

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh konstrukce výkovku A-sloupku

Autor: **Bc. Tomáš ZÍDEK**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Ladislav NĚMEC, CSc.**

Akademický rok 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš ZÍDEK**
Osobní číslo: **S14N0032P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Název tématu: **Návrh konstrukce výkovku A-sloupku**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Navrhnete konstrukční řešení kovaného A-sloupku pro zadané varianty karosérie osobního vozu. Proveďte pevnostní analýzu vybraných variant řešení a celkové zhodnocení výsledků. Konstrukci proveďte pro vůz daného designu a dle podmínek vyplývajících z požadované technologie. Proveďte návrh spojovací techniky, pořadí montáže a posouzení zástavbových poměrů. CAD model bude vyhotoven v systému NX, výpočty případně v jiném vhodném systému. Okrajové podmínky výpočtu budou stanoveny dle standardů IIHS.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Úvod, definování úlohy.
2. Zhodnocení stávajícího stavu.
3. Konstrukční návrh inovovaného produktu.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení navrženého produktu.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

VLK, F. Stavba motorových vozidel. Brno: Nakl. Vlk, 2003

VLK, F. Karosérie motorových vozidel. Brno: Nakl. Vlk, 2000

HEISLER, H. Advanced Vehicle Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007

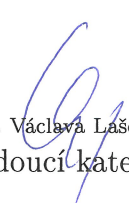
Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Konopiský**
MB-Tech Bohemia, Praha

Datum zadání diplomové práce: **21. září 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2016**


Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 21. září 2015

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Zídek	Jméno Tomáš		
STUDIJNÍ OBOR	2301T001 „Dopravní a manipulační technika“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Němec, CSc.	Jméno Ladislav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh konstrukce výkovku A-sloupku			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	99	TEXTOVÁ ČÁST	80	GRAFICKÁ ČÁST	6
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Cílem diplomové práce je zhodnotit možnosti použití technologie kování v oblasti A-sloupku osobního automobilu a identifikovat její výhody a nevýhody oproti běžným současným konstrukčním řešením. Práce se věnuje návrhu kovaného A-sloupku a jeho hodnocení ve srovnání se stávajícím řešením po stránce hmotnostní, technologické, ekonomické a funkční. V další části se práce věnuje vzájemnému porovnání karosářských variant vozidla z hlediska hmotnosti. Pro řešení byl využit CAD software Siemens NX a výpočtový řešič NX/Nastran.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>A-sloupek, karoserie, hliníková slitina, ocel, vysokopevnostní ocel, spojování materiálu, CAD, MKP</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Zidek	Name Tomáš	
FIELD OF STUDY	2301T001 „Transport and handling machinery“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Němec, CSc.	Name Ladislav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of the forged A-pillar		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2016
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	99	TEXT PART	80	GRAPHICAL PART	6
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The aim of the thesis is to evaluate possibilities of using forging technology for A-pillar and identify strengths and weaknesses in comparison of the state of the art bodywork solution. The thesis deals with design of forged A-pillar and its evaluation with current system in weight, technology, economic a functional aspects. In the next section, the thesis deals with comparison of car body variants in terms of weight. CAD software Siemens NX was used for solution and NX/Nastran was used as a solver.</p>
KEY WORDS	<p>A-pillar, bodywork, aluminum alloy, steel, high strength steel, joining of materials, CAD, FEM</p>

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli při řešení mé diplomové práce.

Jmenovitě zejména vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Ladislavu Němcovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady.

Děkuji také konzultantovi Ing. Janu Konopiskému za vstřícný a obětavý přístup, poskytnutí cenných informací a za trpělivost a podporu.

Obsah

1	ÚVOD	11
1.1	Specifikování zadání	11
1.2	Představení zadávací společnosti	11
2	PŘEDSTAVENÍ A-SLOUPKU	12
2.1	Požadavky na A-sloupek.....	12
2.1.1	Předpis IIHS	13
2.1.2	Výhled z vozu.....	15
2.2	Konvenční konstrukční řešení.....	16
2.3	Nekonvenční konstrukční řešení.....	18
3	SOUČASNÝ STAV V OBLASTI NÁVRHU KAROSERÍ	19
3.1	Materiály	19
3.1.1	Ocel	20
3.1.2	Hliník.....	23
3.1.3	Hořčík.....	25
3.1.4	Kompozitní materiály.....	25
3.1.5	Plast.....	26
3.2	Povrchové úpravy.....	26
3.3	Technologie spojování.....	26
3.3.1	Svařování.....	26
3.3.2	Pájení.....	28
3.3.3	Nýtování.....	28
3.3.4	Lepení.....	28
3.3.5	Klinčování.....	28
3.3.6	FDS šrouby.....	29
3.3.7	Zalemování.....	29
3.3.8	3D lock seam.....	29
4	REFERENČNÍ ŘEŠENÍ	30
4.1	Příprava modelu	31
4.2	Analýza.....	33
4.2.1	Materiálový rozbor	36
4.2.2	Hmotnostní rozbor.....	37
4.2.3	Rozbor spojovací technologie	37
4.3	Kritéria hodnocení	41
4.4	Pevnostní kontrola.....	41
4.4.1	Definování sítě pevnostního výpočtu.....	41

4.4.2	Okrajové podmínky pevnostního výpočtu	44
4.4.3	Vyhodnocení výsledků	46
4.5	Analýza modálních vlastností.....	49
4.5.1	Definování sítě a okrajových podmínek výpočtu mod. vlastností	49
4.5.2	Vyhodnocení výsledků	49
5	NÁVRH NOVÉ KONSTRUKCE	51
5.1	Definování použitého materiálu	51
5.2	Obecné předpoklady nového konstrukčního řešení.....	53
5.2.1	Technologická omezení vyplývající z nýtování	54
5.2.2	Technologická omezení vyplývající z kování	54
5.3	Varianty.....	54
5.3.1	Návrh variant.....	54
5.3.2	Předvýběr vhodných variant.....	55
5.3.3	Pevnostní výpočty variant	58
5.3.4	Výběr nejlepší varianty	60
5.3.5	Optimalizace vybrané varianty.....	60
5.3.6	Vynucené změny	64
5.3.7	Žebrování	66
5.4	Ověření výsledného řešení	67
5.4.1	Pevnostní kontrola.....	67
5.4.2	Analýza modálních vlastností	69
5.5	Výrobní postup	70
5.6	Zhodnocení.....	74
5.6.1	Hodnocení konstrukčních vlastností	74
5.6.2	Technicko-ekonomické hodnocení	75
6	POROVNÁNÍ KAROSÁŘSKÝCH VARIANT	77
6.1	Varianta MPV	77
6.2	Varianta kabrio	80
6.3	Zhodnocení karosářských variant	83
7	ZÁVĚR	87
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	89
9	SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE.....	93
10	PŘÍLOHY	94

Přehled důležitých značek a zkratek

CAD – Computer aided design (počítačem podporované navrhování)

IIHS – Insurance Institute for Highway Safety

MAG – Metal Active Gas (svařování v aktivní ochranné atmosféře)

MIG – Metal Inert Gas (svařování v inertní ochranné atmosféře)

MKP – Metoda konečných prvků

MPV – Multi-purpose vehicle (víceúčelové vozidlo)

SOL – Solver (řešič)

Von-Mises – Kritérium maximálního napětí

Užité veličiny a jejich jednotky

f [Hz] frekvence

P [kW] výkon

p [MPa] tlak

F [N] síla

M [Nm] kroutící moment

1 Úvod

Cílem diplomové práce je zhodnotit možnosti použití technologie kování v oblasti A-sloupku osobního automobilu a identifikovat její výhody a nevýhody oproti běžným současným provedením.

1.1 Specifikování zadání

Hlavním cílem této diplomové práce je navrhnout a zhodnotit použití hliníkového výkovku na A-sloupek na zadaném osobním vozidle. Součástí bude návrh spojovací techniky, montáže, posouzení náročnosti výroby a odhad výsledné ceny. Dalším cílem je prověření možností dalších karosářských variant a jejich vzájemné zhodnocení zejména z hlediska hmotnosti.

Automobil je blíže specifikován jako vůz střední třídy. Typickými zástupci tohoto segmentu jsou Audi A4, BMW řady 3 a Mercedes-Benz třídy C. Ze zadání je zřejmé, že se bude jednat o sériovou výrobu vozu s roční produkcí více než 100.000 ks automobilů.

Pro účely diplomové práce budou poskytnuty CAD data pro referenční řešení. Tím je dán zástavbový prostor a možnost provedení srovnání.

1.2 Představení zadávací společnosti

Společnost MBtech Bohemia se zabývá vývojem a poradenstvím pro automobilový průmysl, železniční dopravu a letectví. Hlavním zaměřením je konstrukce vozidel, zejména karoserií, podvozků, pohonných systémů a elektronických zařízení vozidel. Dalším oborem je vývoj malých motorů. Technologické centrum v Plzni se zabývá vývojem a výrobou nástrojů, přípravků a modelů.

Česká firma MBtech Bohemia s.r.o. je dceřinou společností MBtech Group GmbH & Co. KGaA. Ta je z 35% vlastněna německou firmou Daimler AG a z 65% nadnárodní konstrukční kancelář AKKA Technologies. Ta svůj podíl získala v roce 2012 od Daimleru.

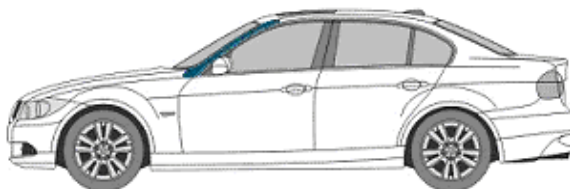
MBtech Bohemia byla založena v roce 1996 a má pobočky v Plzni, Praze a Mladé Boleslavi. Česká pobočka má nyní kolem 400 zaměstnanců a v roce 2014 dosáhla tržeb 688 milionů Kč.



obr. 1: sídlo a prototypová laboratoř společnosti MBtech Bohemia v Daimlerově ulici v Plzni

2 Představení A-sloupku

Střecha osobního automobilu je nesena několika páry sloupků. Ty jsou označovány písmeny abecedy od předku vozu. Obvykle jsou užívány 3 páry sloupků označované jako A, B a C. U vozidel kombi bývá užíván navíc D sloupek. Vzácně se vyskytují vozidla, u kterých je B sloupek vypuštěn (především segment MPV). Kabriolety pak mají pouze A-sloupek v podobě rámu čelního okna.



obr. 2: Pozice A-sloupku je na vozidle vyznačena modře [1]

Sloupky společně se střechou a dalšími částmi karoserie musí tvořit dostatečně pevnou a tuhou strukturu, aby byl při nehodě, a případném převrácení vozidla, zajištěn prostor pro přežití posádky. Na sloupky jsou pak kladeny různé protichůdné požadavky. Na jednu stranu je třeba zajistit co nejvyšší tuhost a pevnost, naopak je ale požadavek na co nejnižší hmotnost, neboť je žádoucí, aby byl vůz co nejlehčí (z důvodu ovladatelnosti a spotřeby paliva). Navíc sloupky, vzhledem k jejich pozici na vozidle, silně negativně ovlivňují těžiště vozu. Zejména na A-sloupek působí ještě další protichůdný požadavek na co nejlepší výhled z vozu.

Dále je A-sloupek společně s čelním oknem prvkem významně ovlivňujícím vzhled vozu a jeho aerodynamiku. Podílí se tak na výsledném odporu vzduchu, který má dominantní vliv na spotřebu vozidla při vysokých rychlostech. V neposlední řadě má obtékání vzduchu okolo A-sloupku významný vliv na hlučnost vozu exteriéru i v interiéru.

2.1 Požadavky na A-sloupek

Požadavky na A-sloupek se během dlouhého vývoje automobilů měnily.

Nejprve zde byl pouze požadavek, že A-sloupek musí nést střechu vozidla a případný náklad na střeše. V minulosti tak vznikala vozidla s velmi tenkými sloupky, jako ukazuje obr. 3.

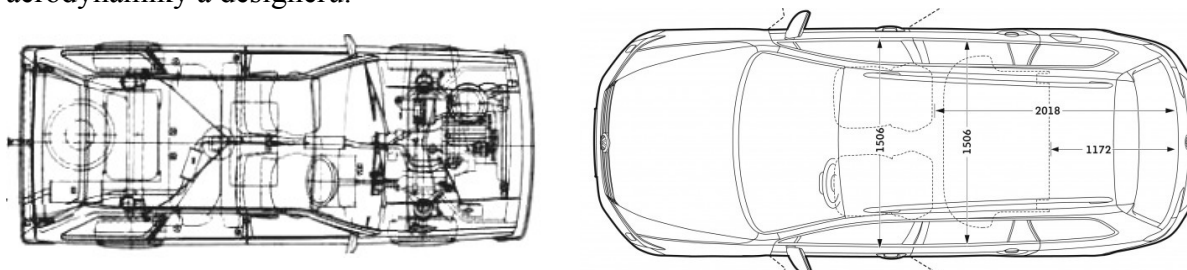


obr. 3: Chevrolet Impala (1961) [2]

Změna nastala až s příchodem samonosných karosérií (viz. kapitola 3). Zde je již A-sloupek nedílnou součástí celé struktury karoserie vozidla, podílí se na přenášení sil a musí tak být již mohutněji dimenzován. Zásadní převrat však nastává až v 80. letech. Tehdy se začíná významně řešit bezpečnost vozidel, která se v 90. letech stává hlavním objektem pozornosti

jak automobilek, tak laické veřejnosti. A-sloupek se stává kritickým místem z hlediska návrhu bezpečnosti. Musí odolávat zatěžování různými způsoby při různých typech nehod. V zásadě se jedná o 3 typy nárazů: nárazy čelní (zejména náraz na roh karoserie), boční náraz a převrácení na střechu.

Právě převrácení na střechu je pro A-sloupek nejméně příznivé. K tomu přispívá i stále větší poklápení A-sloupků (jak ve směru podélném, tak příčném). To je dáno především požadavky aerodynamiky a designérů.



obr. 4 - 7: příklad vývoje proporcí os. automobilu na porovnání VW Passat Variant (vlevo B1 (1973), vpravo B8 (2015)) - čelní sklo je výrazně více poklopeno, boky karoserie se více zužují [3][4][5][6]

Při návrhu A-sloupku je třeba uvažovat nejhorší možné zatížení. Proto se vychází ze zatížení definovaném při převrácení vozidla na střechu. Konstrukci A-sloupku je třeba navrhovat s ohledem na ostatní nosné části struktury karoserie, neboť spolu tvoří jeden celek.

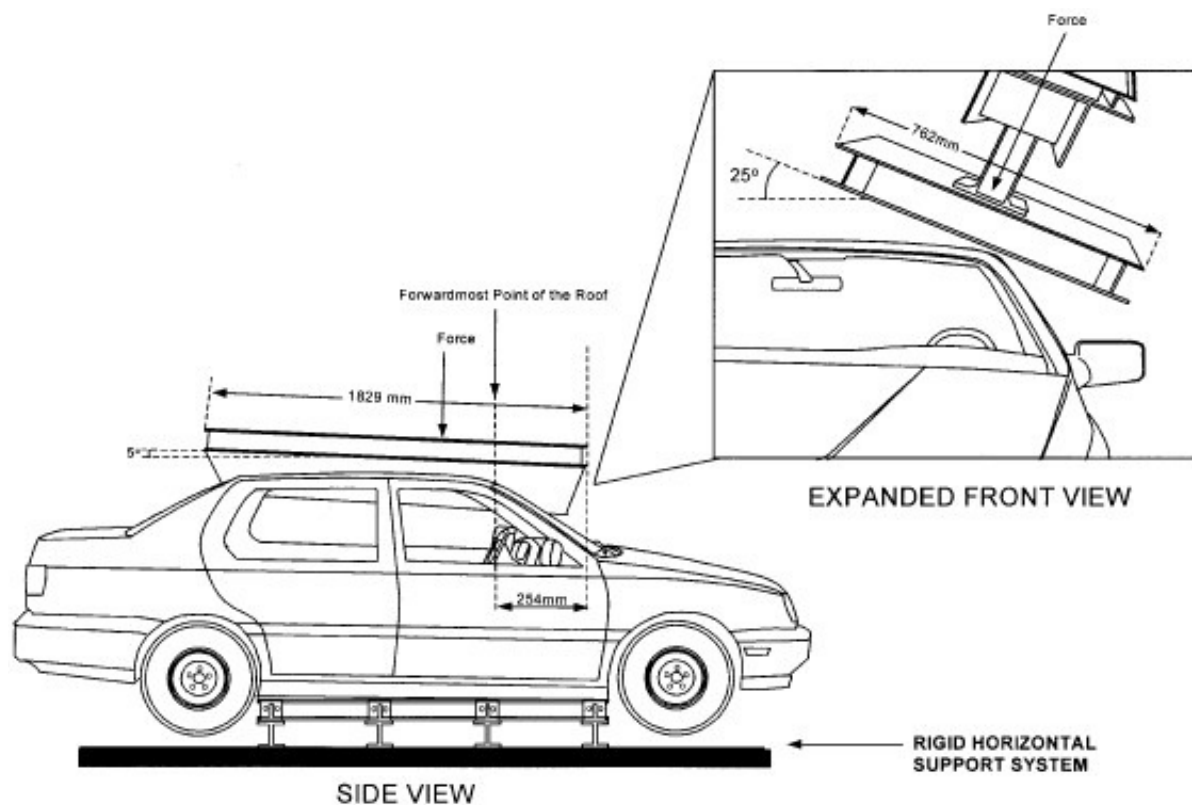
2.1.1 Předpis IIHS

Odolnost vozidla při převrácení na střechu stanovuje předpis IIHS - "Roof crush".

Zkouška dle standardu IIHS se provádí stlačováním rohu střechy auta deskou, která se pohybuje konstantní rychlostí 5 mm/s. Dole je auto pevně uchyceno za podběh. Během zkoušky je zaznamenávána stlačovací síla, neboli odpor, který konstrukce vozidla působí proti stlačování. Vůz je celkově stlačován o 5 palců, tj. 127 mm. Maximální naměřená síla během stlačení o 127 mm je vydělena naměřenou silou od hmotnosti vozu. Tím je získána hodnota SWR (Strength to Weight Ratio). [7] Ta v podstatě určuje kolikrát auto samo sebe unese při převrácení na střechu. Hodnota SWR je pak hodnocena dle následující tabulky:

SWR	Hodnocení
≥ 4	Dobré (good)
$\geq 3,25$ do 4	Přijatelné (acceptable)
$\geq 2,5$ do 3,25	Krajní (marginal)
$< 2,5$	Špatné (poor)

tab. 1: výsledné hodnocení zkoušky roof crush [7]



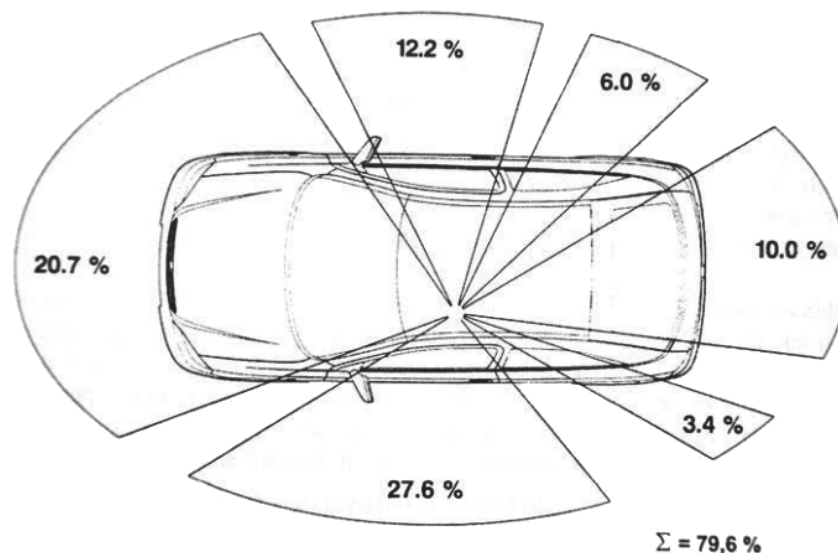
obr. 8: poloha stlačovací desky je přesně určena předpisem IIHS FMVSS 216a [8]



obr. 9: stlačování vozidla na zkušebním standu během zkoušky [9]

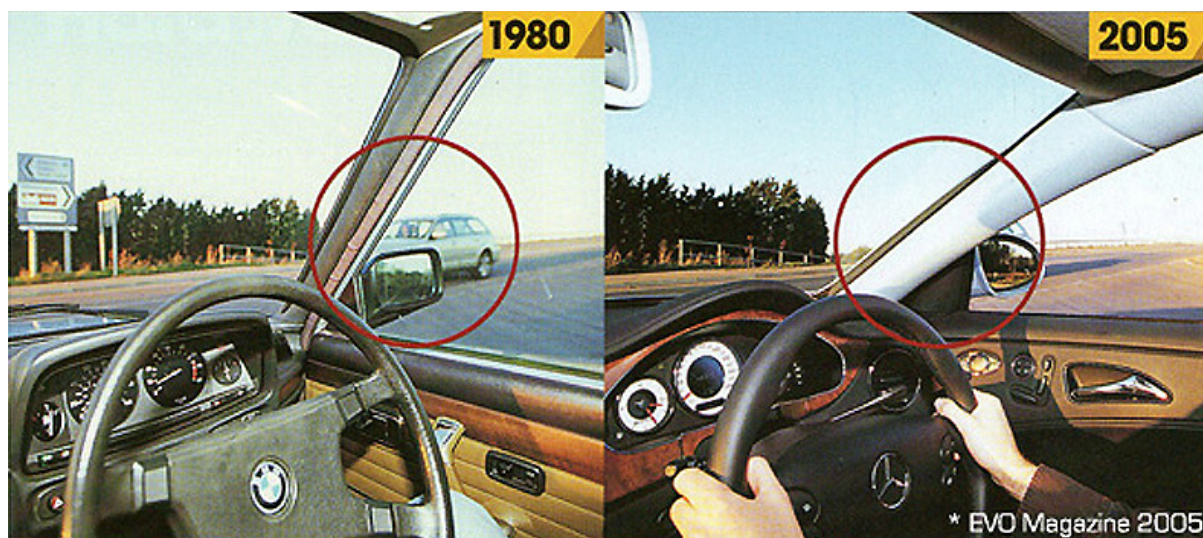
2.1.2 Výhled z vozu

A-sloupek je prvek karoserie, který svým umístěním a rozměry výrazně ovlivňuje zorné pole řidiče.



obr. 10: znázornění výhledu řidiče z vozu [10]

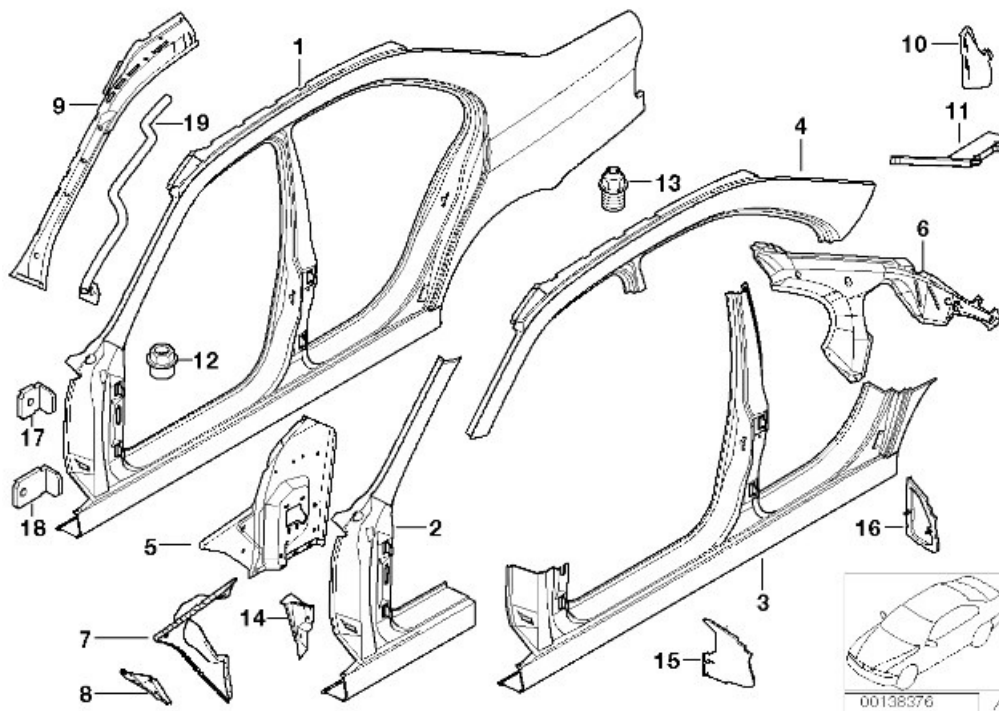
Postupným vývojem se A-sloupek dostal do situace, kdy je v současné době významnou překážkou ve výhledu. Tedy i rizikem pro bezpečnost. Mimo samotné tloušťky k tomu přispívá i výše zmíněné poklápění sloupků. Je proto snaha opět tloušťku snížit či tento problém obejít jiným způsobem (popsané v kapitole 2.3 Nekonvenční konstrukční řešení).



obr. 11: vývoj A-sloupků (zvětšování tloušťky a poklápění) [11]

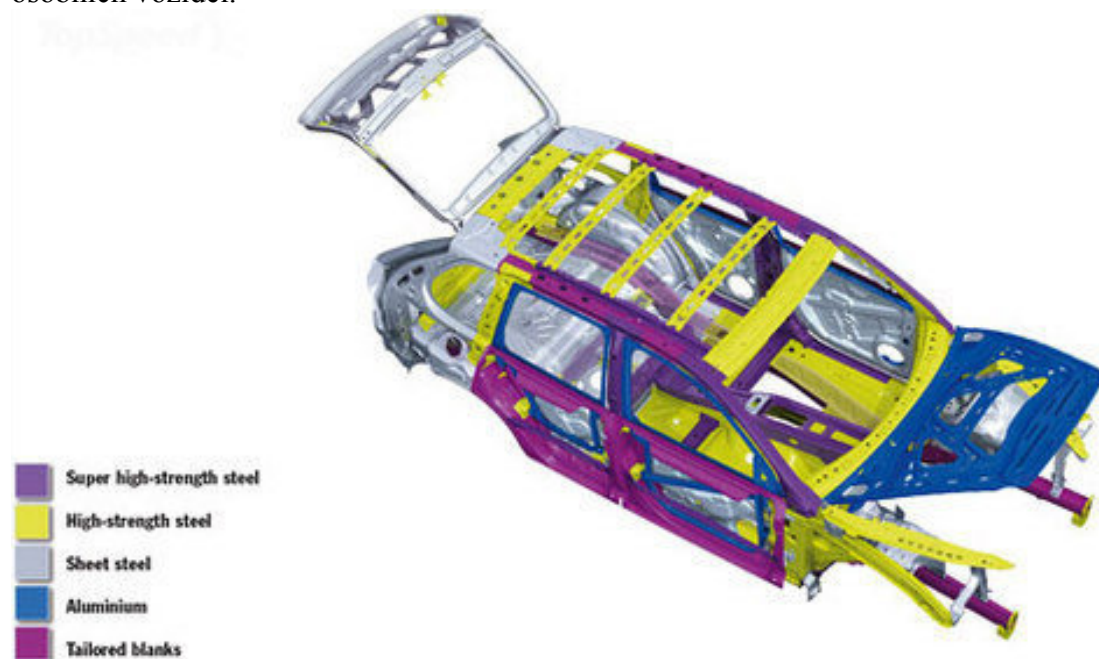
2.2 Konvenční konstrukční řešení

Celý profil A-sloupku se skládá z plechu bočnice, vlastního profilu (obvykle dva ocelové profily) a vnitřního obložení z plastu. Všechny díly boku vozidla jsou na obr. 12, díly A-sloupku jsou na obr. 16 - 18 na str. 18. Ocelové díly jsou během výroby skeletu vzájemně spojeny - svařeny. Zřídka používaným konstrukčním řešením je užití tří plechů či vyztužení vnitřku trubkou.

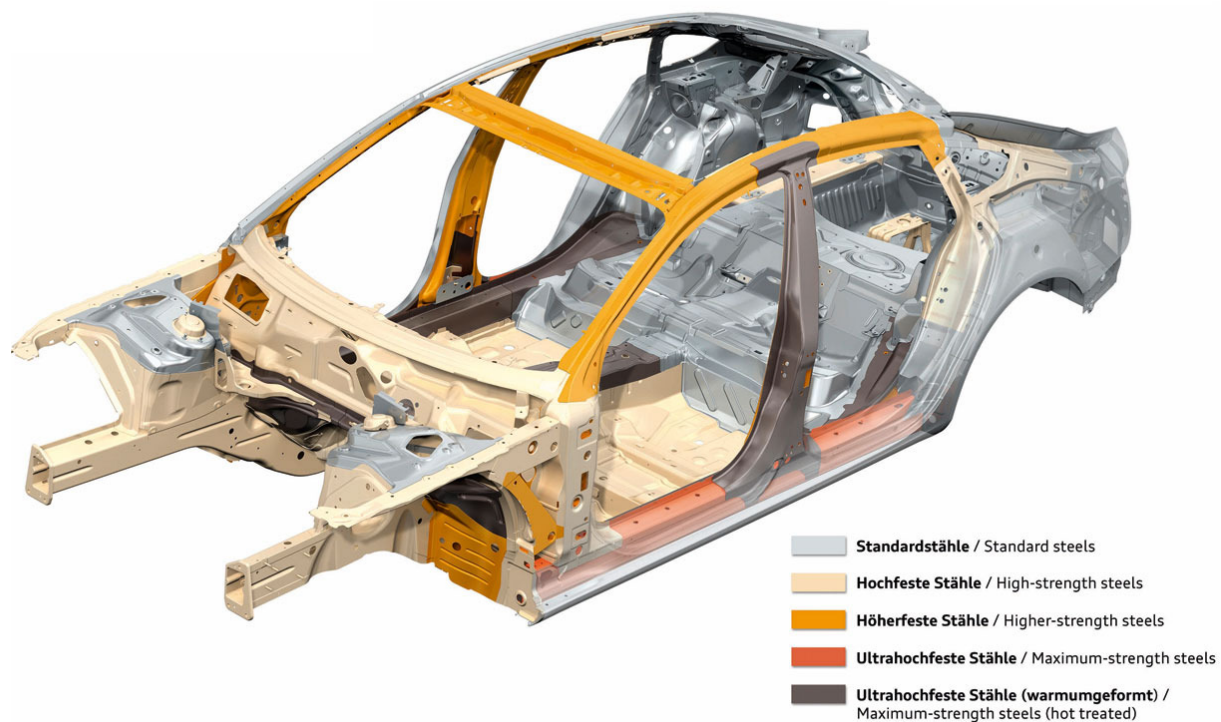


obr. 12: díly bočnice vozidla BMW E39 [12]

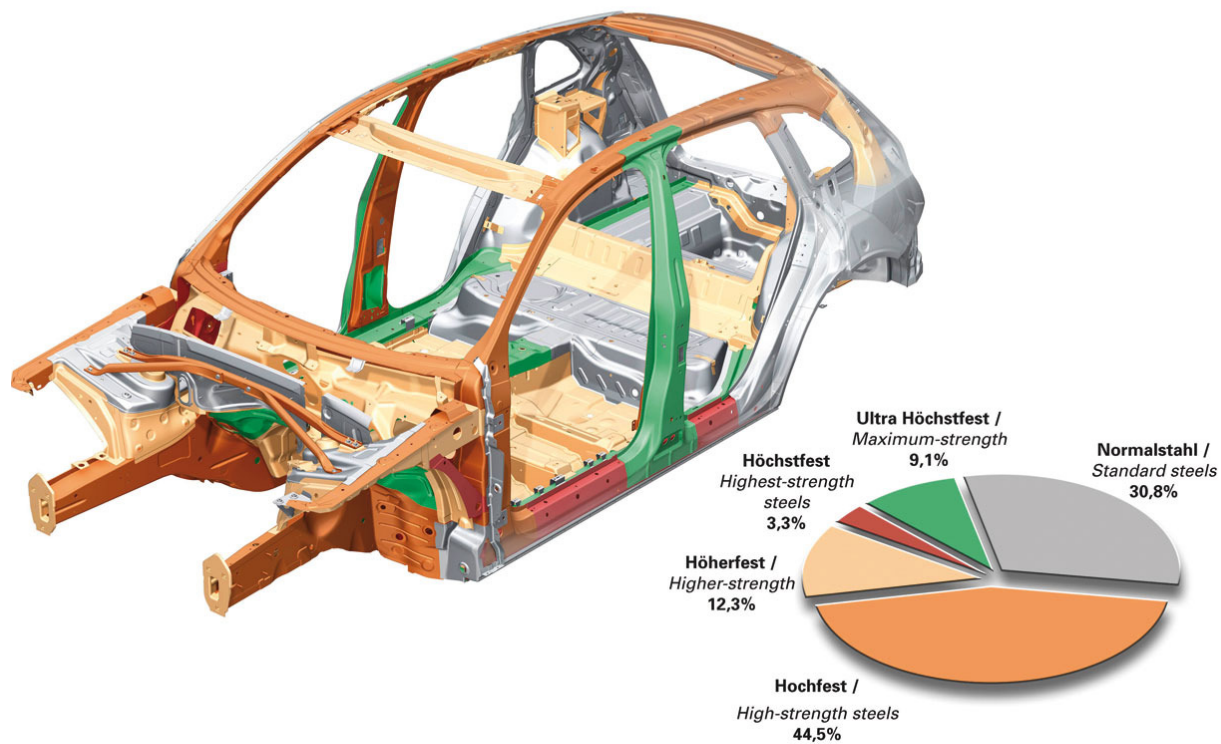
Na následujících obrázcích je vyobrazeno několik příkladů konstrukce nosné karoserie osobních vozidel.



obr. 13: Porsche Cayenne [13]



obr. 14: Audi A5 [14]



obr. 15: Audi Q5 [15]

Na obrázcích 16 - 18 jsou vyobrazeny díly A-sloupku.



obr. 16: A-sloupek - úplný
[16]

obr. 17: A-sloupek (vnitřní díl)
[17]

obr. 18: plastový díl interiéru
[18]

2.3 Nekonenční konstrukční řešení



obr. 19: Renault Espace 4. generace [19]

Vzácně využívaným řešením je použití zdvojeného A-sloupku, kdy je hmota sloupku rozdělena na dvě samostatné části mezi nimiž je umožněn průhled. To přináší celkově lepší výhled z vozu. Pravděpodobně nejznámějším představitelem tohoto řešení je Renault Espace. Renault jej zatím použil u všech pěti generací tohoto úspěšného MPV.

V rámci studií bylo představeno i několik ryze nekonvenčních konstrukčních řešení, které sledovaly stejný cíl - umožnit řidiči průhled skrz A-sloupek. Na obrázcích níže jsou vyobrazeny dvě zajímavé studie z poslední doby. Žádné takové nekonvenční řešení se však do sériové výroby nedostalo.



obr. 20: Volvo Safety Car Concept [20]



obr. 21: Toyota FT-86 [21]

V současné době je trendem spíše snaha "eliminovat" mrtvý úhel A-sloupku pomocí displayů, které by na A-sloupku zobrazovaly obraz z kamer. Řidič by tak získal v podstatě nepřerušované zorné pole v plném rozsahu 180 stupňů. Pokrok v elektronice (zejména na poli displayů) je významným příslibem budoucnosti tohoto řešení.

3 Současný stav v oblasti návrhu karoserií

Karoserie rozlišujeme z konstrukčního hlediska spojení s podvozkem na 3 základní typy: rámové, polonosné a samonosné.

Rámová karoserie (někdy též podvozková) je pružně upevněna na rám podvozku tak, aby se nepřenášelo namáhání z podvozku do karoserie. Rám přenáší jak veškeré síly, tak nese agregáty (motor, převodovka), karoserii a další komponenty. Rámová karoserie se u osobních automobilů dnes již v podstatě nepoužívá.

Polonosná karoserie je s rámem již pevně, avšak rozebíratelně, spojena. Provozní namáhání zachycuje rám společně s karoserií. V segmentu osobních vozidel se dnes vyskytuje téměř výhradně jen u terénních vozů.

Samonosná karoserie je tvořena jedním nerozebíratelným celkem, který obsahuje jak rám (podvozková část), tak samotnou karoserii (vrchní stavbu). Samonosná karoserie nese veškeré celky, včetně podvozkových dílů a jako celek zachycuje namáhání vznikající při jízdě. V místech upevnění náprav, motoru a převodovky je celek vyztužen výztuhami. Povrchové plechy karoserie (především blatníky) jsou snadno odnímatelné panely, obvykle lehce bodově přivařené. Účelem je jednoduchá výměna karosářských dílů při opravách.

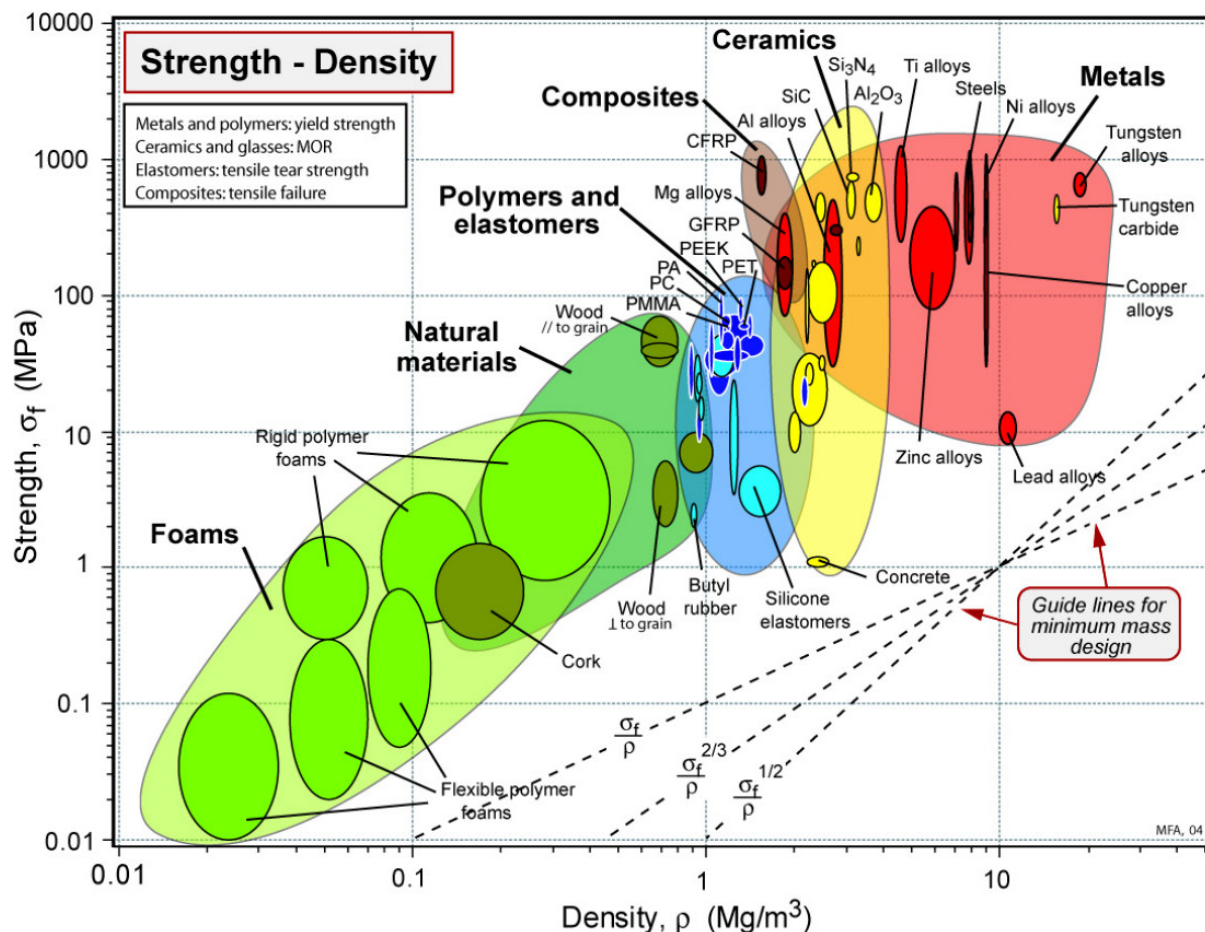
Karoserie plní účely nosné konstrukce, vytváří přepravní prostor pro cestující a náklad, zajišťuje tepelnou pohodu a ochranu před povětrnostními vlivy, omezuje hluk a vibrace, a především musí zajistit ochranu cestujících při nárazu. Z důvodu stále rostoucích požadavků na bezpečnost, při zachování stávajících materiálů, výrazně vzrůstá i hmotnost vozu. Tu dále zvyšují i rostoucí nároky na výbavu vozidel. To negativně ovlivňuje jednak chování vozu, ale především zvyšuje spotřebu pohonných hmot, a v důsledku toho i produkci CO₂, které je Evropskou Unií pro automobilky regulováno. Za překračování stanovených limitů jsou automobilky pokutovány. Proto automobilový průmysl hledá nové materiály, které zajistí nižší hmotnost vozidel.

3.1 Materiály

Nejběžnějším materiálem na výrobu karoserie je ocel. Stále více se dnes užívá také hliníku. Méně často se využívá různých umělých hmot, kompozitů, uhlíkových vláken či karbonu nebo hořčíku.

Jak vyplývá z výše uvedeného, je důležité snažit se používat materiály s co nejvyšší pevností při co nejnižší měrné hmotnosti.

Následující graf znázorňuje závislost napětí (meze pevnosti) na hustotě pro jednotlivé materiály. To lze interpretovat jako pevnost materiálu v závislosti na hmotnosti. Cílem je najít materiál o nejlepším poměru (napětí σ_f / hustota ρ).



obr. 22: závislost napětí σ_f - failure strength (mez pevnosti) na hustotě ρ [22]

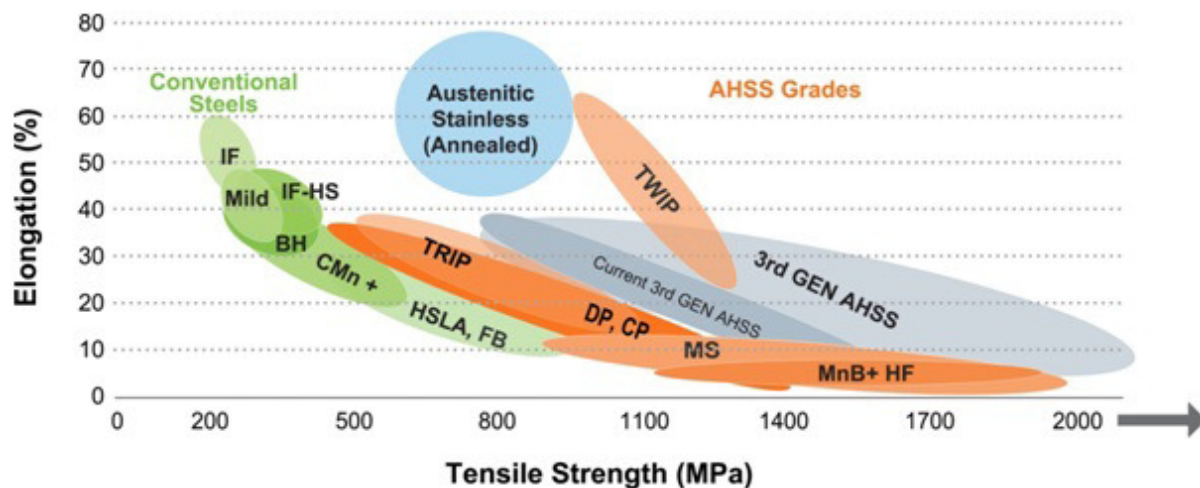
3.1.1 Ocel

Ocel je nejdéle, a stále nejvíce, používaným materiálem na stavbu karoserií. Důvodem je vysoká pevnost, snadné a efektivní spojování (dobrá svařitelnost), snadná tvárnost i tažnost, nízká cena, a také zvládnuté a dostupné výrobní postupy. Při antikorozním zpracování je zajištěna i dostatečná životnost. Největší nevýhodou ocelové stavby je její vysoká hmotnost.

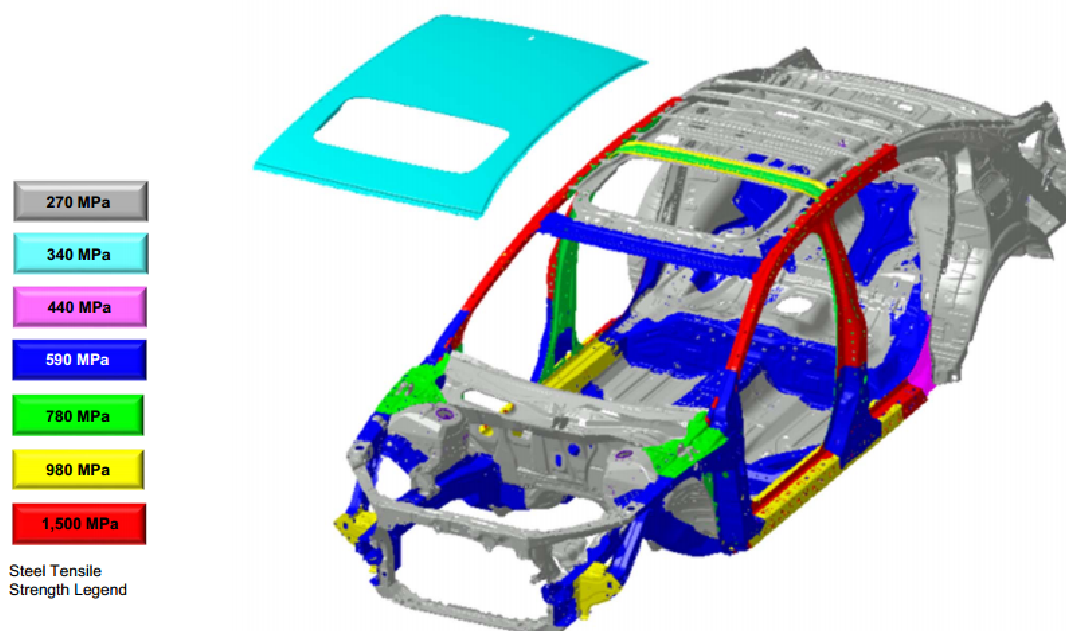
Pevné karosářské plechy mají mez kluzu do 400 MPa, normální karosářské plechy okolo 180 MPa. Běžné tloušťky plechu se pohybují od 0,5 mm do 2 mm.

Na jednotlivé části karoserie jsou používány dobře přetvárné hlubokotažné oceli, vysokopevnostní oceli, vícefázové oceli, martenzitické oceli, oceli legované borem a ušlechtilé oceli.

Na části A-sloupků, B-sloupků a prahů jsou dnes obvykle používány vysokopevnostní martenzitické oceli legované borem. Bor zvyšuje kalitelnost a mez pevnosti. Ocel je zpravidla za tepla válcovaná a vynikajících vlastností dosahuje po lisování s kalením. Může dosahovat meze kluzu až 1200 MPa. Tato ocel je dle DIN označovaná jako 22MnB5, obchodní název USIBOR. Oblast použití na vozidle je vidět z obr. 24.



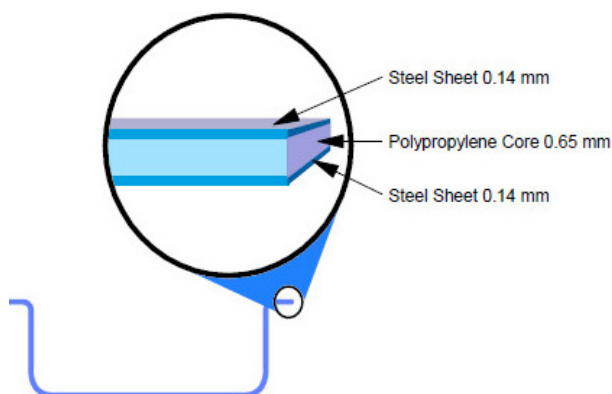
obr. 23: graf prodloužení a napětí pro různé oceli [23]



obr. 24: Acura RSX [24]

ULSAB

Zvláštní kategorií je technologie ULSAB. Jedná se o použití dvou velmi tenkých ocelových plechů s vysokou mezí kluzu (140 až více než 550 MPa), mezi nimiž je uzavřena umělá hmota (obvykle polypropylen). [10] Tloušťka výsledného sendvičového materiálu dosahuje 0,65 až 3 mm. [25] Ocelový plech přenáší hlavní namáhání, plastová výplň zvyšuje tuhost dílu při jakémkoli namáhání.



obr. 25: vzniklý materiál celkové tloušťky 0,96 mm (po spojení) má velmi podobné vlastnosti jako ocelový plech tloušťky 0,7 mm [26]

Výsledný materiál má velmi podobné vlastnosti jako ocelové plechy - hlubokotažnost, řezání, lepení. Zásadní nevýhodou je nemožnost použití svařování. [26]

Při použití technologie ULSAB může být výsledná karoserie až o 25% lehčí, o 80% odolnější vůči namáhání v krutu, o 52% vůči namáhání v ohybu, a mají o 58% vyšší první vlastní frekvenci. [27]

Technologie výroby

Polotovary pro ocelové díly karoserie jsou vyráběny jako tabule, pásy či svitky, obvykle za studena převálcované. Povrch může být pozinkovaný.

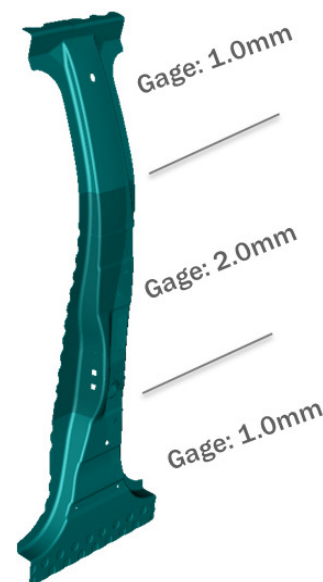
Běžným zpracováním jsou pak nejrůznější formy lisování, tažení či hlubokého tažení.

Problémem pro technologii zpracování je stále se zvyšující pevnost zpracovávaného materiálu. To vede k používání stále výkonnějších lisů, transferových a tandemových linek a servolisů. Významným problémem je odpružení materiálu po tváření, které se zvyšuje společně s pevností materiálu. [28] Proto se stále více prosazují nové nekonvenční metody. Mezi ty patří hydroforming a hydromechanické tváření.

Pro velmi pevné struktury karoserie (typicky A-sloupek, B-sloupek a prahy) je dnes užívána technologie tváření za tepla. Tato metoda umožňuje vyrábět komplexní hlubokotažné díly bez významného zpětného odpružení. Díl je při zpracování nejprve vyražen ze vstupního pásového materiálu a na válečkové průběžné peci zahřán na teplotu dosahující až 950°C. Následně je při lisování vytvarován a zároveň zakalen. Na závěr je díl oříznut laserem na přesný rozměr. Pro oceli s povrchovými úpravami se do celého procesu navíc zařazuje operace předlisování za studena. Tato metoda je obzvláště vhodná ke zpracování vysokopevnostní oceli 22MnB5.

Tailor rolled blanks

Tailor rolled blanks (TRB) je technologie, která umožňuje plynule měnit tloušťku plechu. Navíc plynulými změnami tloušťky dílu zabraňuje vzniku koncentrace napětí, které u konvenčního řešení vznikají na hranách vyztužení. Celkově se jedná o nákladnou technologii, avšak samotné přidání dalších tloušťek již cenu příliš nenavýšuje. Proto např. u B-sloupku Fordu Focus můžeme najít 8 různých tloušťek. Díky tomu se Fordu podařilo ušetřit 1,3 kg na B-sloupku. [29] Kromě B-sloupku nachází TRB také často uplatnění na Front modulu. [30]



obr. 26: B-sloupek s užitím technologie TRB vozidla Chevrolet Colorado [31]

3.1.2 Hliník

Čistý hliník je kov, který má hustotu pouze přibližně 2700 kg/m^3 při pevnosti v tahu kolem 70 MPa a tažnosti asi 30%. Jeho užitím je tak možné dosáhnout významných hmotnostních úspor. V automobilovém průmyslu se používá ve slitinách, které lze rozdělit na slitiny pro tváření a slévárenské slitiny. U slitin jsou vlastnosti hliníku dále zlepšovány legováním (především prvky Mn, Mg, Cu, Si, Ni, Ti), tvářením za studena nebo tepelným zpracováním. Tak je možné dosáhnout meze pevnosti 70 - 520 MPa pro tvářené slitiny, resp. 120 - 450 MPa pro slévárenské slitiny. Hliník má vynikající odolnost proti korozi, protože na svém povrchu vytváří tenkou vrstvičku Al_2O_3 , která zabraňuje další oxidaci. [32] Hliník a většina jeho slitin jsou dobře svařitelné téměř všemi metodami svařování. Pro svařování jsou díky jemnozrnější struktuře obecně výhodnější slitiny tvářené, u kterých však může vlivem svařování docházet k výrazné degradaci mechanických vlastností. [33]

Hliník je v dnešní době používán na méně namáhané díly konstrukce. Typicky se jedná o výztuhy nárazníků. V menší míře je používán na některé svrchní karosářské díly - kapoty, dveře, blatníky. Průkopníkem v oblasti hliníkových karoserií je Audi. To představilo na autosalonu v roce 1993 ve Frankfurtu studii auta s první celohliníkovou samonosnou karoserií na světě. Následně se do sériové výroby dostala řada aut vyrobených z hliníku v kombinaci s vysokopevnostními oceli - např. Audi A8, A2, TT, R8. [34]

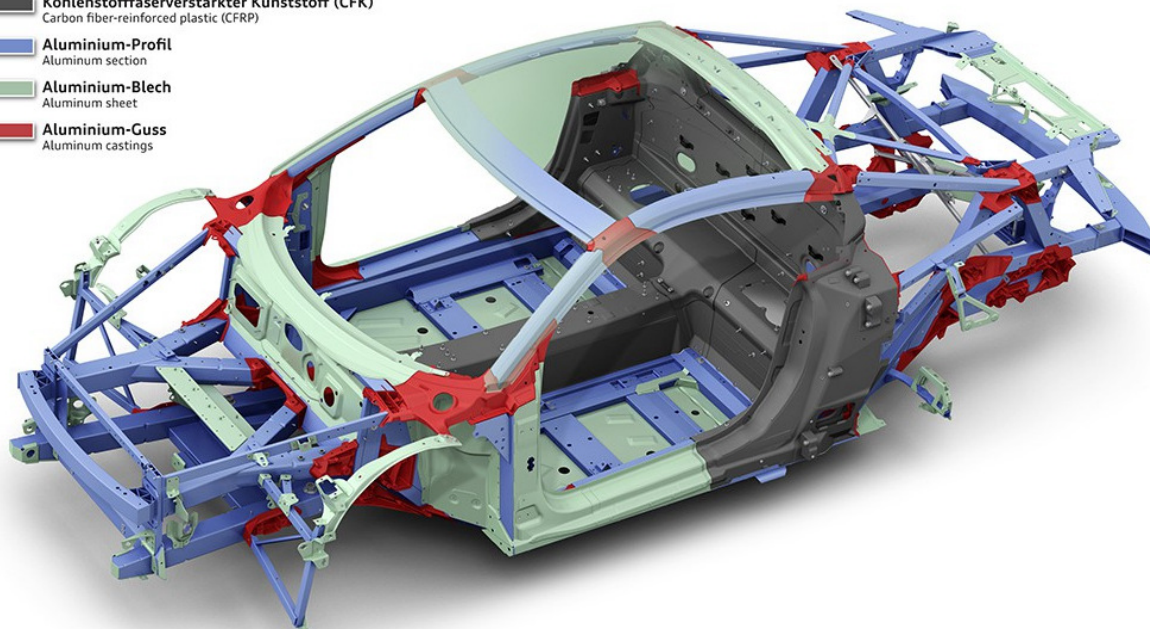


obr. 27: koncept Audi ASF (Audi Space Frame) [35]

Audi R8 Coupé

Audi Space Frame in Multimaterialbauweise
Audi space frame in multimaterial construction
03/15

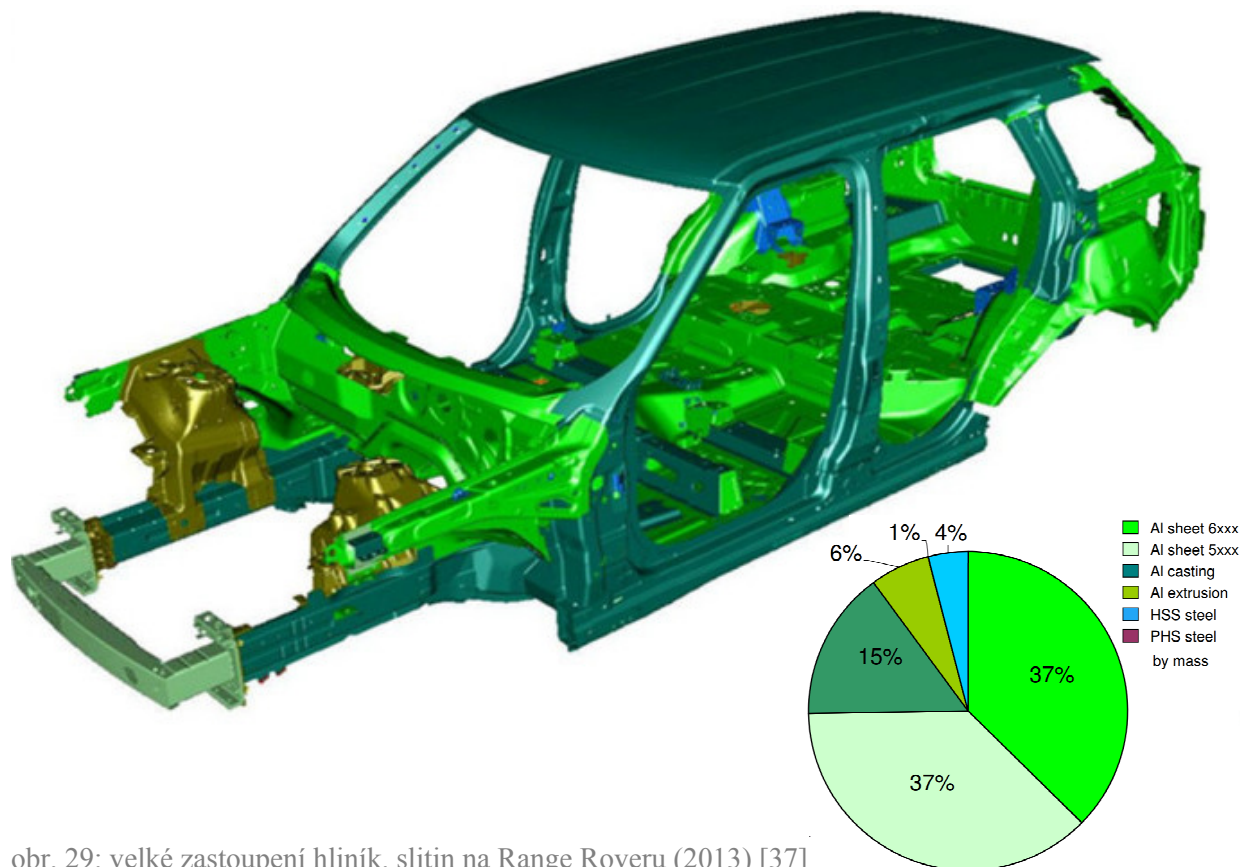
-  Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK)
Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP)
-  Aluminium-Profil
Aluminum section
-  Aluminium-Blech
Aluminum sheet
-  Aluminium-Guss
Aluminum castings



obr. 28: skelet Audi R8 využívající koncepci ASF - hmotnost celého rámu je pouze 200 kg [36]

Hlavními důvody používání hliníku jsou nízká měrná hmotnost, poměrně vysoká pevnost a korozní odolnost. Hlavními důvody relativně nízkého využití u karosérií vozidel je komplikované spojování s ocelovými díly. Ve spojích ocel-hliník je vysoké nebezpečí vzniku koroze. Proto jsou typickou aplikací hliníku např. kapoty či dveře. Druhým důvodem je pak

vyšší cena oproti konvenčnímu ocelovému řešení. Nevýhodná je i menší tvarová pevnost hliníku oproti oceli. To snižuje absorpci energie při nárazu. Proto je nutné používat plechy o větší tloušťce, což se negativně projevuje na výsledné úspoře hmotnosti i ceně.

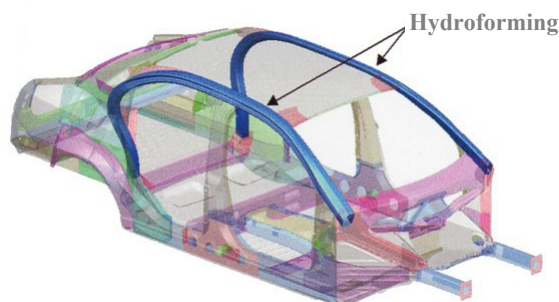


obr. 29: velké zastoupení hliník. slitin na Range Roveru (2013) [37]

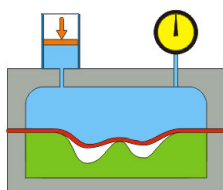
Mimo nosné struktury jsou však již dnes slitiny hliníku v automobilech běžně užívány. Typické aplikace jsou např.: blok motoru, hlava válce, písty, skříň startéru, alternátoru a převodovky, části chladiče, ramena pedálů a další. Veřejnosti známou je pak slitina hořčíku a hliníku používaná na disky kol - $MgAl_6Mn$ pod obchodním názvem elektron.

Technologie výroby

Nejjednodušším tvarovým zpracováním hliníku je **lisování** dílů z plechů. Tato metoda je navíc rychlá a relativně levná. Pokročilejší metodou lisování je tzv. **hydroforming**. Jedná se o tvarování plechu tlakem kapaliny. Hlavní výhodou je nízké tření dílu o membránu, což zlepšuje skluz deformujícího se dílu. Díky tomu se rovnoměrně rozkládá tlak po ploše výlisku a nedochází tak k lokální koncentraci napětí. Největší nevýhodou lisování je konstantní tloušťka celého dílu, která neumožňuje lokální zesílení dílu.



obr. 30: hydroforming použitý pro konstrukci střešních nosníků [38]



obr. 31: hydroforming [39]

Dalším velmi častým způsobem výroby je **kování**. V automobilovém průmyslu je téměř výhradně využíváno kování zápustkové. Je totiž vhodnější pro velké série a náročnější tvary než kování volné. Nejlepších rozměrových tolerancí, jakosti povrchu, jakož i tvaru dílu se dosahuje technologií tzv. **přesného kování**. Tento postup kování nevyžaduje další obrábění, naopak umožňuje vytvářet menší rádiusy, vyšší žebra a dosahuje nejlepších mechanických vlastností, neboť nedochází k porušení vláken materiálu.

Tažení - levná a často používaná metoda. Jedná se o deformační proces, při kterém dochází ke zmenšení průřezu materiálu protahováním skrz nástroj. Dosahuje se vyšší rozměrové přesnosti a lepší povrchové kvality než při lisování. Velkou výhodou je možnost táhnout téměř libovolný tvar průřezu. Konce taženého profilu je možné stlačit pro vytvoření plochy vhodné ke spojování. V dopravě je tato metoda hlavním způsobem výroby hliníkových skříní kolejových vozidel. V automobilovém průmyslu je využívána např. na výztuhy dveří. Využití této technologie na A-sloupek je komplikované a finančně náročné z důvodu výrazně se měnícího průřezu.

Tlakové lití umožňuje odlévání tvarově složitých dílů, a to např. i včetně žeber. Odlévání rozměrných dílů je však drahé (vysoká cena formy) a časově náročné. Proto se využívá především na menší díly, které není možné vyrobit lisováním či kováním. Viz. např. lité uzly karoserie Audi R8 na obr. 28 (označeny červeně).

3.1.3 Hořčík

Hořčík je kov, který má hustotu pouze 1740 kg/m^3 . Je tedy ještě lehčí než hliník. Jeho slitiny mají mez pevnosti v tahu 200 - 340 MPa. Vykazují výbornou obrobitelnost, horší tvárnost a svařitelnost. Výhodou je útlum vibrací. Naopak nevýhodami jsou sklon k elektrokorozí, nízká pevnost ve střihu, prudký pokles pevnosti za vyšších teplot (přibližně od 120°C) a náchylnost ke creepu. [40] Problémy způsobuje při zpracování i vysoká reaktivita s vodními parami. To vše zvyšuje náklady na jeho zpracování. [41] Hořčík je možno zpracovávat tvářením, sléváním či obráběním. V automobilovém průmyslu se hořčík uplatňuje především na tvarově složité díly (např. hlavy válců či díly řízení) a na konstrukci karoserií sportovních automobilů.

3.1.4 Kompozitní materiály

Jedná se o materiál, který je tvořen matricí (pojivo) a výztuží. Výsledné mechanické vlastnosti jsou dány výztuží. Kombinací různých materiálů a různého způsobu skládání lze získat obrovské množství různých kompozitních materiálů. V automobilovém průmyslu se uplatňují především následující dva typy kompozitů s polymerní matricí [42]:

První skupinou jsou kompozity s výztuží skelnými vlákny. Tyto kompozity mají všeobecně příznivé vlastnosti a jsou cenově dostupné. Používají se na části karoserií či skořepiny sedadel. S výhodou jsou využívány na karosářské díly u malosériových výrobců vozidel. Důvodem je relativně levná a snadná příprava výroby.

Druhou skupinou jsou kompozity na bázi uhlíkových vláken. Mají vysokou pevnost a v provozu nízké vibrace a hlučnost. Používají se jen zřídka, a nalézají užití např. na brzdových kotoučích, ojnících či karosérii supersportovních vozidel.

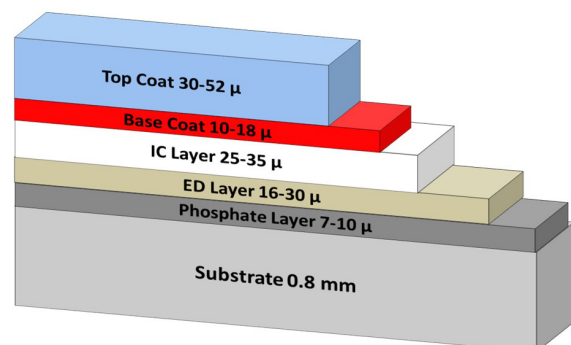
3.1.5 Plast

Některé části karoserie je možné nahradit plasty. Jedná se zejména o nárazníky, kapoty a blatníky. Doménou plastů je vybavení interiéru. Hlavními výhodami jsou nízká hmotnost a absolutní odolnost proti korozi. Mají zpravidla také výhodné tlumicí vlastnosti, které přispívají ke snížení hluku. Nevýhodou je především nízká pevnost, nízká odolnost vůči tepelnému namáhání, degradace vlivem stárnutí plastů a malá absorpce deformační energie. Ačkoli velmi dobře vzdorují běžným provozním poškozením a oděrkám, při významném poškození je jejich oprava nemožná.

V automobilovém průmyslu se používá velké množství různých plastů pro různé účely. Karosářské díly (zejména nárazníky) bývají často z polypropylenu. Malé díly bývají obvykle vyráběny vstřikováním nebo vakuovým tažením, velké především lisováním.

3.2 Povrchové úpravy

Povrchová úprava je důležitá především z důvodu ochrany proti korozi a z estetického hlediska. Na karosériích je prováděno množství úkonů jako je odmaštění a očištění, utěsnění spojů a nanášení několika vrstev laku. Vrstvy tvoří: fosfátová vrstva, základní nátěr, plnič (ochranný nátěr) proti odletujícím kamínkům, vyplňovací lak v odstínu vozu a krycí lak.



obr. 32: vrstvy laku [43]

Pro zlepšení ochrany proti korozi se karosérie často pozinkovávají. Podlahové plechy se pozinkovávají žárově ponorem do roztaveného zinku, což zajišťuje kvalitní povlak na celém svém povrchu, hranách i na případných vnitřních obtížně přístupných plochách. Plechy pro povrchové díly se pozinkovávají galvanicky z důvodu lepší kvality povrchu. [42]

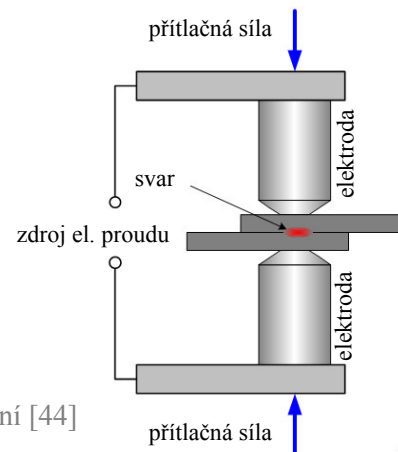
3.3 Technologie spojování

Jednotlivé části karoserie jsou k sobě, obvykle nerozebíratelně, spojeny. Široce využívaným způsobem spojování je svařování. Zejména u hybridních konstrukcí složených z více různých materiálů jsou používány i další způsoby spojování jako je nýtování, lepení nebo klinčování.

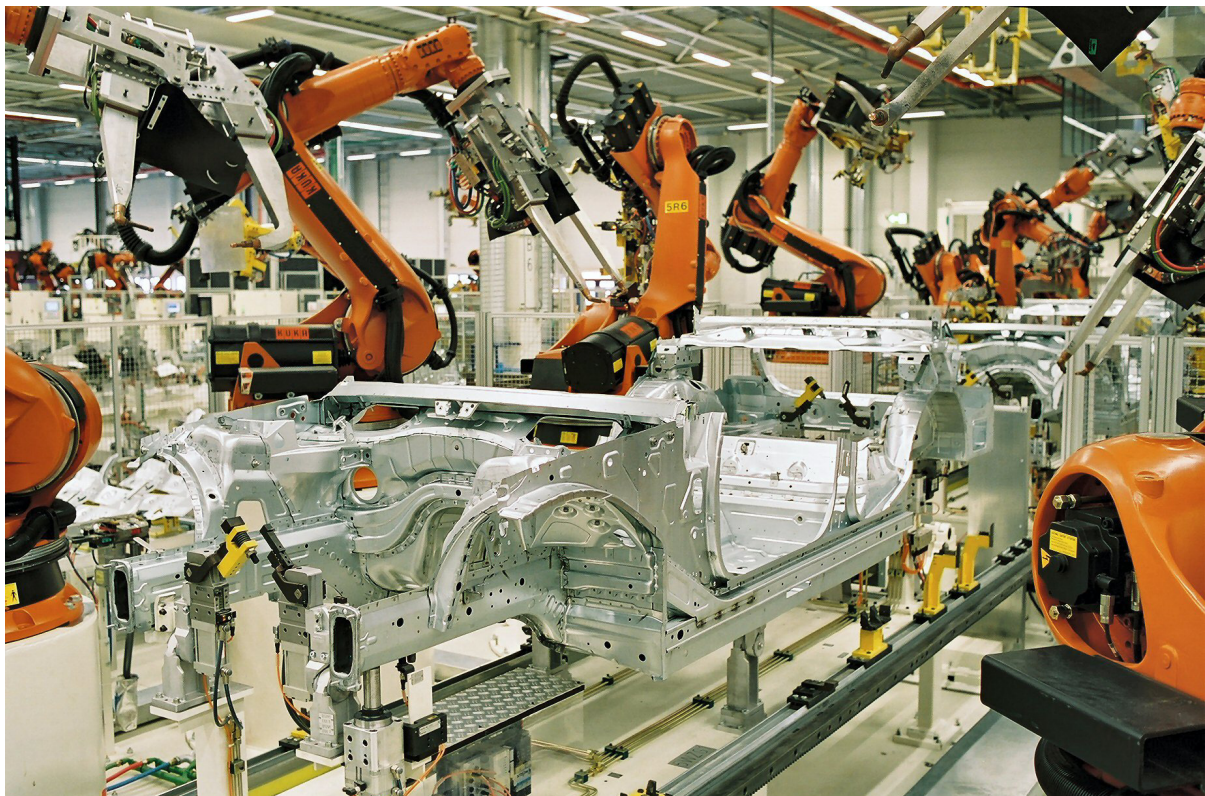
3.3.1 Svařování

Svařováním se vytváří trvalý nerozebíratelný spoj dvou a více součástí. Vhodnost materiálu ke svařování a kvalitu výsledného svaru určuje svařitelnost. Svařitelnost je definována pro každý materiál a je ovlivňována mnoha faktory: především chemickým složením materiálu a metalurgickým způsobem výroby. Svařitelnost u jednotlivých kovových slitin je velmi rozdílná. Dále je třeba zohlednit i technologickou možnost svařování daného materiálu konkrétními technologiemi. Tyto parametry bývají uváděny v materiálových listech. Platí, že je vždy nejvhodnější svařovat dva materiály stejného chemického složení, v opačném případě dochází k degradaci materiálu. Svařitelnost oceli s hliníkem je pak zcela nemožná.

V automobilovém průmyslu je v současnosti nejčastěji užíváno **bodové odporové svařování** ocelových plechů na plně automatizovaných linkách. Bodové odporové svařování je výhodné z hlediska efektivity nákladů, automatizace a kompenzace drobných nepřesností jednotlivých dílů. Bodové svařování poskytuje také vysokou rychlost provádění svarů. Výhodou je i relativně rychlý a levný návrh spojů.



obr. 33: Odporové bodové svařování [44]



obr. 34: svařovací linka BMW v Lipsku [45]

Hlavní části podvozkových skupin bývají svařovány metodou **MAG**, která zajišťuje maximální spolehlivost svaru.

Pro svařování hliníkových plechů je vhodná metoda **MIG**, která zajišťuje rozrušení filmu Al_2O_3 na povrchu materiálu. Dále je používána také ke svařování nerezových plechů a k tvrdému pájení ocelových pozinkovaných plechů.

Laserový paprsek se používá k tvrdému pájení nebo k provařování více vrstev materiálu.

Pro rozebíratelné připevnění dílů se používá šroubových spojů s předpřipravenými navařenými maticemi. Ty jsou odporově přibodovány.

Svařovat lze také plasty a kompozitní materiály na bázi plastů. Jedná se o technologii spojování jednotlivých plastových dílů za použití tepla nebo tlaku (případně kombinace

obojího). Svařování lze provádět s přídavným materiálem nebo bez něj. Ke svařování lze použít pouze termoplasty, které se dají přivedeným teplem opakovaně převést do plastického stavu. Vhodné ke svařování jsou plasty PE, PP a PVC.

3.3.2 Pájení

Pájení je, stejně jako svařování, metoda spojování za vlivu tepla. Narozdíl od svařování však nedochází k natavení základního materiálu. Taví se pouze přídavný materiál - pájka. Užívá se u tenkých karosářských plechů, kde by výrazné tepelné ovlivnění mohlo způsobit deformace.

3.3.3 Nýtování

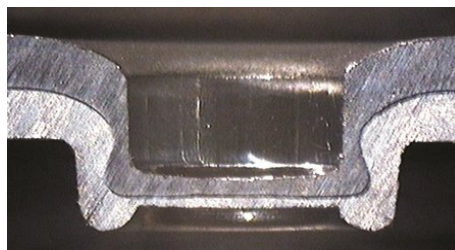
Nýtováním vzniká nerozebíratelný spoj dvou a více materiálů prostřednictvím nýtů. Rozlišujeme následující metody nýtování: za studena, za tepla, přímé a nepřímé. Nýtování za studena a za tepla se provádí pomocí vlastních nýtů, které tvoří spoj. Spojování za tepla se používá u průměrů nad 8 mm. Přímé nýtování je způsob nýtování, kdy je jako nýt použita část materiálu jednoho ze spojovaných dílů. Přímé nýtování je vhodné pouze pro málo namáhané spoje. [46] Na konstrukci karoserií automobilů byly hojně používány na začátku 20. století. Dnes nachází uplatnění u spojování nesvařitelných materiálů a na obtížné přístupných místech, která jsou nedostupná pro svařovací roboty.

3.3.4 Lepení

Lepení je další metodou vytváření nerozebíratelného spojení. Technologie lepení přináší oproti mechanickým typům řadu výhod. Lepení nezpůsobuje vrubové účinky a koncentraci napětí okolo děr pro šrouby či nýty, naopak rovnoměrně rozkládá napětí. Rovněž nedochází k negativnímu ovlivňování materiálu v okolí spoje, jako tomu je u svařování. Lepené spoje navíc tlumí rázy a vibrace a jsou odolnější proti dynamickému namáhání. V neposlední řadě je lepený spoj vodotěsný a nenarušuje povrch výrobku. Bohužel lepené spoje mají také významné nevýhody. Mezi hlavní patří omezené možnosti přenosu vysokého namáhání v různých směrech. Lepené spoje dobře přenášejí pouze smyková napětí. Ostatní druhy zatěžování již vykazují podstatně horší výsledky. Lepený spoj je technologicky náročnější z důvodu nutnosti očistit a odmastit spojované plochy, případně zdrsňit jejich povrch. V automobilovém průmyslu se používá především ve spojení s kompozity či plasty nebo pro spojování pohledových dílů.

3.3.5 Klinčování

Klinčování je mechanické spojení plechů vytvořením mechanického zámku ve spojovaných materiálech. Lze jej využít ke spojování ocelových, nerezových či hliníkových plechů. Jedná se o studený, energeticky nenáročný spoj, bez použití přídavného materiálu. Nedochází tak k negativnímu ovlivňování materiálu. Běžně je možné spojovat plechy do celkové tloušťky 4,5 mm, avšak moderní metody umožňují dosažení i větší tloušťky. Při klinčování stlačí razník dvě vrstvy plechu do předpřipravené matrice a vytvoří tak trvalé nerozebíratelné spojení. [47]



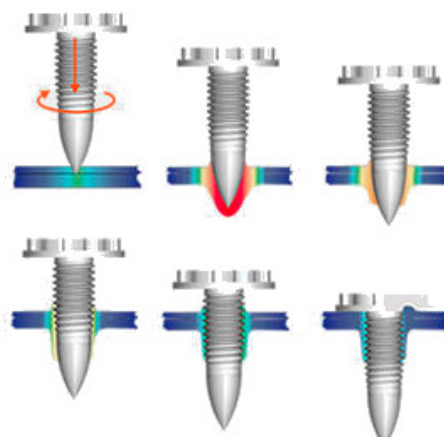
obr. 35: klinčovaný spoj v řezu [48]

3.3.6 FDS šrouby

FDS šroub (Flow Drill Screw) je speciální druh šroubu, který si sám vytvoří díru i závit ve spojovaných materiálech. Šroub je nejprve roztočen na vysoké otáčky a přitlačen na materiál. Tím je materiálu nataven a šroub je do něj silou vtlačen. Zároveň si šroub sám vytvoří závit. Do vzniklého závitu je pak šroub dotažen. Výhodou je především možnost vytváření spojů v místech, které jsou přístupné pouze z jedné strany.



obr. 36: Flow Drill šroub v řezu [49]



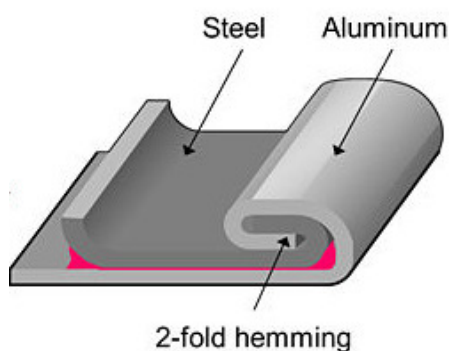
obr. 37: princip FDS spoje [50]

3.3.7 Zalemování

Jedná se o tvarový spoj. Jeho princip spočívá v zarolování konce plechu a vytvoření vzájemného spojení plechů. Tento typ spoje se užívá např. při spojování prahů vozidla nebo na spojení plechů kapoty (pohledový plech s vnitřním výztužným plechem).

3.3.8 3D lock seam

Novou metodou vyvinutou pro spojování oceli a hliníku je technologie 3D lock seam. Jedná se o spoj kombinující lepení a tvarový spoj. Tento spoj použila automobilka Honda na dveřích vozidla Acura RLX. Bohužel tento spoj není vhodný na použití ve spojení nosné konstrukce karoserie, především z pevnostních důvodů.



obr. 38: spoj 3D lock seam [51]

4 Referenční řešení

Jako referenční řešení je uvažován stávající vůz v karosářském provedení kombi. Stávající stav využívá konvenční konstrukční řešení A-sloupku. To se skládá ze dvou ocelových profilů a bočnice, které jsou vzájemně spojeny bodovým svařováním.

Pro potřeby návrhu, a zejména pevnostních výpočtů, je potřeba uvažovat větší celek než pouze A-sloupek. Byla zvolena nejmenší možná část vozidla - tedy část, která je při testu "roof crush" v kontaktu a její nezbytné okolí. Celá sestava je tak tvořena A-, B- a částmi C- a D-sloupků, střešním obloukem, střešní příčkou a částmi spadajícími do konstrukce přední části vozu. Celá sestava se tak skládá celkem z 18 dílů (17 dílů nosné struktury + plech bočnice). Je vyobrazena na obr. níže.



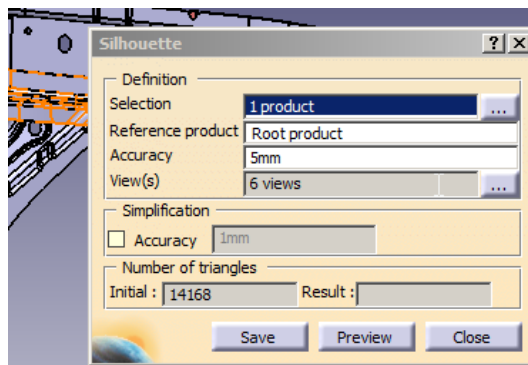
obr. 39: uvažovaná část vozidla

4.1 Příprava modelu

Vstupními daty byl kompletní 3D model vozidla vytvořený v softwaru CATIA V5. Veškerá data však byla bohužel ve formátu CGR (Catia Graphical Representation). Jedná se o formát, kdy jsou data 3D modelu reprezentována trojúhelníkovými plochami. S těmito plochami však nelze nijak pracovat, formát slouží pouze k urychlení načítání pro prohlížení 3D modelu a nenesou s sebou žádnou strukturu, která jej vytvořila. Je tedy zcela needitovatelný, tzv. "mrtvý".

Pro další práci je nezbytné taková data převést na strukturu standardního CATIA modelu CATpart. Postup převodu dat lze stručně popsat v následujících krocích:

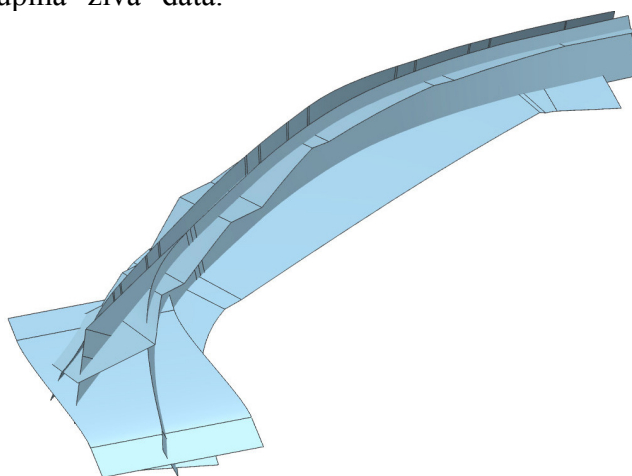
- spuštění DMO licence
- vybrání siluety požadovaného dílu
- uložení jako model
- vytvoření nového partu s geometrickým setem
- kopírování dat z uloženého modelu do geometrical setu
- přepnutí do part designu a upravení ploch (Join, Close surface)
- uložení jako STEP nebo IGES



obr. 40: ukázka z převodu dat z prostředí CAD softwaru CATIA v5

Nově vzniklý CATpart již může být exportován do univerzálních CAD formátů jakými je např. STEP nebo IGES. Tento krok je potřeba učinit proto, aby bylo možné otevřít model v softwaru NX. V posledním kroku je třeba ze STEP souboru vytvořit standardní NX part PRT. To je nutné provést prostřednictvím Import STEP volby v softwaru NX. Využití zabudovaného převodníku je nutné pro přenesení veškeré potřebné geometrie.

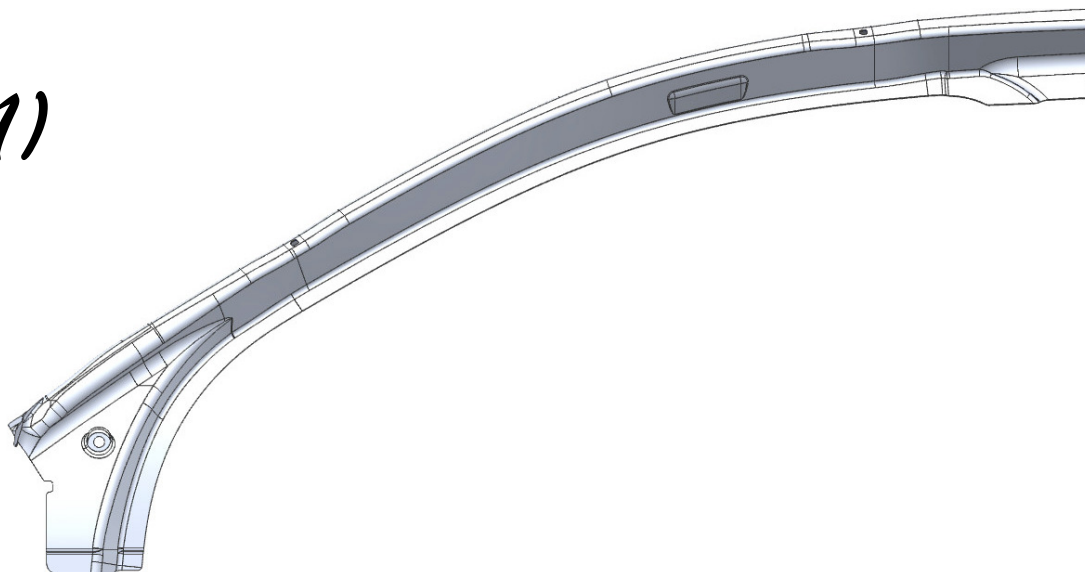
Následně byl celý model postaven znovu s využitím trojúhelníkových ploch získaných z CGR souboru. Ty určily základní vzhled nového 3D modelu. Nový model je tvořen jednotlivými plochami, které jsou spolu vzájemně spojeny. Výsledný plošný díl je oříznut a je mu přiřazena tloušťka. Vznikla tak úplná "živá" data.



obr. 41: základní plochy nového modelu

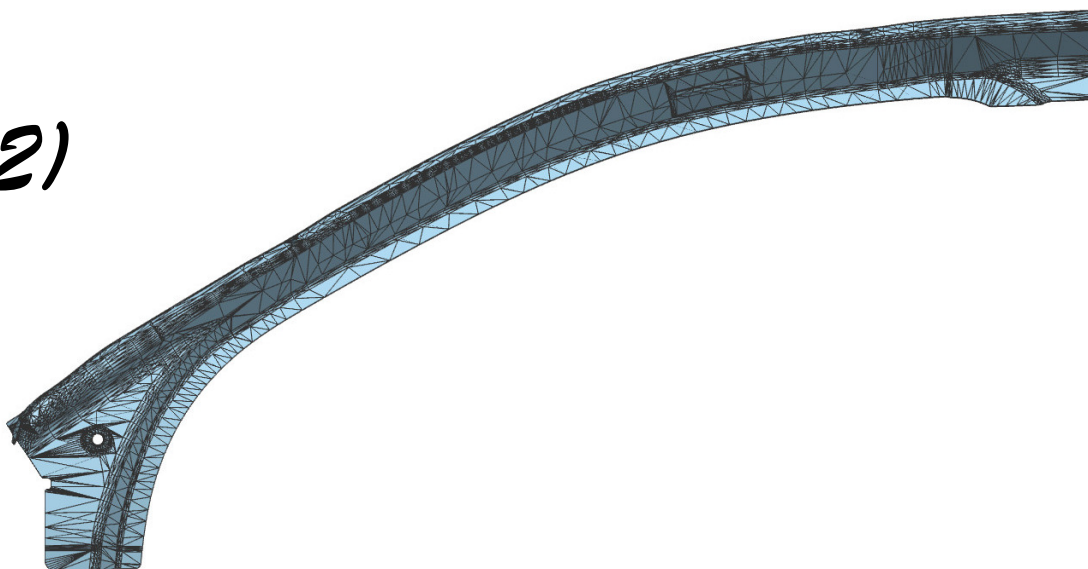
Tento postup byl proveden u všech 18 dílů. Z dílů byly vypuštěny všechny drobnější prolisy a malé otvory. Takové zjednodušení bylo nutné zejména s ohledem na budoucí síťování modelu pro výpočty metodou MKP.

1)



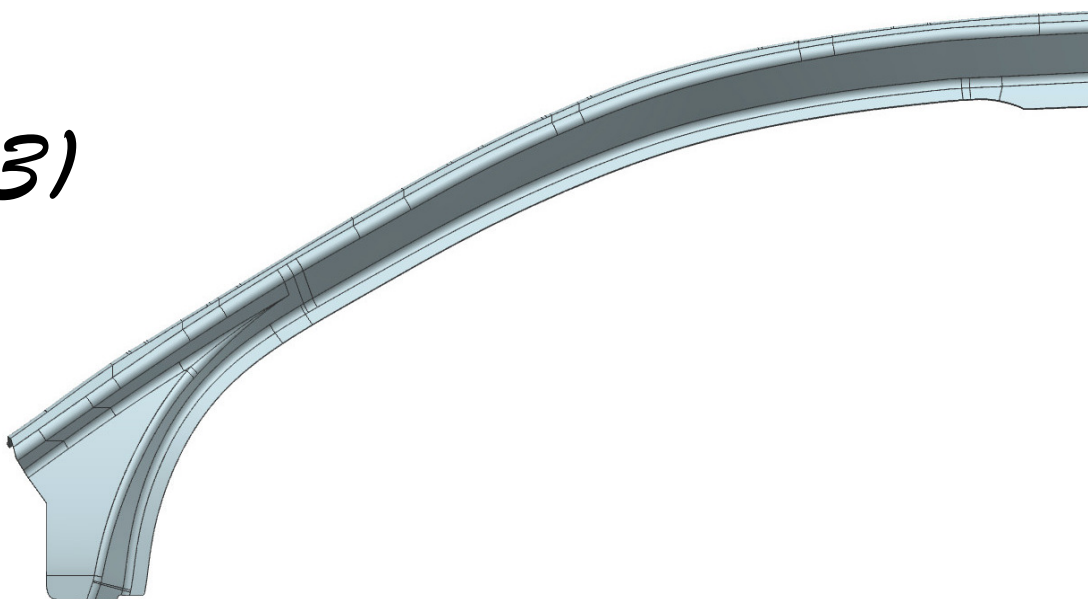
obr. 42: původní model z prostředí softwaru CATIA, soubor *.cgr

2)



obr. 43: STEP model importovaný do softwaru NX se skládá z 12.184 trojúhelníkových ploch

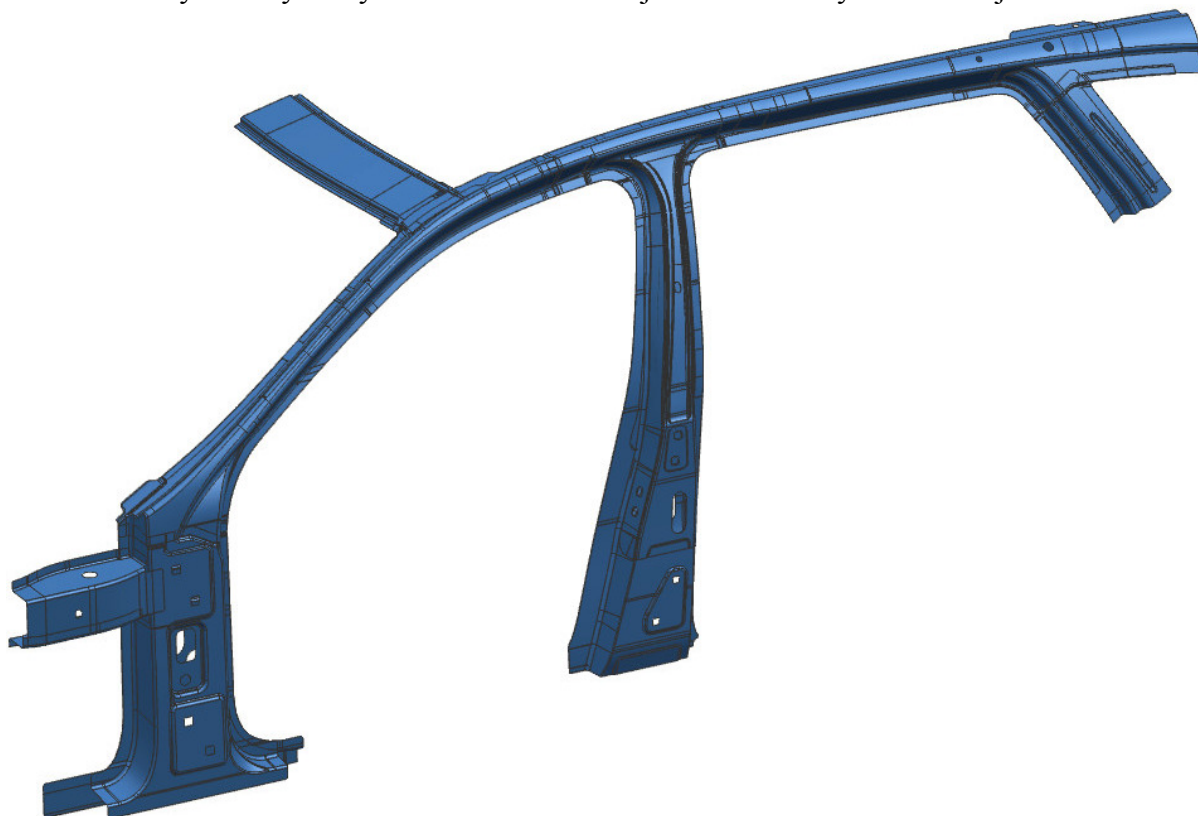
3)



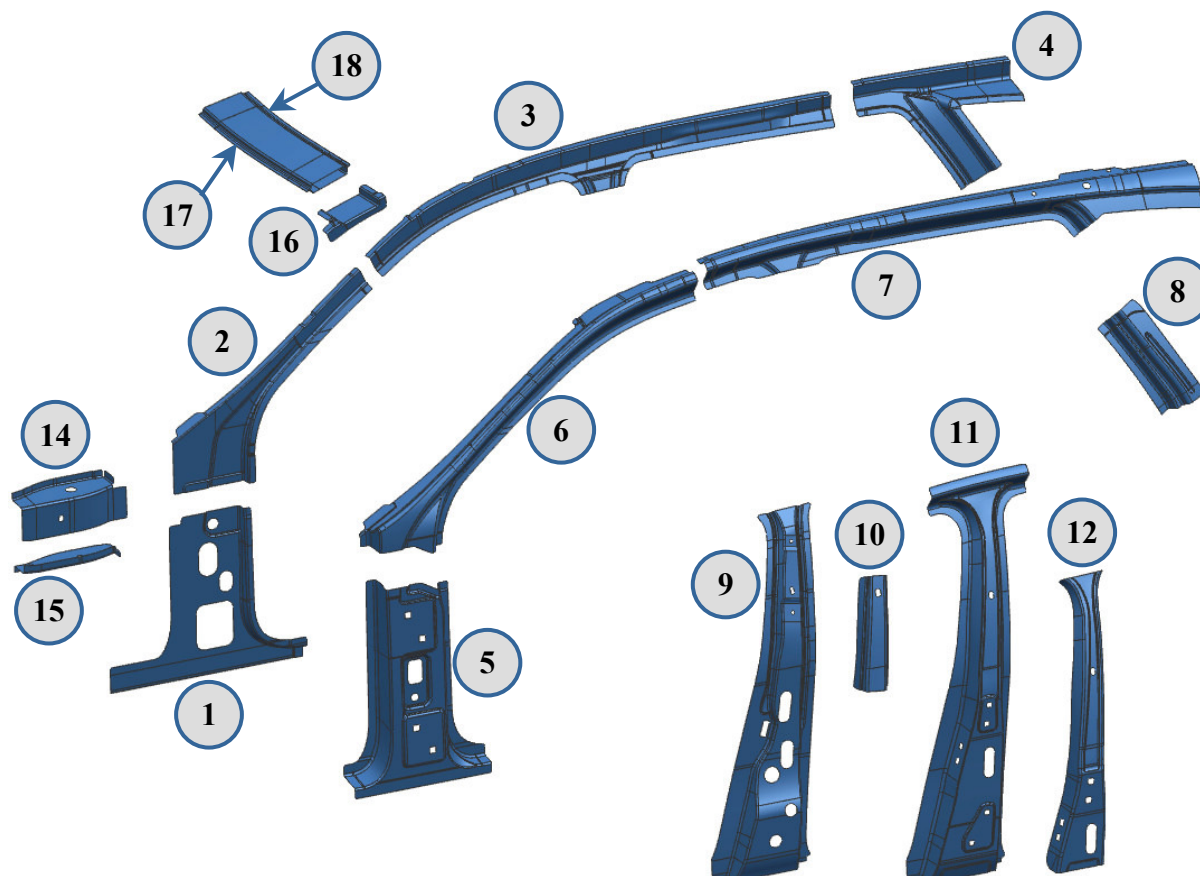
obr. 44: znovupostavený model v softwaru NX

4.2 Analýza

Jednotlivé díly sestavy analyzované části vozidla jsou rozkresleny na následujících obrázcích.

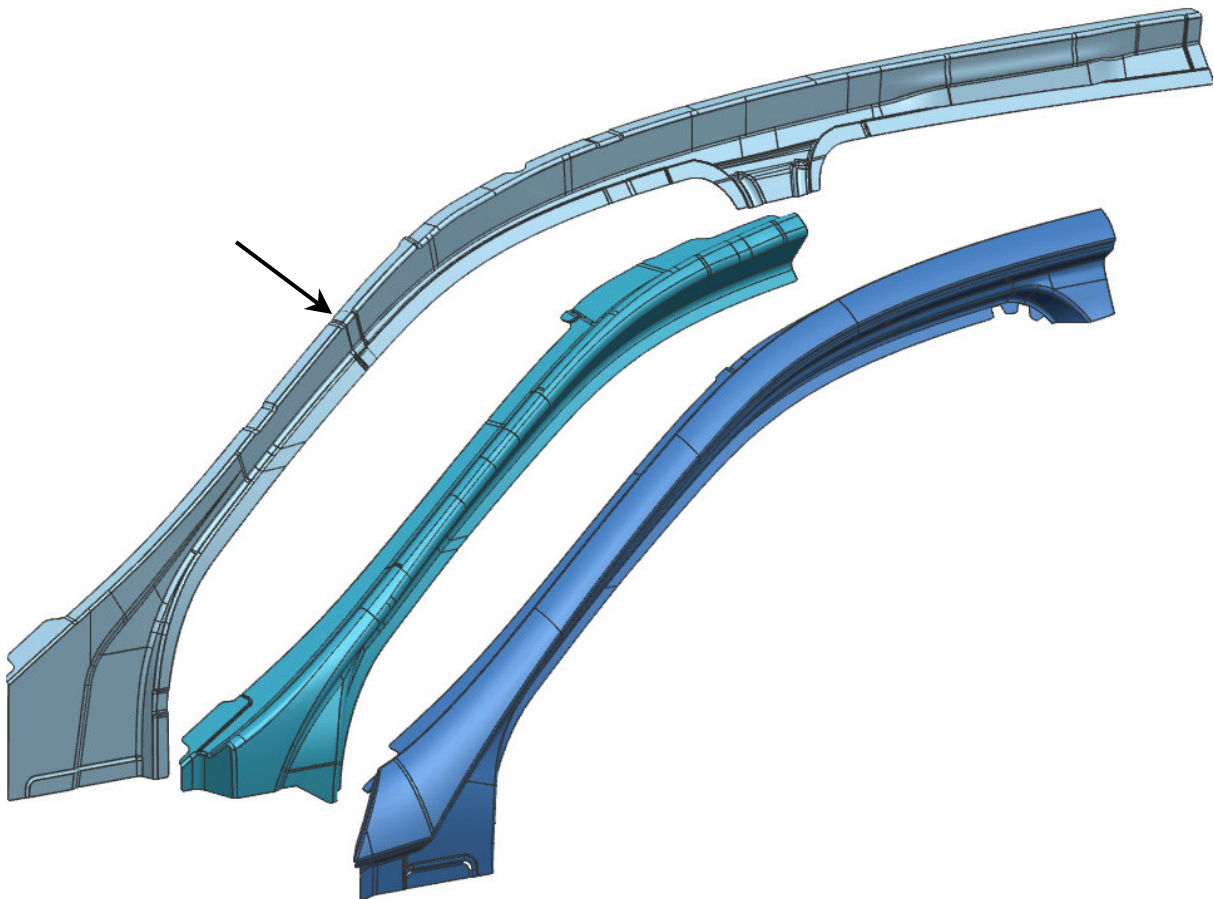


obr. 45: sestava - celkový pohled



obr. 46: jednotlivé díly sestavy (na toto číselné značení je dále v práci často odkazováno)

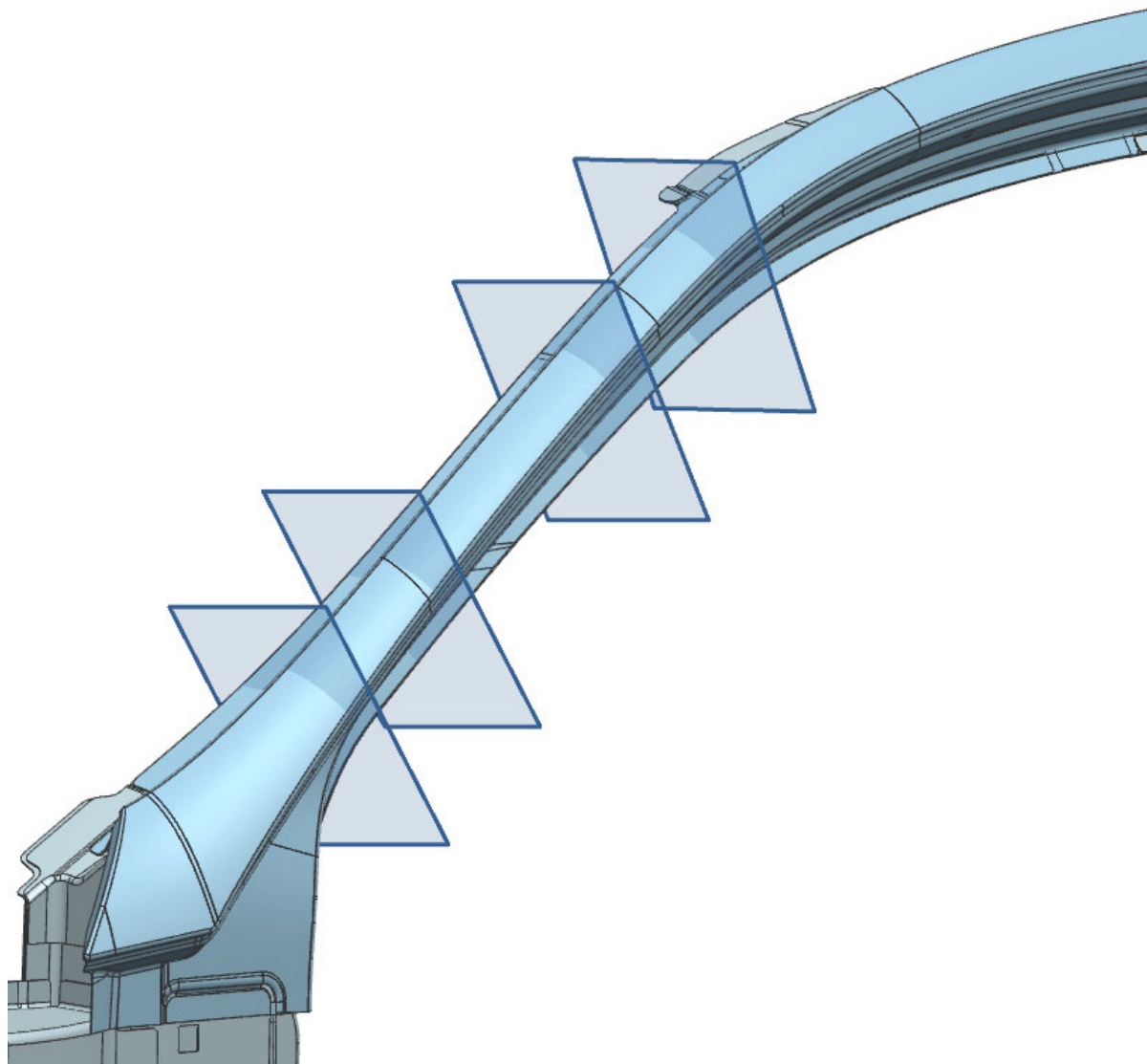
V oblasti samotného A-sloupku se karoserie skládá ze dvou profilů (vnějšího a vnitřního) a bočnice vozidla. Vnitřní profil nepokrývá celou oblast A-sloupku, ale již v místě zvýrazněném šipkou je napojen na vnitřní profil střešního oblouku. Vnější část A-sloupku je napojena až za střešní příčkou nad čelním oknem. Celá situace je patrná z následujícího obrázku. Pozn.: Bočnice (tmavě modrá) není pro přehlednost na obrázku zobrazena celá, ale pouze její výřez.



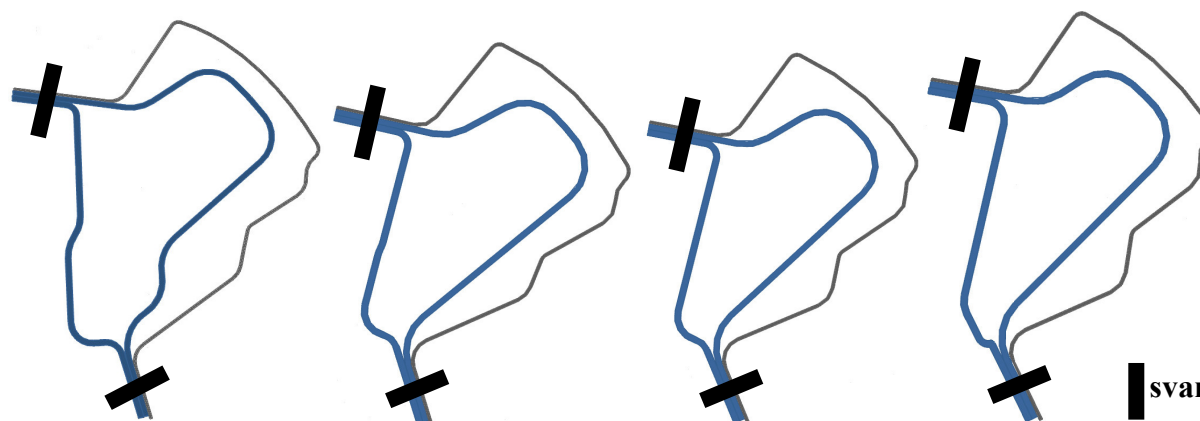
obr. 47: díly A-sloupku (díly č. 2, 3, 6 a bočnice)

Jedná se tedy o typické konvenční konstrukční řešení, které bylo popsáno v kapitole 2.2.

Na následujících obrázcích je zobrazena situace A-sloupku v několika řezech. Jsou zde zobrazeny obě části A-sloupku a místa jejich vzájemného spojení (černě). Dále se v řezu nachází bočnice (šedě), která určuje zástavbový prostor A-sloupku.

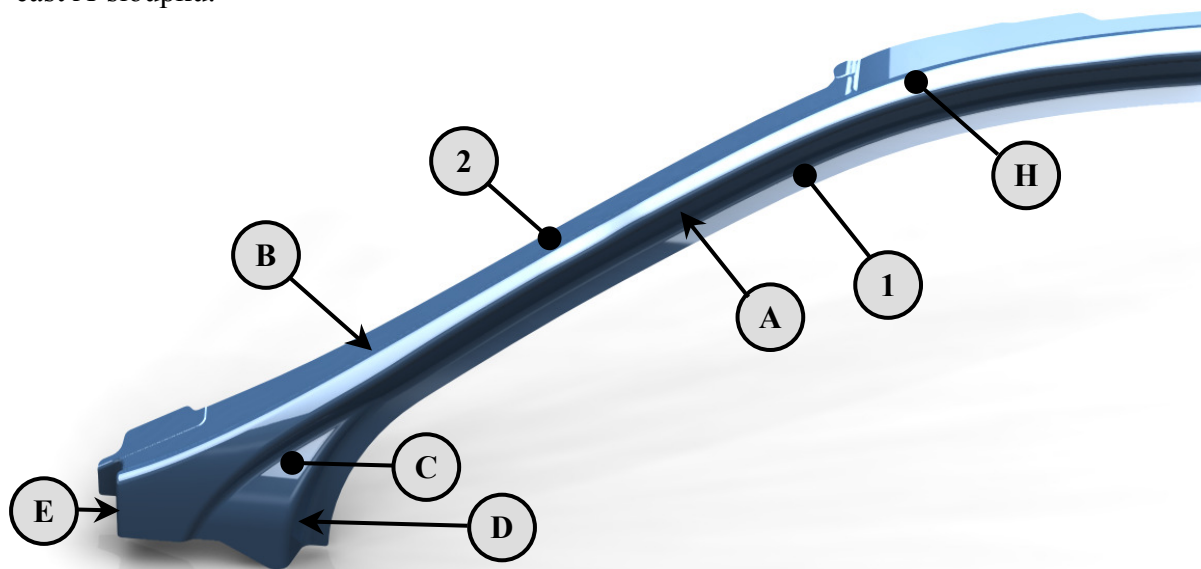


obr. 48: celkové pohledy na A-sloupek a jeho okolí s vyznačenými řezy



obr. 49: řezy A-sloupkem na místech vyznačených na obr. 48 (zleva doprava)

Jak je uvedeno výše, horní část A-sloupku je z geometrického hlediska tvořena několika plochami, které jsou k sobě spojeny radiusy. Pro potřeby této diplomové práce bylo zavedeno následující označení: plocha 1 - dosedací plocha dveří, 2 - dosedací plocha čelního okna, H - horní plocha A-sloupku, A a B - boční plochy, C až E - plochy vyplývající z napojení na dolní část A-sloupku.



obr. 50: označení ploch A-sloupku

4.2.1 Materiálový rozbor

Jako materiál je užito především mikrolegovaných a dvoufázových konstrukčních ocelí válcovaných za studena nebo za tepla. Konkrétní označení ocelí a užití podle dílů je uvedeno v následující tabulce.

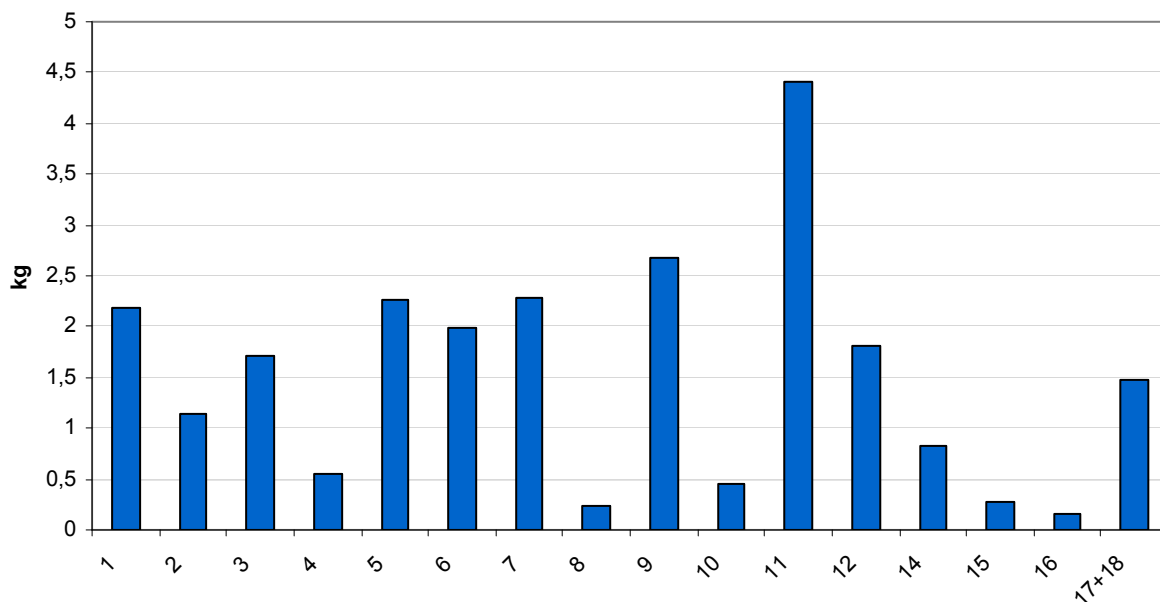
Číslo dílu	Číslo dle EN 10 346	Jakost dle EN 10 346	Válcované za tepla	Mez kluzu Re (Rp 0,2) [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]
1	1.0489	HC300LA		300 - 380	380 - 480
2	1.0489	HC300LA		300 - 380	380 - 480
3	1.0941	HCT600X		340 - 420	600
4	1.0480	HC260LA		260 - 330	350 - 430
5	1.0480	HC260LA		260 - 330	350 - 430
6	1.5528	22MnB5		950	1300
7	1.5528	22MnB5		950	1300
8	1.0338	DC04		≤ 210	270 - 350
9	1.0941	HCT600X		340 - 420	600
10	1.5528	22MnB5		950	1300
11	1.8976	S650MC	✓	650	700 - 880
12	1.5528	22MnB5		950	1300
14	1.0973	S315NC	✓	315	430 - 550
15	1.0973	S315NC	✓	315	430 - 550
16	1.0982	S460MC	✓	460	520 - 670
17	1.0489	HC300LA		300 - 380	380 - 480
18	1.0489	HC300LA		300 - 380	380 - 480

tab. 2: tabulka použitých materiálů

4.2.2 Hmotnostní rozbor

Hmotnostní rozbor pro jednotlivé díly je uveden v grafu na obr. 51. Celková hmotnost celé uvažované sestavy je **24,43 kg**.

Pozn.: Některé díly nejsou v této práci použity celé, ale pouze jejich část - v takovém případě je uvažována pouze hmotnost příslušné části (platí pro díly 4, 8, 14, 15, 17, 18).



obr. 51: grafické znázornění hmotností jednotlivých dílů

4.2.3 Rozbor spojovací technologie

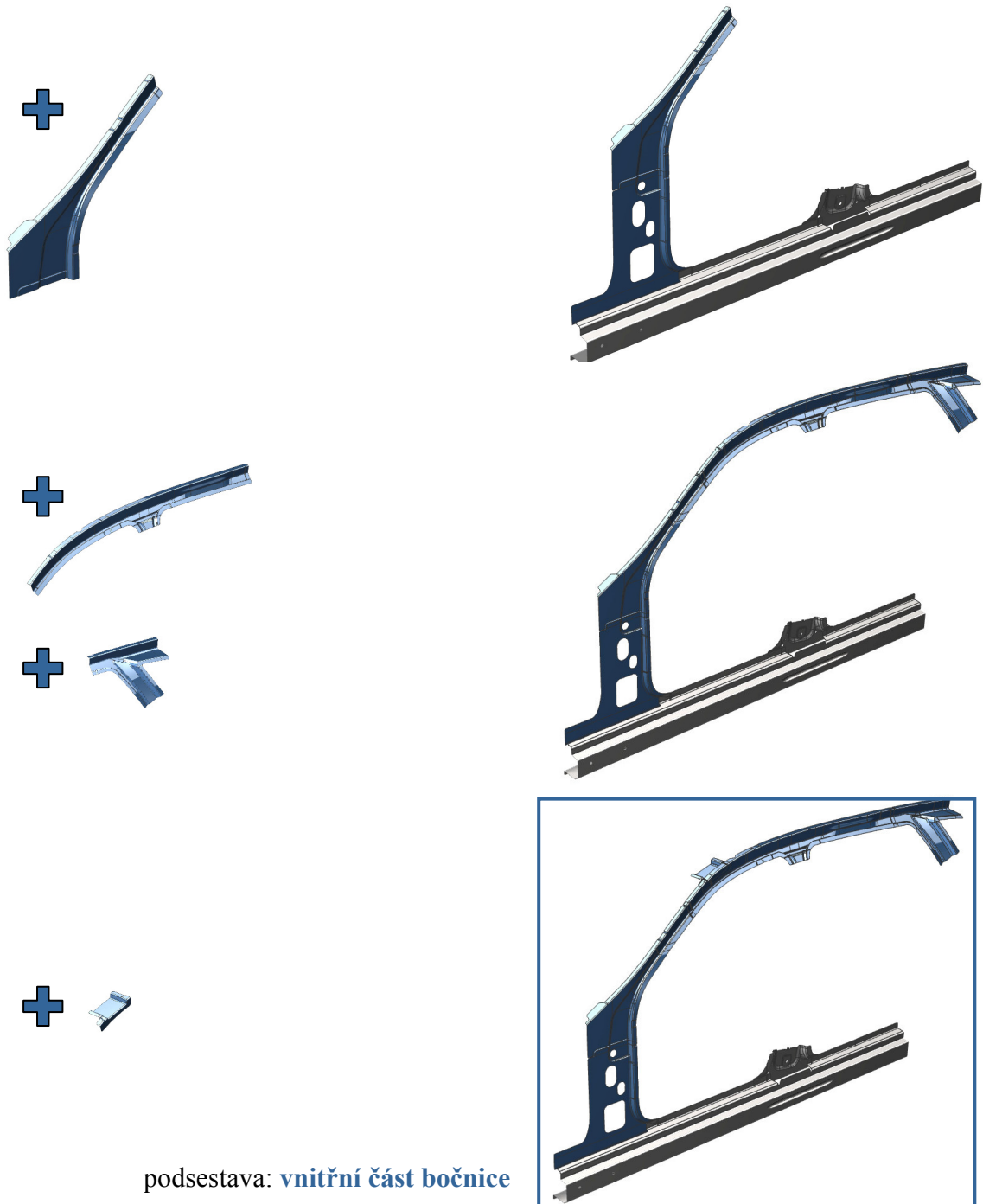
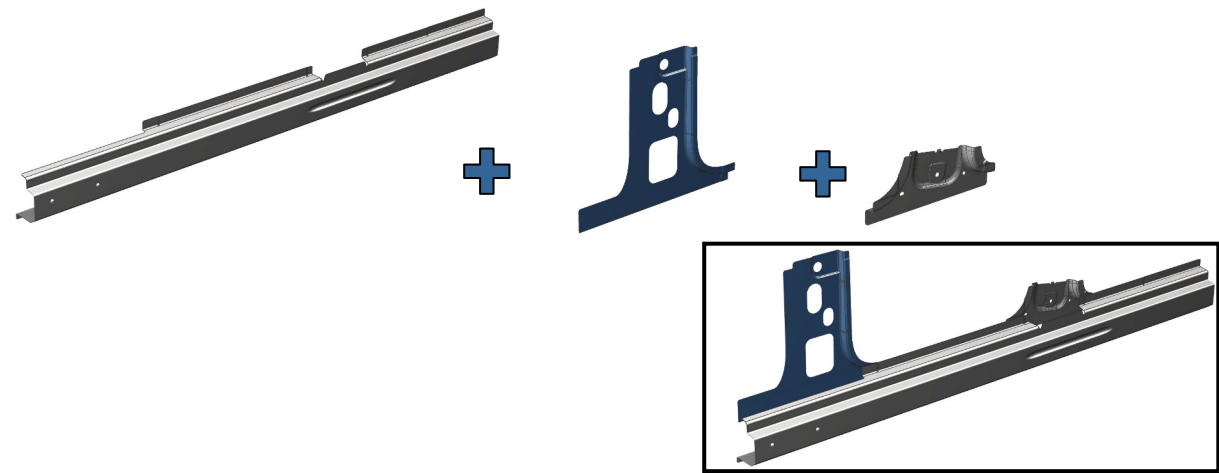
Karoserie je tvořena ocelovými plechy z materiálů, které mají všechny zaručenou svařitelnost. Z jednotlivých plechů jsou svařovány montážní celky, které jsou následně postupně svařeny dohromady.

Celá konstrukce obsahuje 284 bodových svarů o průměru 5 mm.

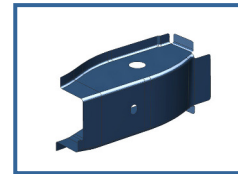
Na následujících stranách je rozebrán výrobní postup. Ten je vhodné zachovat i u nové konstrukce.



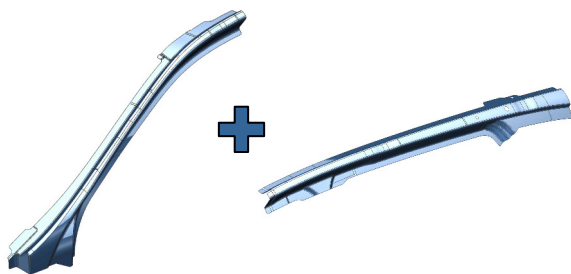
obr. 52: provedení svarů na dosedací ploše dveří v oblasti napojení A-sloupku na spodní část karoserie



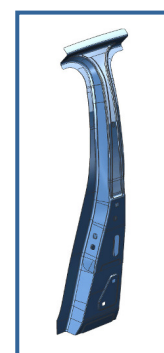
podsestava: **vnitřní část bočnice**



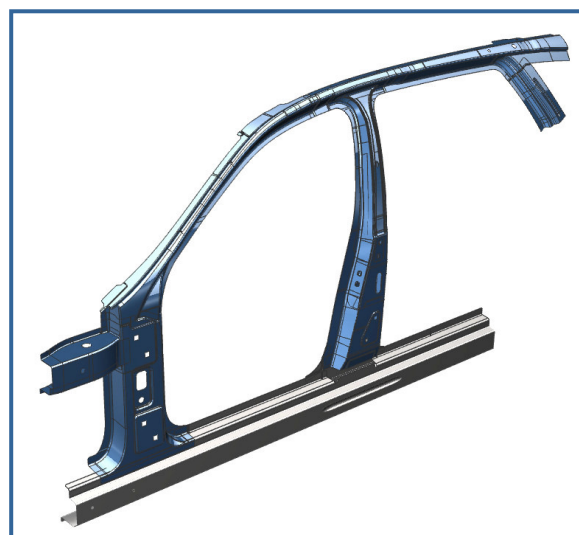
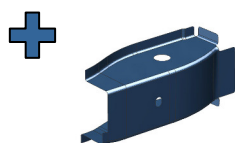
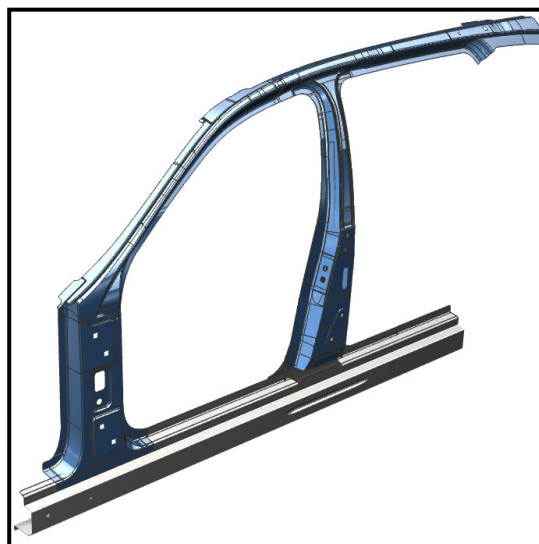
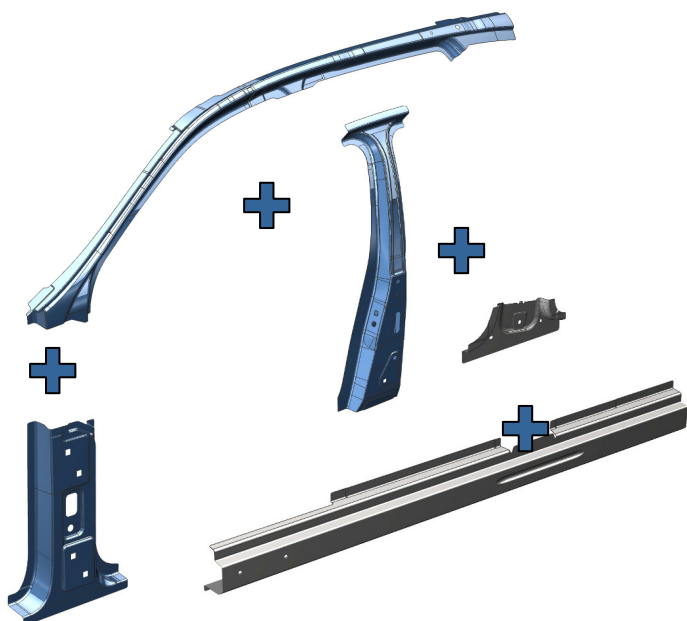
podsestava: **přední
podélný nosník**



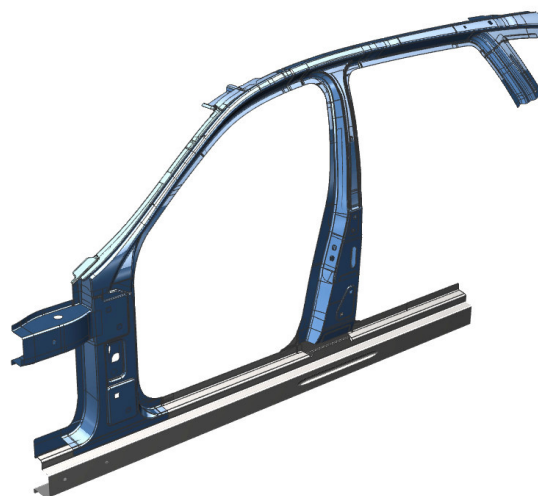
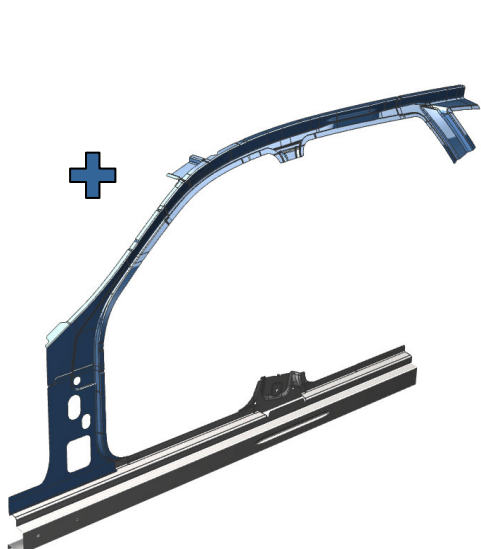
podsestava: **vnější střešní oblouk**

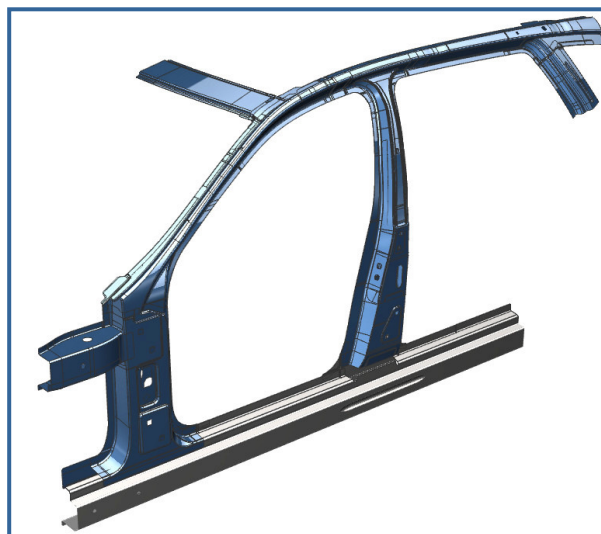
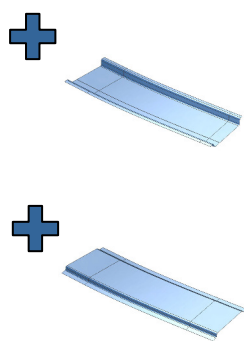


podsestava: **B-sloupek**



podsestava: **vnější část bočnice**





sestava: **hrubá stavba**

4.3 Kritéria hodnocení

Při návrhu nové části nosné konstrukce karoserie je prováděna celá řada analýz a testů. Hlavními kritérii, která je třeba splnit, jsou:

- kritérium **pevnosti** definované zkouškou IIHS "Roof crush"
- kritérium **modálních** vlastností

4.4 Pevnostní kontrola

Pevnostní kontrola je provedena metodou konečných prvků v softwaru NX/Nastran. Úloha je řešena jako nelineární kontaktní s časovou závislostí. Úloha předpokládá velké deformace. Proto byl vybrán pokročilý nelineární řešič Nastran SOL 601. Jedná se o implicitní řešič ADINA, který je implementován v prostředí NX.

4.4.1 Definování sítě pevnostního výpočtu

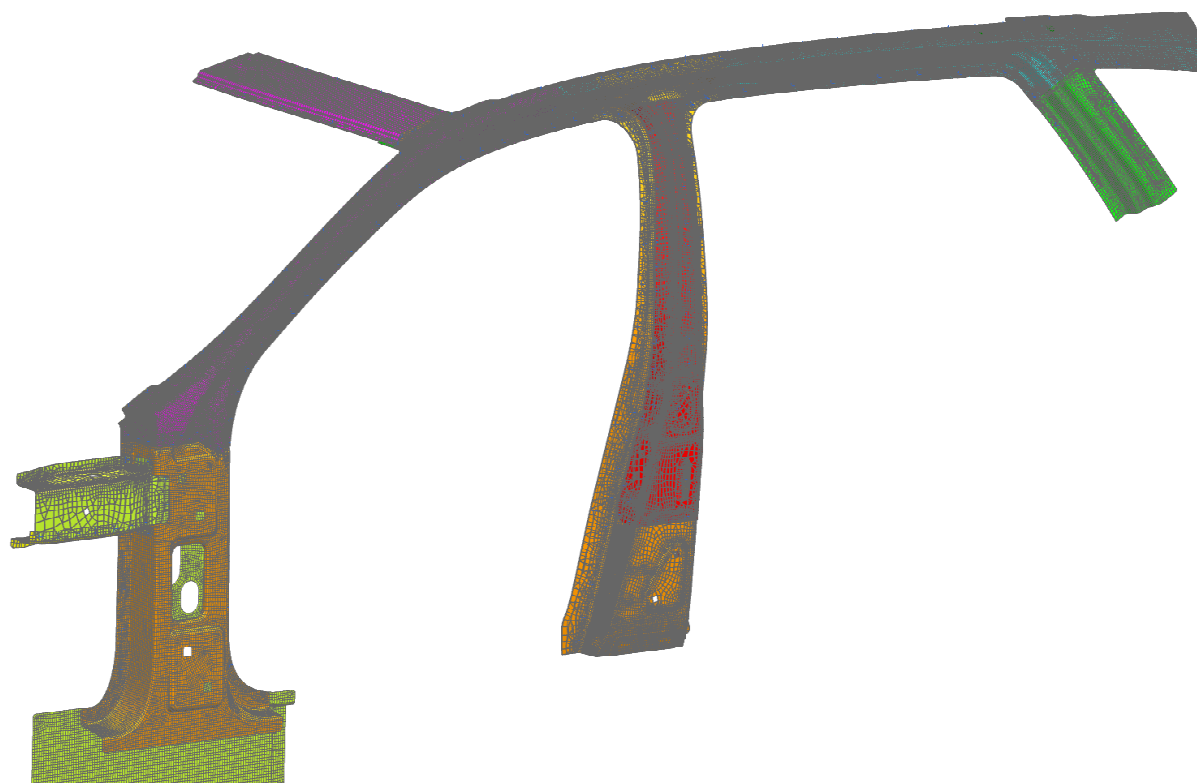
K vytvoření konečněprvkové sítě posloužil preprocesor Nastran, jež je součástí balíku NX. Model je reprezentován 17-ti 2D sítěmi, kdy každý plechový díl má vlastní síť a zároveň i vlastní kompletní nastavení - tzv. kolektor. V každém kolektoru je mimo jiné definována tloušťka sítě a specifikován materiál. Samotná síť je u některých složitějších dílů tvořena několika částmi, které jsou síťovány zvlášť. To je dáno velmi komplikovanými tvary některých plechů.

Z důvodu použití pokročilého nelineárního řešiče SOL 601 je nutné dodržet vysokou kvalitu sítě, zejména rovnoměrnost jednotlivých prvků. Proto bylo užito čtyřúhelníkových prvků a voleno několik různých síťovacích metod dle vhodnosti pro danou část modelu. Síť musela být volena poměrně jemná z důvodu malých rádiusů a drobných prolisů. Velikost prvků je přibližně 2,5 mm v oblasti A-sloupku a navazujícího střešního oblouku. Z důvodu úspory

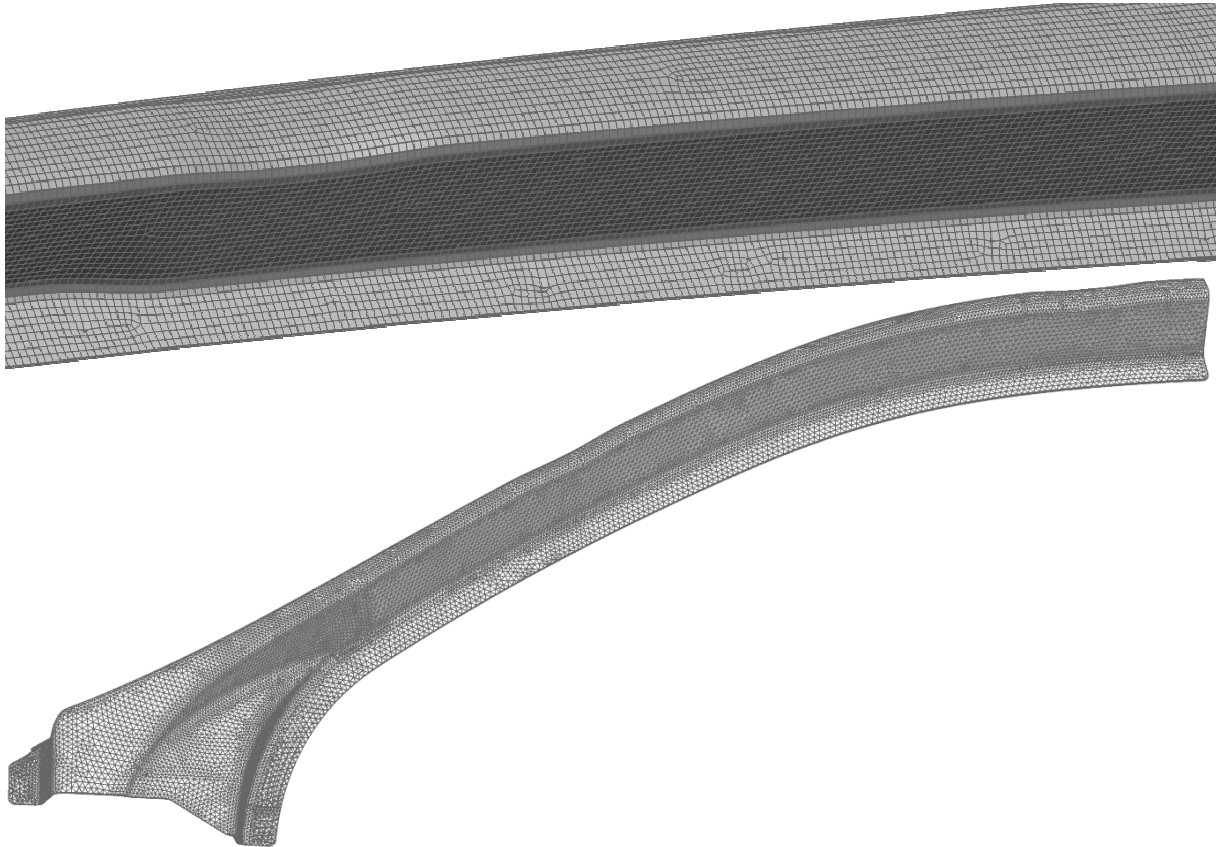
prvků (tedy snížení hardwarové náročnosti) jsou na ostatních částech použity prvky větší, a to až kolem 7 mm. Byly zvoleny prvky CQUAD4 tedy čtyřúhelníkové bez meziuzlů, které jsou pro nelineární řešič nejvhodnější.

Sít' (díl)	počet CQUAD4 prvků	počet CTETRA3 prvků	počet uzlů
1	5.604	653	6.124
2	10.082	1.101	10.838
3	22.180	977	22.097
4	5.411	618	5.853
5	10.702	1.254	11.526
6	17.230	1.420	18.299
7	30.017	1.383	30.879
8	3.186	185	3.377
9	17.006	1.688	18.108
10	2.203	194	2.357
11	18.590	1.250	19.351
12	5.642	562	6.059
14	1.451	170	1.621
15	881	79	982
16	2.305	213	2.489
17	2.415	0	2.509
18	2.311	69	2.432
CELKEM	157.216	11.816	164.901

tab. 3: tabulka počtu prvků v sítích



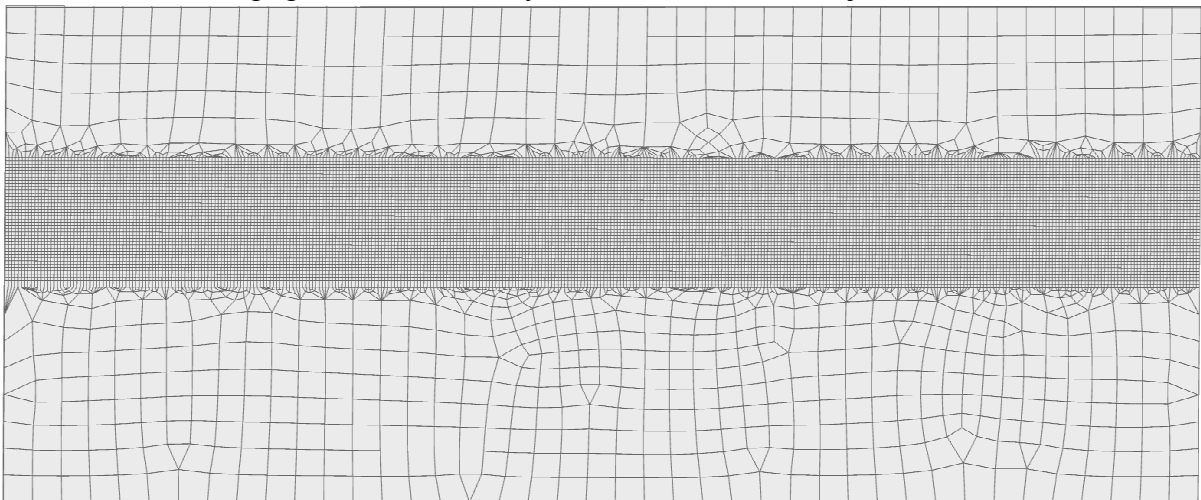
obr. 53: celkový pohled na sít'



obr. 54: pohled na síť A-sloupku a detail sítě

Deska, jež vozidlo stlačuje, byla zasítována taženou prostorovou sítí. Prvky byly zvoleny 8-mi uzlové CHEXA8, tzv. bricky bez meziuzlu. Velikost byla volena s ohledem na stlačovanou část, tedy 2,5 mm. Z důvodu úspory prvků byla kontaktující deska "nastřižena" a sítována na 3 části, které byly následně spojeny funkcí 'Mesh Mating Conditions'. Prvky o velikosti 2,5 mm tak byly užity pouze ve střední části, tedy v části kontaktující, na krajích byly použity prvky výrazně větší. Prvky byly naskládány pouze na tloušťku jedné vrstvy.

Celkem bylo užito 16.871 CHEXA8 a 388 CHEXA6 elementů o celkem 35.856 uzlových bodech. Prvky CHEXA6 (kvádry o trojúhelníkové podstavě) byly použity pouze na krajích k dorovnání přechodu na větší elementy. Takové elementy jsou pro kontaktní výpočet nevhodné. V tomto případě se ale všechny nachází mimo kontaktující část.



obr. 55: pohled na síť stlačovací desky

Svary jsou reprezentovány 1D prvky typu CROD. Jedná se o tažně-tlačný torzní prvek s vlastní hmotností. Pro tento typ prvku je důležité zejména nastavení průřezu.

Plocha:

$$S = \pi r^2 = 19,63 \text{ mm}^2$$

Kvadratický modul v průřezu:

$$J = \frac{1}{2} \pi r^4 = 61,36 \text{ mm}^4$$

Uvedené výsledné hodnoty jsou pro průměr bodových svarů 5 mm.

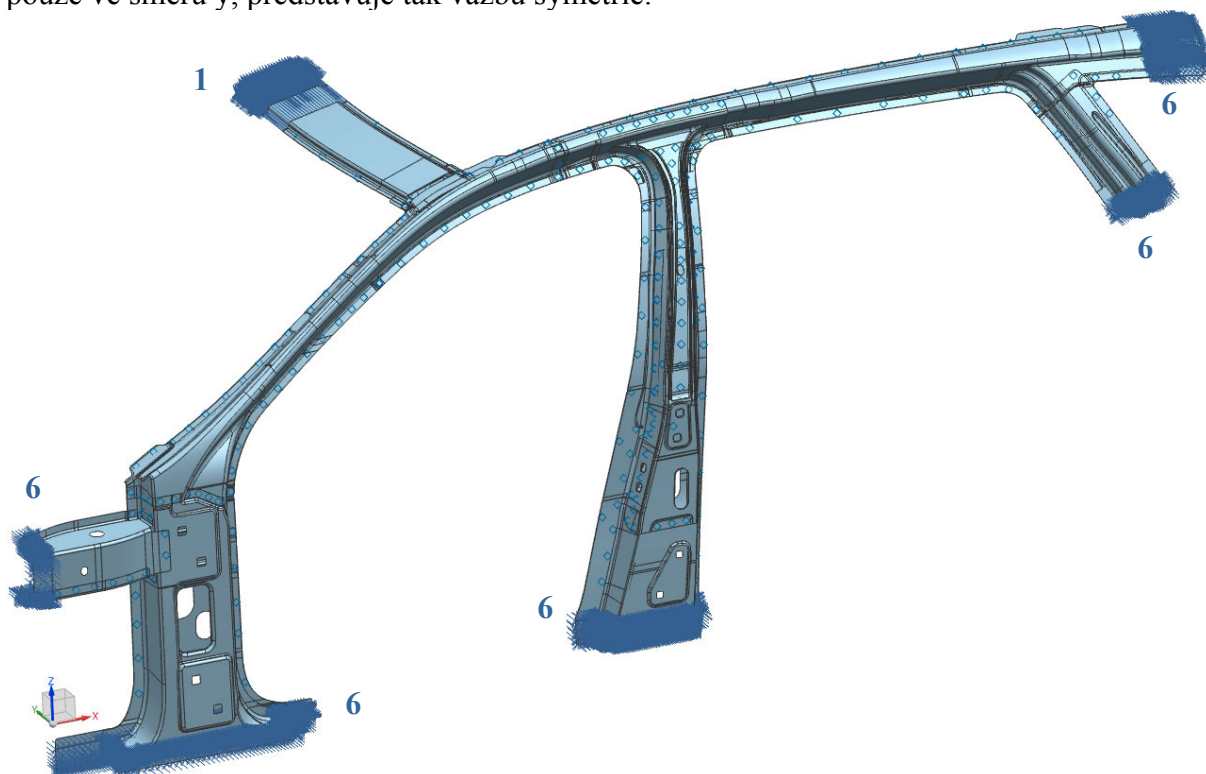
Materiály byly pro jednotlivé díly specifikovány prostřednictvím bilineárního stress-strain diagramu určujícího závislost napětí na poměrné deformaci. Mimo to bylo potřeba zadat dvě ze tří elastických konstant. Byly zadány tyto hodnoty:

- **Modul pružnosti v kluzu:** 210.000 MPa
- **Poissonovo číslo:** 0,29

Třetí hodnota, modul pružnosti ve smyku, je dopočítána automaticky dle závislosti pro izotropní materiál.

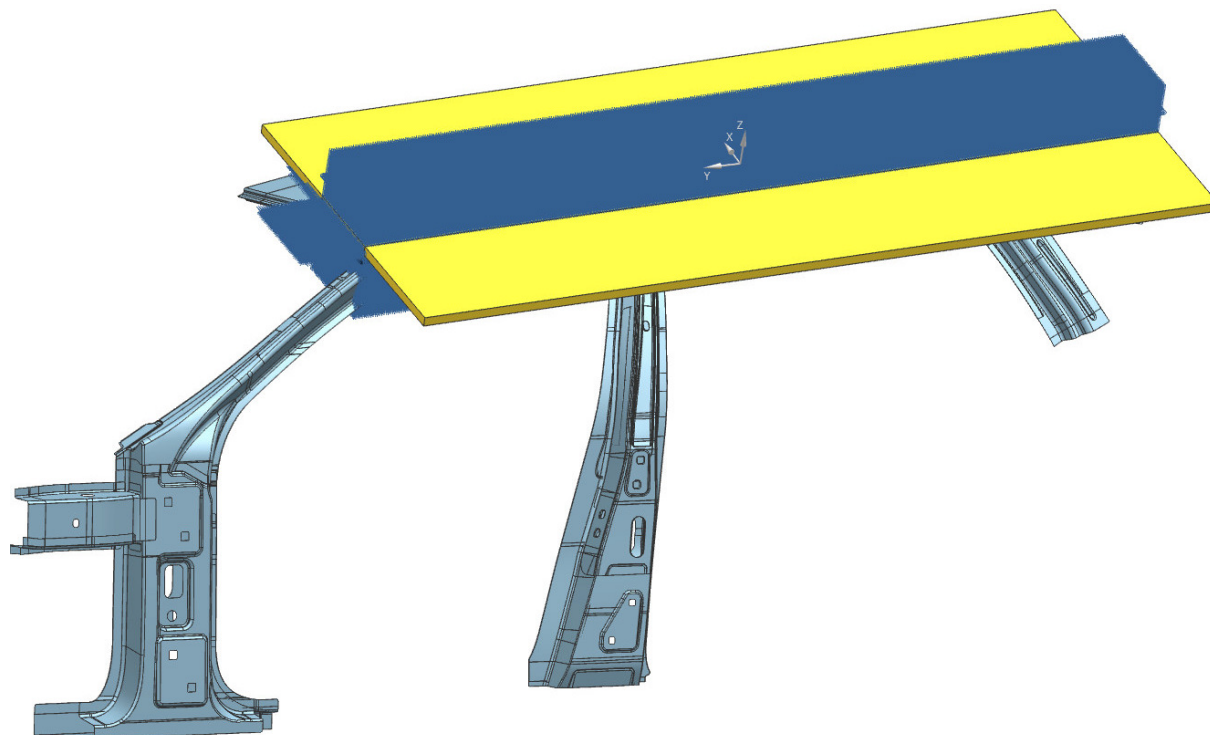
4.4.2 Okrajové podmínky pevnostního výpočtu

Uvažovaná část vozidla je pevně uchycena v pěti místech. V těchto místech je odebráno všech 6 stupňů volnosti. Okrajová podmínka tak supluje zbytek konstrukce, který je považován za dokonale tuhý (podběh a podvozková platforma). Střešní příčník má zabráněný posuv pouze ve směru y, představuje tak vazbu symetrie.



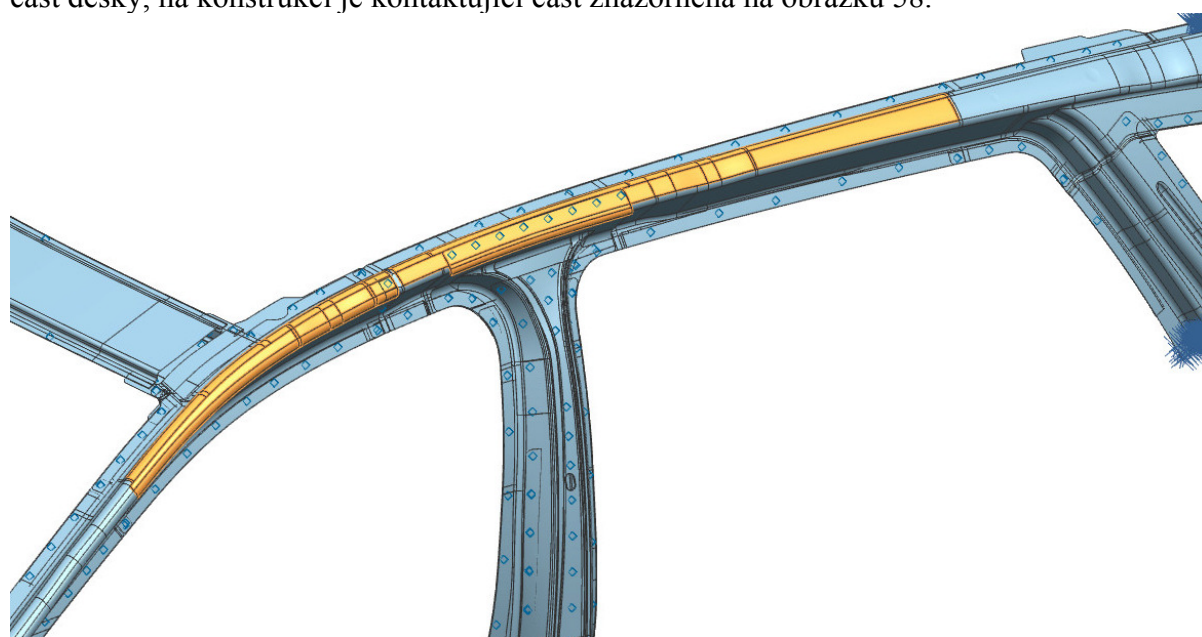
obr. 56: místa s definovanými okrajovými podmínkami (číslo zobrazuje počet odebraných stupňů volnosti v daném místě)

Konstrukce je tedy pevně uchycena. Proti ní vykonává rovnoměrný přímočarý posuv dokonale tuhá deska. Deska se vynuceně posouvá o **-127 mm** ve směru **z**. Jedná se však o pootočený souřadný systém vůči základnímu tak, aby bylo možno snadno definovat tento posuv. Systém je pootočen kolem osy **x** a **y**, a srovnán tak, aby byly všechny jeho osy rovnoběžné s hranami desky (viz. bílý souřadnicový kříž na obr. x). Desce jsou zároveň odebrány všechny ostatní stupně volnosti (kromě směru **z**).



obr. 57: znázornění desky a jejích okrajových podmínek

Pro oblast dotyku je definován kontakt mezi deskou a konstrukcí vozidla. Ten je nastaven jako oboustranný, s proměnlivou normálou kontaktu. Kontaktující plochou na desce je střední část desky, na konstrukci je kontaktující část znázorněna na obrázku 58.

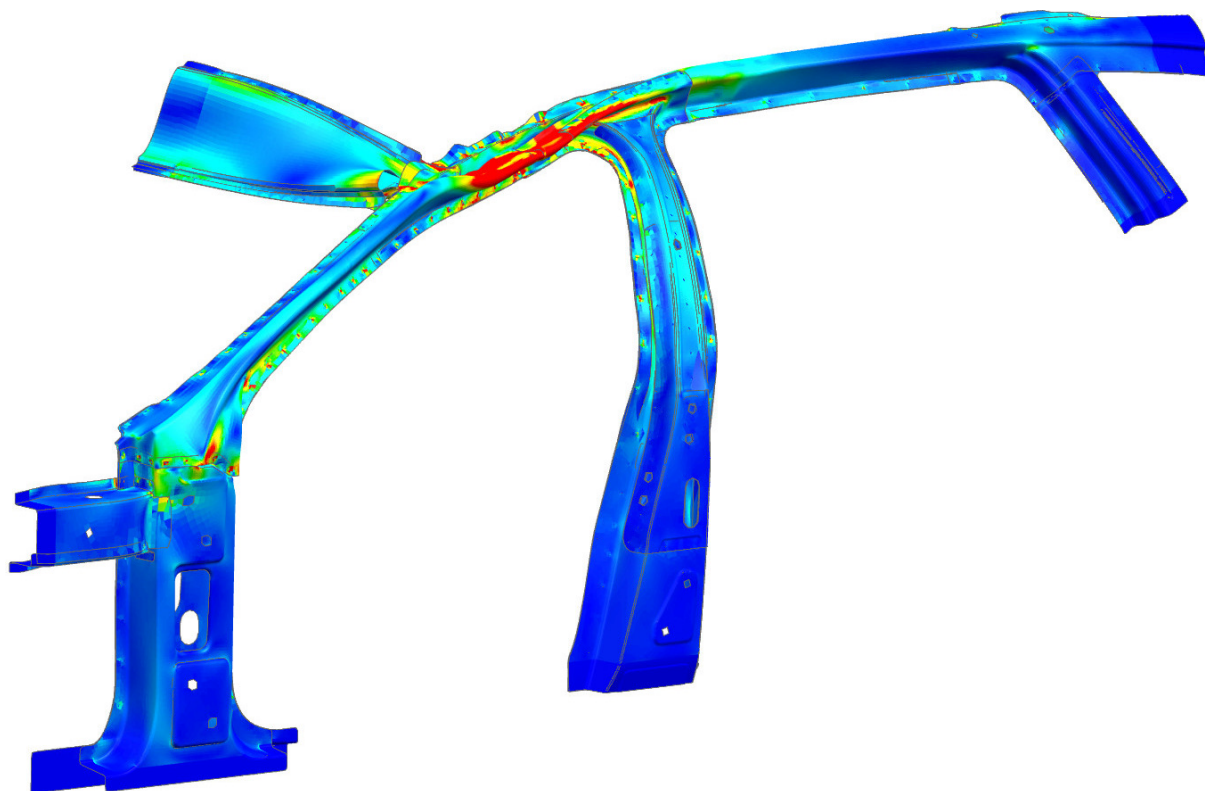


obr. 58: kontaktní plochy

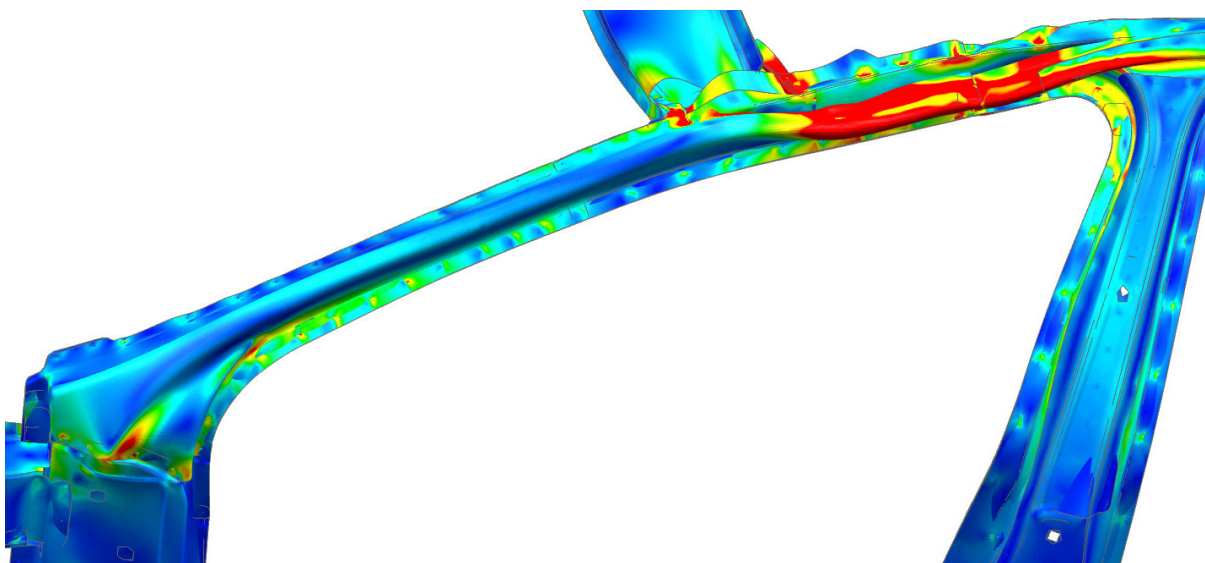
4.4.3 Vyhodnocení výsledků

Vyhodnocován byl posuv, rozložení napětí a především síla v kontaktu v závislosti na posuvu desky. Síla v kontaktu je rovna síle, kterou musí vyvinout posouvající se deska. Sílu posouvající se desky lze chápat jako odpor konstrukce proti stlačení, tedy tuhost karoserie při převrácení vozu. Sílu lze snadno přepočítat na SWR koeficient a získat tak přesně charakteristiku chování konstrukce dle standardu IIHS.

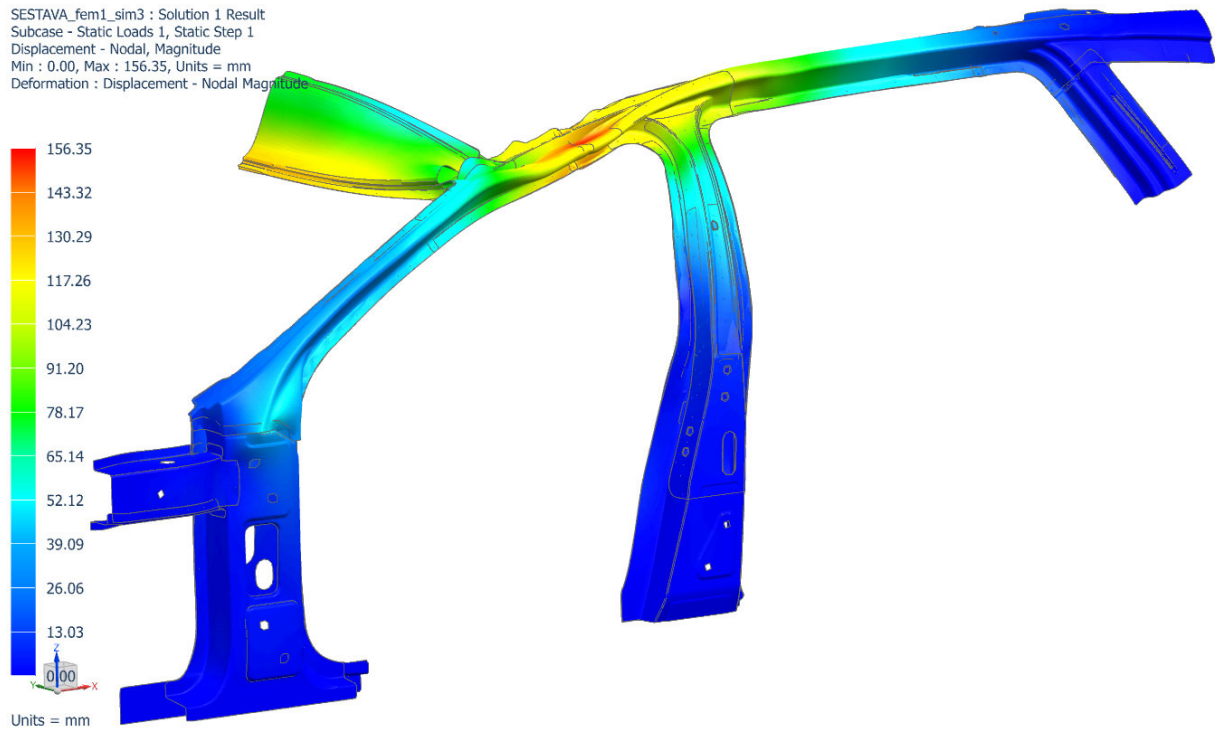
Na následujících obrázcích je zobrazeno rozložení napětí v konstrukci (obr. 59 a 60) a absolutní posunutí (obr. 61).



obr. 59: celkový pohled na konstrukci - napětí dle Von-Mises

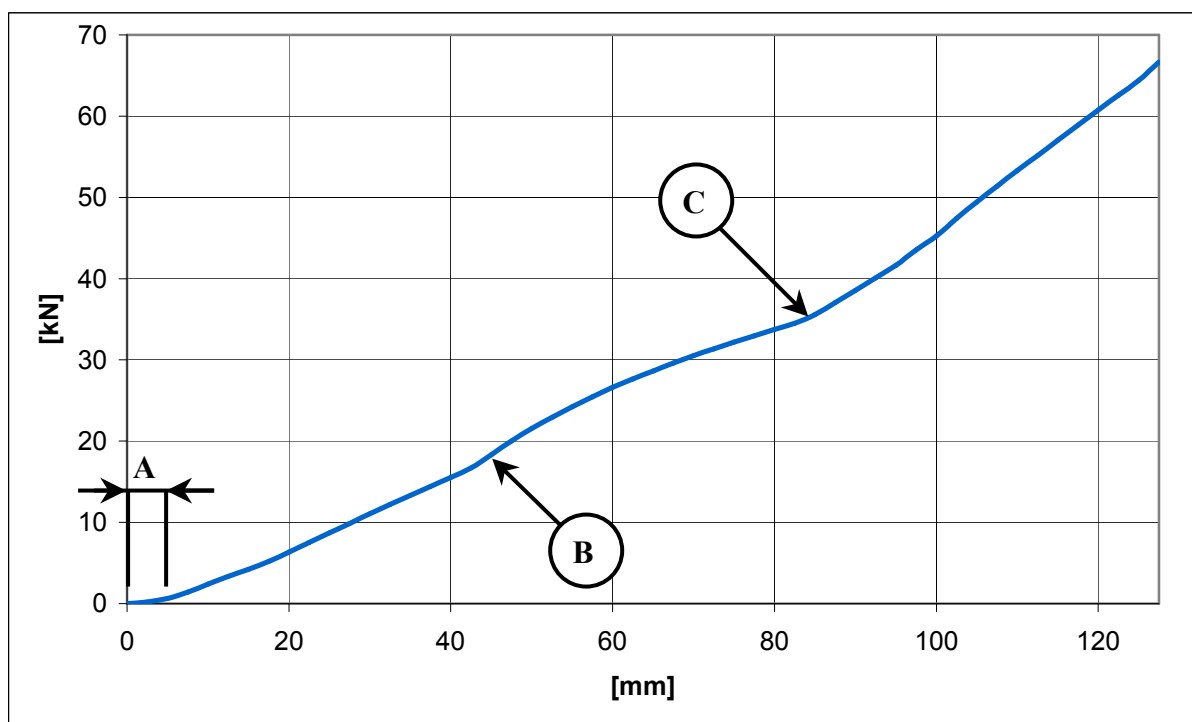


obr. 60: pohled na konstrukci v oblasti A-sloupku - napětí dle Von-Mises



obr. 61: absolutní posunutí v mm

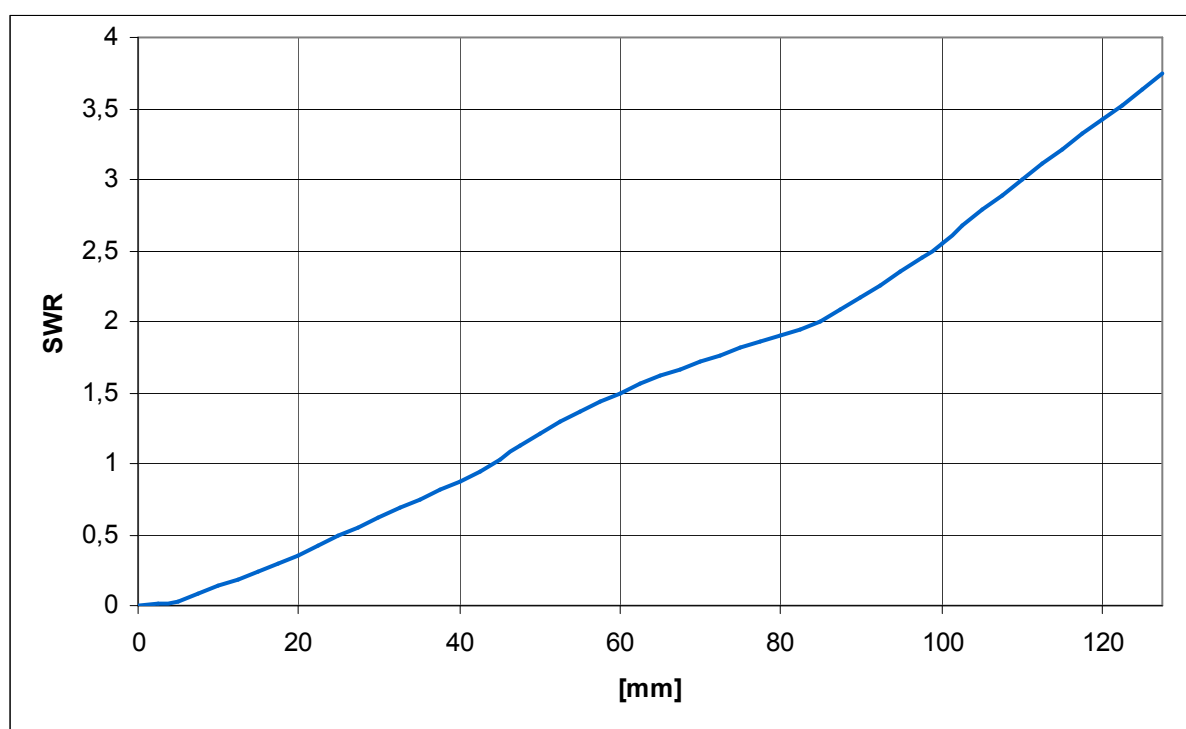
Deska byla posouvána celkem o 127,5 mm. Jeden krok musel být stanoven na pouze 0,25 mm. To je dáno velkými deformacemi materiálu a schopnostmi řešiče SOL 601, který je velmi citlivý na vzájemný průnik kontaktujících elementů. Celkem tedy byla úloha řešena v 510 krocích, přičemž byl ukládán pouze každý 10. krok. I tak soubor s výsledky dosahuje 3 GiB. Bylo tedy získáno 51 hodnot, které byly zaneseny do grafu v závislosti na posunutí desky. Tento graf je na následujícím obrázku.



obr. 62: síla v závislosti na posuvu desky

Na obr. 62. je několik zajímavých míst. Prvním významným místem je prvních přibližně 5 mm. To je oblast náběhu (označena jako **A**), kdy se deska dotkne konstrukce a začíná se dle této desky deformovat - utváří se plocha počátečního kontaktu v nejvyšším místě A-sloupku. Druhý významný bod se nachází kolem 45 mm (**B**). To je posuv, při kterém se již zdeformuje část A-sloupku a deska narazí na velmi tuhý B-sloupek. Tím na chvíli dojde ke zpevnění konstrukce a tedy zvýšení odporu proti deformaci. Následně je B-sloupek ohnut směrem dovnitř vozidla a ztrácí tuhost. Třetím bodem je bod **C**. To je bod, kdy dojde k již takovému prohnutí konstrukce, že posouvající deska již začne působit i na zadní část vozidla a posouvající deska tak musí přemáhat i odpor C-sloupku.

Na grafu níže je již síla přepočtena na násobek hmotnosti vozu (tzv. SWR koeficient) dle metodiky IIHS (viz. kap. 2.1.1). Hmotnost nejtěžšího vozidla je brána dle katalogové hodnoty a pro dané vozidlo je stanovena na **1810 kg**.



obr. 63: koeficient SWR v závislosti na posuvu desky

Výsledná dosažená hodnota **SWR** při posunutí o 127,5 mm je **3,753** pro referenční řešení.

Nedosažení hodnoty $SWR = 4$, tedy splnění kritéria IIHS na nejlepší známku, může být způsobeno chybějícími částmi jako je krycí plech bočnice, plech střechy, zadní příčník střechy či přední příčník. Vliv může mít i okrajová podmínka na střešním příčníku, která má zakázán posuv pouze ve směru y , a v podstatě tak supluje symetrii vozu. Jedná se však o významné zjednodušení situace, neboť úloha není symetrická. Správně by bylo nutné počítat s celým vozidlem, nikoli jeho polovinou. To by však bylo neúměrně časově i hardwarově náročné. Zcela jistě výsledek zkoušky ovlivňují i dveře vozidla, které rovněž nejsou uvažovány. Naopak vliv polstrování interiéru a plastových dílů je zanedbatelný.

4.5 Analýza modálních vlastností

U moderních vozidel je kromě nízké hmotnosti vyžadována také vysoká dynamická tuhost. Ta ovlivňuje přenos a šíření vibrací a hluku, ale také přispívá k lepší ovladatelnosti vozidla.

Cílem bylo provést modální analýzu nosné struktury karoserie. Modální analýza se provádí především pro potřebu nalézt vlastní frekvence a tvary vlastních kmitů zařízení. Ty se nesmějí shodovat s frekvencemi kmitání stroje, resp. kmitáním jeho částí. Cílem je tedy oddělit vlastní frekvence karoserie od vlastních frekvencí náprav a hnacího traktu. Všechny tyto frekvence se obvykle nacházejí pod úrovní 40 Hz. [52] Nejvýraznější jsou patrně vlastní frekvence tlumičů, které obvykle leží okolo 20 Hz. Druhým důvodem je pak základní zhodnocení tuhosti konstrukce a odhalení nejslabších míst.

Pro modální analýzu je důležité mít k dispozici úplná data konstrukce. Bohužel pro řešení této diplomové práce nebyla poskytnuta celá nosná struktura. Je tedy nutné vycházet i v tomto případě z předpokladu, že spodní část vozidla včetně podvozkové platformy je dokonale tuhá. Obdobně nemohou být posouzeny vlastní frekvence na částech automobilu, které nejsou součástí modelu, tj. přední a zadní část. Tyto části ale mohou mít na odezvu celé konstrukce významný vliv. Z tohoto důvodu nalezené vlastní frekvence nemusejí odpovídat skutečnosti, a velmi pravděpodobně nebudou nalezeny všechny. V našem případě je ale hlavním účelem zjistit, zda v chování konstrukce nově navrženého řešení nedošlo k významné změně oproti stávajícímu řešení. To lze posoudit i na takto neúplném modelu. Je však třeba veškeré výsledky chápat pouze v kontextu vzájemného srovnání.

4.5.1 Definování sítě a okrajových podmínek výpočtu mod. vlastností

V tomto případě bylo těženo ze softwarového řešení NX/Nastran, které sdružuje v jednom uceleném balíku nástroje na řešení mnoha rozličných úloh. Mezi ně patří i řešič 'SOL 103 Real Eigenvalues'. Ten slouží k řešení problematiky modálních vlastností. Díky tomuto řešení bylo možné přenést z předchozí úlohy kompletně zasařovaný model včetně definovaných spojů i materiálů.

Okrajové podmínky - uchycení - byly stanoveny stejně jako v předchozí úloze. Žádné další okrajové podmínky k řešení problematiky vlastních frekvencí nejsou vyžadovány.

Výpočet uvažoval podlepení všech spojovaných ploch. Vlastní frekvence byly počítány metodou Lanczos.

4.5.2 Vyhodnocení výsledků

Pro hodnocení je nejvýznamnějších několik prvních vlastních frekvencí.

Byly nalezeny vlastní frekvence:

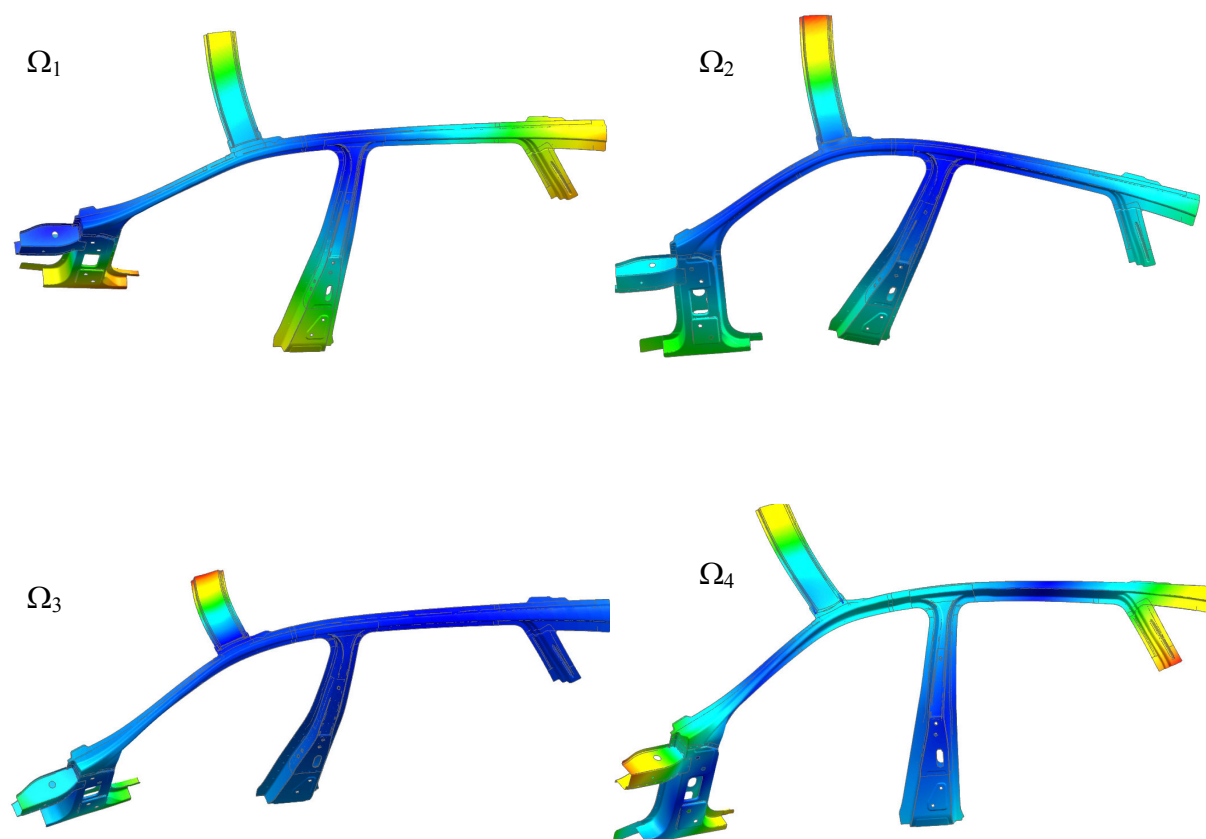
■ $\Omega_1 = 30,68 \text{ Hz}$

■ $\Omega_2 = 60,80 \text{ Hz}$

■ $\Omega_3 = 79,30 \text{ Hz}$

■ $\Omega_4 = 95,44 \text{ Hz}$

Čtyři nejnižší vlastní frekvence mají následující tvar módu (relativní odchylka od původního tvaru, kterou struktura při dané frekvenci zaujímá):



obr. 64: vlastní tvary referenční konstrukce

Z vizualizací je patrné, že konstrukce nemá žádné slabé místo.

5 Návrh nové konstrukce

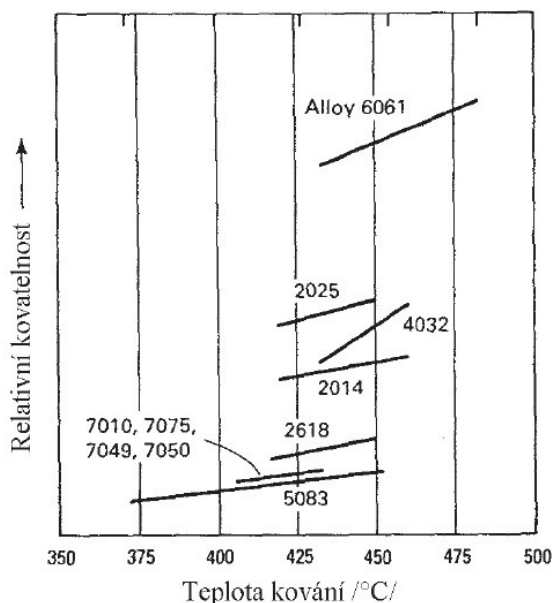
Nová konstrukce bude navržena z hliníkové slitiny vyráběné kováním. Pro spojení ocel-hliník bude nutné využít nýtování. Především z důvodu zabránění koroze bude nezbytně nutné spoj podlepit.

Je požadováno maximální možné dodržení zástavbových poměrů ve vozidle a zachování celkové konstrukce nosné části karoserie vozidla.

Uprostřed profilu A-sloupku je třeba ponechat prostor pro odtokovou trubku na odtok vody ze střechy vozu.

5.1 Definování použitého materiálu

Jako materiál pro nový A-sloupek byla vybrána hliníková slitina **EN AW-6061 T6**. Ta bývá také označována dle chemického složení jako AlMg1SiCu. Jedná se o slitinu ze skupiny slitin pro tváření, legované především hořčíkem a křemíkem (řada 6000). Tyto slitiny jsou velmi dobře tepelně zpracovatelné díky přítomnosti intermetalické fáze Mg_2Si . Materiál byl vybrán právě zejména z důvodu velmi dobrých tvářecích schopností. T6 označuje stav teplem vytvrditelné slitiny po rozpouštěcím žihání a umělém stárnutí.



obr. 65: graf relativní kovatelnosti v závislosti na teplotě pro různé hliníkové slitiny [53]

Vstupním materiálem mohou být plechy, pláty v různých tloušťkách, či kruhové tyče obvykle do průměru 50 mm.



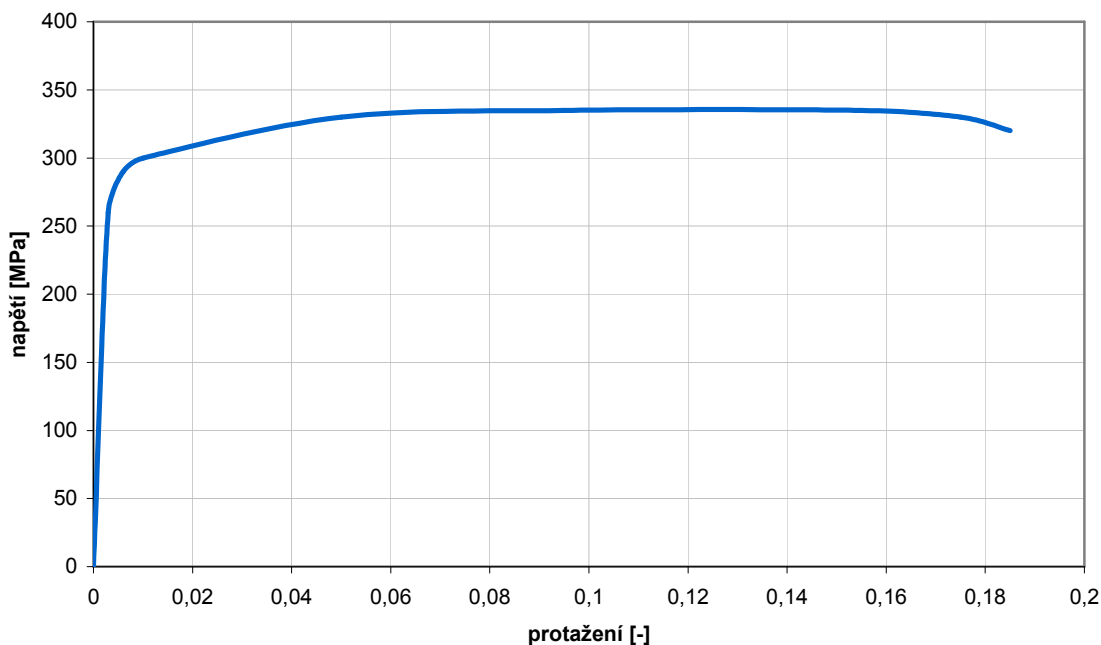
obr. 66: napaletovaný materiál EN AW-6061 připravený ke zpracování [54]

Základní vlastnosti zvoleného materiálu jsou uvedeny v následující tabulce.

Materiálová vlastnost		Hodnota
Fyzikální	Hustota [kg/m ³]	2.700
	Modul pružnosti v tahu [GPa]	68,9
	Tepelná vodivost [W/mK]	167
	Koef. tepelné roztažnosti [μm/m.K]	23,6
	Teplota tání [°C]	582 - 652
Mechanické	Mez kluzu [MPa]	270
	Pevnost v tahu [MPa]	310
	Poissonova konstanta	0,33
	Tažnost [%]	6 - 17
	Tvrdoost dle Brinella [HB]	95
Technologické	Obrobitelnost	špatná
	Svařitelnost	výborná
	Odolnost proti korozi	dobrá
	Pájitelnost	výborná
	Vhodnost k eloxování	výborná
Chemické	Al [%]	95,9 - 98,6
	Mg [%]	0,8 - 1,2
	Si [%]	0,4 - 0,8
	Fe [%]	0 - 0,7
	Cu [%]	0,15 - 0,4
	Cr [%]	0,04 - 0,35
	Zn [%]	0 - 0,25
	Mn [%]	0 - 0,15
	Ti [%]	0 - 0,15
Ostatní [%]	0 - 0,15	

tab. 4: vlastnosti hliníkové slitiny EN AW-6061 T6 [55] [56] [57] [58]

Pro účely návrhu nové konstrukce A-sloupku jsou velmi důležité především mechanické vlastnosti. Obzvláště pak hodnoty meze kluzu, resp. pevnosti. Zde je vhodné podotknout, že se výše uvedené hodnoty pro daný materiál liší v závislosti na zdroji až o 20 MPa. Zadavatelskou firmou byla poskytnuta přímo křivka tahového diagramu materiálu, který bude použit. Materiálové hodnoty byly zjištěné z tahové zkoušky experimentálně.



obr. 67: tahová zkouška použité hliníkové slitiny

5.2 Obecné předpoklady nového konstrukčního řešení

Z výše popsaných důvodů nutně musí dojít ke změně profilu A-sloupku. Ta je vyvolána změnami technologickými nároky z následujících hledisek:

- náhrada bodového svařování **nýtováním**
- změna výroby z lisování za tepla na **kování** dílu tzv. přesným kováním

Spojením oceli a hliníku, jakožto dvou rozdílně vodivých kovových materiálů vzniká korozní článok - elektrochemická koroze. Aby bylo zabráněno nežádoucímu vzniku koroze musí být spoje **podlepeny**.

Lepidla jsou v konstrukci karosérii dnes běžně používána. Kromě zabránění koroze jsou dalšími důvody útlum vibrací a hluku, zajištění těsnosti a zlepšení chování konstrukce při nárazu.

Optimální tloušťka nanášené vrstvy záleží na konkrétním druhu lepidla a povrchu. Obvykle se jedná o 0,1 - 0,15 mm.

Na konstrukce nosných struktur karosérii jsou používány epoxidové pryskyřice. Rozhodující je zde pevnost, tuhost a chování při nárazu. Vhodným lepidlem pro tuto aplikaci je např. konstrukční epoxidové lepidlo BETAMATE 1496F zajišťující kromě výborných mechanických vlastností také vynikající odolnost proti vlhkosti a korozi.

5.2.1 Technologická omezení vyplývající z nýtování

Jako nejvhodnější technologie pro nýtové spojování bylo vybráno nýtování tzv. "samořeznými nýty". Pro tuto technologii je třeba zajistit:

- min. 19 mm širokou spojovací plochu, pro hliníkové díly silnější než 4 mm platí min. 21 mm (platí pro nýty \varnothing 5 mm)
- tloušťka vrchního spojovaného materiálu 1 - 3 mm
- tloušťka spodního spojovaného materiálu 1 - 5 mm
- nýtování by mělo probíhat skrz slabší plech do silnějšího
- min. roztečná vzdálenost nýtů 30 mm

Mez pevnosti nýtů je 420 MPa, přesahuje tedy mez pevnosti obou spojovaných materiálů.



obr. 68: spojení ocelového a hliníkového plechu samořezným nýtem v řezu [59]

5.2.2 Technologická omezení vyplývající z kování

Pro kování výše specifikované slitiny je z technologického hlediska třeba dodržet minimální rádius. Ten je dán především způsobem kování. Zápustkovým kováním je možné zhotovit takovéto díly s rádiusem min 8 mm. Pro tento díl je navrhováno užít technologie tzv. přesného kování, které umožňuje dosahovat min. rádiusu až 2 mm. Vzhledem ke složitosti dílu této aplikace je ale doporučováno 6 mm.

5.3 Varianty

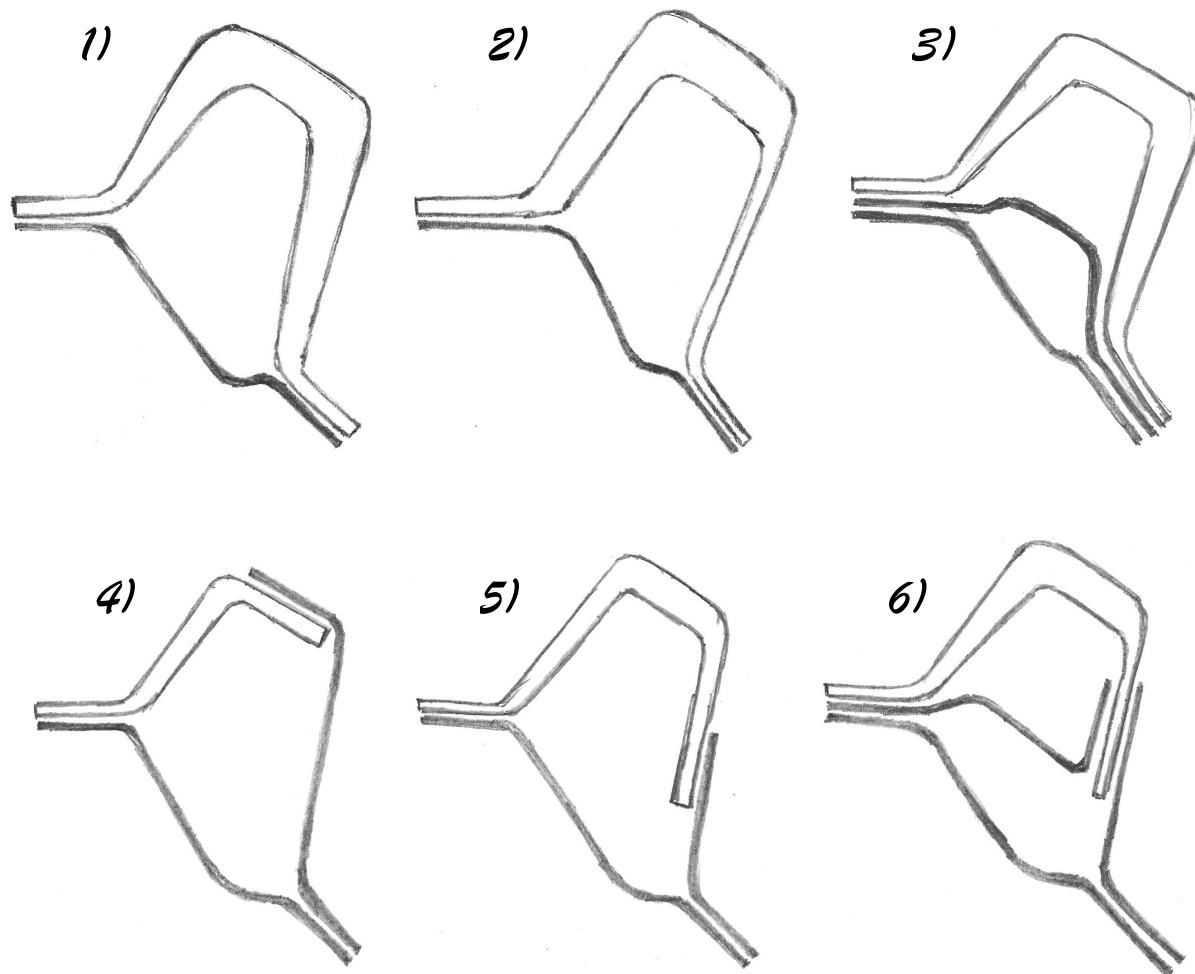
Nová konstrukce byla navržena v několika variantních řešeních, které byly následně posouzeny z různých hledisek a vzájemně srovnány.

Z kovaného hliníku byl navržen pouze vnější díl A-sloupku (díln č. 6). Tento původní díl má oproti vnitřnímu (díln č. 2) dvojnásobnou hmotnost. Vnitřní díl je méně zatížen a k výrobě kování není příliš vhodný. Je naopak žádoucí zpevnění A-sloupku ocelovým plechem, který díky nižší tažnosti zvýší tuhost konstrukce a především zabrání nežádoucímu rozevírání vnějšího hliníkového dílu. Dále je nutné brát v úvahu celkovou tloušťku spoje a jeho provedení. Je třeba nezapomínat na to, že na vnějším dílu se navíc nachází bočnice. Jedná se tedy o spoj tří dílů. Použití hliníku i na vnitřní díl by znamenalo další nárůst tloušťky spoje. V případě užití hliníku pouze na vnější část zůstane hliníkový díl uvnitř spoje celkem tří dílů, což je z pevnostního a tuhostního hlediska i chování při velkých deformacích výhodné.

5.3.1 Návrh variant

Nově navrhované varianty jsou limitovány zástavbovým prostorem ve stávajícím vozidle s přihlédnutím k omezení popsáných v kapitole 5.2.

Byly navrženy varianty uvedené na následujících obrázcích:



obr. 69: navrhované varianty (ocelové plechy kresleny tlustou čarou, hliníkový výkovek znázorněn jako profil)

5.3.2 Předvýběr vhodných variant

Celkem bylo navrženo 6 variantních řešení. Jednotlivé varianty byly označeny čísly 1 - 6 a písmenem A značící prvotní verzi.

Je třeba provést základní rozbor variant, zda jsou vůbec za přijatelných nákladů výrobitelné, abychom následně mohli přistoupit k pevnostnímu srovnání. Tlak na cenu je v automobilovém průmyslu obrovský. Platí zde metoda target costing, tedy že je trhem dána konkurenceschopná cena produktu, kterou je nutné dodržet. Vzhledem k zachování podílu zisku pak musí být i náklady na výrobu ideálně shodné či nižší. V tomto případě však lze očekávat navýšení nákladů. Ty ale musí být vyváženy vyšší užitnou hodnotou produktu. Dále, s ohledem na to, že hlavním účelem celé této práce je dosažení hmotnostních úspor, můžeme rovněž již v této fázi vyřadit varianty, které jsou příliš těžké.

Varianta 1A

Varianta 1 vychází z předpokladu, že nejvíce namáhanou částí je horní část. Tam dosahuje výkovek největší tloušťky, na bočních plochách (A a B) je plynulý přechod na 2 mm tloušťku k dosedací části.

Varianta je levně vyrobiteľná a spojitelná. Vhodná pro srovnání.

Varianta 2A

Varianta 2 vychází z obdobného předpokladu jako varianta 1 s tím, že předpokládá větší (konstantní) tloušťku na ploše B a naopak úsporu hmotnosti na ploše A, která by měla být zatížena nejméně.

Varianta je levně vyrobiteľná a spojitelná. Vhodná pro srovnání.

Varianta 3A

Varianta 3 je obdobou varianty 1. Idea je zabránit "rozevírání" výkovku ještě dalším ocelovým plechem, který výrazně zvýší tuhost a umožní uspořít hmotnost na hliníkovém výkovku.

Po provedení podrobnější analýzy byla výsledná hmotnost tohoto dílu výrazně vyšší než u varianty 1, dokonce i než u referenčního řešení. Tenký ocelový plech výrazně převýšil hmotnostní úsporu hliníku. Z tohoto důvodu tato varianta do srovnání zařazena nebude. Lze však předpokládat, že tímto způsobem lze výrazněji navýšit tuhost (i pevnost) A-sloupku za cenu přijatelného zvýšení hmotnosti (např. pro jiné, více namáhané, karosářské varianty vozidla).

Varianta 4A

Varianta 4 kombinuje výkovek s ocelovým plechem. V nejméně zatížené části se tak nachází jak ocelový tak hliníkový profil. Opačná situace - tedy hliník na ploše A a ocel na ploše B by byla velmi obtížně vyrobiteľná ve spodní, uzavírající se, části A-sloupku.

Tato varianta je nepoužitelná z důvodu nedostatečného prostoru na horní ploše pro spoj. Díly by nebylo možné spojit. Hmotnost by navíc byla vysoká.

Varianta 5A

Tato varianta řeší problém varianty 4. Spoj se přesouvá na plochu A. Zároveň se tím sníží hmotnost.

Naproti pozitivům této varianty oproti variantě 4 zde navíc ale vyvstává problém se slícováním na dolní části A-sloupku, což povede ke zvýšení nákladů. Varianta je však vhodná ke srovnání.

Varianta 6A

Varianta 6 kumuluje hmotnost obdobně jako varianta 2. Celý profil je navíc zpevněn ocelovým plechem obdobně jako u varianty 3. Narozdíl od ní však není hliníkový profil tažen až do dosedací plochy, což přinese snížení hmotnosti a možnost užití svařování na spodní dosedací ploše.

Zásadním problémem této varianty je spojení na ploše A. Zde je nutné využít FDS šrouby (Flow Drill Screw). Jedná se o šrouby s tavným tvarováním závitu. Tento druh spoje je však technologicky náročný, prostorově náročný a především výrazně více nákladný ve srovnání s nýtováním.

Morfologická matice technickoekonomického provedení

Vlastnost	Účinky a organizační struktury						
	1A	2A	3A	4A	5A	6A	Ideální
Počet dílů	2	2	3	3	3	4	2
Počet spoj. operací	2	2	2	3	3	3	2
Způsob spojování	nýtování	nýtování	nýtování	nýt. * + svař.	nýtování + svař.	nýt. + sv. + FDS	svařování
Náročnost kování	střední	střední	střední	nízká	nižší	nižší	nízká
Náročnost na slícování	nízká	nízká	nižší	střední	vyšší	vysoká	nízká
Přístupnost spojů	vynikající	vynikající	vynikající	dobrá	dobrá	dobrá**	vynikající
* velmi málo místa pro spoj							
** s využitím technologie FDS							

tab. 5: morfologická matice

Vlastnost	Účinky a organizační struktury						
	1A	2A	3A	4A	5A	6A	Váha
Počet dílů	5 x 3 = 15	5 x 3 = 15	3 x 3 = 9	3 x 3 = 9	3 x 3 = 9	1 x 3 = 3	3
Počet spoj. operací	5 x 3 = 15	5 x 3 = 15	5 x 3 = 15	3 x 3 = 9	3 x 3 = 9	3 x 3 = 9	3
Způsob spojování	4 x 2 = 8	4 x 2 = 8	4 x 2 = 8	1 x 2 = 2	4 x 2 = 8	1 x 2 = 2	2
Náročnost kování	3 x 1 = 3	3 x 1 = 3	3 x 1 = 3	5 x 1 = 5	4 x 1 = 4	4 x 1 = 4	1
Náročnost na slícování	5 x 1 = 5	5 x 1 = 5	4 x 1 = 4	3 x 1 = 3	2 x 1 = 2	1 x 1 = 1	1
Přístupnost spojů	5 x 1 = 5	5 x 1 = 5	5 x 1 = 5	3 x 1 = 3	3 x 1 = 3	3 x 1 = 3	1
CELKEM	51	51	48	31	35	22	max. 55

tab. 6: hodnocení dle morfologické matice

Na základě hodnocení vyplývajícího z hodnocení jednotlivých variant podle kritérií morfologické matice lze doporučit k další analýze varianty 1A, 2A, 3A a případně i 5A, avšak zde je již nutné počítat s vyššími výrobními náklady oproti předchozím variantám.

Výsledné hodnocení předvýběru variant:

Varianta 1A ✓

Varianta 2A ✓

Varianta 3A ✗ - neprošla hmotnostními kritérii

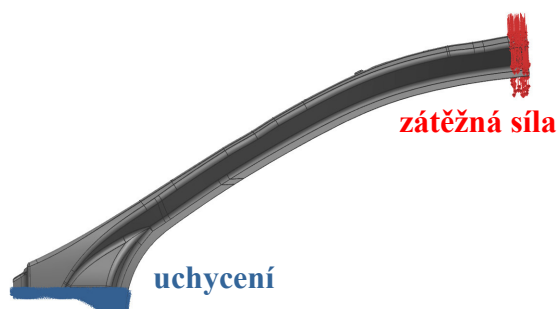
Varianta 4A ✗ - neprošla vzájemným hodnocením variant

Varianta 5A ✓

Varianta 6A ✗ - neprošla vzájemným hodnocením variant

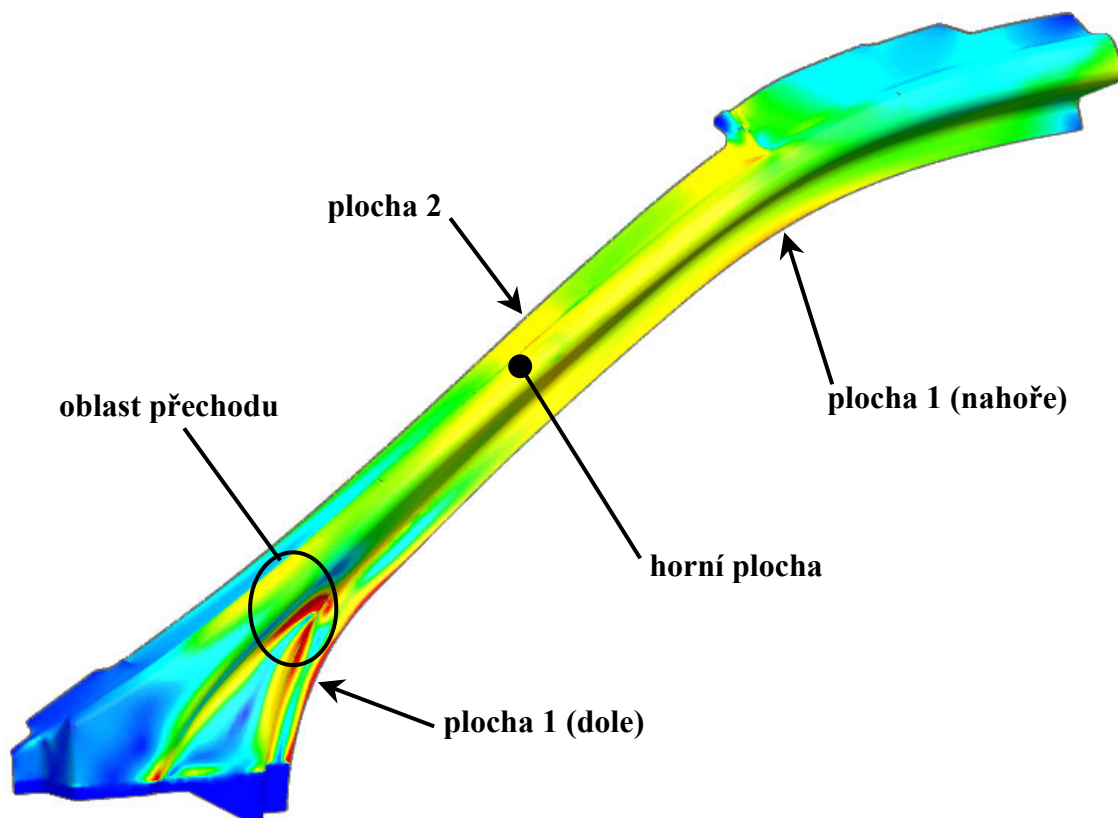
5.3.3 Pevnostní výpočty variant

Pro účel vzájemného porovnání variant byl zvolen zjednodušený výpočet. Důvodem je vysoká náročnost na přípravu celé sestavy pro nelineární řešič Nastran SOL 601 a značná hardwarová náročnost. Zjednodušené zatěžování probíhalo pouze na dílu č. 6 (vlastní A-sloupek), neboť ostatní díly jsou pro všechny varianty velmi podobné. Řešení probíhalo v lineárním řešiči Nastran SOL 101. A-sloupek byl na dolní straně (v oblasti svarů s dílem 5) pevně uchycen a na opačném konci zatížen silou. Její vektor byl definován ve směru ohybu dle nelineárního výpočtu (kap. 4.4). Z důvodu změny zatížení musí být proveden i výpočet pro referenční variantu.



obr. 70: okrajové podmínky

Výsledné napětí bylo hodnoceno na několika kritických místech. Tato kritická místa s nejvyšším lokálním napětím byla na všech 4 variantách přibližně shodně umístěná. Menších odlišností bylo dosaženo pouze u varianty 5A. Místa s největší lokální koncentrací napětí zobrazuje následující obrázek:



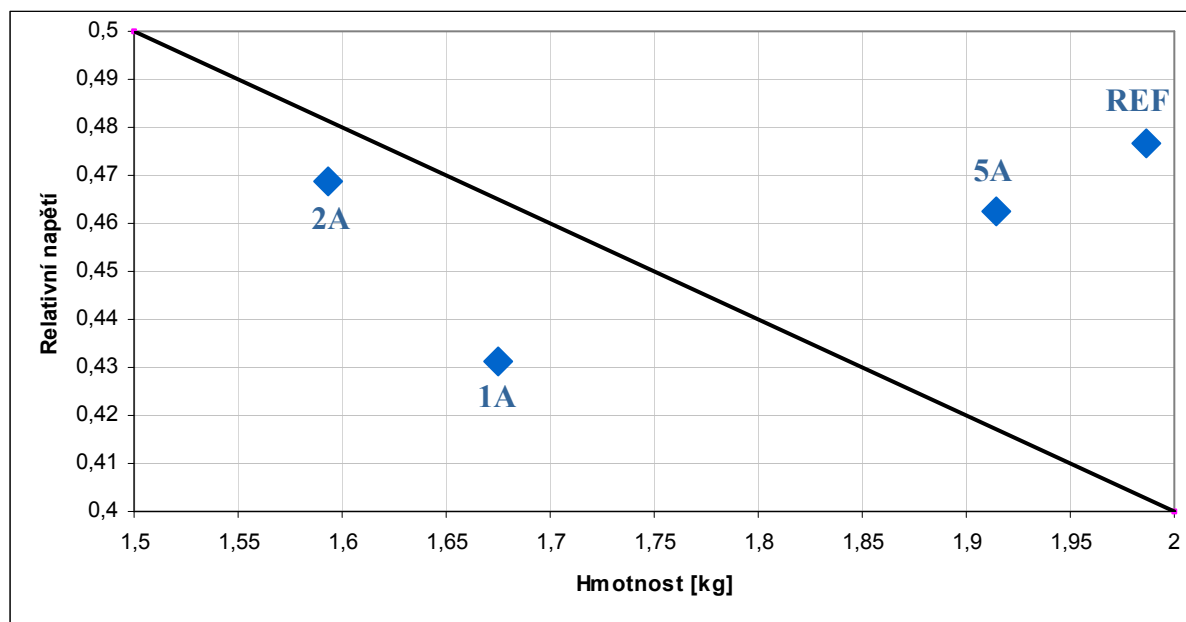
obr. 71: výsledné řešení - průměrné napětí dle Von-Mise

Cílem tohoto porovnání je vybrat nejlepší variantu na základě jejich vzájemného porovnání. Průřezy (tloušťky) všech variant byly upraveny tak, aby se výsledná pevnost přibližně shodovala s referenčním řešením, resp. aby jej mírně překonávala. Lze pak posuzovat hmotnost jednotlivých variant. Jelikož však pevnost všech variant není přesně shodná, nevystačíme si s jednoduchým porovnáním, ale je třeba porovnat výsledky v dvourozměrném grafu typu napětí - hmotnost. Nelze však porovnávat přímo výsledná napětí, neboť se jedná o různé materiály. Je tak třeba přepočíst získané zatížení k mezi kluzu daného materiálu. Jelikož jsou obě hodnoty v MPa, získáme bezrozměrnou veličinu relativního napětí. Tyto dvě veličiny jsou zaneseny do grafu na obr. 72. Je zřejmé, že hmotnost i relativní napětí by měly být co nejnižší.

Varianta	Napětí [MPa] / Relativní napětí [-]					Mez kluzu [MPa]	Průměr. relat. nap. [MPa]	Celková hmotnost [kg]
	1 (dole)	1 (nahore)	2	H	přechod			
REF	703	404	255	300	603	950	0,477	1,987
	0,74	0,43	0,27	0,32	0,63			
1A	134	54	117	182	160	310	0,431	1,675
	0,45	0,18	0,39	0,61	0,53			
2A	124	75	132	208	164	310	0,468	1,593
	0,41	0,25	0,44	0,70	0,55			
5A	368	346	127	231	349	950/ 310	0,462	1,914
	0,39	0,36	0,42	0,77	0,37			

tab. 7: hodnocení variant

Pro názorné porovnání bylo průměrné relativní napětí vyneseno do grafu v závislosti na hmotnosti.



obr. 72: graf relativní napětí - hmotnost pro jednotlivé varianty

5.3.4 Výběr nejlepší varianty

Z grafu obr. 72 je zřejmé, že referenční varianta i varianta 5A jsou těžké. Lze však obtížně rozhodnout, která varianta ze zbývajících dvou je nejlepší. Varianta 2A dosáhla nejnižší hmotnosti, avšak u varianty 1A dávají nejnižší hodnoty relativního napětí prostor pro odlehčení. Podíváme-li se však zpět do tab. 7 zjistíme, že u varianty 2A je lépe využít materiál, tj. v jednotlivých kontrolních místech je rovnoměrněji zatížena.

Z důvodu nejednoznačnosti nejlepšího řešení mezi dvěma podobnými variantami bylo přistoupeno ke Geometrické optimalizaci pomocí Altair HyperOpt řešiče Nastran. Řízeny byly parametry uvedené v tab. 8. Jako výchozí hodnoty byly nastaveny parametry pro variantu 2A. Parametr rozptyl hodnot určuje krajní hodnoty, kterými byl optimalizační algoritmus omezen.

Parametr	Výchozí hodnota [mm]	Rozptyl hodnot [mm]	Popis
p561	5	4 - 8	tloušťka stěny H
p621	2	2 - 3	tloušťka stěny A
p622	5	3 - 5	tloušťka stěny B
p419	10	6 - 12	rádus A-H
p438	10	6 - 12	rádus B-H

tab. 8: parametry optimalizační úlohy

Byla zadána optimalizace na nejnižší hmotnost při požadavku nepřekročit 310 MPa na žádném místě konstrukce. Okrajové podmínky byly definovány shodné s kapitolou 5.3.3.

Z výsledků optimalizace (příloha 1) je patrné, že nejvýhodnější je umístit hmotnost do ploch H a B a naopak plochu A udělat co nejtenčí. To přesně odpovídá variantě 2A.

Z řešení, které prošly 310 MPa limitem bylo dosaženo nejnižší hmotnosti u řešení 3. Abychom však mohli výsledky srovnávat s předchozími variantami, je třeba provést výpočet podle stejné metodiky. Z výsledků optimalizace nejsme schopni nic říci o rozložení napětí ve výše specifikovaných kritických místech. Známe pouze max. hodnotu, navíc se jedná o hodnotu nezprůměrovanou. Řešení 3 tak byla podrobena pevnostnímu výpočtu dle shodné metodiky, pro účely srovnání bylo označeno 2B.

Z výsledků dle stejné metodiky vyplývá, že ačkoli je varianta 2B nejlehčí, je nárůst relativního napětí neakceptovatelný (výsledky v souhrnné tabulce 10 a obr. 74).

Dále je třeba brát v úvahu, že optimalizační úloha nedokvergovala, tzn. nedokázala najít ideální řešení. I opakované pokusy s rozličnými počátečními hodnotami nevedly ke zdárnému výsledku. Řešení nepřineslo ani zvýšení maximálního počtu iterací. Z toho vyplývá, že získané ideální řešení nemusí být nejlepší možné.

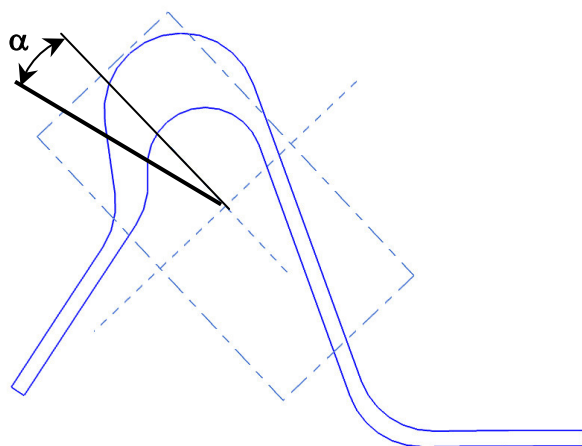
Vzhledem k výše napsanému tak lze pouze konstatovat, že varianta 2 se jeví jako nejlepší.

5.3.5 Optimalizace vybrané varianty

Jelikož v úloze geometrické optimalizace nebylo nalezeno optimální řešení, je třeba jej nalézt jiným způsobem. Můžeme tedy vyjít z obecně platného faktu, že by konstrukce pro co nejvyšší pevnost měla dosahovat co nejvyššího kvadratického momentu průřezu. Zároveň je

nutné dosáhnout minimální hmotnosti. Budeme se tedy snažit nalézt takové řešení, které bude mít nejlepší poměr kvadratického momentu k ploše. Z konstrukčního hlediska to znamená koncentrovat co nejvíce hmotnosti co nejdále od neutrální osy ve směru zatížení.

Software NX bohužel neumožňuje počítat kvadratické momenty k libovolné ose, nýbrž je vždy počítá v maximálním směru a směru kolmém na tento směr. Pro náš případ je však samozřejmě důležité natočení osy kvadratického průřezu ke které je počítán.



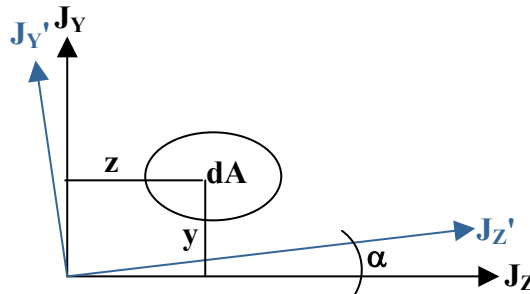
obr. 73 : úhel α je odklon skutečného zatížení od osy max. kvadrat. průřezu

Proto je potřeba využít vztah pro přepočítání kvadratického momentu průřezu k pootočeným osám. Ten je následující:

$$J_{Y'} = \frac{J_Y + J_Z}{2} + \frac{J_Y - J_Z}{2} \cdot \cos 2\alpha + D_{YZ} \cdot \sin 2\alpha$$

[60]

J_Y kvadrat. moment průřezu k ose y
 J_Z kvadrat. moment průřezu k ose z
 D_{YZ} .. deviační moment průřezu



Pro výpočet kvadrat. momentu k pootočeným osám je třeba znát deviační moment D_{YZ} . Ten dopočteme podle následujícího vztahu:

$$D_{YZ} = \int_A yz \, dA \quad [60]$$

y ... ypsilonová vzdálenost k těžišti
z ... zetová vzdálenost k těžišti

Zpracováním mnoha změn vedoucích k maximalizaci kvadratického momentu průřezu v daném směru a minimalizaci hmotnosti vznikla nová varianta 2C (ideově vycházející z varianty 2A). Hlavní změny se týkaly poloměrů rádiusů a definování proměnné tloušťky stěny.

Následující tabulka zobrazuje všechny významné veličiny pro varianty 2A a 2C z hlediska průřezových charakteristik. Navíc je zde pro porovnání i varianta 1A. Ta by dle analýzy pevnostního výpočtu měla dosahovat nejlepší hodnoty kvadrat. momentu průřezu, avšak vlivem vysoké hmotnosti je výsledný poměr horší.

	kvadrat. průřez		plocha [mm ²]	adekvátní obdélník [mm]	úhel poot. [°]	deviač. moment [mm ⁴]	pootoč. kv. mom. [mm ⁴]	kv. mom. / plocha [mm ²]
	MAX [mm ⁴]	MIN [mm ⁴]						
1A	213752	50699,3	480,15	47,91 x 23,33	5,14	134171	201404	419,46
2A	207284	49387,6	429,39	47,51 x 23,19	7,24	118271	191750	446,56
2C	206105	50767	429,98	47,25 x 23,45	5,84	119106	193583	450,21

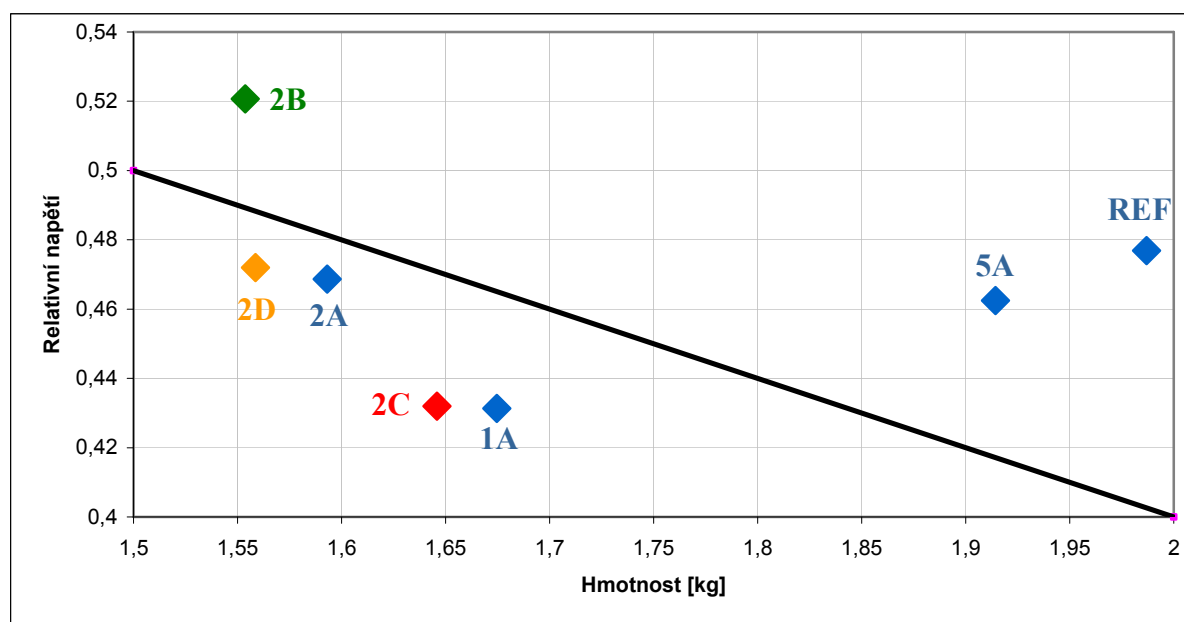
tab. 9: kvadratické momenty průřezu pro jednotlivé varianty

Optimalizovaná varianta 2C vykazuje předpoklad pro nejlepší řešení. Následně byl proveden její pevnostní výpočet dle shodné metodiky. Nyní můžeme porovnat všechny varianty.

Souhrnná tabulka a graf zobrazuje výsledky všech variant.

Varianta	Napětí [MPa] / Relativní napětí [-]					Mez kluzu [MPa]	Průměr. relat. nap. [MPa]	Celková hmotnost [kg]
	1 (dole)	1 (nahore)	2	H	přechod			
REF	703	404	255	300	603	950	0,477	1,987
	0,74	0,43	0,27	0,32	0,63			
1A	134	54	117	182	160	310	0,431	1,675
	0,45	0,18	0,39	0,61	0,53			
2A	124	75	132	208	164	310	0,468	1,593
	0,41	0,25	0,44	0,70	0,55			
2B	136	93	137	238	177	310	0,521	1,554
	0,45	0,31	0,46	0,79	0,59			
2C	110	73	118	200	147	310	0,432	1,646
	0,37	0,24	0,39	0,67	0,49			
5A	368	346	127	231	349	950/ 310	0,462	1,914
	0,39	0,36	0,42	0,77	0,37			

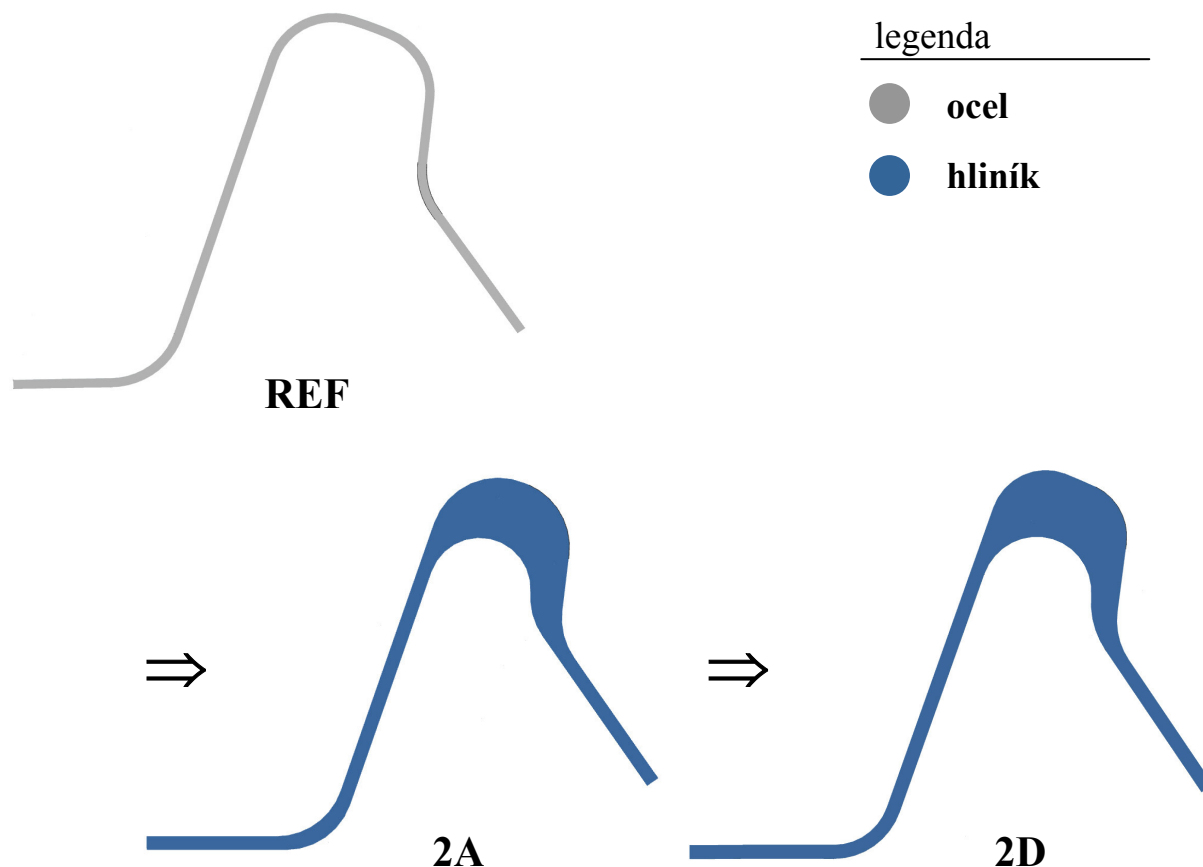
tab. 10: hodnocení variant



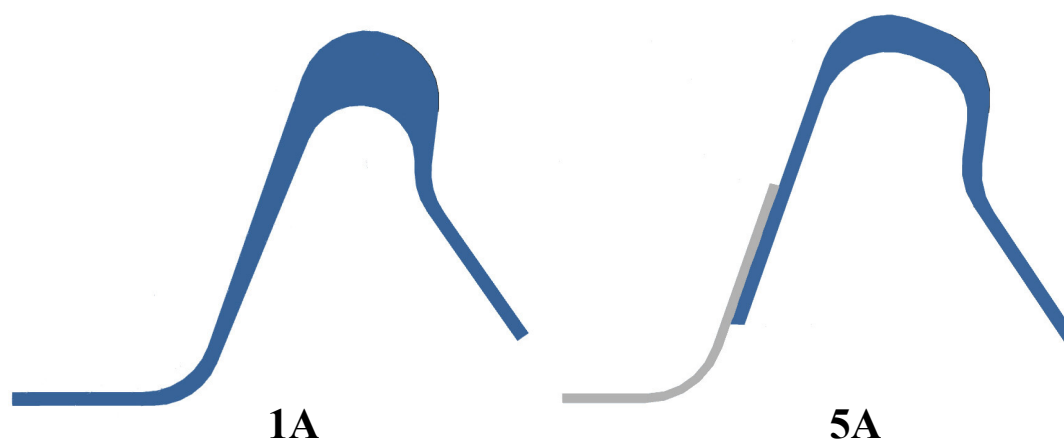
obr. 74: graf relativní napětí - hmotnost pro jednotlivé varianty

Vítězné řešení 2C bylo upraveno na pevnost referenčního řešení, čímž bylo dosaženo významných hmotnostních úspor. Vznikla tak varianta 2D značící výsledné řešení.

Shrnutí vývoje, včetně vyřazených návrhů, je ukázáno na obrázcích zobrazující průřez A-sloupku v nejslabším místě.



obr. 75: shrnutí průběhu vývoje



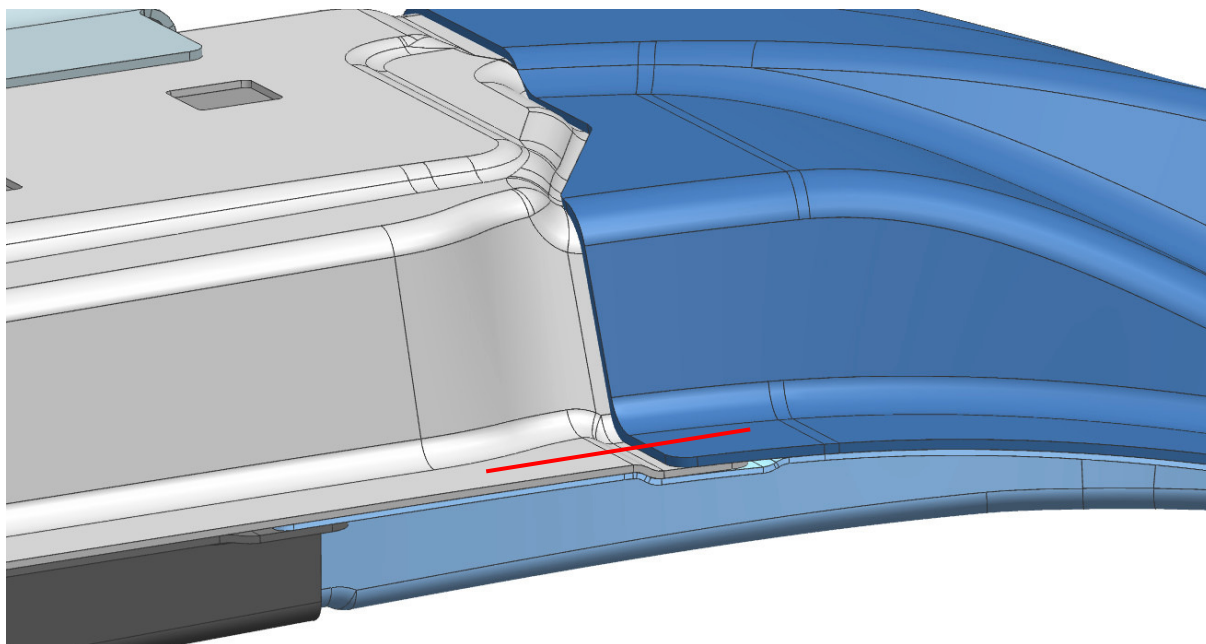
obr. 76: další zvažované varianty

5.3.6 Vynucené změny

Technologická omezení a změna tloušťky dílu si vyžádaly další úpravy na dílu samotném i na přilehlých dílech sestavy.

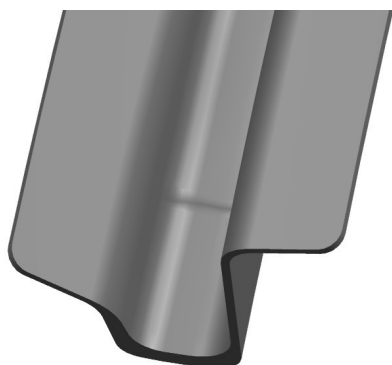
Tloušťku dílu není možné zvýšit směrem "nahoru", neboť je zde dosedací plocha dveří a bočnice. Proto byl díl posílen směrem "dovnitř". To si vyžádalo rozsáhlé úpravy na ostatních dílech. Muselo dojít k posunutí veškerých plechů a dosedacích ploch, které jsou s tímto dílem v kontaktu.

Např. aby byla zachována rovná dosedací plocha dveří (na obr. 77 znázorněno červenou čarou), bylo třeba posunout nejen dosedací plochu sousedního dílu, na kterém nový díl leží, ale i část dílu pod ním (světle modrý).



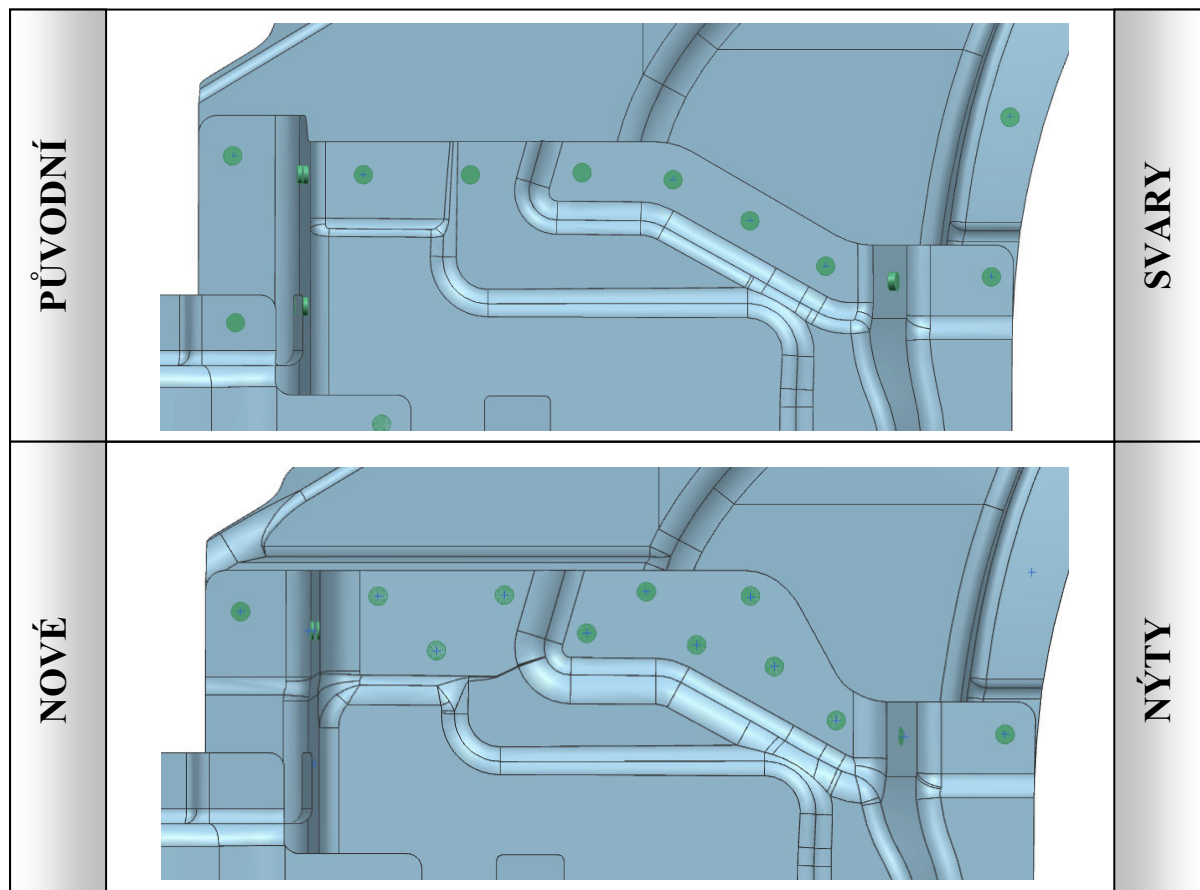
obr. 77: vynucené změny dílů - dosedací plocha

Z důvodu max. přípustné tloušťky spoje bylo nutné snížit tloušťku dílu v oblasti spoje, viz. obr.



obr. 78: snížení tloušťky v oblasti spoje o 0,8 mm

Z důvodu zajištění pevnosti v místě spoje dílů 5 a 6 bylo nutné navýšit počet nýtů. To bylo provedeno zvětšením vzájemných dosedacích ploch dílů a umístěním nýtů částečně do dvou řad.

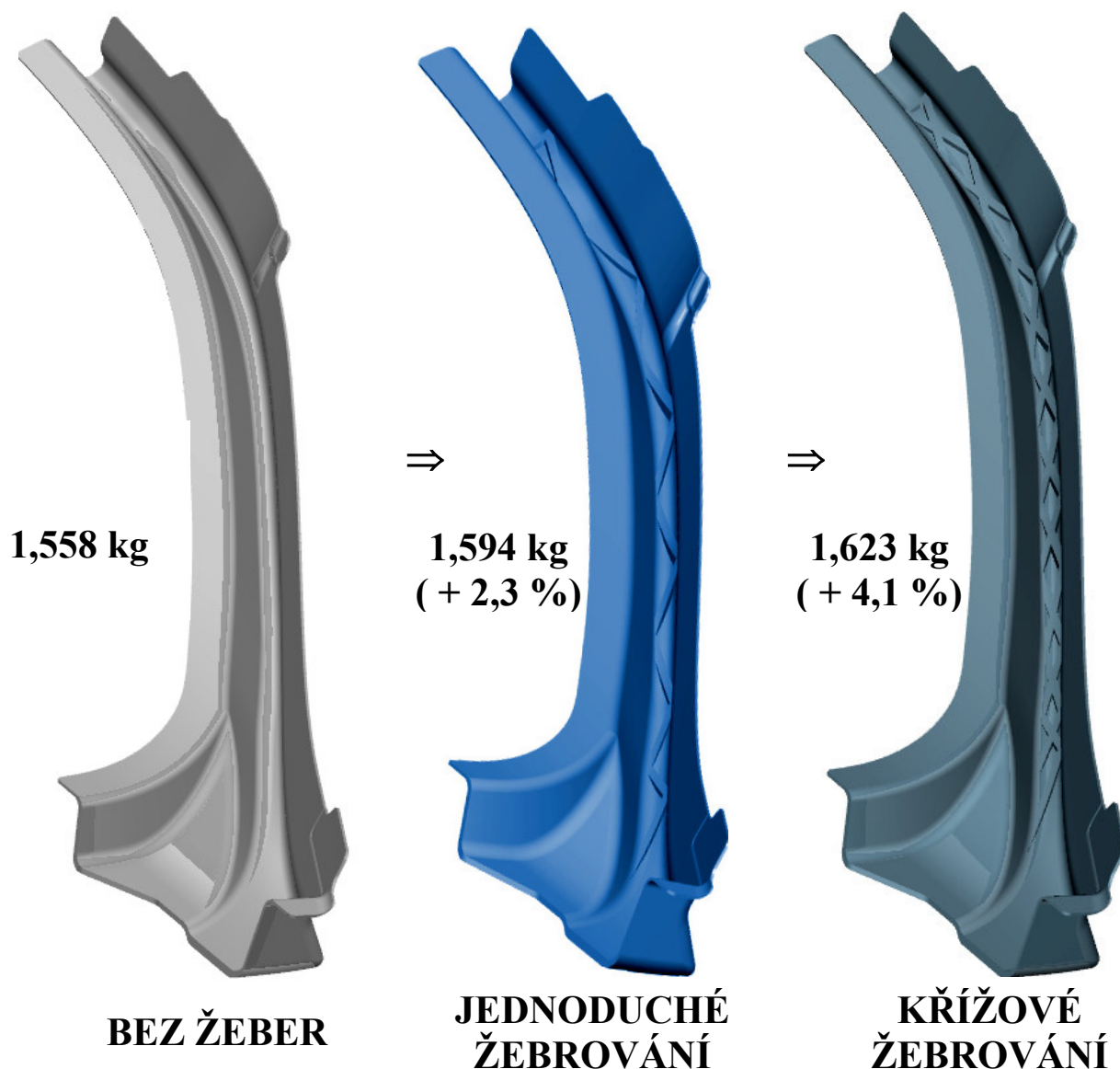


obr. 79: provedení svarů a nýtů

Bočnice musela být upravena z důvodu zvětšení dosedací plochy kvůli nýtování, které nahradilo původní svary.

5.3.7 Žebrování

Dostupnou možností, jak u kovaného dílu zvýšit pevnost a tuhost při malém zvýšení hmotnosti, je vyztužit jej žebry. Následně je možné redukovat tloušťku ploch na pevnost původního dílu. To může ve výsledku přinést hmotnostní úsporu. Byly navrženy dvě varianty vyztužení (viz. obr níže). Posuzována byla pevnost a tuhost podle obdobných kritérií jako v kap. 5.3.



obr. 80: provedení žebrování

VÝSLEDNÉ ZHODNOCENÍ MKP ANALÝZY:

PEVNOST	100,0 %
	101,1 %
	101,4 %
TUHOST	100,0 %
	106,5 %
	114,0 %

Z výsledků vyplývá, že zejména pevnost dílu se žebry zvýšila zcela minimálně. Hodnoty tuhosti jsou již pro žebrované varianty příznivější. Jako vhodnější varianta se jeví varianta s dvojitým žebrováním do kříže, neboť dosahuje většího nárůstu tuhosti v poměru k nárůstu hmotnosti. Celkově však lze výsledky označit za neuspokojivé. Po snížení tloušťky ploch na původní tuhost je výsledná hmotnost téměř identická jako nežebrovaného dílu, navíc s nižší pevností. Připočteme-li zvýšení výrobních nákladů na žebrovanou variantu, je žebrování nerentabilní. Zásadní vliv na dosažené výsledky má technologické omezení vyplývající z technologie kování. Na takto již složitém dílu je možné kovat žebra o max. tloušťce 5 mm a výšce max 3 mm. Naopak úspory plynoucí ze snížení tloušťky stěn jsou malé z důvodu tvarové náročnosti dílu.

5.4 Ověření výsledného řešení

Pro výslednou variantu bylo nutné upravit všechny dosedací plochy, jelikož došlo ke změně tloušťky dílu i tvaru některých ploch. Bylo tak nutné upravit veškeré okolní díly.

Výsledné řešení je třeba validovat. To bylo provedeno pomocí ověřovacích výpočtů, kdy bylo porovnáno nové řešení s řešením referenčním. Výpočty proběhly za shodných okrajových podmínek jako u referenčního řešení - kap. 4.4 a 4.5.

5.4.1 Pevnostní kontrola

Pevnostní kontrola proběhla za okrajových podmínek popsaných v kap. 4.4. Odlišností je síťování dílu č. 6 (kovaný díl), který z důvodu proměnné tloušťky již nelze síťovat 2D sítí. Byla proto užita 3D tetrahedral síť. Pro 3D síť bylo nutné zvolit relativně jemné síťování, síť se tak skládá ze 109.790 elementů, které vytvářejí 34.517 uzlových bodů. Druhou odlišností je pak samozřejmě materiál. Byl definován vlastní materiál pomocí stress-strain křivky dle obr. 67, kap. 5.1). Stress-strain křivka definovaná v prostředí NX/Nastran je zobrazena v příloze 2.

Hlavním výstupem pevnostní kontroly je opět křivka síly v závislosti na posunutí desky. Stejným způsobem jako v kap. 4.4.3. byly získány hodnoty SWR.

Ačkoli při menším posunutí vykazovala nově zvolená varianta lepší hodnoty, tak je výsledná hodnota na posuvu 127,5 mm v podstatě identická s referenčním řešením. Na hodnotě 127,5 mm bylo dosaženo koeficientu **SWR 3,759**, tj. + 0,16 % ve prospěch nové varianty. Lze tedy konstatovat, že z hlediska IIHS standardu jsou si obě varianty rovnocenné.

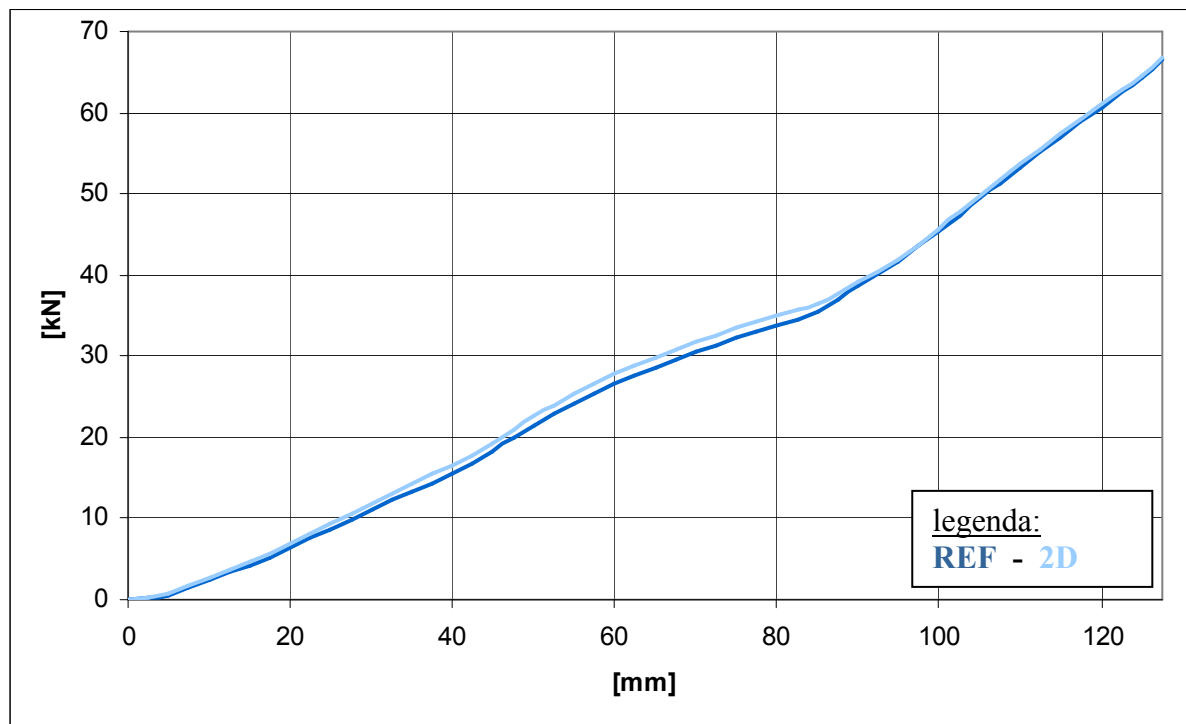
Z celkového pohledu na křivku je zajímavé, že nová varianta na začátku vykazovala výrazně lepší hodnoty, ale se zvětšujícím se posuvem veškerý náskok ztratila. To lze vysvětlit vyšší tažností hliníku oproti oceli.

Jelikož je procentuální rozdíl na křivce "zkreslen" stále se zvětšujícími hodnotami, jsou hodnoty včetně procentuálního rozdílu pro přehlednost uvedeny v tabulce:

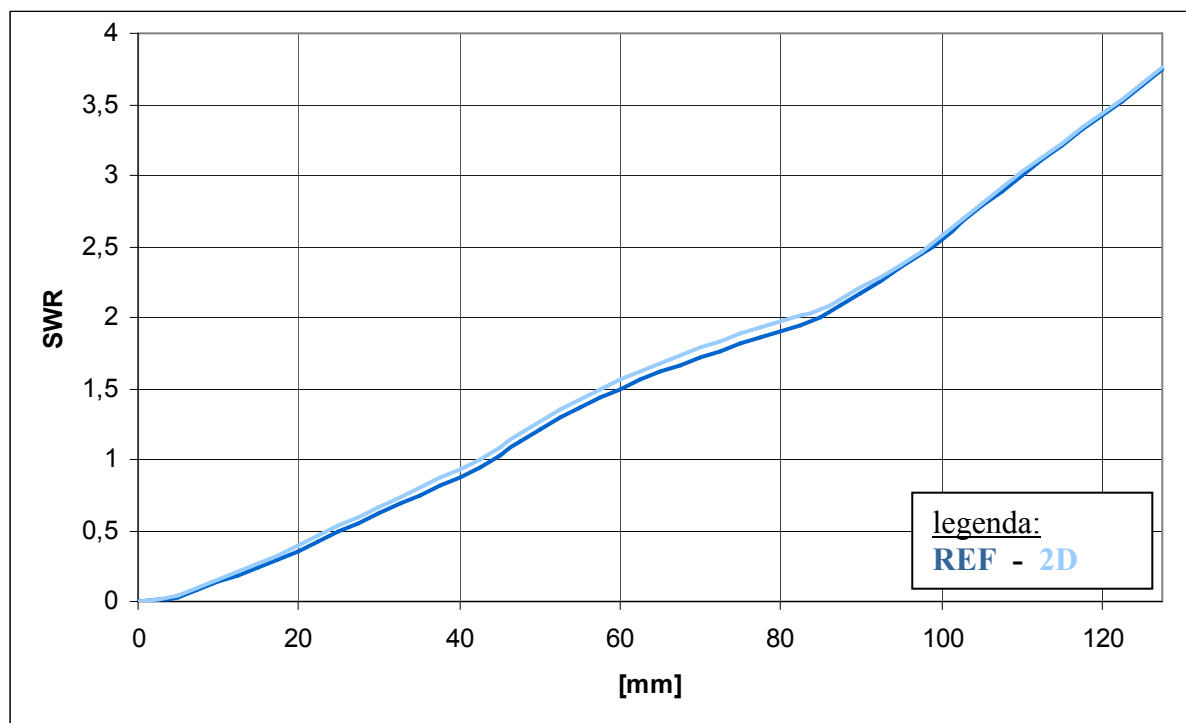
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	127,5
REF	2,39	6,35	11,06	15,51	21,53	26,63	30,51	33,76	38,58	45,27	53,32	60,75	66,64
2D	2,72	6,95	11,87	16,52	22,59	27,76	31,73	34,99	39,14	45,66	53,68	61,05	66,74
%	+13,81	+9,45	+7,33	+6,51	+4,92	+4,24	+3,99	+3,64	+1,45	+0,86	+0,68	+0,49	+0,16

tab. 11: síla [kN] v závislosti na posunutí desky [mm] pro jednotlivé varianty, a jejich porovnání

Grafy obr. 81 a obr. 82 zobrazují sílu, resp. koeficient SWR v závislosti na posuvu stlačovací desky.



obr. 81: síla v závislosti na posuvu desky



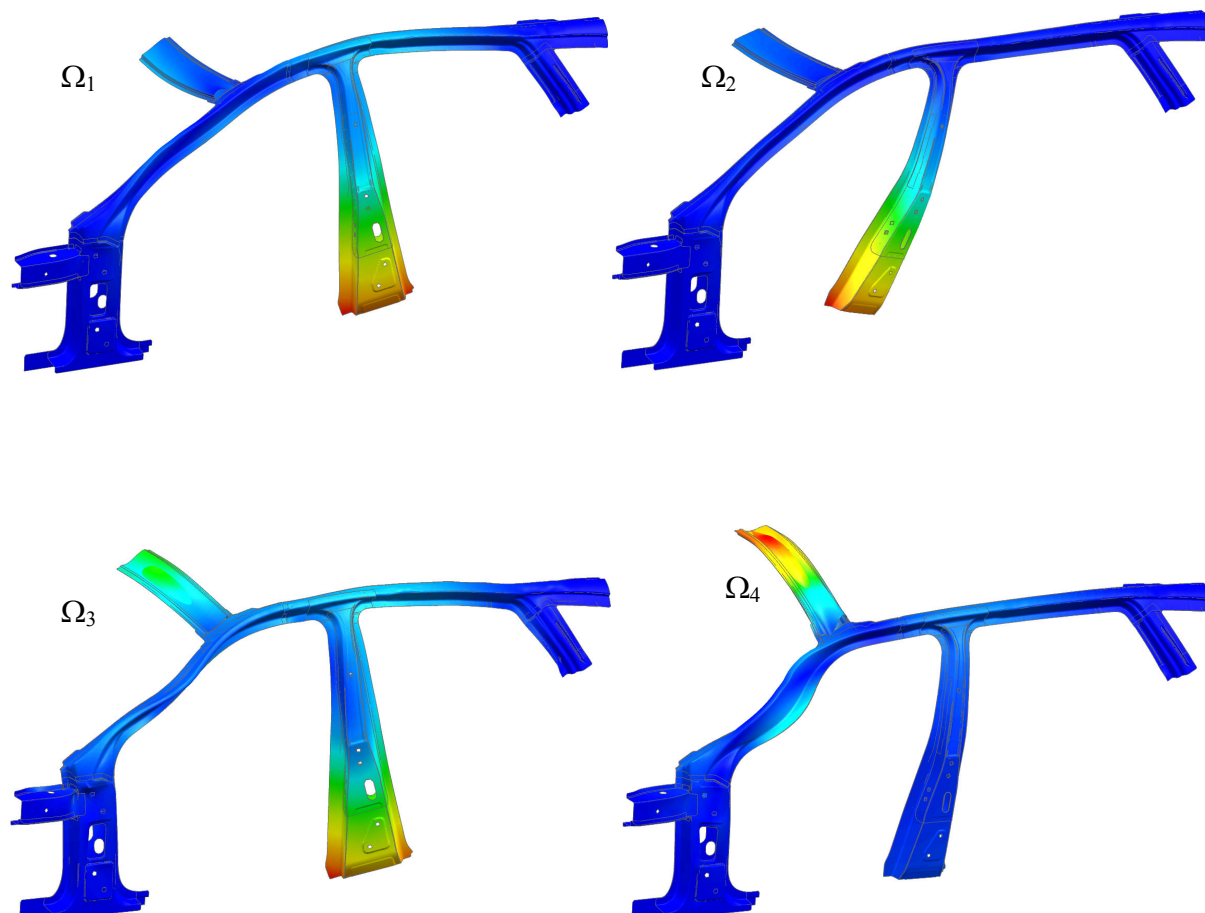
obr. 82: koeficient SWR v závislosti na posuvu desky

5.4.2 Analýza modálních vlastností

Při výpočtu dle kap. 4.5 byly nalezeny vlastní frekvence:

- $\Omega_1 = 32,26$ Hz
- $\Omega_2 = 35,54$ Hz
- $\Omega_3 = 42,10$ Hz
- $\Omega_4 = 47,44$ Hz

Z těchto hodnot je zřejmé, že došlo ke změně odezvy systému. Navíc došlo ke změně tvarů některých vlastních modů, jak je vidět na následujících obrázcích.



obr. 83: vlastní tvary konstrukce varianty 2D

Z vlastních tvarů vyplývá, že došlo ke snížení tuhosti A-sloupku. To lze částečně kompenzovat přidáním žebrování, jak bylo navrženo v kap. 5.3.7.

Z důvodů popsaných v kap. 4.5. není možné říci, zda nalezené frekvence a jejich vlastní tvary odpovídají skutečnosti. S jistotou však lze tvrdit, že došlo ke změně. Pro posouzení skutečného stavu je potřeba na toto téma provést další výpočty, a to na úplném modelu karoserie.

5.5 Výrobní postup

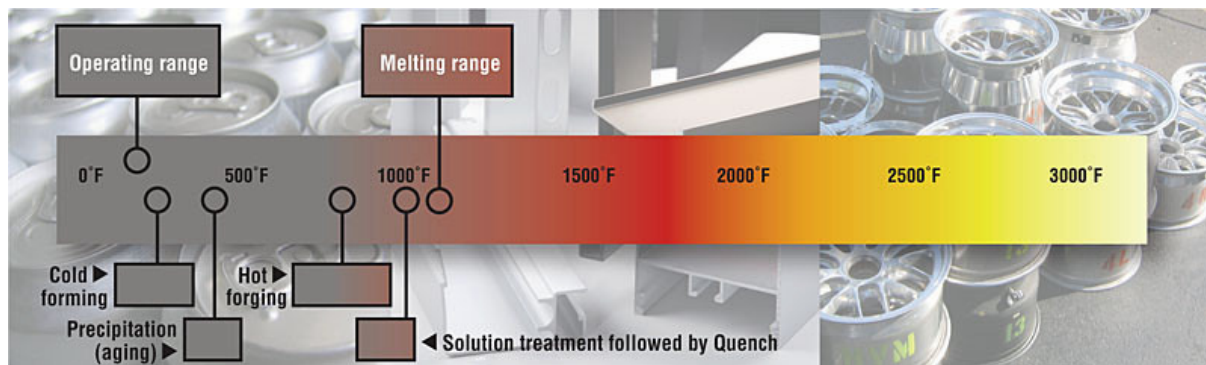
Jak bylo uvedeno výše, díl bude vyráběn tzv. přesným kováním. Jedná se o speciální druh zápustkového kování. Umožňuje minimalizovat náklady na další úpravy (jako např. obrábění) a zároveň poskytuje maximální užitnou hodnotu v podobě dosažení nejlepších vlastností materiálu i navržení dílu s komplikovanými tvary a malými rádiusy. Výrazně také klesají náklady na materiál.

Kování poskytuje dobré mechanické vlastnosti a strukturální integritu dílu, umožňuje dosažení vysoké hmotnostní pevnosti daného materiálu a zlepšuje odolnost výsledného dílu proti nárazům a proti únavě materiálu.

Základní postup výroby lze shrnout v následujících krocích. Materiál polotovaru je uříznut z předkovaného odlitku kruhovou nebo pásovou pilou. Budoucí díl je na začátku procesu předehřán na 430 - 480 °C. Přesné dosažení definované teploty je pro proces tváření hliníku velmi důležité. Pro slitinu hliníku AW-6061 je postačující 1h - 2h výdrž na předehřívací teplotě s přesností $\pm 5^\circ\text{C}$. Kromě polotovaru je rovněž důležité předehřát zápustku na stanovenou teplotu s přesností $\pm 15^\circ\text{C}$. Ta se u přesného kování pohybuje relativně blízko teplotě materiálu. Vhodné je volit infračervený ohřev formy. Ten přináší rovnoměrnější prohřátí, lepší mazání a menší problémy s lepivostí. To umožňuje i dosažení lepších mechanických vlastností výkovku. Nezbytné je rovněž mazání polotovaru a zápustky. To musí být schopné tvářet povrch výrobku a zároveň snížit tření na minimum. U přesného kování je mazání formy obzvláště důležité. Mazivo je obvykle nanášeno rozprašováním, v automobilovém průmyslu pomocí robotů. Trysky nanášecích robotů mohou být vyhřívány pro zlepšení tekutosti a mazacích schopností maziva. Pro samotné kování je kromě výše zmíněné teploty a maziva důležitá především rychlost kování. Pro přesné kování se používá hydraulických lisů. Výkovek je na závěr nutné oříznout na přesné požadované rozměry. To je možné provádět za tepla i za běžné teploty. [61]

Návrh zápustkové formy pro přesné kování hliníkových slitin je velmi složitý proces vyžadující množství zkušeností a podpůrný software, zejména v oblasti MKP simulací napětí, vedení tepla a simulací tvářecího procesu.

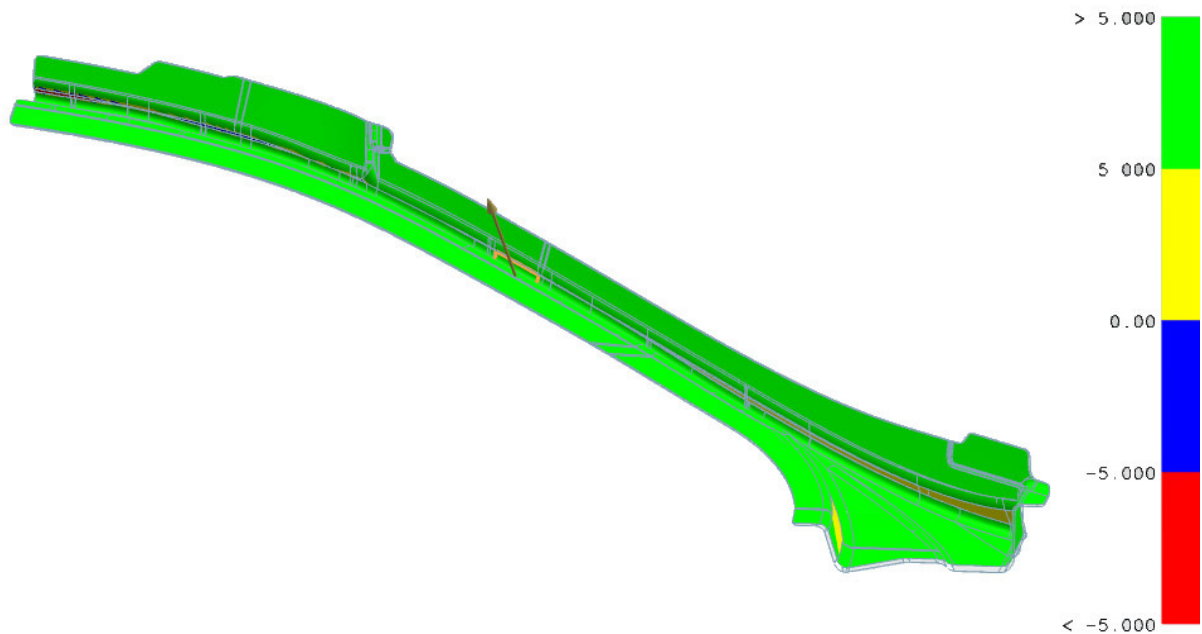
Technologické operace kování je možné provádět za studena i za tepla. Díl může být různými způsoby předkovan. To bude určeno technologickým postupem po důkladné analýze technologem. V té budou zcela jistě hrát významnou roli ekonomické aspekty.



obr. 84: vlastnosti hliníkové slitiny (500°F = 260°C; 1000°F = 538°C) [62]

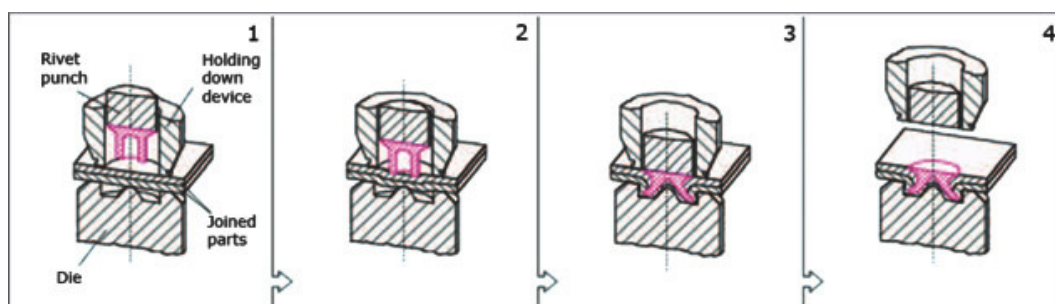
Díl by měl být ve výsledném stavu T6. T6 označuje stav teplem vytvrditelné slitiny po rozpouštěcím žhání a umělém stárnutí.

Díl musí být z konstrukčního hlediska především odformovatelný. Úkosity získané draft analýzou jsou zobrazeny na následujícím obrázku. Některé plochy mají úkosity přibližně pouze 1 stupeň.



obr. 85: analýza odformovatelnosti dílu

Spoje samořeznými napůl dutými nýty budou zhotovovány pomocí robotů, obdobně jako v referenčním řešení svarové spoje. Proces vytváření nýtovaného spoje je znázorněn na následujících obrázcích:



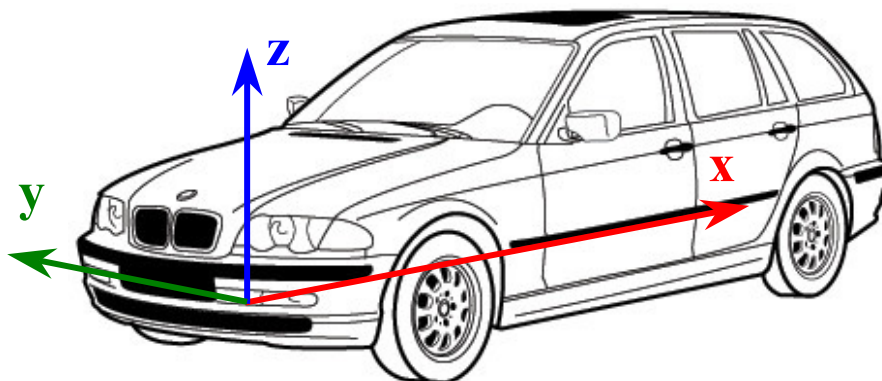
obr. 86: průběh zhotovování spoje pomocí samořezných nýtů [63]

Samořezné nýty jsou oproti plným nýtům částečně uprostřed duté. Zároveň je hrana uzpůsobena k snadnému pronikání materiálem a vytvoření spoje.

Pevnost těchto nýtů je přibližně shodná s bodovými svary nebo i vyšší. Množství spojů, resp. jejich rozteč byla na většině míst ponechána - tedy 1 svar = 1 nýt.

Průměr použitých nýtů je 5 mm.

Další problematikou, kterou je potřeba zohlednit, je upnutí dílu pro montáž. Veškeré souřadnice jsou v modelu vztahovány vůči nulovému bodu souřadného systému - tzv. nullpunktu umístěného v ose vozidla.

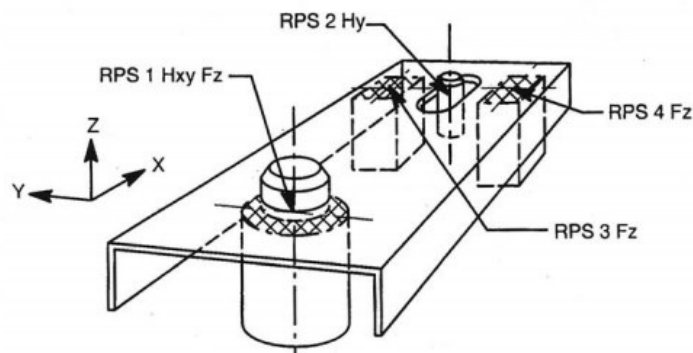


obr. 87: nulový souřadnicový kříž vozidla [64]

Data pro referenční řešení obsahovala pouze absolutní nulový bod (nullpunkt), neobsahovala žádné informace o upínacím systému. Proto byl systém zvolen bez ohledu na původní verzi.

Z hlediska výroby nejsou rozměry ani geometrické tolerance vztahovány k nullpunktu, ale k systému RPS. Jedná se o Reference Point System - systém referenčních měřicích bodů, který je definován pro každý díl zvlášť. Zpravidla jej tvoří referenční bod a několik dalších bodů, podle kterých jsou mj. kontrolovány výrobní tolerance a vzájemná přesnost sesazení dílů. Upínací systém dílů je často shodný s těmito body.

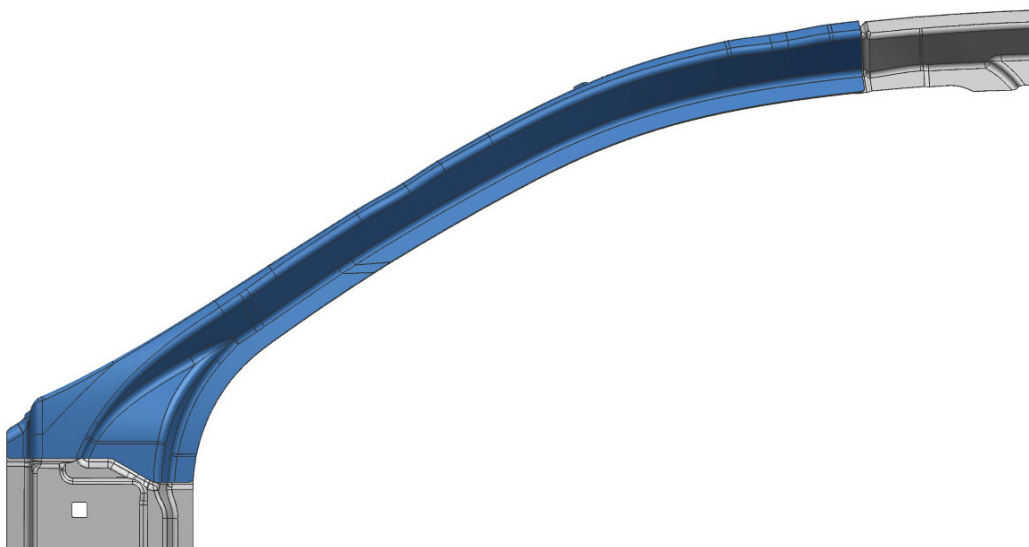
Upínací systém musí odebírat všechny stupně volnosti tělesa. Nejčastějším řešením je užití pevného trnu v kombinaci s vodícím trnem a minimálně tří podpěr.



obr. 88: upínací systém dílů [65]

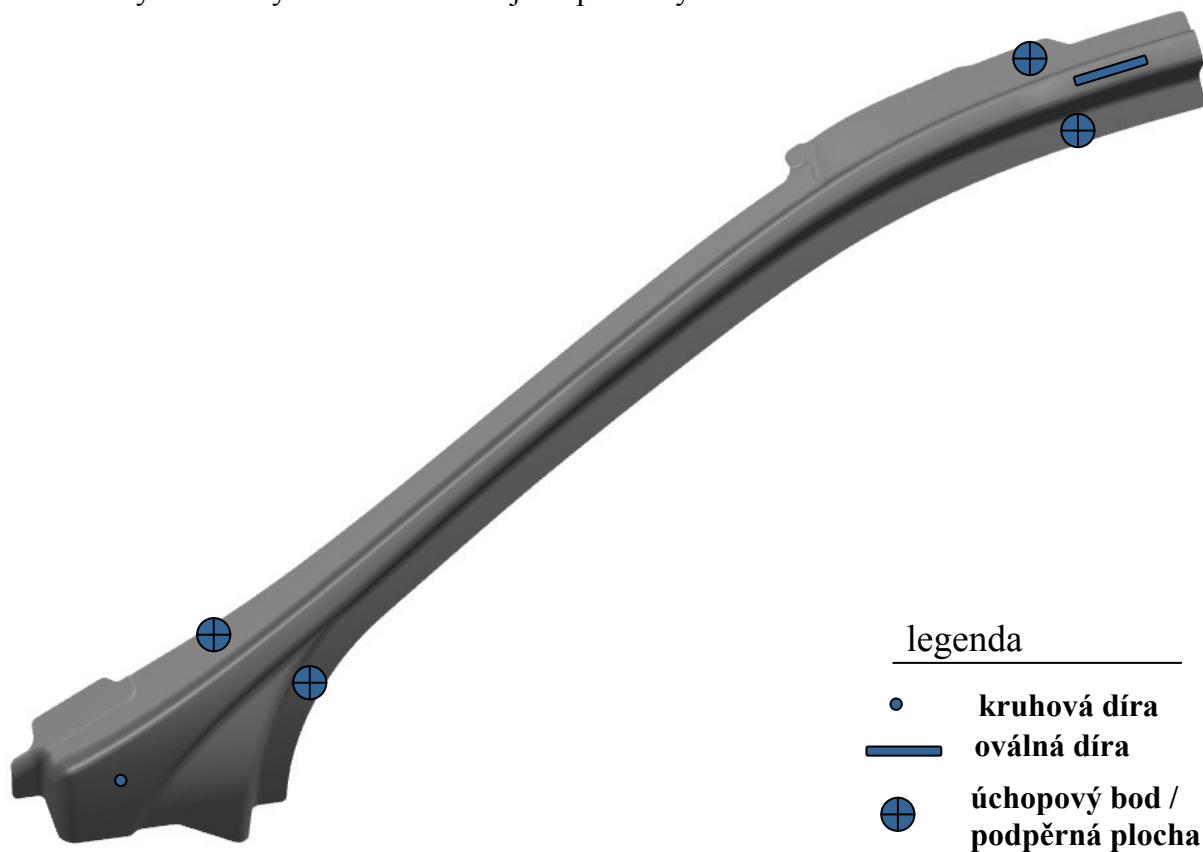
Tři podpěry zabraňují posuvu ve směru z a rotacím okolo osy x a y. Trn v kulaté díře zabraňuje posuvu v ose x a y. Trn v oválné díře odebírá poslední stupeň volnosti - rotaci okolo osy z.

Díl bude k ostatním, se kterými tvoří podsestavu "vnější střešní oblouk" a následně podsestavu "vnější část bočnice" (viz. str. 39 a 40), montován z vnější strany.



obr. 89: díl v podstavě "vnější část bočnice"

Pro kovaný díl č. 6 byl navržen následující upínací systém:



obr. 90: manipulační body

Pro díru byl zvolen \varnothing 10 mm, ovln díra m rozměry 10 x 30 mm.

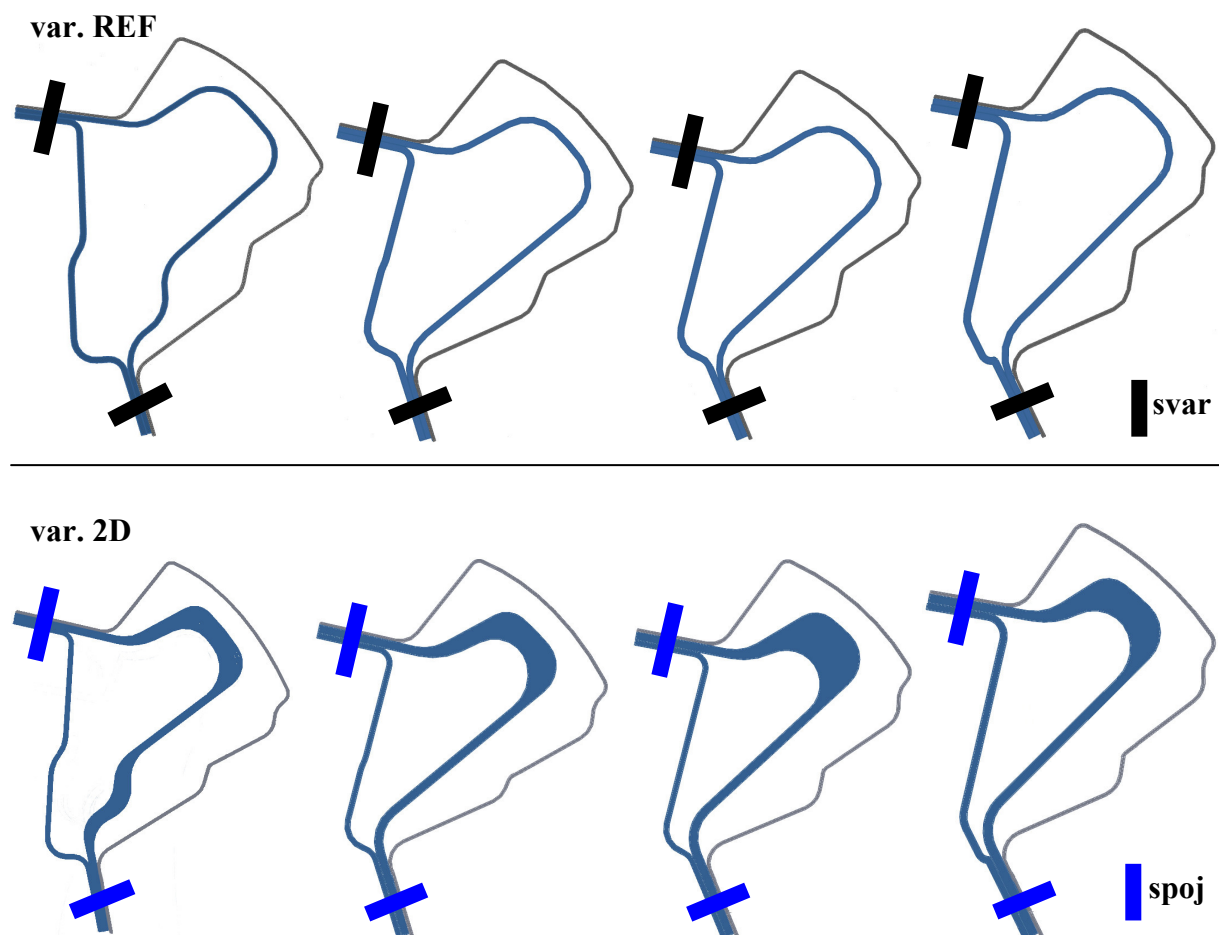
Spojování dílů bude probíhat na montznch ppravcch, jejichz návrh jz n soust této diplomove prce.

5.6 Zhodnocení

Hodnocení dílu je třeba uvažovat z několika specifických požadavků. Konkrétně splnění požadavků IIHS, dosažení co nejlepších užitečných vlastností a v neposlední řadě ekonomické hodnocení.

5.6.1 Hodnocení konstrukčních vlastností

Porovnání řezů obou variant:

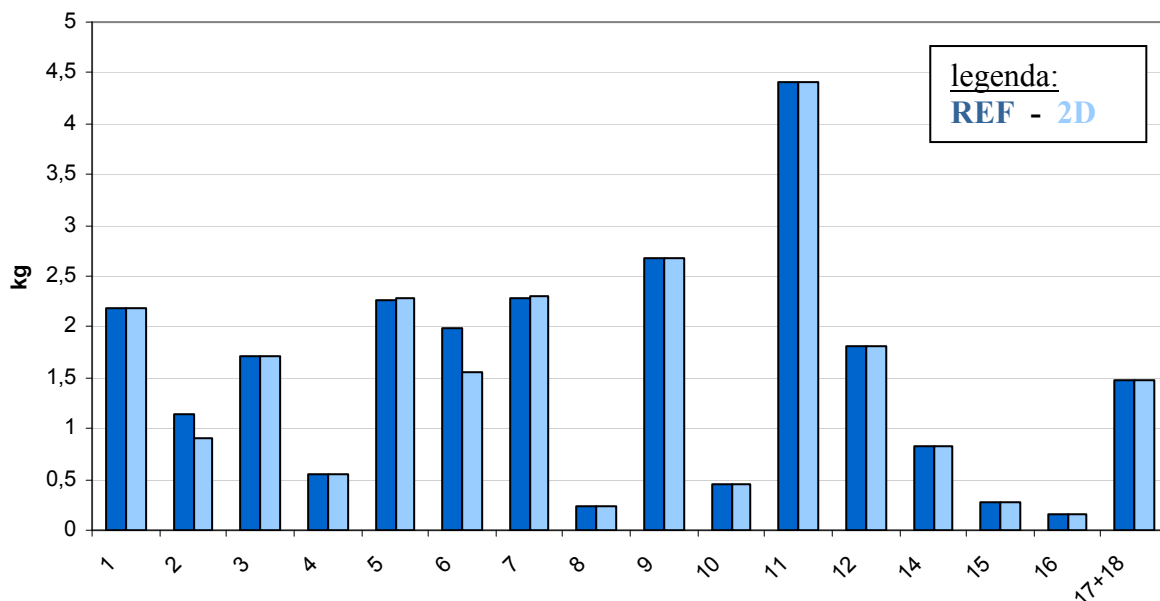


obr. 91: řezy A-sloupkem na jednotlivých místech

Z řezů je zřejmá proměnná tloušťka profilu jak v rámci jednoho řezu, tak podél dílu. Je tak možné umístit materiál pouze tam, kde jej skutečně potřebujeme. To je významným přínosem kování oproti původní technologii. Díl tak má vyšší a rovnoměrnější využití materiálu. Z řezů je vidět naopak i největší nevýhoda nového řešení. Nevyužitý prostor mezi bočnicí a kovaným dílem (na obr. ve spodní části - větší vzdálenost výkovku od šedé křivky (bočnice)). Důvodem je potřeba zvětšení dosedací plochy pro spoj kvůli požadavku nýtování. Profil kovaného dílu není možné více natočit a využít tak lépe prostor z důvodu odformovatelnosti dílu.

Z porovnání řezů můžeme také vidět, že v zásadě nedošlo ke změně zástavbových poměrů. Mírně posunuta byla pouze plocha bočnice v oblasti dveří směrem dovnitř A-sloupku. Tato změna **nebude mít vliv na výhled z vozu.**

Z hmotnostního hlediska došlo k významným změnám na dílech č. 2 a 6 - tj. díly A-sloupku. Drobné změny v hmotnosti ostatních dílů jsou dány změnami na dosedacích plochách.



obr. 92: grafické znázornění hmotnosti jednotlivých dílů

Celková **hmotnost celé uvažované sestavy se snížila** z 24,43 kg na 23,78 kg. Rozdíl tedy činí **0,65 kg**.

5.6.2 Technicko-ekonomické hodnocení

Hlavním cílem je navrhnout řešení, které splní veškeré stanovené požadavky, a zároveň poskytne co nejnižší cenu. V automobilovém průmyslu probíhá výroba veškerých dílů v obrovských sériích, proto i zdánlivě nepatrná úspora přinese během celé produkční doby vozidla značné finanční úspory. Obrovskému tlaku na cenu navíc přispívá i vysoce konkurenční prostředí na trhu výrobců automobilů. Proto je třeba se zabývat technicko-ekonomickým hodnocením již při samotném návrhu nového dílu.

V této kapitole jsou předběžně vyčísleny náklady na výrobu dílu a je provedeno základní ekonomické porovnání variant.

Kování dílu je z hlediska efektivity a nákladů produktivnější a levnější než lití. Přesné kování je výrazně dražší na návrh a zavedení do výroby než kování zápustkové, avšak náklady na kus jsou poté nižší z důvodu úspory na dokončovacích pracích (obrábění a dokončování povrchu). Přesné kování navíc snižuje odpad materiálu, tedy náklady na materiál. Zejména pro hromadnou výrobu je přesné kování ve výsledku výrazně levnější.

Ve srovnání s původní technologií - lisování ocelového plechu - však bude přesné kování dražší.

Orientační ceny vstupního materiálu:

Materiál	Kč / kg
Ocel 22MnB5	20
Hliník. slit. AW-6061	50

tab. 12: ceny materiálu za kg

Významným nákladem kování je cena formy. Dle odborného odhadu je cena formy odhadována na 500.000 - 800.000 Kč. Životnost formy se předpokládá 100.000 ks. U formy je opotřebováván především její povrch. Pro tváření hliníku je, narozdíl od tváření oceli, předpokladatelné, že bude možné povrch minimálně 2x opravit a s malými náklady tak prodloužit životnost formy.

U ocelového dílu je po započtení veškerých dalších nákladů výsledná cena ocelového dílu přibližně 180 Kč / kg.

Cena výsledného výkovku je odhadována na minimálně 400 Kč/kg. Cenu velmi ovlivňuje použitá technologie a konstrukce formy.

Díl	Kč / kg	Kč / ks
Ocelový díl	180*	358
Hliníkový díl	400*	620

tab. 13: výsledné ceny dílů; * přibližné hodnoty dle interní cenové hladiny zadavatelské společnosti

Cena polovičně-dutých samořezných nýtů je relativně nízká ve srovnání s obdobnými metodami spojování jako jsou různé jiné pokročilé metody nýtování nebo FDS šrouby. Výhodnější je pouze kličkování, u kterého jsou náklady na spojovací materiál samozřejmě nulové. Jeden nýt stojí přibližně 4,5 Kč.

Investiční náklady na nýtovací technologie polovičně-dutých samořezných nýtů jsou přibližně 1,5 mil Kč, ve srovnání s ostatními technologiemi přibližně průměrné.

Výhodou je i nadprůměrná rychlost zhotovování spojů, která se pohybuje okolo 3,5 s na spoj. Celková cena jednoho spoje je přibližně 15 Kč.

Naproti tomu cena svařovací technologie je výrazně vyšší - přibližně okolo 12 mil Kč. Zhotovení jednoho svaru po započtení odpisu stroje a veškerých dalších provozních nákladů je přibližně 20 Kč. Rychlost svařování je obvykle méně než 1 s / svar. Jedná se tedy o vysoce produktivní metodu.

Vyčíslení nákladů na spoje je v následující tabulce:

Díl	Kč / spoj	spojů	Kč
Ocelový díl	20*	54	1.080
Hliníkový díl	15*	59	885

tab. 14: celkové náklady na spojení dílů; * dle interních dokumentů zadavatelské společnosti

Celkové náklady:

- **ocelový díl:** 1.438 Kč
- **hliníkový díl:** 1.505 Kč

Výsledné náklady na díl, včetně jeho spojení, se **zvýšily o 67 Kč / kus** (tj. o 4,7 %). Zásadní roli na celkové ceně nového dílu bude mít technologie kování, kterou je třeba podrobit důkladné analýze. Pro orientační srovnání byl uvažován optimistický odhad ceny kování 400 Kč/kg.

Na dílu byly stanoveny 4 úchopové, resp. podpěrné plochy. Jejich konkrétní využití bude stanoveno technologem montáže. Platí, že použití pouze podpěry je levnější než pevné uchycení kleštěmi. Snahou je samozřejmě použít minimální množství úchopových míst a ušetřit tak za nástroje.

6 Porovnání karosářských variant

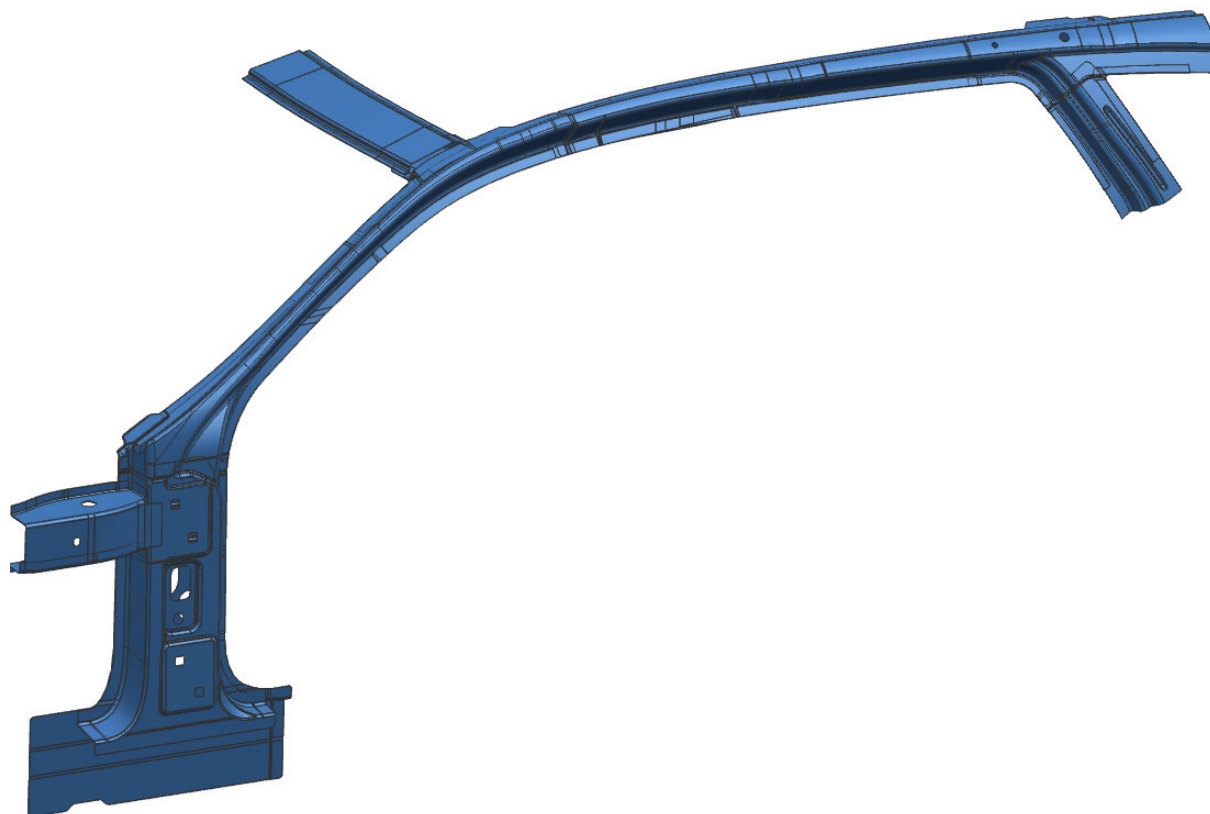
Dále bylo požadováno prověření dalších karosářských variant, včetně jejich vzájemných srovnání z hlediska hmotnosti. Původní verze **kombi**, tak byla v této kapitole doplněna o verzi **MPV** a **kabrio**. Tyto dvě nově navrhované karosářské varianty mají na A-sloupek zcela zásadní vliv. Verze MPV byla navržena zcela bez B-sloupku, verze kabrio má pouze A-sloupek.

6.1 Varianta MPV

První z dalších prověřovaných variant je varianta velkoprostorového vozu bez B-sloupku. Cílem je porovnat klasickou koncepci se všemi sloupky a koncepci bez B-sloupku.

Model vychází z předchozího řešení, ze kterého byl odstraněn B-sloupek a začištěny všechny dosedací plochy a hrany pro B-sloupek na ostatních dílech.

Veškeré díly střešního oblouku a A-sloupku byly posíleny zvětšením tloušťky. Vzniklá struktura je na obr. 93.

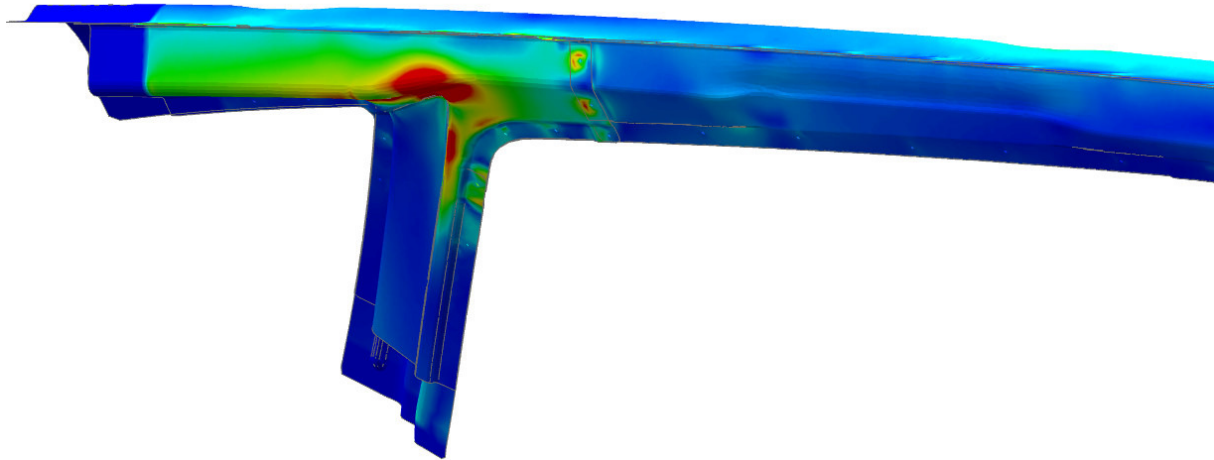


obr. 93: sestava MPV

Díly byly nadimenzovány tak, aby výsledná síla, resp. koeficient SWR, byl na obdobné úrovni jako u předchozích variant.

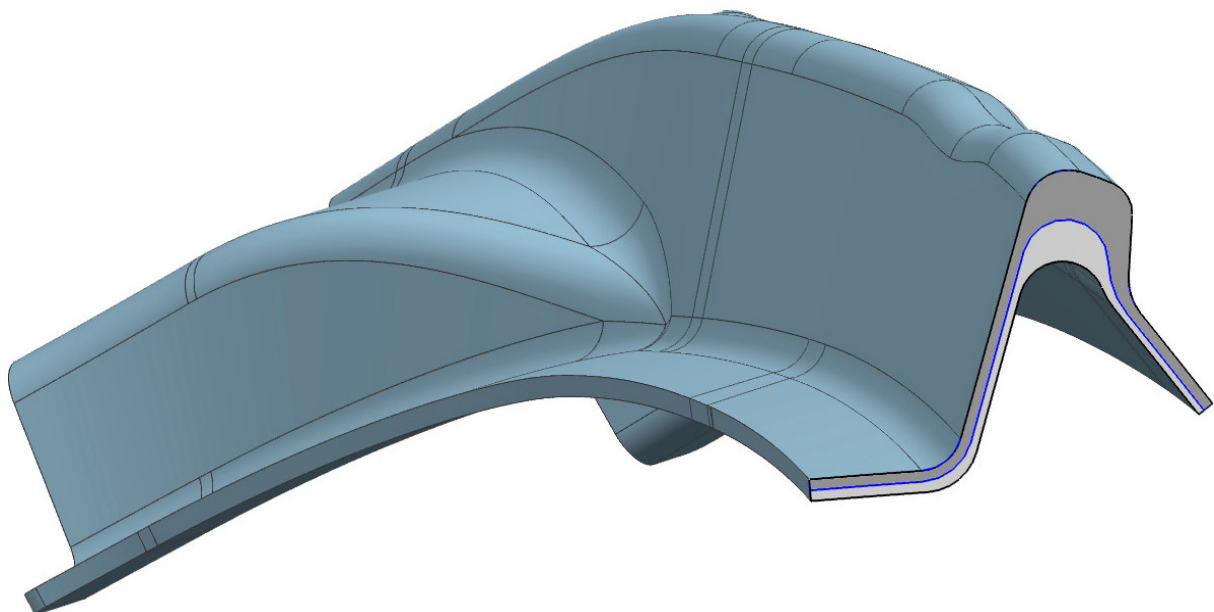
Dílem, který bylo potřeba jednoznačně nejvíce vyztužit byl vnitřní díl C-sloupku (díl č. 4). Zde docházelo k velké kumulaci napětí, jak je vidět na obr. 94. Celá konstrukce v tomto místě

významně ztrácela tuhost a celý střešní oblouk se tak snadno poddával posunu desky. Aby bylo tomuto nežádoucímu jevu zabráněno, bylo třeba zvýšit tloušťku tohoto dílu z 0,75 mm na 1,8 mm.



obr. 94: koncentrace napětí v místě napojení C-sloupku

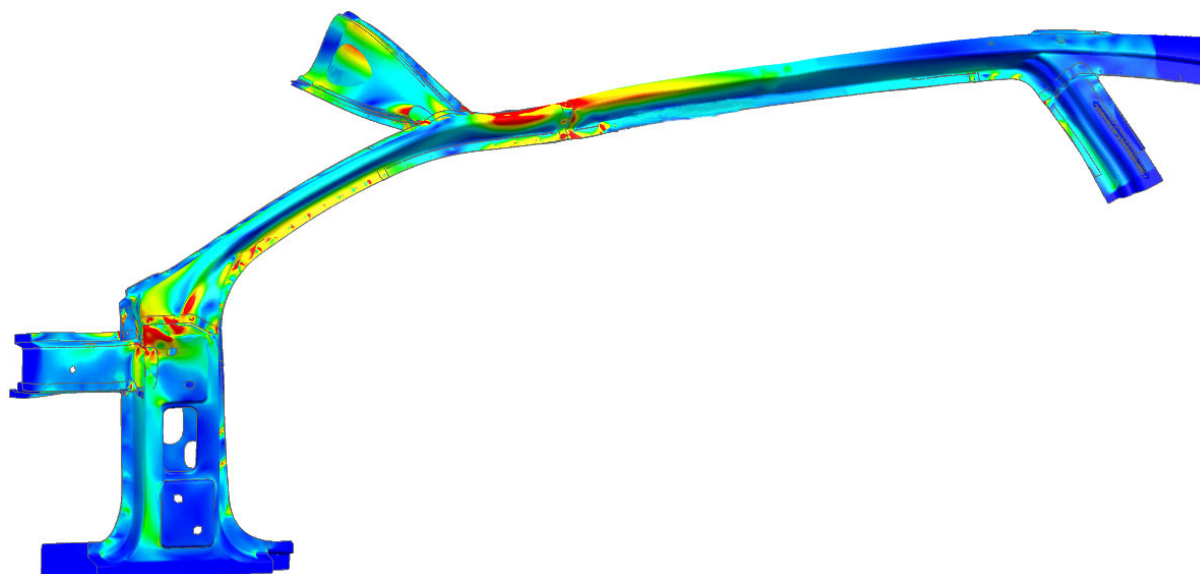
Díl A-sloupku bylo rovněž nutné významně posílit. U vnitřního ocelového dílu (díl č. 2) byla zvětšena tloušťka z 1,2 mm na 1,6 mm. Vnější díl (kovaný hliníkový díl č. 6) je vyobrazen v řezu na obrázku níže. Řez je proveden v nejužším místě. Tmavší část, oddělená modrou čarou, ukazuje původní hliníkový díl. Zvětšit tloušťku stěny A již není více možné z důvodu ponechání minimálního prostoru pro spoj na konci dílu.



obr. 95: spodní část A-sloupku v řezu

Po odstranění B-sloupku došlo mimo jiné také ke změně zatížení A-sloupku. Na spodní dosedací ploše vzrostlo napětí výrazně více než na horní. Na to bylo reagováno větším posílením spodní dosedací plochy. To je patrné na porovnávacím obrázku v řezu - větší navýšení tloušťky spodní dosedací plochy (vlevo) než u horní (vpravo).

Rozložení napětí v konstrukci je vidět na obrázku 96.



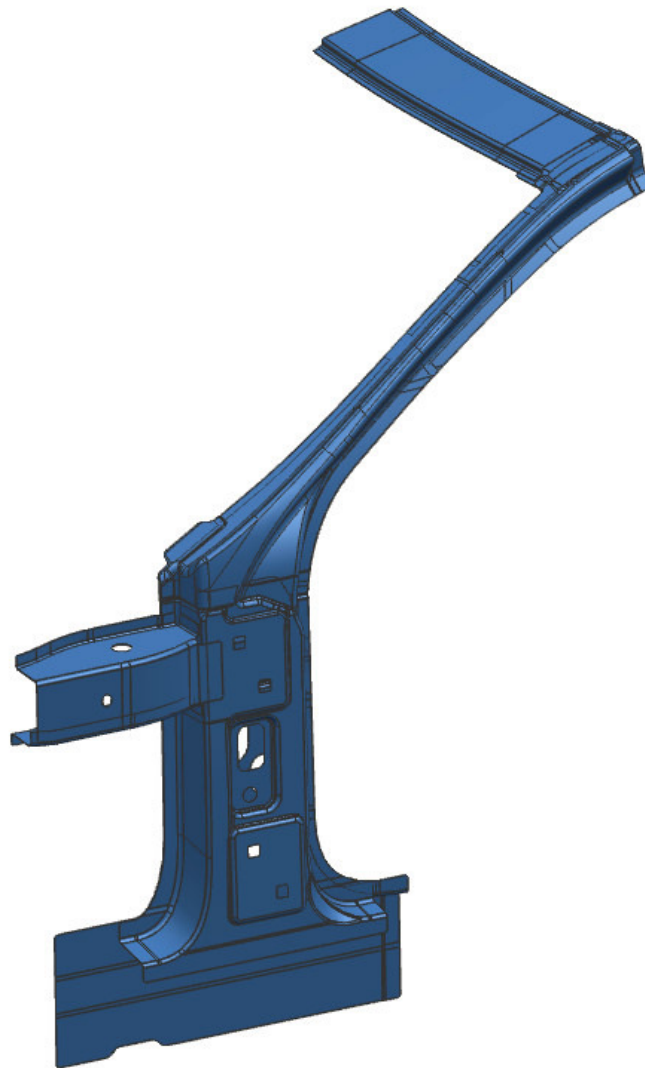
obr. 96: celkový pohled na konstrukci - napětí dle Von-Mises

Výsledné řešení této karosářské varianty bylo označeno jako 7B.

Střešní oblouk není příliš rovnoměrně namáhán (platí pro vnitřní i vnější část, tj. díly č. 3 a 7). Bylo by proto vhodné prověřit jiné spojení dílů střešního oblouku a A-sloupku ve smyslu změny místa spoje. Rovněž by bylo vhodné prověřit možnosti rozdělit střešní oblouk na více dílů či použít technologii proměnné tloušťky tailor rolled blanks. Samozřejmě se též nabízí možnost použít hliníkový materiál i na střešní oblouk. Řešení střešního oblouku a související problematiky však již přesahuje rozsah této diplomové práce. Proto bylo koncepční řešení střešního oblouku ponecháno ve stávajícím stavu a pouze upraveny tloušťky dílů.

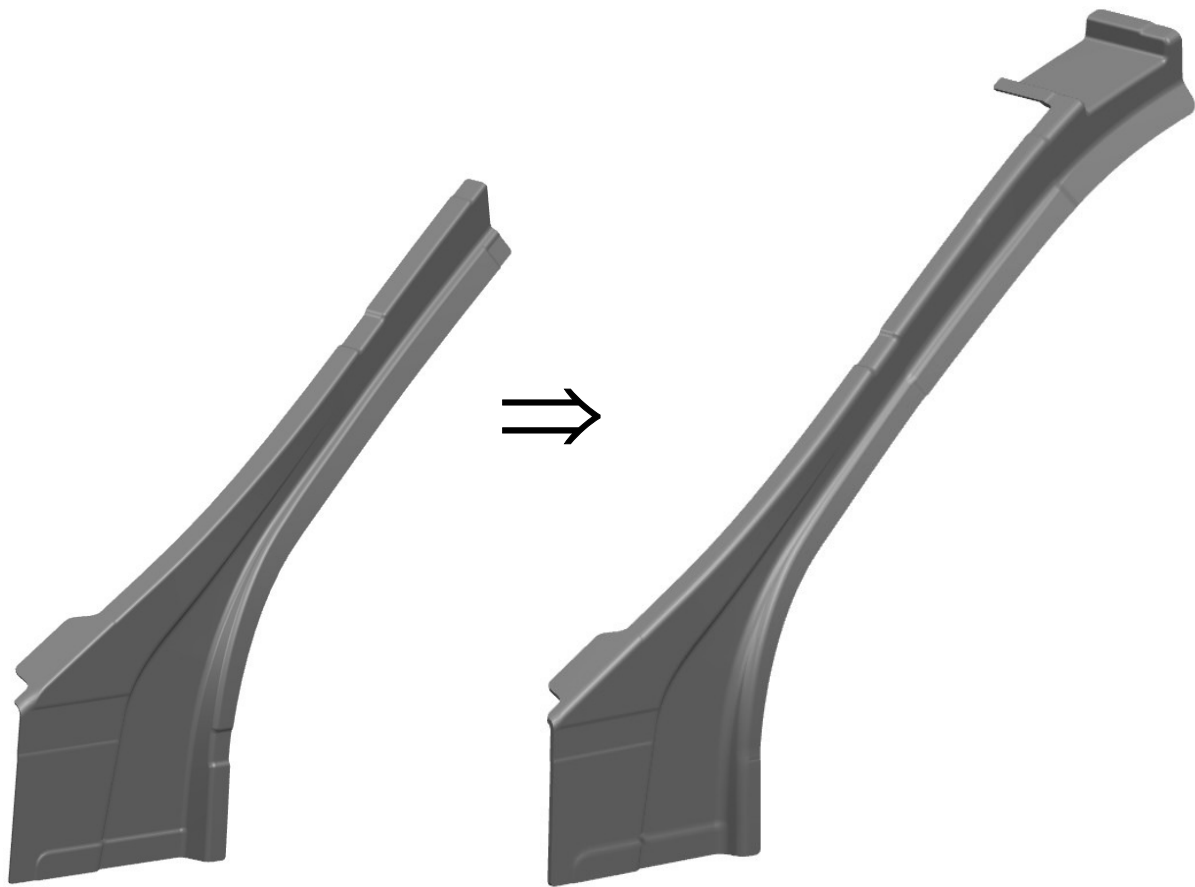
6.2 Varianta kabrio

Druhou z dalších posuzovaných variant je varianta kabrio. U této varianty odpadá veškerá další konstrukce a zůstává pouze A-sloupek a střešní příčník. V důsledku se tak již nejedná o A-sloupek, ale o okenní rám. Konstrukce byla v horní části začištěna vytvoření nové dosedací plochy. Výsledné řešení je na obr. 97.



obr. 97: sestava kabrio

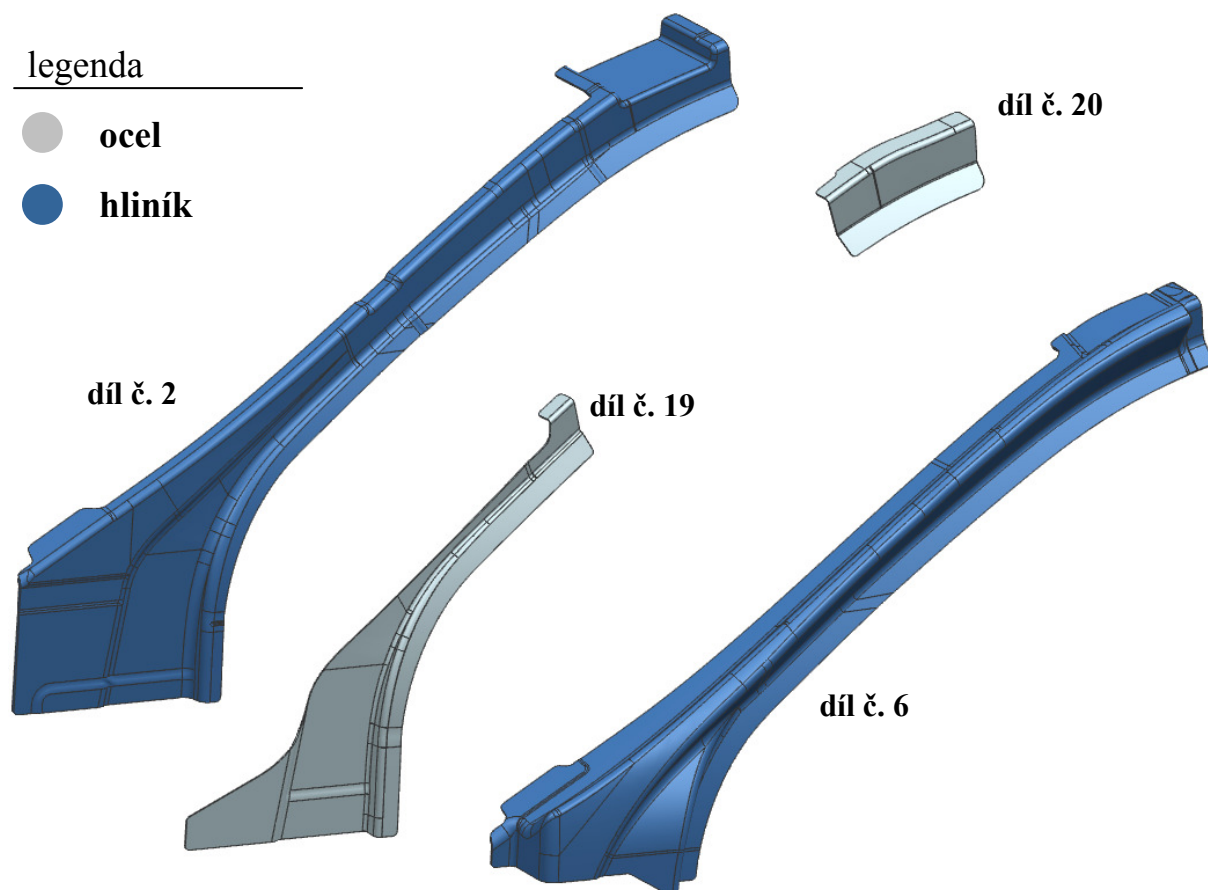
Pro tuto variantu již není vhodné dělit vnitřní díl A-sloupku na dvě části. Naopak je výhodné z hlediska pevnosti i nákladů spojit díl č. 2, 16 a část dílu 3 do jednoho výkovku. Spojením těchto dílů dohromady tak vznikl nový kovaný díl. To si vyžádalo kompletní překonstruování tohoto dílu.



obr. 98: změna dílu č. 2 - sloučení s dalšími částmi konstrukce

Takovéto řešení stále poskytovalo velmi nízkou tuhost a pevnost. Bylo proto potřeba přikročit k dalším rozsáhlejším úpravám. Docházelo ke kumulaci napětí zejména v dolní oblasti A-sloupku. K velkým deformacím a ztrátě tuhosti docházelo také v horním rohu v oblasti spoje se střešním obloukem, který je zároveň stlačován. Reakcí na tyto nedostatky bylo doplnění A-sloupku ocelovou výztuhou tloušťky 1,5 mm v dolní části (nově vzniklý díl č. 19) a ocelovou patkou tloušťky 1,4 mm v horním rohu (nový díl č. 20). Ta zabraňuje nežádoucímu borcení rohu, který měl za následek nevhodné roznášení napětí po konstrukci. Posíleny byly i části pod A-sloupkem, tj. díly č. 1 a 5.

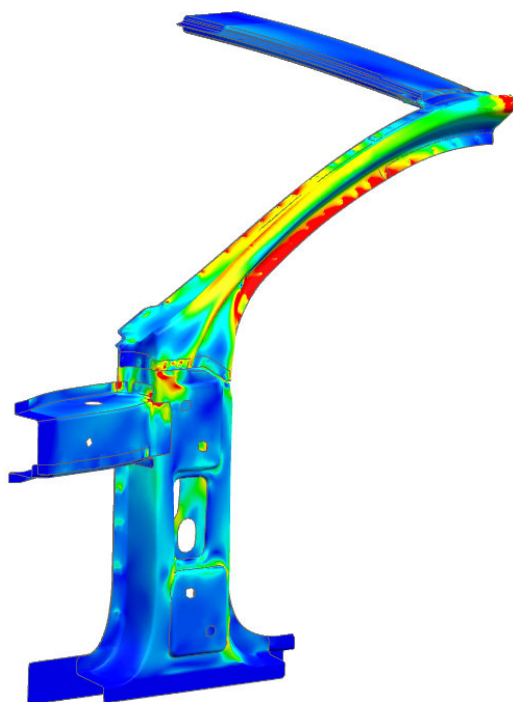
U verze kabrio bylo možné dále navýšit průřez vnějšího kovaného dílu A-sloupku (díl č. 6), neboť zde již není žádný spoj v horní ploše tohoto dílu. Díl je nově ukončen dosedací spojovací plochou, která zajistí spoj skrz všechny díly.



obr. 99: nově řešený A-sloupek pro verzi kabrio

Výsledné řešení této karosářské varianty bylo označeno jako 8B.

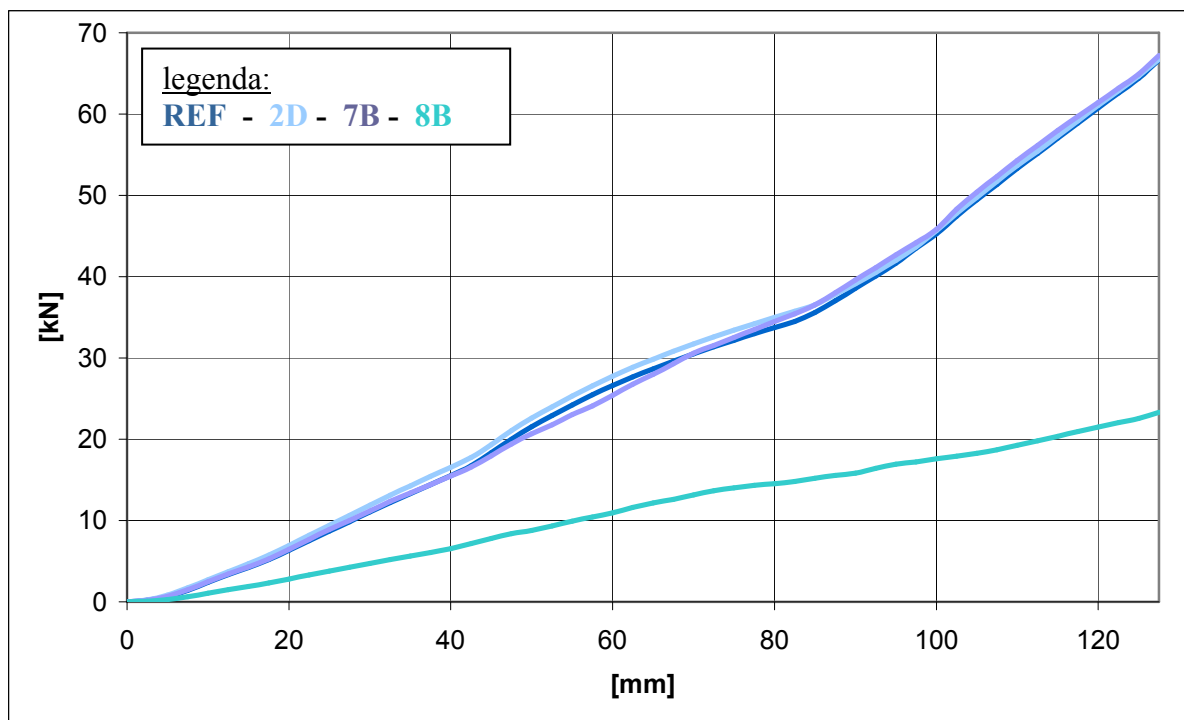
Výsledné rozložení napětí v konstrukci kabria je vidět z obrázku 100.



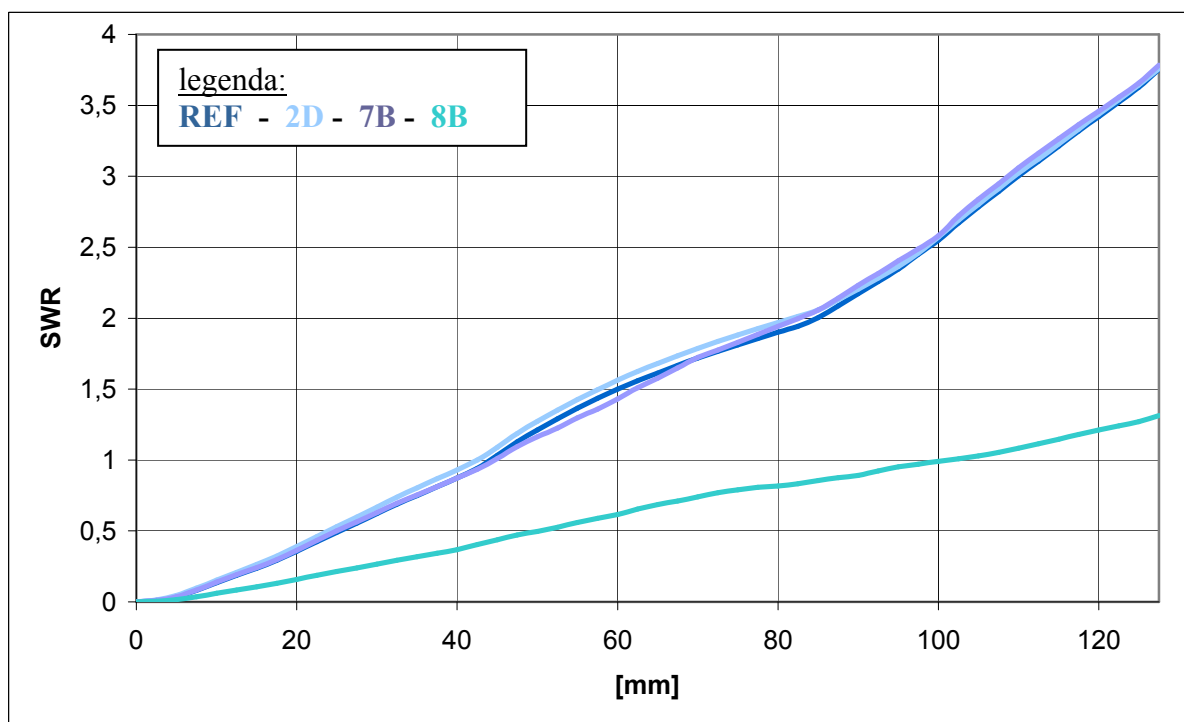
obr. 100: celkový pohled na konstrukci - napětí dle Von-Mises

6.3 Zhodnocení karosářských variant

Hodnocení dalších karosářských variant probíhalo podle již známé metodiky z předchozích kapitol. Křivky výsledné síly a koeficient SWR je uveden na následujících grafech.



obr. 101: síla v závislosti na posuvu desky



obr. 102: koeficient SWR v závislosti na posuvu desky

Z grafů je patrné, že varianta 7B, tedy **MPV**, dosáhla obdobných výsledků jako předchozí varianty. Průběh křivky se liší pouze v její střední části, kde již není patrný vliv B-sloupku, který byl odstraněn.

Varianta 8B (**kabrio**) nedosáhla porovnatelných hodnot. A to navzdory výraznému posílení dílů a vyztužení ocelovými výztuhami. Hodnoty jsou tak nízké, že ani mírné zvětšení zástavbového prostoru (tedy zvětšení celého sloupku a tím zhoršení užitečných vlastností vozu) by nevedlo k dosažení cíle. Je tedy zřejmé, že není možné konstruovat A-sloupek pro kabrio z hliníkové slitiny. Hlavní příčinou je zde zřejmě vysoká tažnost hliníku, resp. nízký modul pružnosti v tahu E, který je přibližně třetinový oproti oceli. A-sloupek tak nemá tuhost a snadno se poddává stlačovací desce. A-sloupek má u kabria navíc i velkou snahu k ohýbání podle podélné osy směrem dovnitř vozu. To je důsledkem náklonu desky v kombinaci s chybějícím uzavřením struktury. Zanedbáme-li střešní příčník, jedná se v podstatě o vetknutý nosník.

Rozdíl mezi kabriem a ostatními verzemi je rovněž patrný na průběhu křivky, kdy kabrio zkraje dosahovalo více než 45% síly referenční varianty. Na 127,5 mm byl výsledek již pouze 34,96%.

Výsledné koeficienty SWR:

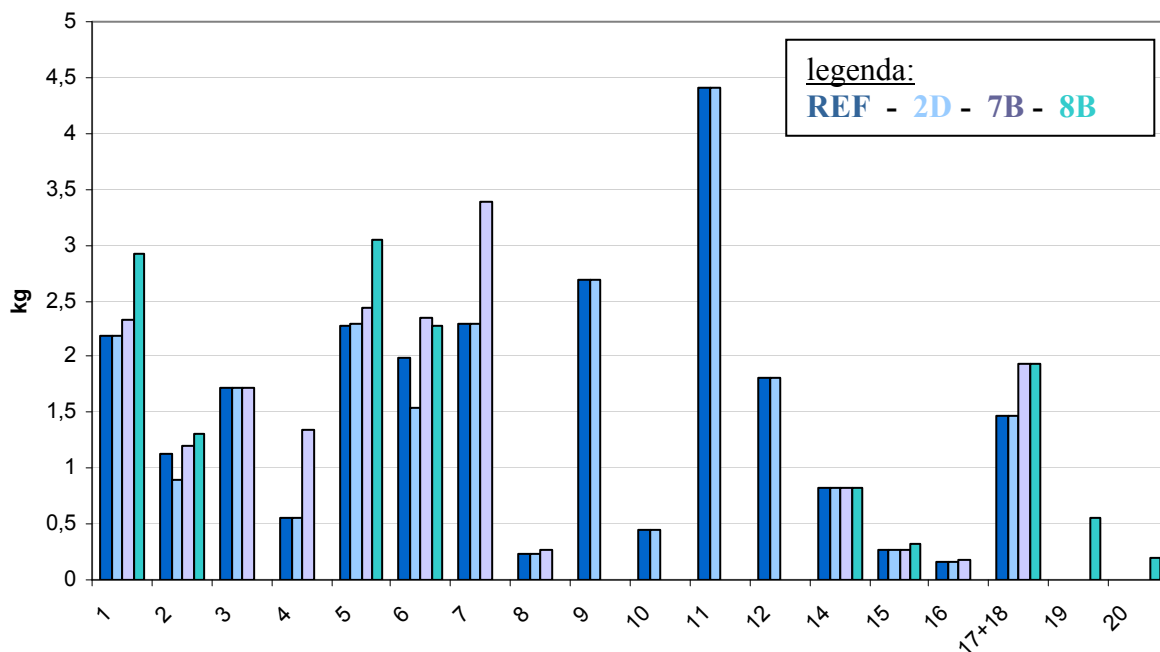
Varianta REF - 3,753

Varianta 2D - 3,759

Varianta 7B - 3,785

Varianta 8B - 1,312

Hmotnostní hledisko je nejlépe možné porovnat dle grafu zobrazujícího hmotnosti jednotlivých dílů:



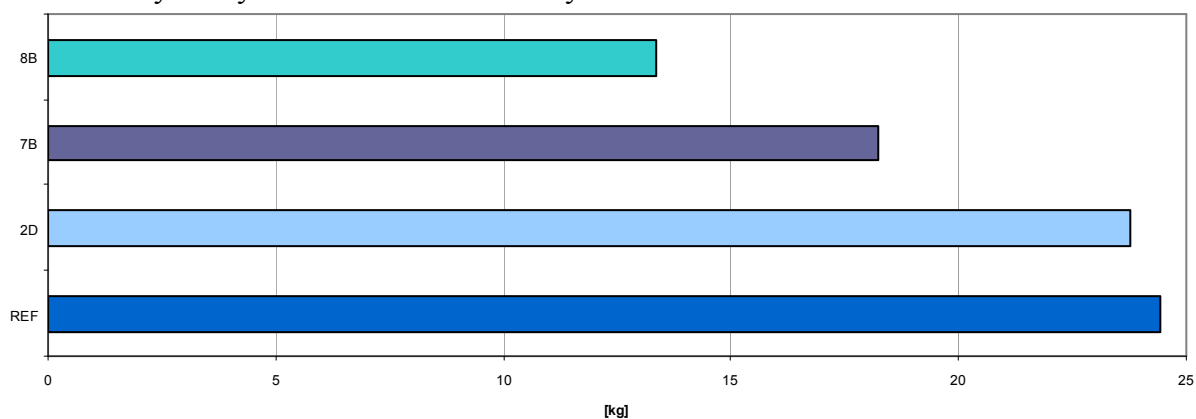
obr. 103: graf hmotností jednotlivých dílů

Hmotnosti všech dílů pro všechny varianty jsou v tabulce 15.

Varianta	REF	2D	7B	8B
Díl 1	2,1842	2,1843	2,3349	2,9125
2	1,1334	0,9009	1,209	1,3041
3	1,718	1,7123	1,7196	0
4	0,5586	0,5586	1,3382	0
5	2,2733	2,2874	2,4401	3,052
6	1,9873	1,5498	2,3515	2,2698
7	2,2851	2,2956	3,379	0
8	0,2311	0,2311	0,2641	0
9	2,6831	2,6831	0	0
10	0,443	0,443	0	0
11	4,4001	4,4001	0	0
12	1,8143	1,8143	0	0
14	0,8211	0,8211	0,8211	0,8211
15	0,2695	0,2695	0,2695	0,3233
16	0,155	0,155	0,1817	0
17+18	1,4746	1,4746	1,944	1,944
19	0	0	0	0,551
20	0	0	0	0,2006
CELKEM:	24,4317	23,7807	18,2527	13,3784

tab. 15: porovnání hmotností jednotlivých dílů, veškeré hodnoty v kg

Porovnání výsledných hmotností celé sestavy:



obr. 104: porovnání hmotností sestav pro jednotlivé karosářské varianty

U varianty 2D, tedy užitím hliníku na A-sloupek u **stávajícího vozidla**, je dosažena úspora hmotnosti **0,65 kg**.

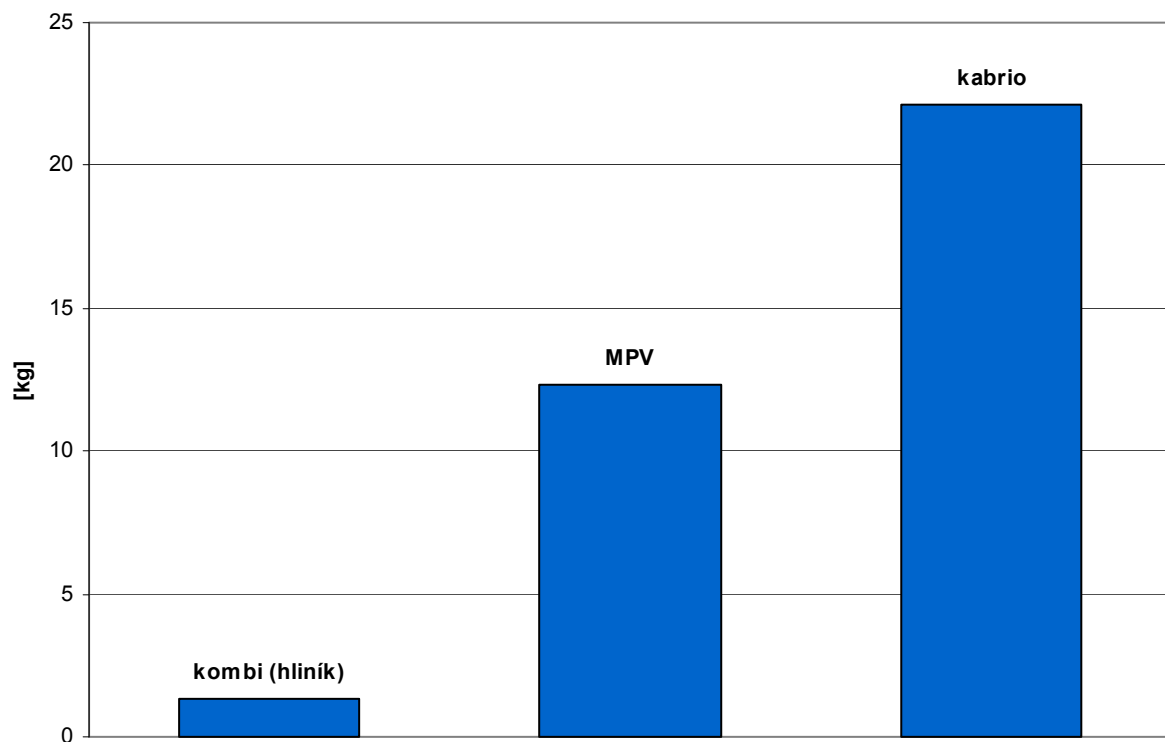
Pro verzi **MPV (7B)** bylo třeba posílit mnoho částí, avšak hmotnostní úspora odstraněním B-sloupku byla mnohem výraznější. Došlo k poklesu hmotnosti o **5,53 kg**, resp. **6,18 kg** oproti původní referenční variantě. Důvodem takto velkého poklesu je velké množství "mrtvé hmoty" v dolní části B-sloupku. To je dobře vidět z obr. 59 na str. 46. Je však nutné dodat, že tato hmota má zde svůj účel zejména pro boční nárazy a tzv. náraz na sloupek. Bude tak nutné

významně posílit dveře vozidla. Tím zcela jistě dojde ke značnému hmotnostnímu nárůstu této varianty.

Varianta **kabrio** (8B) dosáhla největších úspor hmotnosti (- **11,05 kg** oproti referenčnímu vozidlu). Ovšem je nutné dodat, že nebyla dosažena dostatečná tuhost a varianta je tak z hlediska metodiky IIHS **NEVYHOVUJÍCÍ**. Použití hliníku na A-sloupek resp. kabrio zřejmě není možné a je třeba zůstat u dnes používaných vysokopevnostních ocelí, příp. hledat nové materiály.

Závěrem je třeba dodat, že z hlediska celkového pohledu na výsledné vozidlo je třeba **všechny hmotnosti násobit dvěma, neboť byla vždy uvažována pouze polovina vozidla**.

Graf zobrazuje hmotnostní úsporu pro celé vozidlo oproti referenčnímu vozidlu:



obr. 105: hmotnostní úspora pro jednotlivé karosářské varianty vztažená k referenčnímu vozidlu

7 Závěr

Práce v úvodní části popisuje A-sloupek, referenční konstrukční řešení karoserie a hlavní sounáležitosti potřebné pro návrh karoserie.

V první části (kapitola 5) práce představuje návrh použití hliníkové slitiny na konstrukci A-sloupku osobního vozidla. V této části je cílem provedení srovnání konvenčního řešení a nově navrhovaného řešení s použitím hliníkového výkovku na konstrukci A-sloupku. Po nastínění problematiky konstrukce hliníkových dílů a vytvoření předpokladů pro řešení se tato kapitola soustřeďuje na hledání optimálního řešení. Výsledné řešení je pak srovnáváno s referenčním řešením v různých aspektech. Mezi ně patří jak konstrukční hlediska, tak provozní (výhled z vozu), ale zcela jistě i hledisko ekonomické. V této části je rovněž nastíněn výrobní postup.

V druhé části (kapitola 6) je provedeno srovnání jednotlivých karosářských variant. Z výsledků vyplývá, že pro verzi MPV je možné dosáhnout zajímavých hmotnostních úspor. Ty lze ještě navýšit kompletním přepracováním střešního oblouku. Je samozřejmé, že tato varianta si vyžádá zcela novou konstrukci dveří. Ty budou nově konstrukčně náročnější z hlediska bezpečnosti proti bočnímu nárazu. U varianty kabrio je A-sloupek, resp. v tomto případě okenní rám, extrémně namáhán. Pro tuto variantu se ukázalo použití hliníku jako krajně nevhodné. Lze tak doporučit setrvání u vysokopevnostních ocelí.

K práci je přiložena výkresová dokumentace obsahující výrobní výkres kovaného dílu (díl č. 6) a jeho umístění v nosné struktuře karoserie vozidla - část podsestavy "vnější část bočnice", viz. str. 40).



obr. 106: celkový pohled na sestavu, varianta 2D

8 Seznam použité literatury

- [1] E90 drawing (editable) [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.e90post.com/forums/showthread.php?t=111135>
- [2] Chevrolet Impala 1961. Wikimedia [online]. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1961_Chevrolet_Impala_\(15920842667\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1961_Chevrolet_Impala_(15920842667).jpg)
- [3] Volkswagen Passat B1. Autocentrum.pl [online]. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: <http://www.autocentrum.pl/volkswagen/passat/b1/>
- [4] VW Passat B8 2015 - details. Pultag.org [online]. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: http://paultan.org/2014/07/04/2015-volkswagen-passat/db2014a102945_large-jpg/
- [5] VW Passat B1 (typ 33). Flickr.com [online]. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/21532948@N04/4685998852>
- [6] VW Passat B8 2015. Autoforum.cz [online]. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/testy-aut/prvni-test-vw-passat-b8-2015-dale-kralem/obrazek/163>
- [7] Roof Strength Test Protocol. Insurance Institute for Highway Safety [online]. 2012 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: http://www.iihs.org/media/46940e89-46cb-4e6e-81ee-8230bb3b5dd9/-813775174/Ratings/Protocols/current/test_protocol_roof.pdf
- [8] U.S. Government Publishing Office [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: http://www.ecfr.gov/cgi-bin/textidx?SID=7d443eb75ceba033fed91e90f816b574&node=se49.6.571_1216&rgn=div8
- [9] IIHS Details Roof Strength Tests in Latest Video. AutoGuide [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://www.autoguide.com/auto-news/2013/05/iihs-details-roof-strength-tests-in-latest-video.html>
- [10] VLK, František. Karosérie motorových vozidel: ergonomika : biomechanika : pasivní bezpečnost : kolize : struktura : materiály. Brno: VLK, 2000. ISBN 80-238-5277-9.
- [11] A-pillars. Cargocollective.com [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://cargocollective.com/cbmartin/A-Pillar-Re-Design>
- [12] E39 530d BODY-SIDE FRAME [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.realoem.com/bmw/enUS/showparts?id=DL71-EUR-04-2002-E39-BMW-530d&diagId=41_0050
- [13] 2007 Porsche Cayenne. TopSpeed.com [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.topspeed.com/cars/porsche/2007-porsche-cayenne-ar17066.html>
- [14] Audi A5 Sportback BIW UHSS. Boron Extrication [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.boronextrication.com/2009/04/18/audi-a5-sportback-biw-uhss/>

- [15] Audi Q5 – Body Structure Materials (BIW). Boron Extrication [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.boronextrication.com/2010/04/18/audi-q5-body-structure-materials-biw/>
- [16] A-pillar. [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://shiloh.com/wp-content/plugins/portfolio-slideshow-pro/inc/popup/popup.php?id=491&wh=625&ww=625&carouselsize=4>
- [17] Steels for hot stamping -Usibor. Automotive Worldwide ArcelorMittal [online]. 2014 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/E_EN.pdf
- [18] Obrázek. Eurochopshop.com [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <https://eurochopshop.com/store/wp-content/uploads/2014/12/XAHC040a.jpg>
- [19] Renault Espace. Renaultpmj.cz [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://www.renaultpmj.cz/espace>
- [20] Concept Model-Making. Dangar Engineering & Mfg. [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://www.dangar.com/brochure12.htm>
- [21] Toyota-ft-86-concept1. Automotiveaddicts.com [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://www.automotiveaddicts.com/wp-content/uploads/2009/10/toyota-ft-86-concept1.jpg>
- [22] Material and process charts [online]. Cambridge UK, 2009 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/2_materials-charts-2009.pdf
- [23] Advanced High Strength Steels for Cars. AZO Materials [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11250>
- [24] 2014 Acura RLX Sport Hybrid. Boron Extrication [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.boronextrication.com/2014/12/25/2014-acura-rlx-sport-hybrid/>
- [25] VLK, František. Stavba motorových vozidel: [osobní automobily, autobusy, nákladní automobily, jízdní soupravy, ergonomika, biomechanika, struktura, kolize, materiály]. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8757-2.
- [26] Ultra Light Steel Auto Body [online]. Porsche Engineering Services, Inc., 1998 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Programs/ULSAB/ulsab_eng_rpt_complete.pdf
- [27] ULSAB. World Auto Steel [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/projects/ulsab/>
- [28] Tvářecí a výrobní procesy ve stavbě lehkých karoserií. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tvareci-a-vyrobní-procesy-ve-stavbe-lehkych-karoserii.html>
- [29] Focus B-pillar 'tailor rolled' to 8 different thicknesses. SAE International [online]. [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://articles.sae.org/7695/>

- [30] Application of Tailor Rolled Blank in Vehicle Front End for Frontal Impact. SAE International [online]. [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2007-01-0675/>
- [31] The future for steel in the automotive industry. Repairer Driven News [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.repairerdrivennews.com/2015/07/08/steel-debate-guest-column-the-futurefor-steel-in-the-automotive-industry/>
- [32] VACÍK, Jiří. Přehled středoškolské chemie. 4. vyd., v SPN - pedagogickém nakl. 2. vyd. Praha: SPN - pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-7235-108-7.
- [33] Svařitelnost hliníkových slitin. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-hlinikovych-slitin.html>
- [34] Stránky Ifaster [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://ifaster.cz/hlinik-se-odstehoval-do-audi-pred-dvaceti-lety/>
- [35] Stránky ETG [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: http://www.euro-t-guide.com/See_Coun/Germany/D_S/D_See_Audi_Museum_8-1.htm
- [36] Audi Technology Portal [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.audi-technology-portal.de/en/body/aluminium-bodies/new-audi-space-frame-with-high-proportions-of-aluminum-and-cfrp>
- [37] Forming Lightweight Materials for High Volume Production: Aluminium Focus. Global Automotive Lightweight Materials [online]. 2013 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.global-automotive-lightweight-materials.com/media/downloads/111-1400-simon-black-jaguar-land-rover.pdf>
- [38] ULSAB-AVC. M.blog.naver.com [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://m.blog.naver.com/mockory/108129771>
- [39] Hydroforming. Wikipedia [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydroforming>
- [40] ČECH, Jaroslav a Ivo JUŘIČKA. POUŽITÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN VE SLÉVÁRENSTVÍ. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [online]. BRNO: VUT FS, 2004 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: http://www.explat.cz/files/pouziti_mg_slitin_ve_slevarenstvi.pdf
- [41] HROUDA, Vladimír. SLITINY HOŘČÍKU A JEJICH APLIKACE VE VELOPRŮMYSLU. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [online]. BRNO: VUT FS, 2010 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=31401
- [42] GSCHEIDLE, Rolf. Příručka pro automechanika. 3., přeprac. vyd. Překlad Iva Michňová, Zdeněk Michňa, Jiří Handlíř. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-17-7

- [43] Phosphating Process in Automotive Paint Shops. Paintstuffworks [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <https://www.paintstuffworks.com/phosphating-in-automotive-paint-shops/>
- [44] Resistance Welding. Substech.com [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=resistance_welding_rw
- [45] BMW Leipzig. Wikimedia [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/67/BMW_Leipzig_MEDIA_050719_Download_Karosseriebau_max.jpg
- [46] Nýt. Wikipedie [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Nýt>
- [47] Clinching přináší možnosti spojování plechů za studena. MM Průmyslové spektrum[online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/clinching-prinasi-moznosti-spojovani-plechu-za-studena.html>
- [48] Mechanické tváření za studena vs. spojování za tepla. Digitovarna.cz [online]. [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/materialove-a-energeticky-nenarocne-spojovani.html>
- [49] EJOT FDS® - Flow drilling screw. Ejot & Avdel System AB [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.ejot-avdel.se/sv/product/show/262>
- [50] EJOT Vibration-resistant screw. DirectIndustry [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/ejot/product-18890-885075.html>
- [51] New Technology to Join Steel and Aluminum with World's First Application to the Door Panel of Mass Production Vehicles. Honda Worldwide [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://world.honda.com/news/2013/4130218New-Technology-Join-Steel-Aluminum/>
- [52] Audi A4 - vše vpředu nově. Auto.cz [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/audi-a4-vse-vpredu-nove-1684>
- [53] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁŠ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. Encyklopedie hliníku. Prešov: Adin, s. r. o., 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [54] Aluminium Alloy Plate Material. Cgsdigital.com [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: http://img.cgsdigital.com/nimg/5b/e2/a25160afbe20438c8d8e0067d936-600x600-0/inside_diameter_505mm_polished_aluminium_sheet_aluminium_alloy_plate_material.jpg
- [55] 6061-T6 aluminum is a type of 6061 aluminum. MakeItFrom.com [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/6061-T6-Aluminum/#Intro>
- [56] Aluminum 6061-T6; 6061-T651. ASM [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T6>

[57] Understanding Extruded Aluminum Alloys. Astro.caltech.edu [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: http://www.astro.caltech.edu/sedm/_downloads/Extruded_Alloy_6061.pdf

[58] MaterialData_9391_Al-6061.pdf, Aluminum 6061-T6; 6061-T651. Amet-me.mnsu.edu[online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: http://amet-me.mnsu.edu/userfilesshared/DATA_ACQUISITION/mts/MaterialData/MaterialData_9391_Al-6061.pdf

[59] Tucker SPRs. STANLEY® Engineered Fastening [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://www.emhart.eu/eu-en/products-services/products-by-category/mechanical-joining/SPR-rivets.php>

[60] Veličiny charakterizující geometrii ploch. kme.zcu.cz [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: http://www.kme.zcu.cz/kmet/ppe/teorie/02_chhap_02.pdf

[61] Forging of Aluminum Alloys. Materialsdata.nist.gov [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <https://materialsdata.nist.gov/dspace/xmlui/bitstream/handle/11115/223/Forging%20of%20Aluminum%20Alloys.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[62] Forging Materials: Aluminum Alloys. Google.cz [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: https://www.google.cz/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.forgemag.com%2Fext%2Fresources%2FForge%2FHome%2FImages%2Ffg0512-materials-fig2-lg.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.forgemag.com%2Farticles%2F83807-forging-materials-aluminum-alloys&docid=miVIvmCmXmDtXM&tbnid=--d07fa919mvmB%3A&w=800&h=238&ved=0ahUKEwi3tM3blv3LAhXMA5oKHcmIDLwQMwg_KBkwGQ&iact=mrc&uact=8

[63] Stanznieten mit Halbhohlnieten. TOX® PRESSOTECHNIK GmbH & Co. KG [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.tox-de.com/verfahren/fuegen-mit-elementen/halbhohlstanznieten/>

[64] BMW 318i E46 - 1998-2005. Supercheap Auto [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://www.supercheapauto.com.au/parts-for-your-car/BMW/318i-e46.aspx>

[65] VOLKSWAGEN reference point system. Delta-mold.com [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: [http://www.delta-mold.com/FTP/VOLKSWAGEN reference point system.pdf](http://www.delta-mold.com/FTP/VOLKSWAGEN%20reference%20point%20system.pdf)

9 Seznam použitého software

- Dassault Systèmes Catia V5
- Microsoft Excel 2000
- Microsoft Word 2000
- Paint Shop Pro X7
- Siemens NX 8.5

10 Přílohy

10.1 Příloha 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
List v Simulation - Part6_igs_fem2_sim1.sim														
1	Optimization History													
2	Based on Altair HyperOpt													
3														
4	Design Objective Function Results													
5	Minimum Weight [N]													
6	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
7	16,34264	16,75858	16,70044	15,98427	16,22498	16,33663	14,63607	14,53347	14,62132	14,72288				
8	Design Variable Results													
9	Name													
10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
11	6	6,8	6	6	6	6	4,74	5,126369	5,271507	5,486974				
12	2	2	2,2	2	2	2	2	2	2	2				
13	5	5	5	4,6	5	5	4,1	3,726	3,68	3,634				
14	8	8	8	8	9,2	8	9,52	9,6	9,68	9,76				
15	10	10	10	10	10	10	10,08	10,2	9,825667	9,8				
16	Design Constraint Results													
17	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
18	Result Measure													
19	272,36	262,71	269,11	276,45	272,94	272,56	318,89	341,75	330,83	361,51				
20	Upper Limit = 310,000000 [N/mm ² (MPa)]													
21	Maximum number of iterations reached, no convergence.													
22														
23														
24														
Optimization Objective "Part6_igs" p561=5 / "Part6_igs" p621=2 / "Part6_igs" p622=5 / "Part6_igs" j														

10.2 Příloha 2

