



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PASIVNÍ BEZPEČNOST - ČELNÍ SRÁŽKA

PASSIVE SAFETY - FRONTAL CRASH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kateřina Sendlerová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Blaták, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka: **Kateřina Sandlerová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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

PASIVNÍ BEZPEČNOST – ČELNÍ SRÁŽKA

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pasivní bezpečnost je jedním z důležitých úkolů při návrhu vozidla. Hraje roli i z hlediska zákaznických preferencí. Přestože za posledních několik desítek let byl učiněn v této oblasti značný pokrok, s rozvojem nových materiálů a výpočetních postupů zůstává stále prostor pro další její zlepšování. Při návrhu jednotlivých opatření je třeba vycházet ze statistik samotných poranění posádky ve vozidle a také mechanismu samotné srážky.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši v oblasti technických řešení pasivní bezpečnosti vozidel.

Analyzovat dopravní nehody (resp. srážky) s ohledem na poranění osob ve vozidle i mimo vozidlo (ostatní účastníci silničního provozu).

Analyzovat příčiny dopravních nehod i ve stavu k mechanismu samotné srážky.

Navrhnout vlastní opatření pasivní bezpečnosti vozidla pro čelní srážku tak, aby byla ochráněna samotná posádka vozidla při zachování bezpečnosti zejména chodců.

Seznam doporučené literatury:

MORELLO, Lorenzo, et. al. The Automotive Body. Dordrecht: Springer Verlag, 2011. 668 s. ISBN 978-94-007-0512-8.

SHIGLEY, Joseph Edward, MISCHKE, Charles R. a BUDYNAS, Richard G. (ed.). Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-26290.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá pasivní bezpečností, konkrétně pasivní bezpečností při čelní srážce. Práce obsahuje rešeršní část v oblasti pasivní bezpečnosti, a to od její historie až po detailní popis chování karoserie při čelní srážce automobilu. Je zde i rozebrána nehodovost s ohledem na zranění posádky a chodců. Cílem práce je pak návrh opatření pro zlepšení pasivní bezpečnosti nejen automobilu a jeho posádky, ale i chodců při dopravní nehodě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Automobil, čelní srážka, pasivní bezpečnost, deformační člen, karoserie, zranění, kinetická energie, hliník

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with passive safety, specifically passive safety in frontal crash. The thesis includes a research section in the field of passive safety, from history to a detailed description of the car body behaviour in the frontal crash. Accident rate with regards to the crew and pedestrian injuries is included as well. The result of this thesis is the measures proposal to improve passive safety in the traffic accidents not only of cars but the crew and pedestrians as well.

KEYWORDS

Car, frontal crash, passive safety, deformation member, body, injury, kinetic energy, aluminium

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SENDEROVÁ, Kateřina. *Pasivní bezpečnost – čelní srážka*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ondřej Blaťák. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149785>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Blatáka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Kateřina Sandlerová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce, Ing. Ondřeji Blaťákovi, Ph.D., za odborné rady při tvorbě práce a zejména za vstřícný přístup. Dále bych chtěla poděkovat panu Bc. Markovi Krejčímu za poskytnutí anonymní zdravotnické dokumentace od ZZS JmK. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

Úvod.....	9
Cíl práce.....	9
1 Dopravní nehoda.....	10
1.1 Zranění při dopravních nehodách.....	10
2 Pasivní bezpečnost.....	16
2.1 Historie deformačních zón.....	16
2.2 Funkční souvislosti a koncepce karoserie.....	18
2.3 Pasivní bezpečnost a předpisy k zajištění ochrany.....	19
2.4 Předpisy EHK k zajištění ochrany cestujících.....	20
3 Ochrana proti nárazům.....	23
3.1 Možnosti absorpce nárazové energie.....	23
3.2 Zákonné požadavky na nárazníkové systémy.....	23
4 Ochrana účastníků silniční dopravy.....	24
4.1 Struktura karoserie.....	24
4.1.1 Deformační vlastnosti struktury.....	27
5 Materiály pro karoserie osobních vozidel.....	28
5.1 Ocel.....	28
5.2 Hliník a jeho slitiny.....	29
5.3 Hořčík a jeho slitiny.....	29
5.4 Kovové pěny.....	29
6 Návrh deformačního členu.....	31
6.1 Deformační člen z hliníkové pěny.....	32
6.1.1 Výběr vhodné hliníkové pěny.....	33
6.1.2 Konstrukční návrh.....	34
6.2 Hydraulický deformační člen.....	35
6.2.1 Konstrukční návrh hydraulického deformačního členu.....	36
Závěr.....	37
Použité informační zdroje.....	38
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	39

ÚVOD

V dnešní době si téměř nikdo z nás nedovede představit život bez automobilů. Automobily se tak staly nedílnou součástí našich životů. Každý z nás je využívá k jinému účelu. Při cestách automobilem jsme vystaveni možnosti vzniku dopravní nehody, a to ať už cestujeme na dovolenou stovky kilometrů daleko nebo jedeme jen krátkou cestu na nákup či do práce. Vzhledem ke stále hustšímu provozu na silnicích dochází i k většímu počtu dopravních nehod. A to z mnoha příčin. Dopravní nehody mohou mít pro posádku automobilu mnohdy až fatální následky. Dopravní nehody se však netýkají pouze posádek automobilů nebo jiných dopravních prostředků, ale stále častěji jsou účastníky dopravních nehod i chodci.

Z tohoto důvodu se bezpečnost posádky automobilu, ale i chodců, stala v posledních letech velkým tématem při navrhování bezpečnostních prvků automobilů, ať už se jedná o prvky aktivní nebo pasivní bezpečnosti.

Bakalářská práce je zaměřena konkrétně na čelní srážku automobilu, a to nejen s překážkou či jiným automobilem, ale i čelní srážku automobilu s chodcem, kdy není ohrožena pouze posádka daného automobilu, ale i chodec. Cílem mé práce je analýza dopravních nehod s ohledem na poranění osob v automobilu i mimo něj a návrh zlepšení pasivní bezpečnosti automobilu se zaměřením na konstrukci přední části automobilu tak, aby byla ochráněna posádka automobilu i samotní chodci.

CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši pasivní bezpečnosti automobilů. Dále analyzovat dopravní nehody s ohledem na poranění posádky vozidla i osob mimo něj. Velkou částí práce je navrhnout opatření pasivní bezpečnosti automobilu pro čelní náraz, aby byla ochráněna nejen posádka automobilu, ale případně i chodci.

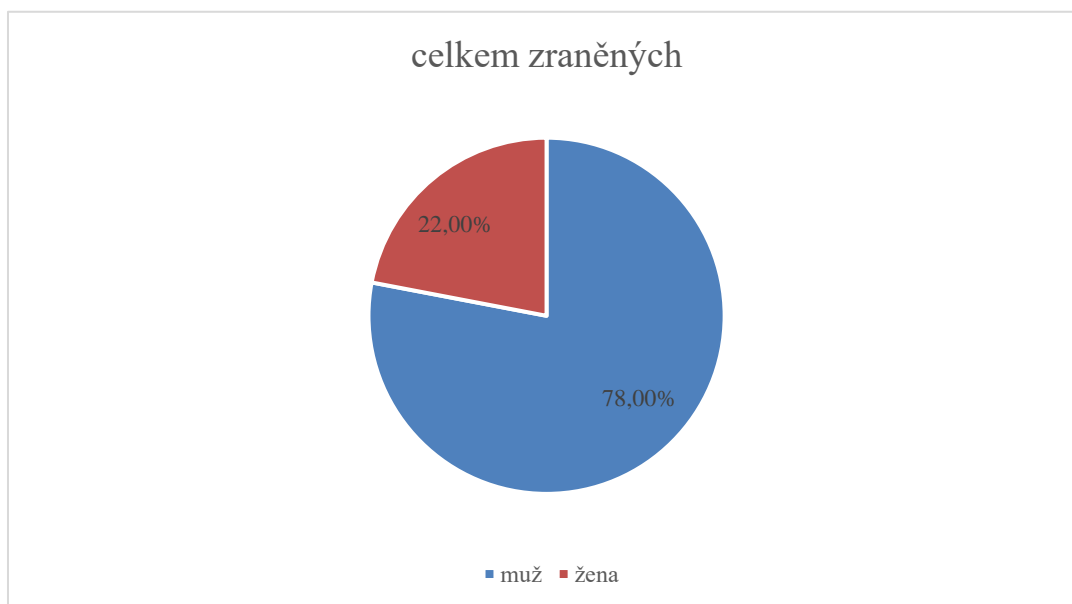
1 DOPRAVNÍ NEHODA

Dopravní nehoda je podle zákona o provozu na pozemních komunikacích 361/2000 Sb. § 47 definována následovně:

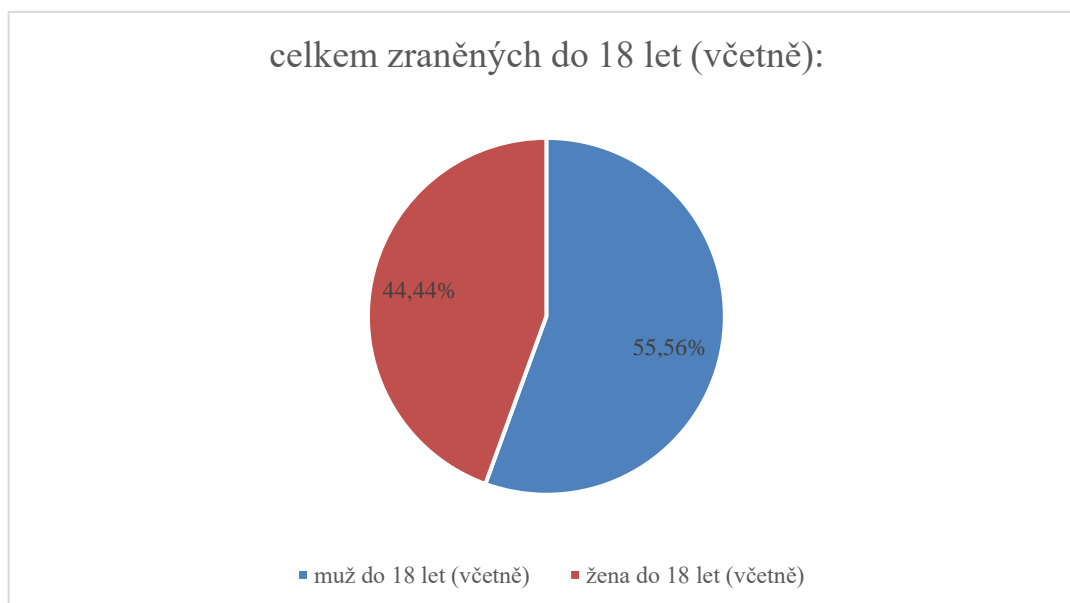
„Dopravní nehoda je událost v provozu na pozemních komunikacích, například havárie nebo srážka, která se stala nebo byla započata na pozemní komunikaci a při níž dojde k usmrcení nebo zranění osoby nebo ke škodě na majetku v přímé souvislosti s provozem vozidla v pohybu.“ [1]

1.1 ZRANĚNÍ PŘI DOPRAVNÍCH NEHODÁCH

Jak je zmíněno v zákoně, za dopravní nehodu se považuje situace, kdy mimo jiné dojde k usmrcení nebo ke zranění osob. Za pomoci zdravotnické záchranné služby Jihomoravského kraje (ZZS JmK) byla vytvořena statistika zranění při dopravních nehodách v Jihomoravském kraji v roce 2022. Jedná se o řidiče, spolujezdce, cyklisty, motocyklisty a chodce. Mezi spolujezdce a chodce můžeme zařadit i děti do 18 let včetně. Z databáze ZZS JmK bylo použito celkem 50 anonymních zdravotnických dokumentací, které mají společnou diagnózu, a to polytrauma. Do statistiky bylo zařazeno 39 mužů a 11 žen, z toho 9 dětí.



Graf 1: procentuální rozdělení zraněných podle pohlaví



Graf 2: procentuální rozdělení zraněných podle pohlaví do 18 let včetně

Následující tabulka ukazuje rozdělení zranění podle stupně závažnosti. Tabulka byla vytvořena na základě podkladů v dokumentacích pacientů, kdy závažnost zranění hodnotili členové ZZS JmK po převzetí pacienta do péče.

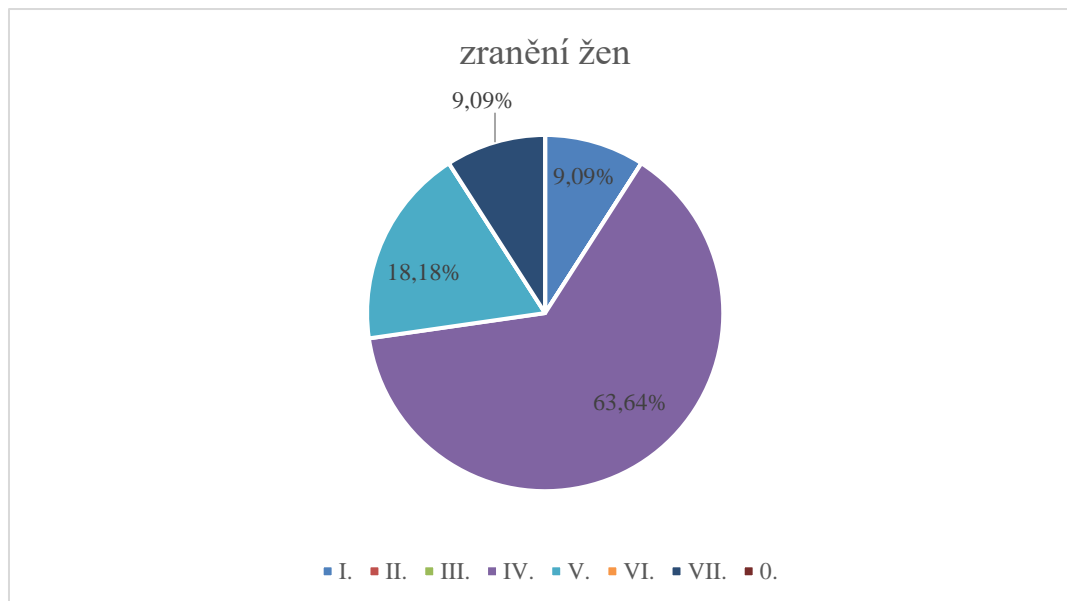
Tabulka 1: stupně zranění podle ZZS JmK

Stupeň zranění	Definice
I.	Lehké zranění
II.	Středně těžké zranění
III.	Těžké zranění
IV.	Potenciální ohrožení života
V.	Přímé ohrožení života
VI.	Selhání vitálních funkcí
VII.	Smrt
0.	Bez zranění

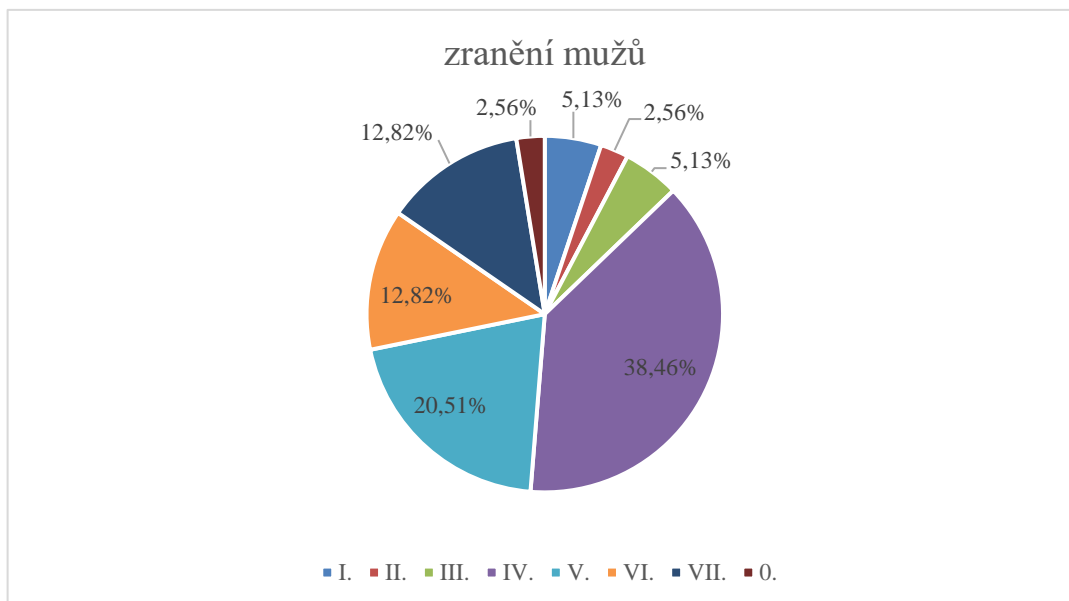
Z následujících tabulek a grafů je vidět četnost jednotlivých stupňů zranění u mužů a žen, případně dětí.

Tabulka 2: počet zraněných jednotlivých stupňů zranění podle pohlaví

	muž	muž %	žena	žena %
I.	2	5,13 %	1	9,09 %
II.	1	2,56 %	0	0,00 %
III.	2	5,13 %	0	0,00 %
IV.	15	38,46 %	7	63,64 %
V.	8	20,51 %	2	18,18 %
VI.	5	12,82 %	0	0,00 %
VII.	5	12,82 %	1	9,09 %
0.	1	2,56 %	0	0,00 %
celkem zraněných:	39	78,00 %	11	22,00 %



Graf 3: četnost jednotlivých stupňů zranění u žen

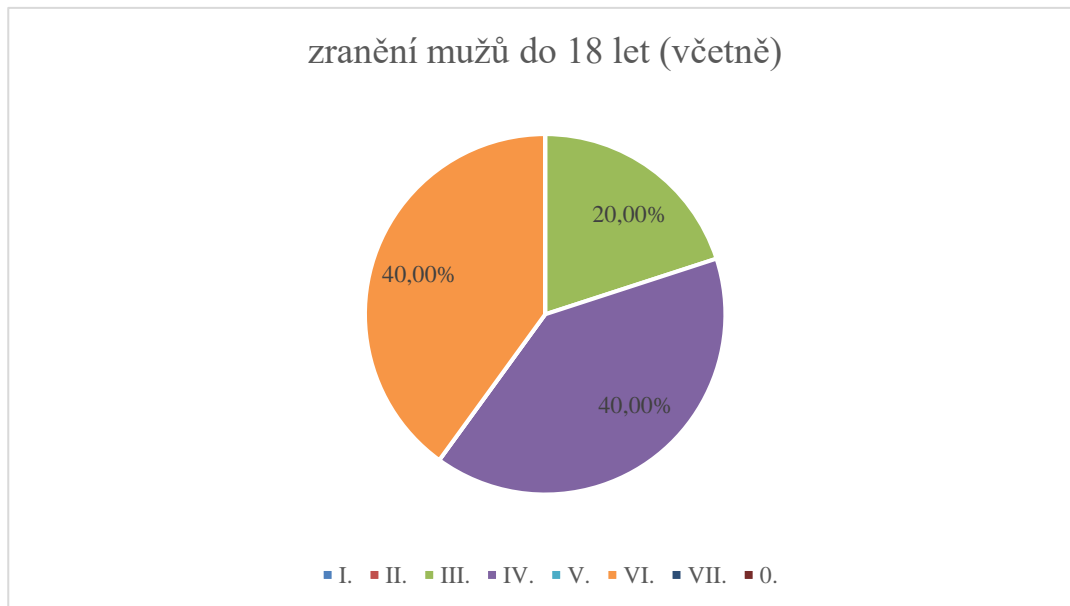


Graf 4: četnost jednotlivých stupňů zranění u mužů

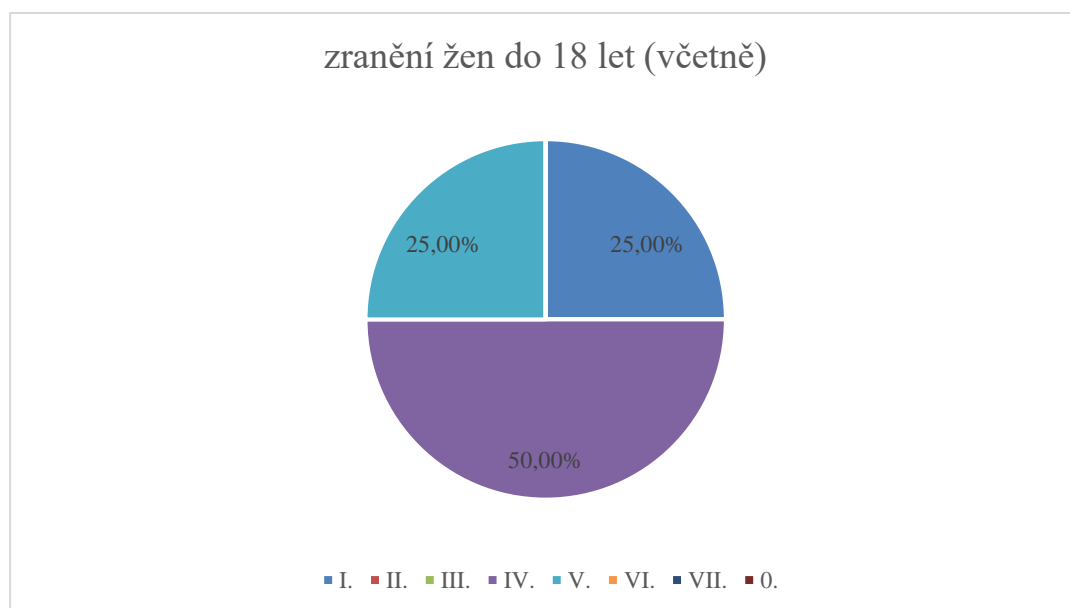
Z tabulky č. 2 a grafů č. 3 a 4 je patrné, že nejčastějšími zraněními při čelní srážce jsou zranění VI. stupně, tedy potenciální ohrožení života. K tomuto stupni řadí ZZS JmK například poranění pánve, zlomeniny končetin, tržné rány v oblasti obličeje, poranění hrudníku a dutiny břišní, předpokládá i poranění krční páteře.

Tabulka 3: počet zraněných jednotlivých stupňů zranění podle pohlaví do 18 let včetně

	muž do 18 let (včetně)	muž do 18 let (včetně) %	žena do 18 let (včetně)	žena do 18 let (včetně) %
I.	0	0,00 %	1	25,00 %
II.	0	0,00 %	0	0,00 %
III.	1	20,00 %	0	0,00 %
IV.	2	40,00 %	2	50,00 %
V.	0	0,00 %	1	25,00 %
VI.	2	40,00 %	0	0,00 %
VII.	0	0,00 %	0	0,00 %
0.	0	0,00 %	0	0,00 %
celkem zraněných do 18 let (včetně):	5	55,56 %	4	44,44 %



Graf 6: četnost jednotlivých stupňů zranění u mužů o 18 let včetně



Graf 5: četnost jednotlivých stupňů zranění u žen do 18 let včetně

U dětí do 18 let včetně dochází stejně jako u dospělých nejčastěji ke zraněním IV. stupně, jak ukazuje tabulka č. 3 a graf č. 5 a 6. Z nich je také možné vidět, že u chlapců dochází také ke zranění VI. stupně, tedy k selhání vitálních funkcí. K tomuto stupni řadí ZZS JmK například bezvědomí, špatné dýchání, nepravidelný pulz, otevřené rány, velké krvácení a v ojedinělých případech se objevuje i resuscitace pacienta. V tomto případě je většinou zraněný transportován leteckou záchrannou službou.

2 PASIVNÍ BEZPEČNOST

Pasivní bezpečnost neboli opatření ke snížení následků dopravní nehody, je možné rozdělit na vnější pasivní bezpečnost a vnitřní pasivní bezpečnost. Jako vnější pasivní bezpečnost označujeme provedení obrysu vozidla tak, aby zranění ostatních účastníků nehody byla co nejmenší, např. zaoblení hran, zamezení podjetí osobního vozidla pod nákladní, kliky, kryty kol, absorbéry nárazové energie nebo také raménka stěračů. Mezi vnitřní prvky pasivní bezpečnosti, které zabraňují nebo alespoň snižují možnost zranění posádky. Jako vnitřní pasivní bezpečnost se rozumí deformovatelná před' a zád', ochrana proti dalším nárazům (zádržné systémy, hlavové opěrky, deformovatelné uložení volantů), zachování prostoru pro přežití (odolnost proti převrácení, bočnímu nárazu, čelnímu nárazu a posunutí nákladu), ochrana proti vymrštění osob (zámky a závěsy dveří, bezpečnostní skla, zádržné systémy) a ochrana proti požáru. [6]

Pokud je řeč o pasivní bezpečnosti, je důležité se zaměřit hlavně na deformační zóny, které tvoří hlavní kostru celé pasivní bezpečnosti.

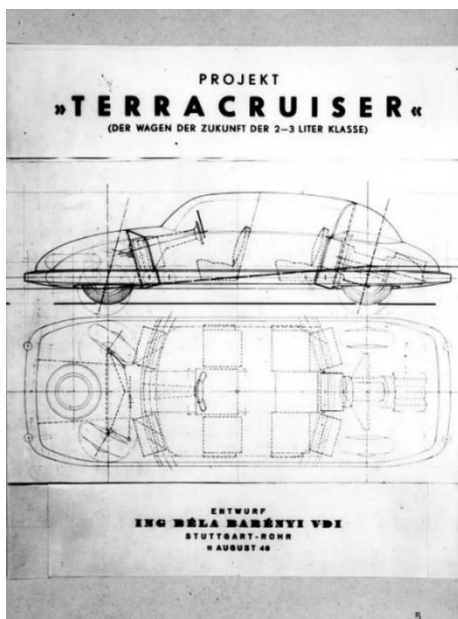
2.1 HISTORIE DEFORMAČNÍCH ZÓN

Deformační zóny neboli systém ochrany cestujících díky části karosérie, která je schopna pohltit velké množství energie při srážce, si dala 23. ledna roku 1951 patentovat automobilka Mercedes – Benz. [3]

V roce 1959 byl představen revoluční model W 111, který byl jako první na světě vybaven deformačními zónami, které jsou v dnešní době už úplnou samozřejmostí. V doby, kdy automobily neobsahovaly ani bezpečnostní pásy byla auta s nejtuzší a nejpevnější karosérií považována za ty nejvíce bezpečné. [3]

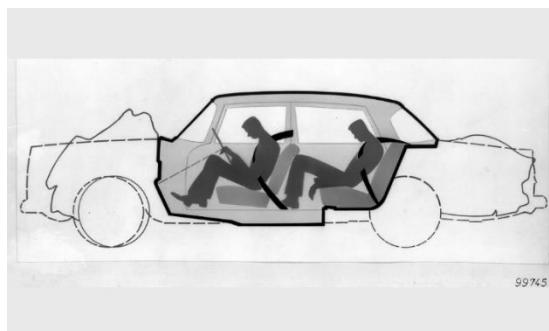
Nápad s deformačními zónami přisuzujeme maďarskému inženýrovi jménem Béla Barényi, který pracoval od roku 1939 ve Stuttgartu. Jeho myšlenka byla taková, že je důležité, aby automobil dokázal pohltit kinetickou energii, která při nárazu vznikne a čím více ji dokáže pohltit, o to méně bude v ohrožení posádka automobilu. [3]

Jeho vizionářským projektem byl bezpečný automobil Terracruiser (Obrázek 1), který byl rozdělen do tří částí a každá z nich měla jinou tuhost. Přední a zadní část měly být schopné pohlcovat deformace a prostřední část měla sloužit jako prostor pro ochranu cestujících. Barényi při svém návrhu umístil prostor pro posádku do konstrukce automobilu do nějaké pružné kolébky, která pohlcovala vibrace a sedadlo pro řidiče umístil centrálně, aby byl chráněn i v případě bočního nárazu. Tento automobil obsahoval dokonce i boční výztuhy dveří a deformační sloupek řízení. [3]



Obrázek 1: Projekt Terracruiser [2]

Právě inženýr Béla Barényi patřil k zakladatelům vývoje pasivní bezpečnosti moderních automobilů. Na jeho jméno je registrováno přes 2500 patentů. Pro Mercedes pracoval od roku 1939. [3]



Obrázek 2: deformační zóny Mercedes-Benz W 111 [4]



Obrázek 3: Mercedes-Benz W 111 [5]

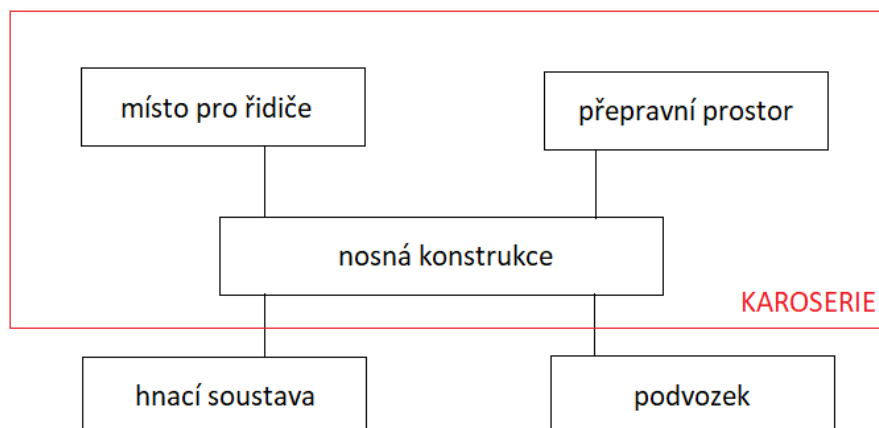
2.2 FUNKČNÍ SOUVISLOSTI A KONCEPCE KAROSERIE

„Jednotlivé konstrukční skupiny nebo konstrukční díly motorového vozidla lze shrnout do několika funkčních skupin (Obrázek 4). Vozidlo se skládá z hnací soustavy, podvozku a karoserie (nástavby). K těmto funkčním složkám nemohou však být přiřazeny jednotlivé konstrukční díly, protože tyto díly musí ve skutečnosti často vykonávat více funkcí, např. kolo náleží jak ke hnací soustavě, tak také k podvozku.“ [6]

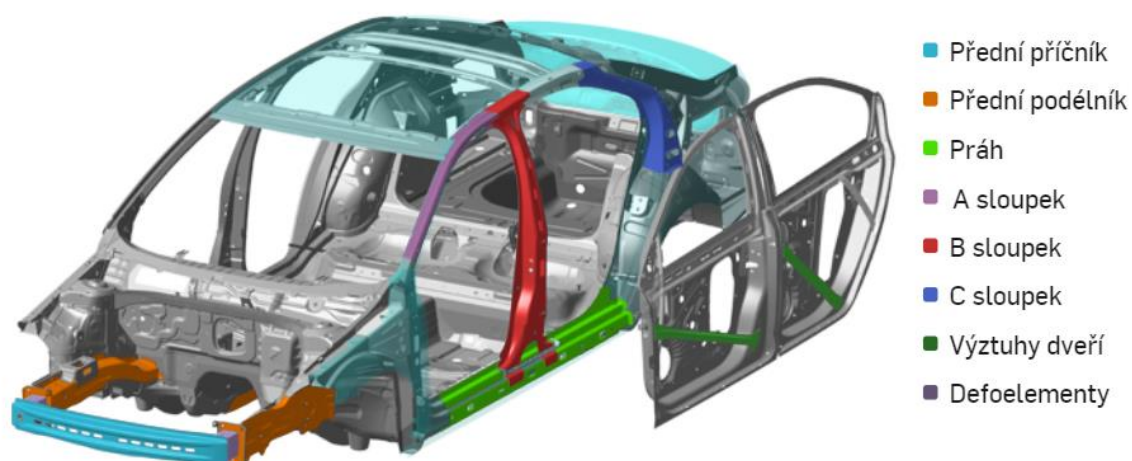
Karoserie vozidla je tvořena:

- místem pro řidiče
- přepravním prostorem
- nosnou konstrukcí

Konstrukce karoserie osobního automobilu se skládá z několika prvků, a to z A, B, C sloupků, prahu, předního příčnicku a podélníku, výztuhy dveří a defoelementů (Obrázek 5).



Obrázek 4: Funkční složky motorového vozidla [6]



Obrázek 5: Konstrukce karoserie osobního automobilu [7]

2.3 PASIVNÍ BEZPEČNOST A PŘEDPISY K ZAJIŠTĚNÍ OCHRANY

„Pasivní bezpečnost nezahrnuje pouze vnitřní bezpečnost, tzn. ochranu vlastních cestujících, ale také ochranu ostatních účastníků silniční dopravy. Ochrana cestujících je určována vnitřní a vnější kompatibilitou (kompatibilita = slučitelnost, snášenlivost).

K vnitřní kompatibilitě patří např. sladění zadržovacích systému s průběhem zpoždění kabiny k dodržení biomechanických mezních hodnot, zachování neporušeného prostoru pro cestující (až na dovolené vniknutí) s pevnými úchyty pro bezpečnostní pásy a také vytvoření vnitřního prostoru při zvláštním zřeteli na možné oblasti nárazu.

Vnější kompatibilitou se rozumí sladění deformačních sil a deformačních drah se zřetelem na rozdělení nárazové (absorbované) energie všech účastníků nehody k dodržení biomechanických mezních hodnot a zachování prostoru pro přižití.“ [6]

„Z hlediska zákonodárství jsou požadavky na pasivní bezpečnost v ČR stanoveny Zákonem č. 38/1995 Sb. a vyhláškou „O technických podmínkách provozu silničních vozidel ba pozemních komunikacích“ a vyhláškou č. 102/1995 Sb. „O schvalování technické způsobilosti a technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích“ a homologačními předpisy Evropské hospodářské komise OSN (EHK, ECE = Economic Commission of Europe). V zemích Evropské unie (EU) navíc platí směrnice Evropské společnosti (ES), do roku 1993 směrnice Evropské hospodářské společnosti (EHS, EEC = European Economic Community). Důležité jsou také předpisy a normy USA (FMVSS = Federal Motor Vehicle Safety Standard), které v některých případech daly impuls k vypracování předpisů EHK.“ [6]

„Dojde-li k nehodě, potom o přežití a minimálním ohrožení rozhodují tato základní kritéria:

- maximální vzniklé přetížení organismu a doba jeho trvání
- zbytkový prostor přežití
- možnost poranění o řídicí a ovládací ústrojí vozidla, resp. o povrch vnitřního prostoru
- možnost včas vozidlo opustit
- riziko vzniku požáru

Pasivní bezpečnost plní své poslání jednak při nárazu – tehdy je rozeznávána její vnější funkce (tj. míra agresivnosti vůči ostatním účastníkům silničního provozu) a vnitřní funkce (schopnost ochrany posádky) a jednak po nárazu, kdy na ní závisí možnost vyproštění posádky i míra snížení rizika požáru.

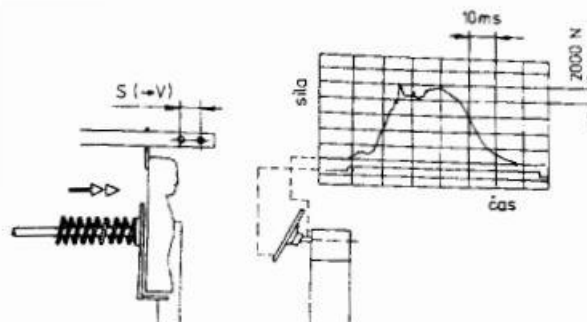
Mezinárodní předpisy EHK – OSN obsahují řadu předpisů z této oblasti, jejichž požadavky musí vozidla splnit, aby mohla být v rámci smluvních strach Ženevské dohody („*O přijetí jednotných podmínek pro homologaci (tj. ověřování shodnosti) a o vzájemném uznávání homologace výstroje a součástí motorových vozidel*“ – 1958) připuštěna do silničního provozu. Tyto homologační předpisy nespecifikují přímo konstrukční řešení, ale požadují předepsané účinky a vlastnosti.“ [6]

2.4 PŘEDPISY EHK K ZAJIŠTĚNÍ OCHRANY CESTUJÍCÍCH

Existuje mnoho předpisů EHK, které se vztahují k ochraně cestujících. S ohledem na téma bakalářské práce je zajímavý předpis EHK-R 12.

„Požadavky na bezpečné řízení jsou uvedeny v předpisu **EHK-R 12**, který specifikuje chování řídicího ústrojí osobních automobilů, je-li vystaveno dvěma druhům sil, a to:

- a) silám vzniklým při čelním nárazu, které mohou způsobit zpětný pohyb řídicího ústrojí;
- b) silám způsobeným setrvačností těla řidiče v okamžiku nárazu na volant (zkouška nárazem torza). První kritérium se posuzuje při bariérové zkoušce, kdy vozidlo o pohotovostní hmotnosti a bez figuríny narazí na betonovou bariéru rychlostí 48,3 km/h a sleduje se vodorovný posuv horního konce sloupku řízení směrem vzad vodorovně s podélnou osou vozidla, tj. proti řidiči; tento posuv nesmí přesáhnout 127 mm. Při zkoušce nárazem torza (obrázek 6) je vržena přesně specifikovaná část trupu figuríny na volant rychlostí 24,1 km/h, přičemž síla na torze nesmí přesáhnout 11,1 kN.



Obrázek 6: Schéma zkoušky nárazem torza podle Předpisu EHK-R 12 [6]

V následující tabulce je vidět přehled předpisů, které zajišťují vnitřní pasivní bezpečnost cestujících. Tučně zvýrazněné řádky v tabulce jsou předpisy, které jsou v rámci této bakalářské práce důležité.

Tabulka 4: Předpisy zajišťující vnitřní pasivní bezpečnost cestujících: OA – osobní vozidla; NA – nákladní vozidla; A – autobusy, P – přípojná vozidla [6]

Část vozidla	Předpis EHK	Směrnice ES/EHS	Norma FMVSS
zámký a závěsy dveří (OA)	R 11	70/387	206
náraz na sloupek řízení (OA)	R 12	74/297	203, 204
úchytky bezpečnostních pásů (OA)	R 14	76/115	210
bezpečnostní pásy pro dospělé (OA, NA, A)	R 16	77/541	208, 209
pevnost sedadel a jejich uchycení (OA)	R 17	74/408	207
vnitřní výčnělky osobních vozidel (OA)	R 21	74/60 78/632	201
opěrky hlavy (OA, NA, A)	R 25	78/932	202
pevnost budek nákladních vozidel (NA)	R 29		208
náraz na vozidlo zezadu (OA)	R 32		301
náraz na vozidlo zepředu (OA)	R 33		208, 301
ochrana proti požáru (OA)	R 34		301
konstrukce vozidel pro hromadnou přepravu osob (A)	R 36	76/761	
bezpečnostní skla a zasklívací materiály (OA, NA, A)	R 43	92/22	205, 212
zadržovací zařízení pro děti (OA)	R 44		213
zařízení proti podjetí zezadu (NA)	R 58		
pevnost karoserie autobusu (A)	R 66	92/114	
boční ochrana (NA, P)	R 73		
sedadla a úchytky (A)	R 80		
zařízení proti podjetí zepředu (NA)	R 93		
ochrana cestujících při čelním nárazu (OA)	R 94	96/79	208
ochrana cestujících při bočním nárazu (OA)	R 95	96/27	214, 301
převrácení na střechnu (OA)			216

„Předpis **EHK-R 33** se vztahuje na chování nosné konstrukce prostoru pro cestující je-li vystavena čelnímu nárazu. Po čelním nárazu nezatíženého vozidla rychlostí 48,3 km/h na bariéru musí vnitřní prostor splňovat tyto požadavky: a) vzdálenost mezi dvěma příčnými rovinami, z nichž jedna prochází definovaným bodem R a druhá je nejzazším průmětem obrysu přístrojové desky, nesmí být po nárazu menší než 450 mm; b) vzdálenost od průsečíku příčné roviny jedoucí bodem R a přímkou, která je průsečíkem vodorovné roviny procházející středem brzdového pedálu a svislé roviny procházející středem sedadla průsečíku této přímky s přední stěnou prostoru pro cestující nesmí po nárazu být menší než 650 mm. Dále se nárazem stanoví body, ve kterých příčná vodorovná osa procházející středem pedálu provozní dvěma svislými podélnými rovinami procházejícími týmiž průsečíky. Tato vzdálenost nesmí být u žádného s předních míst k sezení menší než 250 mm. Vzdálenost mezi podlahou a střešou se určuje podél svislice procházející bodem R a nalézající se v podélní rovině vedené středem každého předního místa k sezení; po nárazu nesmí být tato vzdálenost menší o více než 10 %. Po zkoušce nesmí opět žádná tuhá součást v prostoru pro cestující vytvářet nebezpečí vážného poranění osob cestujících ve vozidle. Kromě toho se boční dveře vozidla nesmějí vlivem nárazu samovolně otevřít, ale po nárazu musí být možnost otevřít je bez použití nástrojů.“ [6]

„Předpis **EHK-R 94** stanovuje podmínky pro homologaci vozidel z hlediska ochrany cestujících při čelním nárazu vozidla. Platí od roku 1996. Určuje zkušební metodiku pro zkoušku čelním nárazem na bariéru, při které se používá zkušební figurína HYBRID 3. Rychlost vozidla v okamžiku nárazu musí být $56 + 0/-2$ km/h. Vozidlo najíždí na čelní bariéru (hmotnost min. 70 t), která je kolmá na směr pohybu zkoušeného vozidla. Pokud vozidlo vyhoví předepsaným kritériím, při zkoušce provedené ve vyšší rychlosti, se pak výsledek zkoušky považuje za splňující požadavky.“ [6]

3 OCHRANA PROTI NÁRAZŮM

„Při drobných kolizích a parkovacích manévrech slouží k ochraně karoserie, funkčních orgánů i osvětlení vozidla nárazník. Podmětem pro zdokonalení účinnosti nárazníků se stal přísný předpis FMVSS 215, který vstoupil v USA v platnost již v roce 1972. V Evropě musí v současné době nárazníky a jiná ochranná zařízení splňovat požadavky předpisu EHK-R 42. Snížení následků kolize při vyšších rychlostech záleží na tom, jak účinně je pohlcována energie nárazu.“ [6]

3.1 MOŽNOSTI ABSORPCE NÁRAZOVÉ ENERGIE

Nárazová energie může být absorbována několika způsoby:

- 1) elasticko – plastickou deformací struktury vozidla (stlačování, prodlužování a kombinace ohybu, lámání, rozšiřování, vyboulení, stříh);
- 2) třením;
- 3) vytlačováním kapalných, plyných a tuhých látek (ztráty při proudění, komprese).

Kinetická energie při srážce může být absorbována následovně:

- a) deformovatelná plechová struktura;
- b) hydraulický absorbér (tlumič);
- c) pneumatický absorbér (tlumič);
- d) konstrukční díly vyrobené z plastů;
- e) kombinovaný absorbér (hydropneumatický absorbér, vypěnovaný plechový nosník). [6]

3.2 ZÁKONNÉ POŽADAVKY NA NÁRAZNIKOVÉ SYSTÉMY

“Podmínky pro účinnost předních a zadních ochranných zařízení (nárazníků) stanovuje předpis EHK-R 42 a norma ISO 2958. Předpis stanoví, že vnější povrch ochranných prostředků na přídi a zádi vozidel musí být pokryt nebo vyroben z pryže nebo jí odpovídajícího materiálu, jehož tvrdost nesmí překročit 60 stupňů tvrdosti podle Shorea.” [6]

4 OCHRANA ÚČASTNÍKŮ SILNIČNÍ DOPRAVY

V případě dopravní nehody závisí ochrana cestujících přímo ve vozidle na struktuře karoserie, vlastnostech zadržovacích systémů, vybavení karoserie a zabránění vzniku požáru. Při navrhování karoserie je nutné zabezpečit i kompatibilitu vozidle vzhledem k chodci, cyklistovi a k jiným vozidlům. [6]

4.1 STRUKTURA KAROSERIE

Z pohledu pasivní bezpečnosti musí struktura karoserie splňovat dvě velmi důležité funkce. Nosná konstrukce musí mít dostatečnou schopnost absorpce energie při dopravní nehodě, která zaručuje, že nebudou překročeny biomechanické toleranční limity. Dále nesmí být deformace nosné konstrukce tak velká, aby narušila vnitřní prostor pro posádku vozidla. [6]

Na následujících obrázcích (Obr. 7 až Obr. 12) je možné vidět průběh deformace přední části vozidla při nárazu rychlostí 50 km/h.



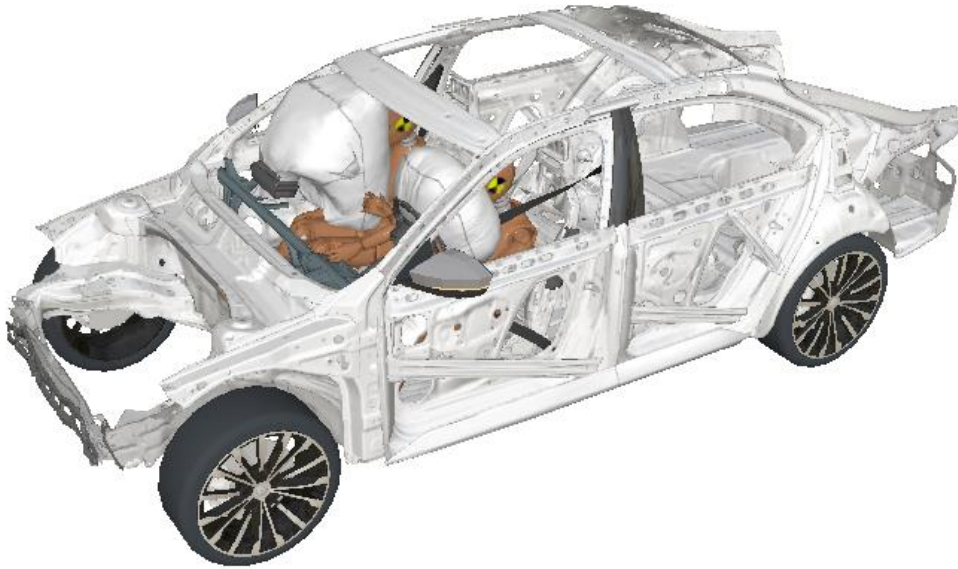
Obrázek 7: Počátek čelního nárazu [7]



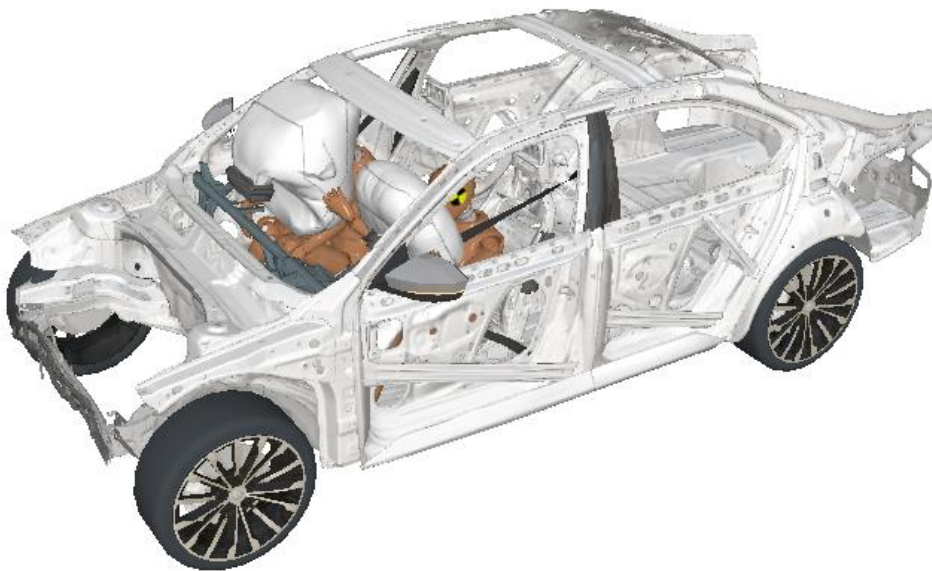
Obrázek 8: Aktivace airbagů [7]



Obrázek 9: Airbagy aktivovány [7]



Obrázek 10: Plně aktivní airbagy [7]



Obrázek 11: Deformace předního příčniku [7]



Obrázek 12: Úplně deformovaný přední příčník [7]

4.1.1 DEFORMAČNÍ VLASTNOSTI STRUKTURY

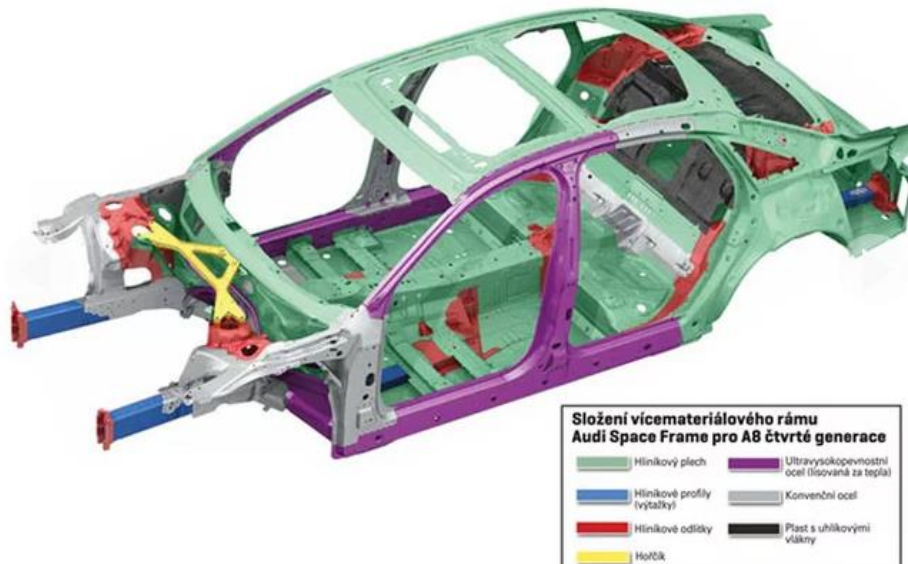
„Velikost kinetické energie nárazu, která musí být přeměněna v deformační práci strukturou obklopující prostor pro cestující, závisí na intenzitě srážky a směru srážky. K absorpci nárazové energie jsou vhodně přední a zadní části vozidla vzhledem k dostatečným délkám deformačních zón.“ [6]



Obrázek 13: Zatížení karoserie vozidla při čelním nárazu rychlostí 50 km/h [7]

5 MATERIÁLY PRO KAROSERIE OSOBNÍCH VOZIDEL

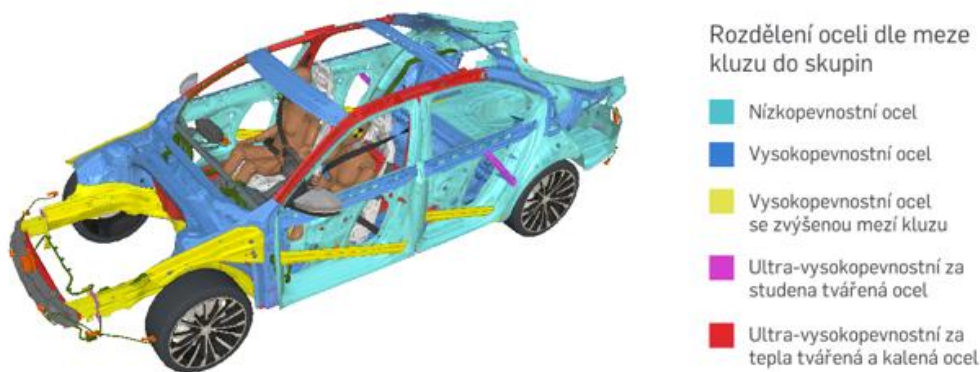
Při konstrukci karoserie se využívá velkého množství materiálů. Pokud se podíváme do jiných průmyslových oblastí, těžko bychom hledali tak širokou nabídku materiálů, které je možné použít. Výběr jednotlivých materiálů závisí na jejich vlastnostech. [8]



Obrázek 14: Využití materiálů při konstrukci karoserie [9]

5.1 OCEL

Nejpoužívanějším materiálem při výrobě karoserie je bezkonkurenčně ocel. Ocel je levný materiál, má vysokou pevnost, je dobře svařitelná, umožňuje spojování pomocí pájení, má dobrou životnost při antikorozi. Používají se plechy ve tvaru pásů, tabulí a svitků. Nicméně se ocel používá i ve formě trubek, otevřených a uzavřených profilů, výkovek a odlitků. Jako nevýhodu vnímáme hmotnost oceli. Hmotnost můžeme redukovat metodou ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body), která je založena na tzv. sendvičovém řešení. Jedná se o metodu, kdy je mezi dva ocelové plechy (0,2 až 0,65 mm) vložen polypropylen (umělá hmota) o větší tloušťce. Ocelové plechy díky vysoké pevnosti přenesou hlavní napětí a střední vrstva polypropylenu zvyšuje tuhost. Díky této metodě je karoserie odolnější o 52 % vůči ohybu a až o 80 % vůči namáhání krutem. Touto technologií lze uspořit cca 25 % hmotnosti celé karoserie oproti karoserii z čistě ocelových plechů. [8]



Obrázek 15: Využití oceli při konstrukci karoserie rozdělené podle meze kluzu [7]

5.2 HLINÍK A JEHO SLITINY

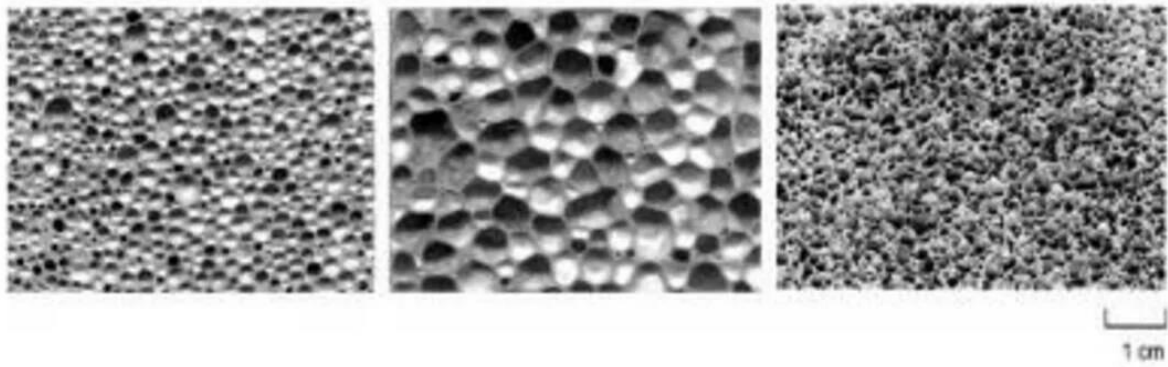
Lehkým a dalším nejvíce používaným kovem je hliník a jeho slitiny. Technologie, kdy je používám hliník je označována zkratkou ASF (Aluminium-Space-Frame-Technik). Tahle metoda se využívá v oblastech nosičů nárazníků u zavěšených kol, v oblastech dveří a dalších částech karoserie. Hliník má velkou výhodu oproti oceli hlavně co se hmotnosti týče. Oproti oceli je hliník také odolnější vůči korozi. Pokud se ale zaměříme na pevnost hliníku, oproti oceli má menší modul pružnosti a kvůli tomu je absorpce energie při nárazu výrazně menší. Kvůli této nevýhodě je nutné používat tlustší plechy, což má za následek úsporu hmotnosti jen o 30 % ve srovnání s ocelovými plechy. Co se ceny týče, hliníkové slitiny jsou až 3x dražší při porovnání s ocelí. Hliníkové slitiny jsou odolné vůči korozi, ale nelze je používat ve všech částech karoserie. Hliníkové karoserie se používají u sportovních a luxusních modelů automobilů a u užitkových vozidel. U osobních automobilů se hliník používá zatím pouze u samostatných dílů karoserie (víka, lišty, kapoty a další). [8]

5.3 HOŘČÍK A JEHO SLITINY

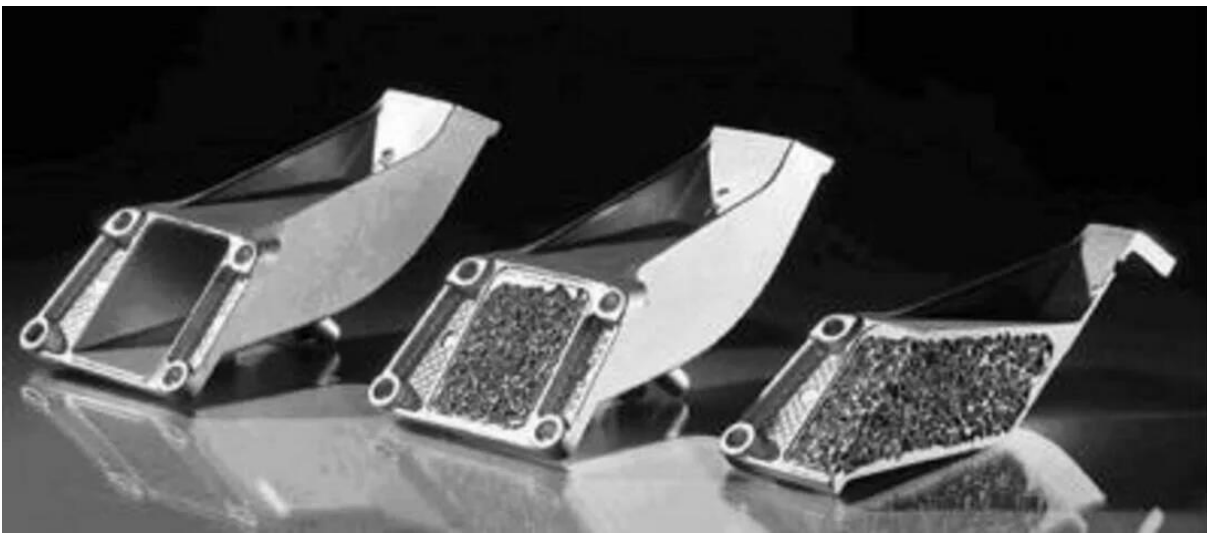
Hořčík a jeho slitiny mají v současné době velký vliv při výrobě karoserie. Hořčík má nižší hustotu než hliník a díky tomu se dá při výrobě karoserie docílit ještě o něco nižší hmotnosti, než při použití hliníku. Hořčík tvoří slitinu nejčastěji s hliníkem, díky kterému je výsledný materiál pevnější a tvrdší. Nevýhodou hořčíku a jeho slitin je jeho pevnost při vyšších teplotách, a tak je jeho používání omezeno pouze na provozní teplotu maximálně okolo 120 °C. [8]

5.4 KOVOVÉ PĚNY

Za kovové pěny lze považovat materiály hlavně z hliníku a jeho slitin. Inspirací z přírody jsou pro kovové pěny kosti, korály a další materiály, které se vyznačují vysokou tuhostí. Při výrobě těchto pěn se používá hliník a jeho slitiny, což dává pěnám další výhody, které vyplývají z vlastností materiálů jako je vysoká tuhost, odolnost proti korozi a houževnatost. Materiál ve formě pěny navíc velmi dobře absorbuje nárazové energie a má schopnost tlumit hluk a vibrace. Pěna obsahuje póry, kterými je tvořena až ze 60 %. Díky tomu je snížena hustota a následně i hmotnost. Velikost pórů se pohybuje řádově v milimetrech. Hliníkové pěny se používají hlavně k výplním profilů deformačních zón (prahy, sloupky). [8]



Obrázek 16: Struktura hliníkové pěny [10]



Obrázek 17: Tvarové profily vyplněné hliníkovou pěnou METCOMB (výrobce LKR Ranshofen) [10]

6 NÁVRH DEFORMAČNÍHO ČLENU

Následující kapitola se bude věnovat samotnému návrh deformačního členu. Konkrétně vylepšení předního příčnicku. Pro návrh byl vybrán osobní automobil Porsche Macan. Návrh je prováděný při střední rychlosti 30 km/h.

Tabulka 4: Parametry vozidla Porsche Macan 195 kW [11]

Parametr	Hodnota
Maximální přípustná hmotnost	2 510 kg
Hmotnost nezatíženého vozidla	1 920 kg
Délka	4 726 mm
Šířka	1 922 mm
Šířka se zpětnými zrcátka	2 097 mm
Výška	1 621 mm



Obrázek 18: Porsche Macan – viditelný přední příčník (foto: vlastní 8.3.2023)

Na obr. 18 je možné vidět odkrytý přední příčník, který je předmětem návrhu. Polystyrenová výplň napasovaná na přední příčník má 40 mm ve svém nejširším místě. Příčník je 1 110 mm dlouhý a 90 mm vysoký. Volný prostor od výplně k nárazníku je asi 40 mm.

6.1 DEFORMAČNÍ ČLEN Z HLINÍKOVÉ PĚNY

Prvním návrhem deformačního členu je deformační člen z hliníkové pěny. Jak už bylo zmíněno v kapitole 5.4, kovové pěny dobře absorbují energie díky své pórovitosti, jsou odolné vůči korozi, mají nízkou hustotu a díky tomu i nízkou hmotnost.

KINETICKÁ ENERGIE AUTOMOBILU E_k

Výpočet při rychlosti 30 km/h a nezátížené hmotnosti automobilu 1 920 kg:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 [J] \quad (1)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 1\,920 \cdot \left(\frac{30}{3,6}\right)^2 = 66\,666,667\,J = 66,667\,kJ$$

MAXIMÁLNÍ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA DEFORMAČNÍ ČLEN F_{MAX}

Výpočet maximální síly působící na deformační člen při srážce (dobu trvání srážky uvažujeme $t = 0,1\,s$):

$$F_{MAX} = m \cdot a [N] \quad (2)$$

$$a = \frac{v}{t} [m \cdot s^{-2}] \quad (3)$$

$$F_{MAX} = m \cdot \frac{v}{t} = 1920 \cdot \frac{30}{0,1} = 160\,000\,N = 160,000\,kN$$

PLOCHA NAVRHOVANÉHO DEFORMAČNÍHO ČLENU Z HLINÍKOVÉ PĚNY S_{DEF}

Hrubý výpočet plochy deformačního členu z hliníkové pěny o délce 1 110 mm a šířce 90 mm:

$$S_{DEF} = A \cdot B [m^2] \quad (4)$$

$$S_{DEF} = 1,1 \cdot 0,09 = 0,099\,m^2 = 99\,000\,mm^2$$

OBJEM NAVRHOVANÉHO DEFORMAČNÍHO ČLENU Z HLINÍKOVÉ PĚNY V_{DEF}

Hrubý výpočet objemu deformačního členu z hliníkové pěny, kdy uvažujeme hloubku 60 mm, aby zůstala vůle mezi deformačním členem a nárazníkem:

$$V_{DEF} = S_{def} \cdot C [m^3] \quad (5)$$

$$V_{DEF} = 0,099 \cdot 0,06 = 0,005\,94\,m^3 = 5\,940\,000\,mm^3$$

6.1.1 VÝBĚR VHDNÉ HLINÍKOVÉ PĚNY

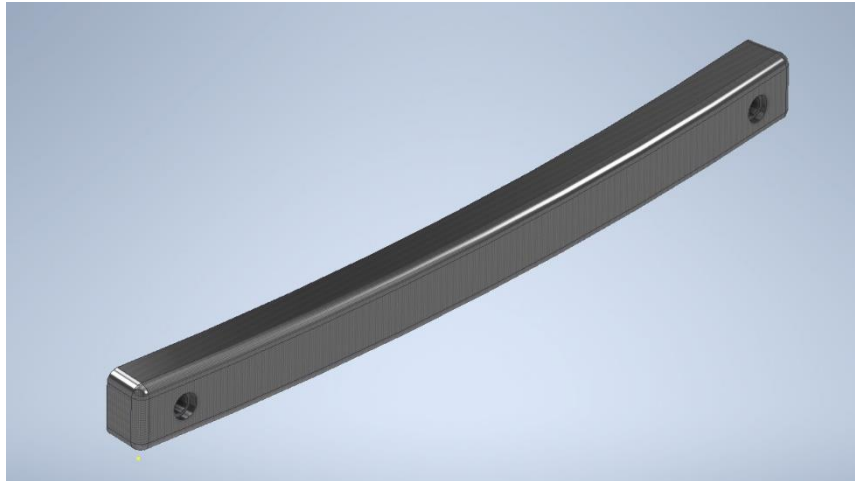
Podle výpočtů byla vybrána hliníková pěna s uzavřenými buňkami. V následující tabulce jsou znázorněny vlastnosti vybrané hliníkové pěny.

Tabulka 5: Přehled vlastností hliníkové pěny [12]

Hliníkový pěnový panel s uzavřenými buňkami		
Základní funkce	Chemické složení	více než 97 % hliníku
	Typ buňky	uzavřená buňka
	Hustota	250 ~ 300 kg/m ³
Akustická funkce	Koeficient akustické absorpce	NRC 0,70 ~ 0,75
Mechanická funkce	Pevnost v ohybu	3,0 ~ 5,0 MPa
	Pevnost v tlaku	3,0 ~ 4,0 MPa
	Absorpce energie	1000 ~ 2000 kJ/m ³
Tepelná funkce	Tepelná vodivost	0,268 W/mK
	Bod tání	cca 780 °C
Extra funkce	Schopnost stínění elektromagnetických vln	přes 90 dB
	Test solným sprejem	žádná koroze

6.1.2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH

Podle výpočtů z kapitoly 6.1 byl vytvořený konstrukční návrh předního deformačního členu z hliníkové pěny. Jedná se o hrubý návrh, který by v případě používání musel být modifikován na určitý model vozu.



Obrázek 19: Konstrukční návrh deformačního členu z hliníkové pěny (vlastní)

Motivací pro návrh deformačního členu z hliníkové pěny je, že hliníková pěna velmi dobře absorbuje energii. V tabulce 5 je možné vidět, že na jeden metr krychlový je vybraný typ hliníkové pěny, složený z více než 97 % hliníku s uzavřenými buňkami, schopný absorbovat energii až 2 000 kJ. To je pro osobní automobil i vyšší hmotnosti dostačující. Energie, která vznikne při nárazu bude z velké části absorbována deformačním členem, takže nebude postupovat dál karoserií. Záleží samozřejmě na rychlosti, jakou automobil do překážky narazí.

6.2 HYDRAULICKÝ DEFORMAČNÍ ČLEN

Druhým přístupem je návrh hydraulického tlumiče s pružinou. Návrh je realizován při střední rychlosti 30 km/h a je uvažována hmotnost vozidla 1 200 kg, což odpovídá nejčastější hmotnosti středně velkého osobního vozidla.

KINETICKÁ ENERGIE AUTOMOBILU E_k

Výpočet kinetické energie na počátku srážky:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 [J]$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 1200 \cdot \left(\frac{30}{3,6}\right)^2 = 41\,666,667\,J = 41,667\,kJ$$

V následující tabulce jsou hodnoty, které byly použity pro návrh tlumiče s pružinou. Návrh probíhal v multibody systému ADAMS. Jsou uvažovány dva tlumiče

Tabulka 6: Hodnoty pro návrh tlumiče

Veličina	Hodnota
Tuhost pružiny	400 N/mm
Celkové tlumení	10 000 Ns/m
Maximální deformace	333,36 mm
Maximální síla na tlumiči	41 665 N
Energie odebíraná tlumičem	19 441 J

TLAKOVÁ ZTRÁTA NA TLUMIČI Δp

Výpočet tlakové ztráty jednoho tlumiče, pokud byl zvolen poloměr pístu $r_p = 50 \text{ mm}$:

$$F_T = \Delta p \cdot S_p \quad (6)$$

Ze vzorce pro výpočet síly, která působí na tlumič je nutné spočítat plochu pístu.

$$S_p = \pi \cdot r^2 \quad (7)$$

$$S_p = \pi \cdot 0,05^2 = 0,00785 \text{ m}^2 \cong 7854 \text{ mm}^2$$

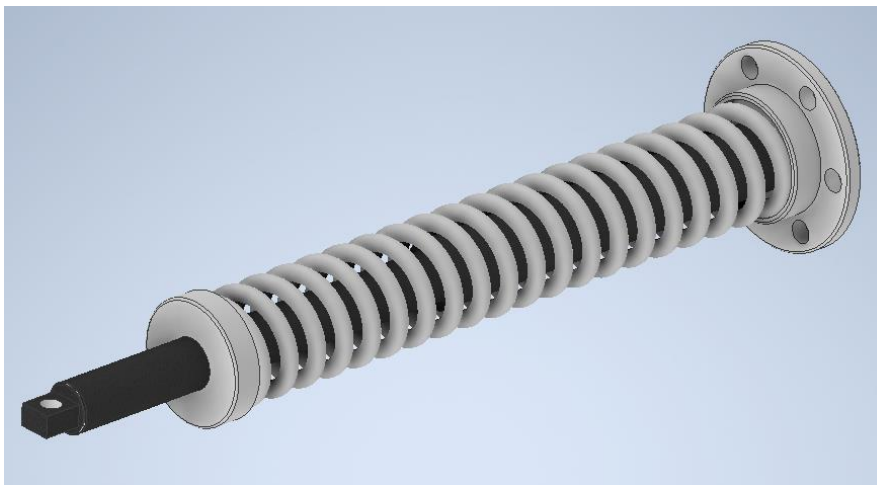
Následně je z rovnice (6) vyjádřena tlaková ztráta.

$$F_T = \Delta p \cdot S_p \rightarrow \Delta p = \frac{F_T}{S_p} = \frac{41\,665}{0,00785} = 5\,307\,643,312 \text{ Pa} = 5,308 \text{ MPa}$$

Jedná se o maximální tlakovou ztrátu.

6.2.1 KONSTRUKČNÍ NÁVRH HYDRAULICKÉHO DEFORMAČNÍHO ČLENU

Podle výpočtů v kapitole 6.2 byl zvolen následující konstrukční návrh.



Obrázek 20: Konstrukční návrh hydraulického deformačního členu (vlastní)

Hydraulický deformační člen je navrhnutý tak, aby do rychlosti 30 km/h pohltil co nejvíce energie, která při nárazu vznikne. V případě, že by byla energie při nárazu větší než 41,667 kJ, přestane energii absorbovat tlumič a začne se deformovat karoserie.

Toto řešení by mohlo být účinné hlavně při srážce s chodcem, případně při menších dopravních nehodách, například na parkovišti na sídlišti nebo u nákupního centra, které jsou velmi časté. Principem je, že se při nárazu stlačí přední nárazník a následně se vrátí do své původní polohy. Poškozen by měl být pouze přední nárazník (promáčknutí, odřený lak apod.), další části předního prostoru automobilu by měly být bez poškození. V případě větších rychlostí, tedy potřeby absorbovat větší kinetickou energii, už by tento deformační člen nefungoval tak dobře a začala by se deformovat karoserie.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši pasivní bezpečnosti automobilů a navrhnout nějaké nové, další opatření s ohledem na bezpečnost posádky, případně jiných účastníků dopravní nehody, například chodců.

V současné době je již pasivní bezpečnost automobilů natolik vyvinutá, že se těžko hledá její část, která by se dala ještě vylepšit. Pokud se zaměříme na nehodovost, nejčastějším typem dopravní nehody je čelní srážka, ať už s jiným vozidlem, náraz do pevné překážky nebo srážka s chodcem. Mezi nejčastější zranění při tomto typu dopravní nehody jsou zranění z kategorie IV., kdy se jedná o potencionální ohrožení života. U posádky automobilu (u řidiče, případně spolujezdce) je nejčastější poranění dutiny břišní, krční páteře, případně tržné rány. U chodců se ve většině případů jedná o poranění dolních končetin, pánve, hrudníku a taktéž krční páteře. Tato zranění u chodců se objevují i při srážce v malých rychlostech.

Velmi významným prvkem pasivní bezpečnosti je konstrukce karoserie automobilu. Pro její výrobu se používá široké spektrum materiálů. Tím nejvíce zastoupeným materiálem je ocel. V přední části karoserie se používá nejčastěji vysokopevnostní ocel se zvýšenou mezí kluzu a na předním příčniku se používá ultra – vysokopevnostní ocel, která je za tepla tvářená a kalená.

První částí návrhu pro zlepšení pasivní bezpečnosti byl návrh předního deformačního členu, tedy vylepšení předního příčniku. Měření základních rozměrů deformačního členu probíhalo na automobilu Porsche Macan, který mi byl pro tyto účely poskytnutý v Porsche Brno. Jako nejvhodnější materiál pro výrobu navrhovaného předního deformačního členu byla zvolena hliníková pěna, která velmi dobře absorbuje kinetickou energii, která při srážce vzniká. Tato hliníková pěna je lehká, takže nijak výrazně nezvýší hmotnost automobilu. Deformační člen byl navrhován jako základní a pro praktické použití je třeba jej modifikovat na konkrétní automobil.

Druhou částí návrhu pro zlepšení pasivní bezpečnosti byl návrh hydraulického deformačního členu. Jedná se konkrétně o tlumič s pružinou, který by byl umístěn za předním nárazníkem. Je uvažováno použití dvou takovýchto tlumičů. Základní hodnoty pro potřeby návrhu mi byly poskytnuty vedoucím práce, který provedl simulaci v multibody systému ADAMS. Simulována byla situace nárazu automobilu o hmotnosti 1 200 kg v rychlosti 30 km/h. Ukázalo se, že síla, kterou bude tlumič muset přenášet je vysoká a jeho rozměry by byly velké. Tento princip řešení by fungoval při menších rychlostech, kdy nevzniká tak velká kinetická energie při nárazu. Příkladem takové menší srážky je náraz při parkování, případně srážka s chodcem při rozjíždění. Při větších rychlostech by tlumič již nedokázal tak dobře přenášet kinetickou energii. Pokud by bylo uvažováno použití tlumiče s pružinou v praxi, bylo by nutné přizpůsobit konstrukci karoserie a provést několik zkoušek, aby se našel ideální rozměr, při kterém dokáže tlumič přenést co největší množství vzniklé energie.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Zákon o provozu na pozemních komunikacích: 361/2000 Sb. *Zákony.centrum.cz* [online]. [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <http://zakony.centrum.cz/zakon-o-provozu-na-pozemnich-komunikacich/cast-1-hlava-2-dil-3-oddil-3-paragraf-47>
- [2] Stand Sicherheit wirklich immer im Mittelpunkt von Bela Barenys Überlgungen? [online]. [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://mvcoldtimerticker.de/stand-sicherheit-wirklich-immer-im-mittelpunkt-von-bela-barenys-ueberlgungen/>
- [3] Deformační zóny mají 60 roků. *Pravda* [online]. [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://auto.pravda.sk/magazin/clanok/3775-deformacne-zony-maju-60-rokov/>
- [4] Mercedes-Benz W 111 “Fintail”: Following “Das Zeitgeist” – the Tune of the Times.... In: Mercedesblog.com [online]. [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://mercedesblog.com/mercedes-benz-w-111-fintail-das-zeitgeist/>
- [5] "Heckflossen-Mercedes", Sechszylindertypen (W 111, W 112), 1959-1968. In: Mercedes-Benz [online]. [cit. 2022-11-09]. Dostupné z: <https://mercedes-benz-publicarchive.com/marsClassic/de/instance/ko/Heckflossen-Mercedes-Sechszylindertypen-W-111-W-112-1959---1968.xhtml?oid=4888>
- [6] VLK, František. Karosérie motorových vozidel. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5277-9.
- [7] Karoserie. In: Bezpečné cesty [online]. [cit. 2023-01-12]. Dostupné z: <https://www.bezpecnecesty.cz/cz/bezpecnost-automobilu/pasivni-prvky-bezpecnosti/karoserie>
- [8] VONDRÁK, Zdeněk. Materiály pro karoserie osobních vozidel [online]. Brno, 2011 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/17766/final-thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Hejtmánek.
- [9] Karoserie nového Audi A8: Hliník na ústupu!. In: AUTO.CZ [online]. 16.4.2017 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/karoserie-noveho-audi-a8-hlinik-na-ustupu-105526>
- [10] Výrobky z hliníkové pěny. In: MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny>
- [11] Porsche. *Porsche* [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://www.porsche.com/international/models/macan/macan-models/macan/>
- [12] HLINÍKOVÁ PĚNA S UZAVŘENÝMI BUŇKAMI. BeiHai Composite [online]. [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <http://cs.beihaicomposite.com/closed-cell-aluminum-foam-panel-jessica-product/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[m]	Délka deformačního členu
a	[m/s ²]	Zrychlení automobilu
B	[m]	Šířka deformačního členu
C	[m]	Hloubka deformačního členu
E _k	[J]	Kinetická energie automobilu
F _{MAX}	[N]	Maximální síla na deformační člen
F _p	[N]	Maximální síla působící na tlumič
m	[kg]	Hmotnost automobilu
r _p	[m]	Poloměr pístu
S _{DEF}	[m ²]	Plocha deformačního členu
S _p	[m ²]	Plocha tlumiče
t	[s]	Doba trvání srážky
v	[m/s]	Rychlost automobilu
V _{DEF}	[m ³]	Objem deformačního členu
Δp	[Pa]	Tlaková ztráta tlumiče