX. Konkrétně pro zhotovení modelu konstrukčního dílu a následné analýzy jeho chování. Dále byla, pro návrh materiálu, použita materiálová databáze Granta EduPack.

### 6.1 Siemens NX

Program Siemens NX vznikl spojením předchozích softwarových platform Unigraphics a I-deas, které společnost Siemens získala v roce 2007. Dnes již, díky mnohým inovacím a vylepšením patří mezi špičku v oblasti CAD/CAM/CAE technologií. Siemens NX je velmi výkonný a komplexní software pro 3D návrhy, simulaci a výrobu v mnohých průmyslových odvětvích. To z něj dělá velice hojně využívaný nástroj v oblasti letectví, automotive, průmyslu a dalších odvětví.[16]

Pro různé analýzy nabízí program spoustu řešičů. Jedním z nejpoužívanějších je SOL 101, který je určen pro statickou analýzu. Je vhodný pro simulaci chování za předpokladu malých deformací a lineárního materiálového chování. Umožňuje analyzovat napětí, deformace a další mechanické vlastnosti. Pro problém v této práci by však bylo vhodnější použít jeden z řešičů SOL 601 nebo SOL 402. Oba tyto řešiče se již používají pro pokročilou analýzu, která již zahrnuje například materiálové nelinearity jako jsou velké deformace nebo plasticita. Dále tyto řešiče dokáží přesně zpracovat kontakty mezi jednotlivými částmi nebo komponenty konstrukce.

### 6.2 Granta EduPack

Jedná se o softwarový nástroj vyvinutý společností Granta Design. Granta EduPack obsahuje rozsáhlou knihovnu materiálů ať už se jedná o kovy, polymery, keramiky nebo různé kompozity. Všechny materiály jsou zde podrobně popsány co do informací o jejich mechanických, tepelných nebo elektrochemických vlastnostech a dalších charakteristikách.

Dále nám Granta EduPack umožňuje provádět srovnávání jednotlivých materiálů dle námi vybraných vlastností, vyhledávání materiálů dle konkrétních vlastností. Jedná se o užitečného pomocníka při výběru materiálu, optimalizaci výkonu výrobku a minimalizaci jeho dopadu na životní prostředí.

## 7 Specifikace a vyjasnění požadavků

Před samotným návrhem bylo nutné vyjasnit si samotnou funkci dané komponenty, jaké požadavky musí splňovat, jak moc záleží na ekonomičnosti řešení a mnoho dalšího. Zadáním tedy bylo navrhnout vyrobiteľný díl, který se bude nacházet na krajním sedadle druhé řady. Bude splňovat všechny výše zmíněné zákonné požadavky. Měl by být také vhodný pro sériovou výrobu, z čehož vyplývá poměrně jednoduchý design a materiály z nichž je vyroben by měly být snadno cenově dostupné.

Tabulka 1 – Specifikace základních požadavků

<b>Specifikace požadavků</b>		
<b>Požadavky na vlastnosti</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Zdroj</b>
<b>a) Funkční požadavky</b>		
- Sedadlo	Druhá řada	Zadáno
- Umístění sedadla	Krajní	Zadáno
- Způsob uchycení komponenty	Trhací nýty	Zadáno
- Absorpce nárazové energie	Žebrovaním	Vlastní
<b>b) Požadavky na design a konstrukci</b>		
- Vnější design	Dodržet zadaný	Zadáno
- Pohledový/ nepohledový díl	Nepohledový	Zadáno
- Rozteč děr pro uchycení	Dána konstrukcí sedadla	Zadáno
- Počet děr pro uchycení	5	Zadáno
- Hmotnost	Minimální	Předpokládáno
<b>c) Vyrobiteľnost</b>		
- Způsob výroby	Vstřikování	Vlastní
<b>d) Vlastnosti z hlediska vlivu na bezpečnost</b>		
- Zákonné požadavky	Splnit	Zadáno
- Zabránit kontaktu s tvrdými částmi sedadla	Maximálně	Předpokládáno
- Zakrýt všechny ostré hrany	Maximálně	Předpokládáno
- Zabránit vzniku volných úlomků	Maximálně	Předpokládáno
<b>e) Požadavky k vlastnostem pro likvidaci</b>		
- Demontovatelnost	Nedůležité	Předpokládáno
- Recyklovatelnost	Jednoduchá a vysoká	Předpokládáno

Po uspořádání požadavků z hlediska celého životního cyklu do tabulky 1, bylo přistoupeno k návrhu materiálu komponenty.

## 8 Návrh materiálu

Před samotným výběrem bylo nutné si uvědomit co se od materiálu určeného pro tento typ použití vlastně očekává. Konstrukční požadavky, potřeby a podmínky byly převedeny na takzvanou funkci komponenty, omezující podmínky, cíle a volné proměnné. Následně lze již bude možné poměrně dobře určit, na základě jakých vlastností bude materiál vybrán. K porovnání vlastností jednotlivých materiálů lze využít již zmíněný software Granta EduPack.

**Funkce:** Jsou definovány účelem součásti. Pro navrhovanou komponentu jde tedy o absorpci energie při dopadu hlavy.

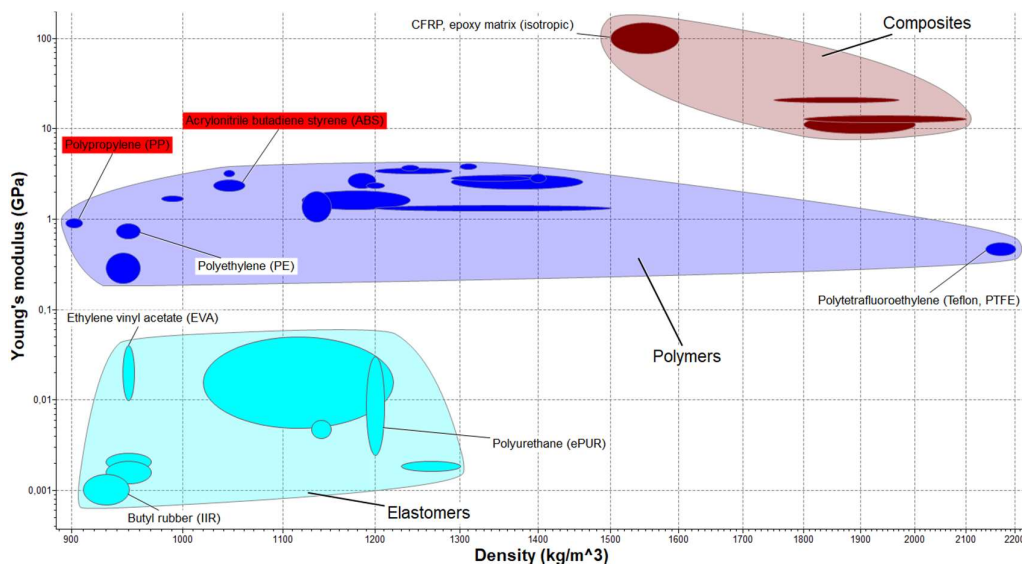
**Omezení:** Jedná se o podmínky, které je nutno splnit, aby mohla být funkce vykonávána. Zde tedy výrobitelnost vstřikováním, pevně daný vnější design a tuhost dílu (nesmí být moc tuhý, ale zároveň musí zachytit náraz).

**Cíle:** Veličiny, které mají být maximalizovány nebo minimalizovány. Cíly jsou maximální absorpce energie, minimální hmotnost a minimální cena.

**Volné proměnné:** Jsou to takové vlastnosti a parametry, které se mohou měnit tak, aby bylo možné optimalizovat zmíněné cíle. Zde do volných proměnných patří právě volba materiálu, rozložení žebër, ale také jejich konstrukce a tloušťka.

### 8.1 Srovnání vlastností materiálů

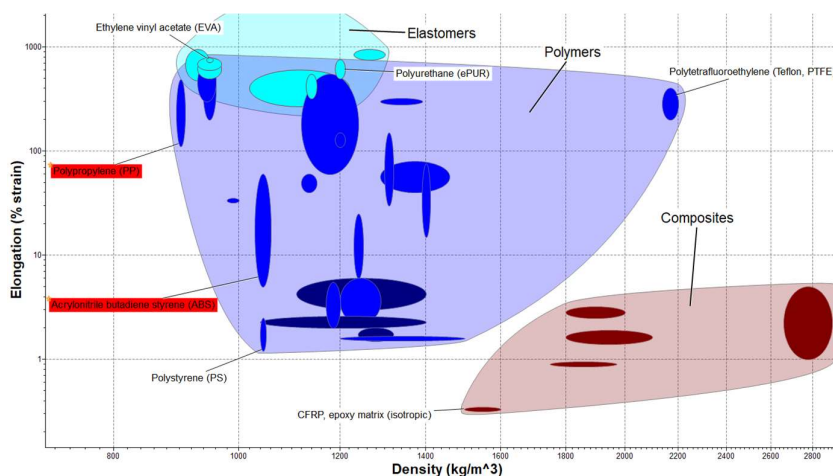
Jako první srovnávací vlastnosti byly zvoleny na y-ose youngův modul a na x-ose hustota.



Obrázek 19 – Porovnání vlastností Youngův modul – Hustota

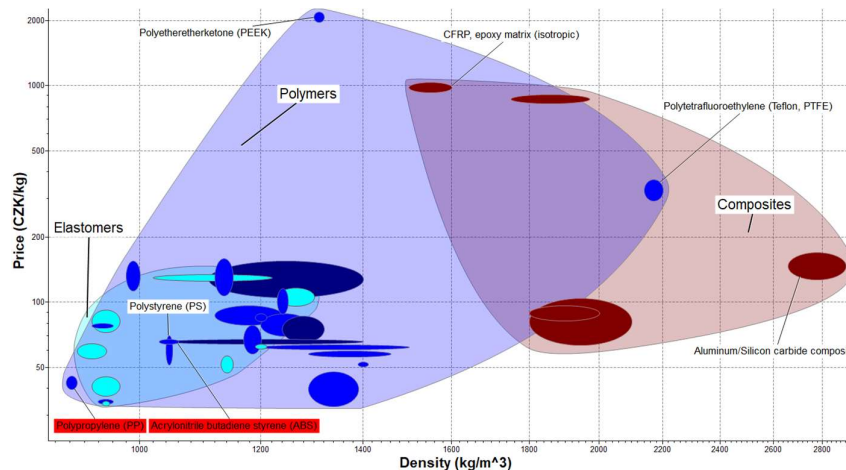
Již bylo zmíněno, že komponent by měl být sice tuhý, aby dokázal zachytit náraz, avšak neměl by být tuhý naopak moc, aby nedošlo k příliš rychlému zpomalení hlavy při nárazu a následnému poranění. Na obrázku 19 lze tedy vidět, že pokud budeme uvažovat pouze rodinu polymerů, ideální materiál by se mohl nacházet vlevo (nejlehčí) a zhruba někde uprostřed co do tuhosti. Předběžně byly vybrány dva červeně zvýrazněné materiály. PP se jeví jako nejlepší volba, avšak v případě malé tuhosti dílu by mohl být použit například právě ABS.

Z výše uvedeného vyplývá, že PP by tedy měl být měkčí a mít větší schopnost deformace, což je chtěné, protože cílem je pohltit náraz právě pomocí deformace, ale nesmí být měkký moc. To potvrzuje srovnání na obrázku 20, které porovnává schopnost poměrného prodloužení opět vzhledem k hustotě materiálu.



Obrázek 20 – Srovnání vlastností Poměrné prodloužení – Hustota

Poslední zde zmíněný parametr bude cena. Na obrázku 21 lze vidět porovnání ceny znovu vzhledem k hustotě a také, že polypropylen je velice levným a zároveň lehkým materiálem.



Obrázek 21 - Srovnání vlastností Cena – Hustota



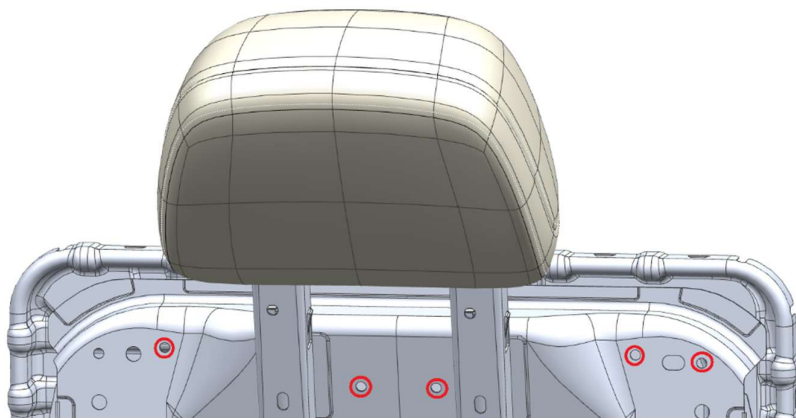
Na základě pečlivého srovnání nejen více zmíněných vlastností byly vybrány materiály PP a jako náhradní materiál v případě nesplnění požadavků ABS. V tabulce 2 jsou vidět rozsahy jejich základních mechanických vlastností, které se liší v závislosti na jednotlivých výrobcích. Hodnoty převzaty z materiálové databáze Granta EduPack.

**Tabulka 2 – Rozsahy vlastností vybraných materiálů**

<b>Vlastnosti materiálů</b>			
	<b>PP</b>	<b>ABS</b>	<b>Jednotky</b>
<b>a) Základní vlastnosti</b>			
- Cena	39,8 - 45,6	64,3 - 67,5	CZK/kg
- Hustota	895 - 909	1030 - 1060	kg/m <sup>3</sup>
<b>b) Mechanické vlastnosti</b>			
- Youngův modul	0,824 - 1,02	2,07 - 2,76	GPa
- Modul pružnosti smyk	0,327 - 0,36	0,74 - 0,987	GPa
- Poissonovo číslo	0,422 - 0,465	0,391 - 0,407	-
- Mez elasticity	24,1 - 28,4	34,5 - 49,6	Mpa
- Pevnost v tahu	26 - 50	37,9 - 51,7	Mpa
- Pevnost v tlaku	23,8 - 25	39,2 - 86,2	Mpa
- Poměrné prodloužení	112 - 483	5 - 60	%
- Tvrdost - Vickers	8	10 - 15	HV

## 9 Konstrukční návrh

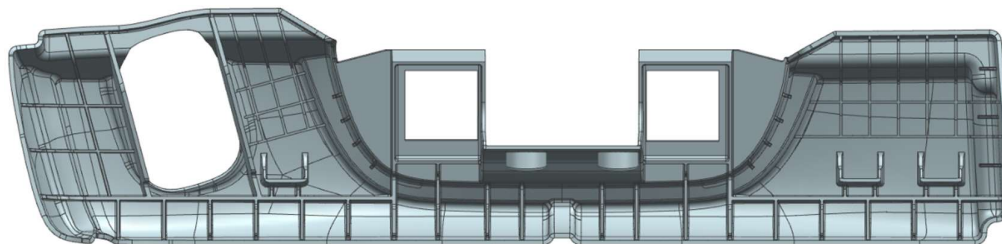
Na začátku konstrukčního návrhu byly převzaty plochy, podle kterých měl být dodržen design komponentu. Dále rozměry a rám sedadla na který měl být díl uchycen. Díry pro upevnění jsou červeně znázorněny na obrázku 22. Na základě těchto požadavků byl zhotoven konstrukční návrh.



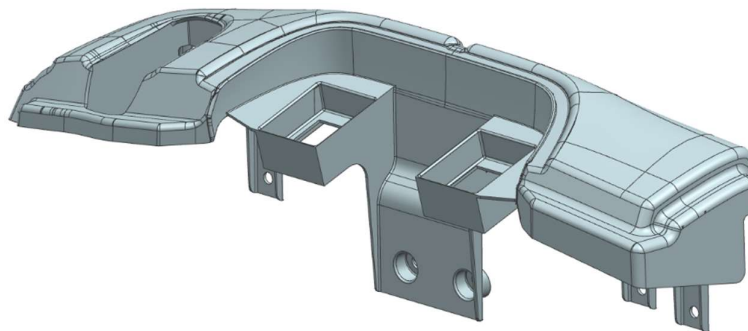
Obrázek 22 - Díry pro uchycení

### 9.1 Hrubý konstrukční návrh

Nejprve byl zhotoven pouze hrubý konstrukční návrh. Tloušťka žeber je zde 1,2 mm a jejich rozmístění je vidět na obrázku 23.



Obrázek 23 - Rozložení žeber při hrubém návrhu



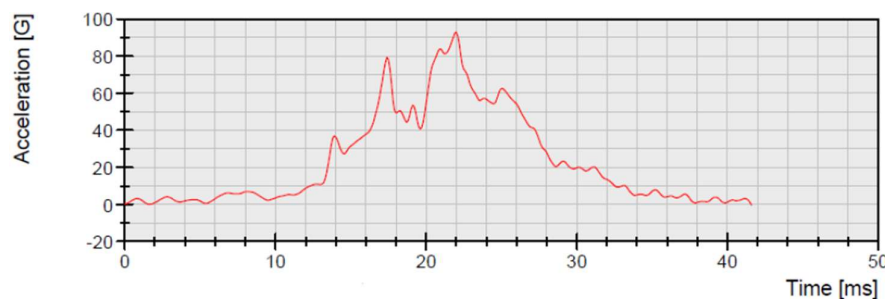
Obrázek 24 - Celková podoba hrubého návrhu

### 9.1.1 Analýza

Pro analýzu byla vytvořena sestava makety složená z modelu impaktoru a navržené komponenty. Před síťováním bylo provedeno zjednodušení modelu, kdy byly odstraněny všechny zaoblení a prvky, které by neměly vliv na výsledné chování dílu. Tyto prvky by způsobovaly vady, nepravidelnost sítě a také jemnější síťování v těchto místech způsobující značné zvýšení výpočtového času. Následovalo síťování pomocí 3D elementů bez meziuzlu, tedy CTETRA (4), které značně zjednoduší náročnost výpočtu. Velikost elementů byla 2.5 mm s podmínkou minimálně dvou elementů na tloušťku stěny. Dále bylo povoleno zjemnění sítě v okolí tvarově složitějších prvků a kvalita sítě zkontrolována pomocí funkce „element quality“, v síti se nenacházel žádný vadný element. Také byl přiřazen materiál polypropylen.

Následně byla vytvořena simulace. Protože cílem této analýzy bylo zatím jen velmi hrubě odhadnout chování dílu a také ověřit funkci výpočtového modelu, byl zvolen řešič SOL 101 Linear Statics popsáný v kapitole 6.1. Funkcí „surface to surface contact“ definován kontakt mezi impaktorem a komponentem s koeficientem statického tření 0.5. Pomocí uživatelsky definovaných vazeb byly zafixovány díry pro uchycení. Dále byla, pomocí funkce „1D connection“ a dokonale tuhých elementů RBE2, propojena rovinná plocha impaktoru s předem vytvořeným bodem. Tomuto bodu byly odebrány všechny stupně volnosti mimo posuvu ve směru osy x, tedy ve směru nárazu a pod úhlem 45°. Otázkou však bylo jakou sílu aplikovat na tento bod a nahradit tak náraz impaktoru.

**Výpočet síly při nárazu:** Vzhledem k přesně definovaným parametrům zkoušky lze přibližně sílu působící během nárazu impaktoru poměrně snadno spočítat z věty o změně hybnosti, která říká, že změna hybnosti v časovém intervalu je dána impulsem výsledné vnější síly v témže časovém intervalu. Je však ještě potřeba znát čas do zastavení impaktoru. Ten byl převzat z provedeného skutečného testu za podobných podmínek. Lze z něj vyčíst, že k nárazu impaktoru došlo zhruba v 6 ms a k jeho odskoku (nulová rychlost impaktoru) okolo 23 ms.



Obrázek 25 - Průběh decelerace při testu absorpce energie [17]

Z výše uvedeného byl získán časový úsek a další hodnoty pro výpočet impulsu síly při testu jsou již známé.

Parametry: Rychlost impaktoru při nárazu  $v_0 = 24,1 \text{ km/h} = 6,694 \text{ m/s}$

Redukovaná hmotnost ve středu nárazu  $m_r = 6,8 \text{ kg}$

Čas do zastavení kyvadla  $t = 17 \text{ ms}$

Věta o změně hybnosti:

$$H - H_0 = \int_0^t F dt \rightarrow m_r v - m_r v_0 = F * t$$

$$F = \frac{0 - m_r v_0}{t}$$

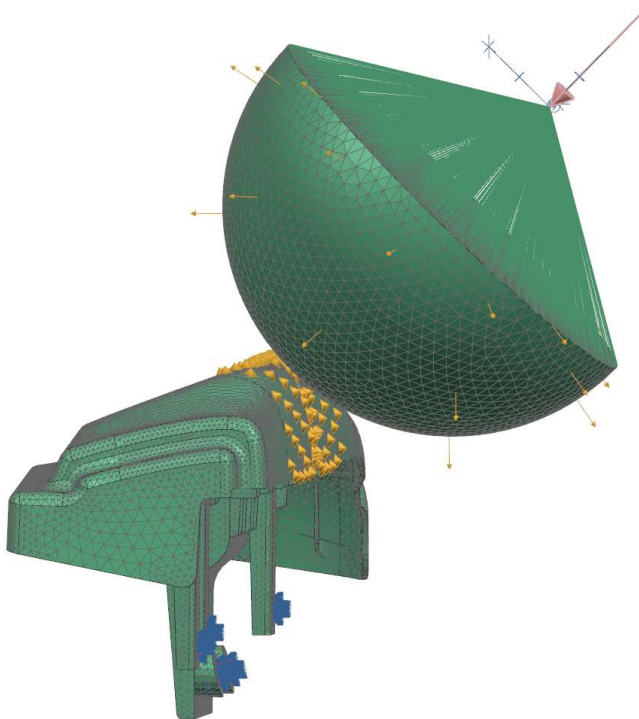
$$F = -\frac{6,8 * 6,694}{17 * 10^{-3}} = -2677,6 \text{ N}$$

Kde:  $H$  = koncová hybnost,  $H_0$  = počáteční hybnost

$F$  = vnější působící síla,  $v_0$  = počáteční rychlost

Síla vyšla záporná, protože se v podstatě jedná o sílu, kterou působí komponent na impaktor.

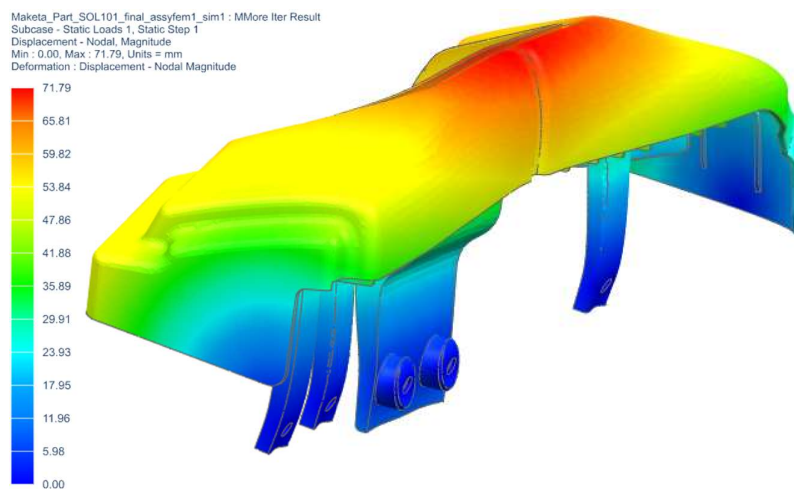
Tato síla byla tedy aplikována na zmíněný bod viz. obr. 26.



Obrázek 26 - Sestava připravena pro analýzu

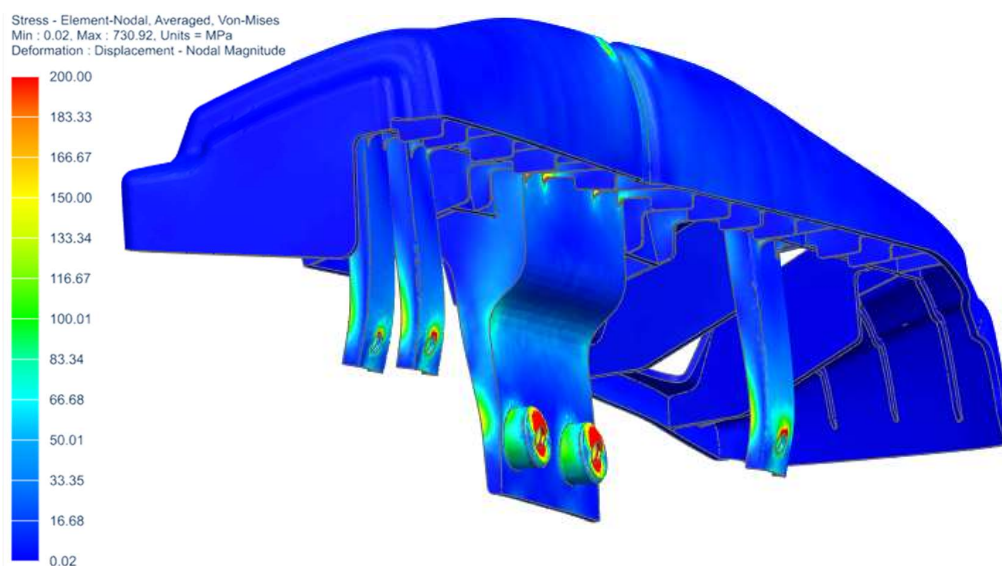
### 9.1.1.1 Výsledek

Výpočet trval i přes takto zjednodušený model ke dvěma hodinám. Z obrázku 27, který ukazuje deformaci komponenty jsou patrné poměrně velké deformace, a to zejména vlivem ohybu všech držáků.



Obrázek 27 – Deformace dílu, hrubý konstrukční návrh

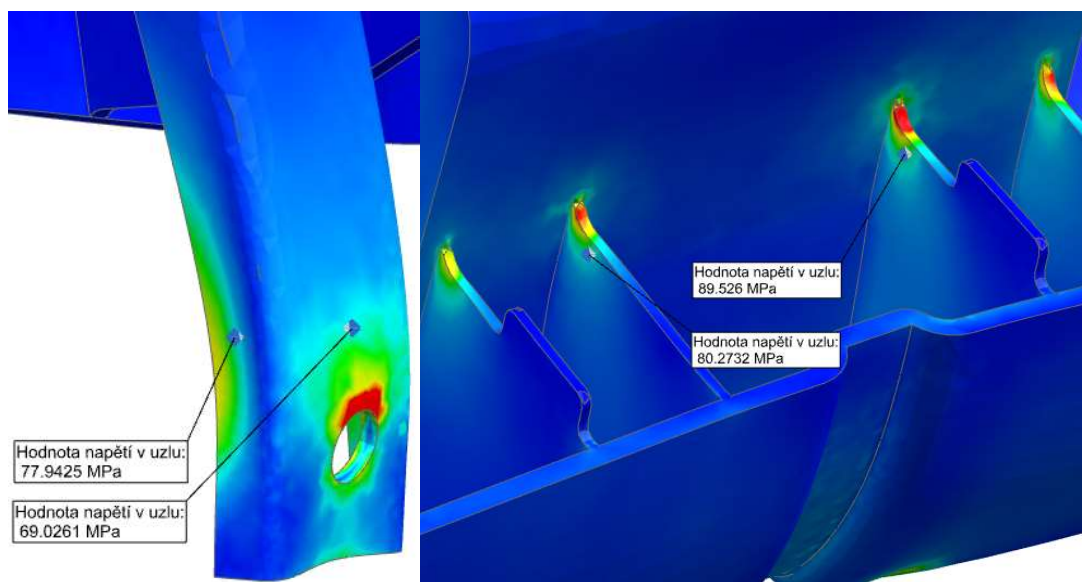
Na obrázku 28 je vidět rozložení napětí v dílu. Stupnice byla manuálně upravena pro lepší vizualizaci výsledků, které zkreslovaly napěťové špičky v okolí děr, které vznikly jejich zafixováním. Při zanedbání tohoto napětí jsou kritickými místy dílu držáky v oblasti nad otvory pro uchycení, dále uchycení na středu a žebra v oblasti nárazu.



Obrázek 28 – Rozložení napětí v dílu, hrubý konstrukční návrh

Při vyhodnocování napětí v těchto oblastech je nutné brát tyto výsledky s velkou rezervou, protože napětí se pohybuje již za mezí elasticity, a tak pravděpodobně dojde k plastickému chování materiálu nebo zde pravděpodobně, vzhledem k jejímu poměrně velkému překročení, spíše k destrukci. Lze tedy pouze odhadovat, jak se díl bude chovat. Bylo by vhodné v těchto oblastech použít složitější analýzu s uvažováním nelineárního chování materiálu, která by ukázala například možné zborcení žeber nebo postupné borcení bočnic u držáků.

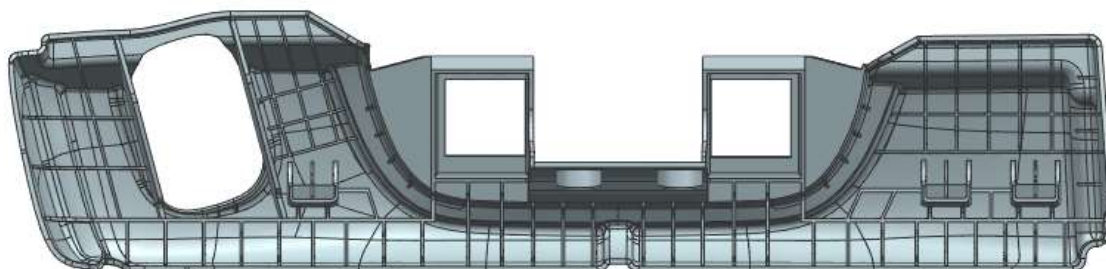
Dále lze také odvodit z výsledků, že pokud nedojde k nárazu na střed jako v tomto případě, ale dojde k nárazu na jednu ze stran, bude situace ještě horší. Vznikne tak riziko destrukce držáků, následného posuvu komponentu a možného kontaktu hlavy s tvrdými částmi sedadla. Po vyhodnocení těchto výsledků a úvah byla provedena úprava dílu a vytvořen tak finální konstrukční návrh.



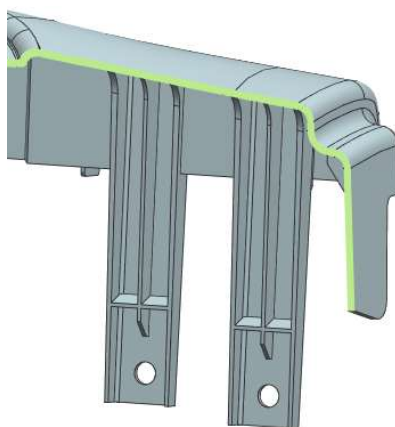
Obrázek 29 – Detail napětí v držáku a žebrech, hrubý konstrukční návrh

## 9.2 Finální konstrukční návrh

V tomto návrhu bylo změněno rozložení žebër, která byla lehce zhuštěna, aby pokud možno došlo k rozptýlu zatížení do jejich většího počtu. Těto změny si lze všimnout hlavně ve středové části kde se žebra přiblížila k sobě a vznikl tak prostor pro přidání ještě jednoho páru. Mimo to byla tloušťka žebër snížena z 1,2mm na 1mm. Dále bylo na uchycení přidáno středové žebro a byly zvýšeny boční stěny držáků. Komponenta by tak měla být podle předpokladů o něco tužší. Provedené změny viz. obrázek 30 a 31.



Obrázek 30 – Rozložení žebër finálního návrhu



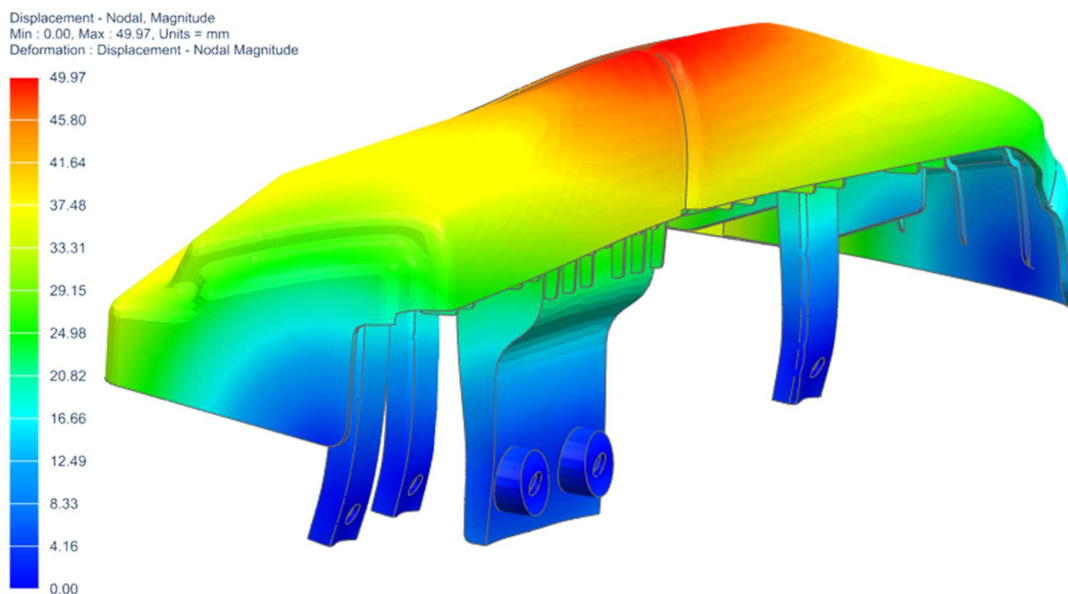
Obrázek 31 – Provedená úprava uchycení

## 9.2.1 Analýza

Analýza tohoto finálního konstrukčního návrhu probíhala za podobných podmínek. Byly ponechány stejné okrajové podmínky, aplikována stejná síla. Ovšem v tomto případě již byl použit řešič s názvem SOL 402 Multi-Step Nonlinear Kinematics zmíněn v kapitole 6.1. Tato změna by s sebou měla přinést určité zpřesnění výsledku. To zejména protože v tomto řešení již dochází k průběžnému aktualizování kontaktu mezi tělesy. Oproti SOL 101 kde řešič pracuje pouze s kontaktem, který najde na začátku řešení. Navíc nám tento řešič dává možnost například předzatížit sestavu nebo díl, tak aby došlo ke správnému kontaktu součástí a následně od určitého imaginárního času, soustavu zatížit plnou silou. Bohužel tohle s sebou přináší značnou náročnost výpočtu, a tak při tomto řešení byla použita síť s velikostí elementu 6 mm, ale stále s podmínkou dvou elementů na tloušťku a s povoleným zjemněním v okolí menších prvků.

### 9.2.1.1 Výsledek

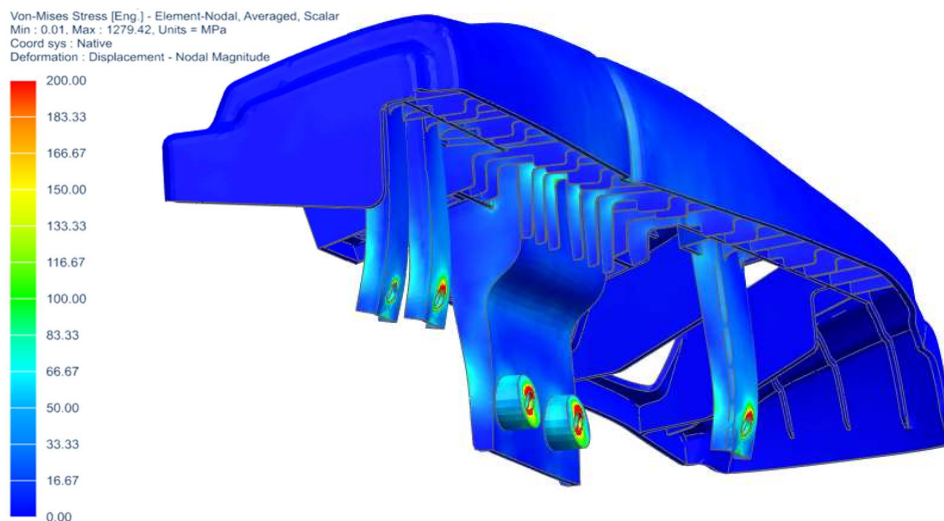
Po vyhodnocení bylo již na první pohled patrné že dochází k menším deformacím než v prvním případě. Maximální posunutí zde bylo zhruba o 20 mm menší, viz. obrázek 32.



Obrázek 32 - Deformace dílu, finální konstrukční návrh

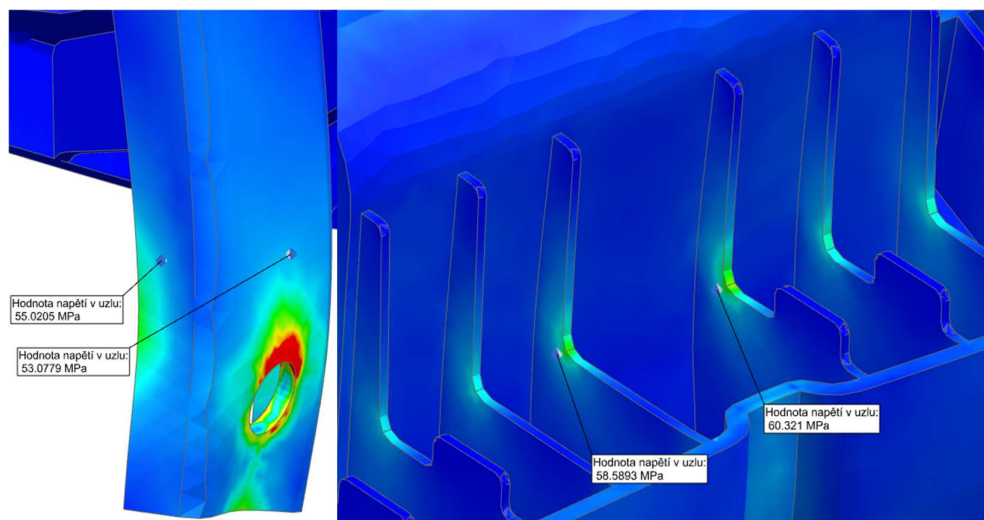


Rozložení napětí v takto upraveném dílu lze vidět na obrázku 33, kde se ukazuje jeho rovnoměrnější distribuce v žebrech a také již menší napětí v držácích. Stupnice byla pro lepší vizualizaci výsledků opět upravena na stejné hodnoty jako v předešlém případě.



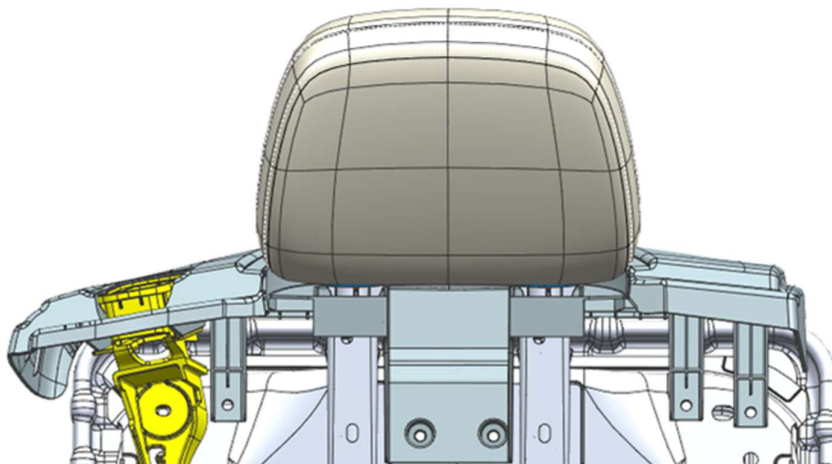
**Obrázek 33 - Rozložení napětí v dílu, finální konstrukční návrh**

Při vyhodnocování napětí ve stejných místech jako v předešlém případě si lze povšimnout jeho snížení. Napětí je u žebrek vyhodnocováno dále od maxima proto, že napětí tam může být zkresleno ostrým přechodem elementů v zaoblení. Ovšem i dále od patrných maxim dochází k překročení meze elasticity a z toho lze odvodit, že bude docházet k plastickému chování nebo destrukci jak v oblasti žebrek, tak v oblasti držáků. Také je dobré si povšimnout posunutí deformace a vyšších hodnot napětí směrem dolů, blíže k otvorům pro nýty. To je způsobeno přidáním středového žebra, jehož délka je limitována právě nutným prostorem pro hlavu nýtu.



**Obrázek 34 - Detail napětí v držáku a žebrech, finální konstrukční návrh**

## 10 Finální shrnutí výsledků



Obrázek 35 - Komponenta na konstrukci sedadla

Z výsledků se může zdát, že díl nemá šanci obstát, avšak je důležité si uvědomit, že v tomto případě je plasticita a porušení materiálu v určitých oblastech vlastně chtěným chováním. Nemělo by zde být cílem navrhnout dokonale tuhý díl, protože v podstatě každá elastická, ale i plastická deformace žeber nebo dokonce jejich praskání, bude znamenat právě zmiňovanou absorpci nárazové energie. Pokud by byl díl dokonale tuhý, došlo by skoro k okamžitému zastavení hlavy a navržený díl by tak nesplňoval zákonné požadavky. Zároveň síla, která zde byla aplikována je vypočtená špičková síla, působící po velmi krátkou dobu při nárazu a nelze tedy prakticky očekávat, že navržený komponent bude schopný této síle odolávat při statickém zatížení. Takto zpracovaná analýza není bohužel korektním způsobem vyhodnocení absorpce energie a nelze tedy na jejich výsledcích dělat závěry o splnění nebo nesplnění zmiňovaného testu. Správným způsobem vyhodnocení by bylo provést plně dynamickou simulaci se zahrnutím nelineárního chování a destrukcí materiálu, což však vzhledem k celkové náročnosti, bohužel nebylo v této práci proveditelné.

Ovšem dá se z takto zpracované analýzy odhadovat chování dílu a jeho možná kritická místa. Dalo by se předpokládat, že při nárazu dojde nejprve k absorpci určitého množství energie ohnutím a deformací držáků, do doby, než dojde k opření dílu v místě průchodu uchycení hlavové opěrky. Po tomto zapření bude pravděpodobně zbytek energie pohlcen deformací a destrukcí žeber. Je důležité zmínit, že určité množství energie pohltní také samotný rám opěradla a určitě jeho polohování. Ze zmíněného vyplývá že jde o velice komplexní problematiku, kterou by bylo potřeba ještě dále řešit, a to buď výrobou s následným experimentálním zkoušením nebo zmíněnou plně dynamickou analýzou.

## 11 Závěr

Hlavní náplní této práce byl návrh komponenty, umístěné na zadní straně sedadel, která slouží k absorpci nárazové energie při dopadu hlavy na tento díl. Sedadla jsou však částí vozidla, která zejména při nehodách přímo ovlivňuje bezpečnost všech pasažerů. Mnohdy tak na jejich kvalitním a bezpečném provedení může záviset i lidský život. Toto dělá ze sedadel velmi kontrolovanou součást podléhající mnohým předpisům a požadavkům, které bylo nutno zohlednit při navrhování zmíněného dílu.

První rešeršní část práce je věnována seznámení se s konstrukcí sedadel, s jejich hlavními prvky a také komfortními a bezpečnostními funkcemi. Navazujícím tématem je shrnutí legislativních požadavků spolu s detailním rozbořem normy ECE R17-10, která nejvíce pokrývá problematiku řešenou v této práci. Poslední úsek teoretické části tvoří průzkum materiálů používaných pro absorpci energie.

Základem praktické části byla specifikace požadavků na díl samotný, ale také na materiál komponenty. Vyjasnění očekávaných vlastností materiálu, na jejichž základě byly s pomocí softwaru Granta EduPack vybrány materiály, které by mohly být použitelné. Při znalosti materiálu přišlo na řadu vytvoření hrubého konstrukčního návrhu ve formě 3D modelu, pomocí softwaru Siemens NX.

Návrh byl následně zkontrolován pomocí rychlé statické MKP analýzy, kde na díl zafixovaný v otvorech pro šrouby byla aplikována, skrze model impaktoru, vypočtená statická síla. Po vyhodnocení výsledků této simulace bylo provedeno vyztužení kritických částí komponenty a následná MKP kontrola těchto úprav. Tato analýza již byla provedena pomocí komplexnějšího řešiče, který lépe zvládá větší deformace, dokáže lépe nadefinovat kontakt mezi tělesy a poskytnout tak přesnější náhled na chování dílu.

V poslední řadě proběhlo finální shrnutí všech výsledků a úvah o možném průběhu absorpce energie, na které by se dalo skvěle navázat rozšířením této práce. A to například složitou dynamickou simulací se zahrnutím všech parametrů a proměnných vstupujících do problematiky absorpce energie.

## Seznam použitých zdrojů

[1] VLK, František. Karosérie motorových vozidel: ergonomika, biomechanika, pasivní bezpečnost, kolize, struktura, materiály. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5277-9

[2] MODERNÍ SEDADLA: CO JE SKRYTO POD POTAHEM. Skoda-storyboard.com [online]. 12. 11. 2020 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/skoda-svet-cs/inovace-a-technologie/moderni-sedadla-co-je-skryto-pod-potahem/>

[3] SafetyCompanion 2023 [online]. [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.carhs.de/en/companion-poster/product/safetycompanion-2023-pdf-download.html?sprache=English>

[4] Proposal for the 10 series of amendments to UN Regulation No. 17 (Strength of seats, their anchorages and head restraints). In: . 2020, E/ECE/324/Rev.1/Add.16/Rev.6. Dostupné z: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/G20/212/84/PDF/G2021284.pdf?OpenElement>

[5] Advancement in Vehicle Safety in Malaysia from Planning to Implementation: Car safety rating program (NCAP) on the world map. In: Researchgate.net [online]. 2017 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Car-safety-rating-program-NCAP-on-the-world-map-The-first-official-test-at-MIROS-Crash\\_fig4\\_321209695](https://www.researchgate.net/figure/Car-safety-rating-program-NCAP-on-the-world-map-The-first-official-test-at-MIROS-Crash_fig4_321209695)

[6] Legislative vs Consumer Testing [online]. [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.greenncap.com/legislative-vs-consumer-testing/>

[7] In: Tuvsud.com [online]. [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/en/e-essentials-newsletter/automotive-essentials/e-essentials-03-2020/vehicle-safety-testing-at-component-level-interiors-testing>

[8] JONGSOO, Lim. A study on energy absorption characteristic and head injury performance according to the characteristic of countermeasures and space between interior and body structures [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://www-esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/23/files/23ESV-000162.PDF>

[9] , Plascencia-Mora H, Ledesma-Orozco ER, Aguilera-Gómez E, Gómez-Márquez DA a Rodríguez-Sánchez AE. Numerical analysis of energy absorption in expanded polystyrene foams. In: Journal of Cellular Plastics [online]. 2020;56(4):411-434. Mexico [cit. 2023-01-10]. DOI:10.1177/0021955X19880506

[10] Výroba polystyrenu pod lupou. Hitaplast.cz [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://www.hitaplast.cz/vyroba-polystyrenu>

[11] In: Ergaerospace.com [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://ergaerospace.com/energy-absorption/>

[12] MAREK, Pavel. Výroba a aplikace expandovaného polypropylenu. Mmspektrum.com [online]. Cheb, 13. 02. 2013 [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-a-aplikace-expandovaneho-polypropylenu>

[13] Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a frontal collision. In: . 2017, E/ECE/324/Rev.1/Add.93/Rev.3. Dostupné také z: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2017/R094r3e.pdf>

[14] RŮŽIČKA, Milan. CHOVÁNÍ KOMPOZITŮ PŘI RÁZOVÉM ZATÍŽENÍ. In: Csm-kompozity.wz.cz [online]. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v. v. i., Prosecká 809/76, 190 00 Praha 9, 2018 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: [http://www.csm-kompozity.wz.cz/prezentace\\_Ruzicka\\_final.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/prezentace_Ruzicka_final.pdf)

[15] J. MICHAEL STARBUCK. Test Methodologies for Determining Energy Absorbing Mechanisms in Automotive Composite Material Systems. In: Ornl.gov [online]. [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: [https://technicalreports.ornl.gov/cpr/pres/107057\\_.pdf](https://technicalreports.ornl.gov/cpr/pres/107057_.pdf)

[16] Siemens NX. Wikipedia.org [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Siemens\\_NX](https://en.wikipedia.org/wiki/Siemens_NX)

[17] HUNAGUND, Gajanan a Chiu LI-BAN. Sensitivity study of plastic material failure and counter measure to improve the ECE R17 seat back energy absorption [online]. Stansted: FISITA (UK) Limited, 2018. Copyright - Copyright 2019 FISITA (UK) LIMITED; Last updated - 2019-08-16. ISBN 978-0-9572076-7-7