

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

**Simulace impaktu bateriového boxu
vozidla SCX 3.5**

Simulation of impact of the battery box of
the vehicle SCX 3.5

Student:

Bc. Filip Zaoral

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Fusek, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Filip Zaoral**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Simulace impaktu bateriového boxu vozidla SCX 3.5**
Simulation of Impact of the Battery Box of the Vehicle SCX 3.5
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rozpracujte teorii potřebnou pro řešení (pozn.- normy, realizace impaktní zkoušky,...)
2. Vytvořte model. Sestavte soubor potřebných vstupních dat.
3. Proveďte řešení a vyhodnocení ve vhodném MKP software.
4. Srovnajte výsledky modelu s dostupnými experimentálními daty. Vyvoďte závěry a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L.: The Finite Element Method (Volume 1 - 3), Butterworth-Heinemann, Oxford 2000, ISBN 0-7506-5049-4
- [2] Jones, N.: Structural Impact, Cambridge University Press, 2003, ISBN 0 - 521 - 30180 - 7.
- [3] Němec, J., Dvořák, J., Höschl, C.: Pružnost a pevnost ve strojírenství, Technický průvodce 69, SNTL, Brno, 1989.
- [4] Bittnar, Z., Šejnoha, J.: Numerické metody mechaniky 1, Vydavatelství CVUT, Praha, 1992.
- [5] Lenert, J.: Úvod do metody konečných prvků, VŠB – TU Ostrava, 1999, ISBN 80 – 7078 – 686 – 8
- [6] Macura, P.: Experimentální metody v pružnosti a plasticitě, VŠB – TU Ostrava, 2001, ISBN 80-7078-934-4

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Fusek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 15. května 2016



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 15. května 2016



.....
Podpis autora práce

Filip Zaoral

Albrechtická 41a, 794 01, Krnov

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ZAORAL, F. *Simulace impaktu bateriového boxu vozidla SCX 3.5: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2017, 73 s. Vedoucí práce: Fusek, M.

Předložená práce se zabývala numerickou simulací reálné zkoušky, jejímž účelem bylo zkoumat celistvost bateriového boxu vozidla SCX 3.5 v případě bočního nárazu do vozidla. V první části této práce byla provedena rešerše na téma teorie potřebné k řešení. Ve druhé části byl vytvořen výpočtový model a provedena vlastní numerická simulace, a to prostřednictvím metody konečných prvků v prostředí komerčních programů MSC Patran a MSC Marc Mentat. V poslední části byla popsána samotná realizace skutečné zkoušky. Závěrem této práce bylo provedeno zhodnocení výsledků numerické simulace.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ZAORAL, F. *Simulation of impact of the battery box of the vehicle SCX 3.5: Master Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2017, 73 p. Thesis head: Fusek, M.

Submitted thesis dealt with a numerical simulation of a real test, whose purpose was to examine a structural integrity of the battery box of the vehicle SCX 3.5 in case of side impact to the vehicle. In first part of this thesis there was conducted a background research on topic of theory necessary for a solution. An analysis model was created and numerical simulation itself was realized in second part, in a user environment of commercial software MSC Patran and MSC Marc Mentat. In last part, an execution of the real test was described. In conclusion of this thesis there was done an evaluation of results of the numerical simulation with the results of the real test.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
Úvod.....	9
1 Současný stav řešené problematiky	11
1.1 Rizika specifická pro elektrická vozidla	11
1.2 Stavba baterií elektrických vozidel	12
1.3 Bezpečnostní hlediska v návrhu energetických úložišť	14
1.4 Přehled současného vývoje na poli baterií elektrických vozidel	15
2 Nelineární úlohy mechaniky	18
2.1 Geometrické nelinearity	19
2.2 Materiálové nelinearity	20
2.3 Kontakty	22
3 Výpočtový model.....	23
3.1 Geometrie	23
3.2 Materiálové vlastnosti	32
3.3 Konečno-prvková síť.....	34
3.4 Okrajové podmínky a kontakty	42
4 Analýza a výsledky	47
4.1 Posuvy	47
4.2 Napětí	56
5 Experimentální část.....	65
6 Závěr	67
7 Poděkování.....	69
8 Seznam použité literatury	70

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
U_c	Napětí na bateriovém článku	[V]
U_M	Napětí na elektrickém motoru	[V]
U_m	Napětí na bateriovém modulu	[V]
E_m	Energetická kapacita modulu	[kW · h]
m_p	Hmotnost bateriového packu	[kg]
E_p	Energetická kapacita bateriového packu	[kW · h]
V_p	Objem bateriového packu	[l]
θ_p	Objemová energetická hustota bateriového packu	[W · h/l]
μ_p	Hmotnostní energetická hustota bateriového packu	[W · h/kg]
t_3	Tloušťka plechu (3 mm)	[mm]
t_2	Tloušťka plechu (2 mm)	[mm]
t_4	Tloušťka plechu (4 mm)	[mm]
$t_{1,5}$	Tloušťka plechu (1,5 mm)	[mm]
t_5	Tloušťka plechu (5 mm)	[mm]
t_{10}	Tloušťka plechu (10 mm)	[mm]
E^0	Modul pružnosti v tahu konstrukční oceli S 355	[MPa]
μ^0	Poissonovo číslo konstrukční oceli S 355	[-]
R_e^0	Mez kluzu v tahu konstrukční oceli S 355	[MPa]
R_m^0	Mez pevnosti v tahu konstrukční oceli S 355	[MPa]
A^0	Tažnost konstrukční oceli S 355	[%]
E_T^0	Plastický (tečný) modul konstrukční oceli S 355	[MPa]
E^{H22}	Modul pružnosti v tahu slitiny hliníku 5083-H22	[MPa]
μ^{H22}	Poissonovo číslo slitiny hliníku 5083-H22	[-]
$R_{p\ 0,2}^{H22}$	Smluvní mez kluzu v tahu slitiny hliníku 5083-H22	[MPa]
R_m^{H22}	Mez pevnosti v tahu slitiny hliníku 5083-H22	[MPa]
A^{H22}	Tažnost slitiny hliníku 5083-H22	[%]

Symbol	Význam	Jednotka
E_T^{H22}	Plastický (tečný) modul slitiny hliníku 5083-H22	[MPa]
E^{H111}	Modul pružnosti v tahu slitiny hliníku 5754-H111	[MPa]
μ^{H111}	Poissonovo číslo slitiny hliníku 5754-H111	[-]
$R_{p0,2}^{H111}$	Smluvní mez kluzu v tahu slitiny hliníku 5754-H111	[MPa]
R_m^{H111}	Mez pevnosti v tahu slitiny hliníku 5754-H111	[MPa]
A^{H111}	Tažnost slitiny hliníku 5754-H111	[%]
E_T^{H111}	Plastický (tečný) modul slitiny hliníku 5754-H111	[MPa]
h	Průměrný charakteristický rozměr konečného prvku sítě	[mm]
h'	Průměrný charakteristický rozměr konečného prvku sítě v místech se zjemněnou sítí	[mm]
F	Zatěžující síla	[N, kN]
F_{max}	Maximum zatěžující síly	[N, kN]
x	Posuv ve směru osy X globálního souřadného systému	[mm]
y	Posuv ve směru osy Y globálního souřadného systému	[mm]
z	Posuv ve směru osy Z globálního souřadného systému	[mm]
rx	Rotace okolo osy X globálního souřadného systému	[mm]
ry	Rotace okolo osy Y globálního souřadného systému	[mm]
rz	Rotace okolo osy Z globálního souřadného systému	[mm]
f_{hh}	Součinitel smyk. tření materiálové dvojice hliník-hliník	[-]
f_{ho}	Součinitel smyk. tření materiálové dvojice hliník-ocel	[-]
f_{oo}	Součinitel smyk. tření materiálové dvojice ocel-ocel	[-]
T	Teplota prostředí	[°C]
t_a	Doba nárůstu velikosti zatěžující síly z nuly na svou maximální hodnotu	[s]
t_b	Doba výdrže zatěžující síly na své maximální hodnotě	[s]
t_c	Doba pozorování	[h]
u_{max}	Maximální posuv v rámci celého modelu	[mm]
u_{max}^i	Maximální posuv v rámci konkrétní části bateriového boxu, i značí pořadové číslo části, viz Tab. 5	[mm]

Úvod

Historie moderního automobilismu má svůj počátek v 80. letech 19. století. V roce 1886 Karl Friedrich Benz dokončil historicky první automobil. Jednalo se o třístopé vozidlo, poháněné dvoudobým zážehovým jednoválcovým motorem. Na přelomu 20. století však mimo vozidel se spalovacími motory byla velice populární také vozidla elektrická. Již roku 1899 Camille Jenatzy v elektromobilu vlastní výroby, zvaném La Jamais Contente, viz Obr. 1, překonal rychlost 105 km/h. V září roku 1905 poté H. Krieger ve svém elektrickém voze zdárně uskutečnil jízdu Paříž – Trouville bez dobití akumulátoru^{1 2 3}.



Obr. 1 Camille Jenatzy ve voze La Jamais Contente².

Na našem území se vývoji elektromobilů věnoval zejména Ing. František Křižík. V roce 1895 zkonstruoval elektrický vůz, poháněný elektromotorem s výkonem 3,6 kW. U jeho následujícího elektromobilu byla jeho zadní kola poháněna zvlášť vlastním elektromotorem o výkonu 2.2 kW. V pořadí třetí zkonstruovaný vůz měl již hybridní pohon. Františku Křižíkovi tak nejspíše náleží prvenství za historicky první vůz s hybridním pohonem, a pokud toto prvenství nenáleží jemu, pak jej lze zcela jistě přisoudit jinému českému rodáku, Ferdinandu Porsche. I přes to se však vozidla s hybridním pohonem širšího uplatnění nedočkala^{2 4}.

Úpadek v užívání elektromobilů však přišel s vybudováním nových dlouhých silnic, kdy bylo zapotřebí vozidel s delším dojezdem. S objevem nových ložisek ropy dále klesla cena benzínu. Charles Kettering roku 1912 vynalezl elektrický startér a výrazně tím zjednodušil proces startování vozidel se spalovacími motory. Nakonec Henry Ford v Americe roku 1910 spustil sériovou výrobu vozidel se spalovacími motory za velice dostupné ceny. Elektromobily tak musely ustoupit vozidlům se spalovacím pohonem.

Nadále se však používaly pro některé vybrané činnosti. Elektrický pohon dodnes nalezneme u golfových, plošinových, anebo vysokozdvížných vozíků².

Vozidla s hybridním pohonem se naproti tomu dočkala svého vzkříšení až v roce 1997, kdy na tuto koncepci navázala japonská automobilka Toyota se svým modelem Prius a o rok později americká automobilka Chevrolet se svým vozem Volt. V posledních letech je však slovo elektromobil skloňováno čím dál častěji. O značný technologický pokrok v této oblasti se postarala zejména automobilka Tesla. Nejprve s modelem Roadster, jenž je schopen na jedno nabití akumulátorů urazit až 393 km a zrychlit z 0 na 97 km/h za 3,7 s. Mladší Model S však disponuje dojezdem až 426 km a maximální rychlostí 250 km/h^{4 5}.



Obr. 2 Sportovní kupé s elektrickým pohonem StudentCar SCX 3⁶.

Vývoj elektromobilů však probíhá také na půdě Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, a to konkrétně na Katedře materiálů a technologií pro automobily, Fakulty Metalurgie a materiálového inženýrství. Zde byl po několika různých prototypech vyvinut elektromobil StudentCar SCX 3 s pohonem všech čtyř kol, viz Obr. 2, o celkovém výkonu 220 kW a točivém momentu 1800 N. m, umožňujícím zrychlení z 0 na 100 km/h za 4,9 s. V současné době je zde vyvíjen sportovní automobil s hybridním pohonem SCX 3.5. Součástí tohoto vozidla je bateriový box, jehož účelem je nést a chránit baterie, potřebné pro provoz vozidla. V průběhu vývoje takového bateriového boxu je nutné provést řadu zkoušek dle příslušných norem, aby bylo zaručeno, že baterie nebudou představovat žádné riziko pro osoby uvnitř i vně vozidla, a to jak za provozu, tak i v průběhu případné havárie a po ní. Jednou z takovýchto zkoušek je zkouška mechanické integrity bateriového boxu v průběhu bočního nárazu do vozidla. Z důvodu existence jediného prototypu vyvíjeného bateriového boxu v době plánovaného provedení této zkoušky bylo napřed rozhodnuto o provedení počítačové simulace této zkoušky s užitím metody konečných prvků⁶.

1 Současný stav řešené problematiky

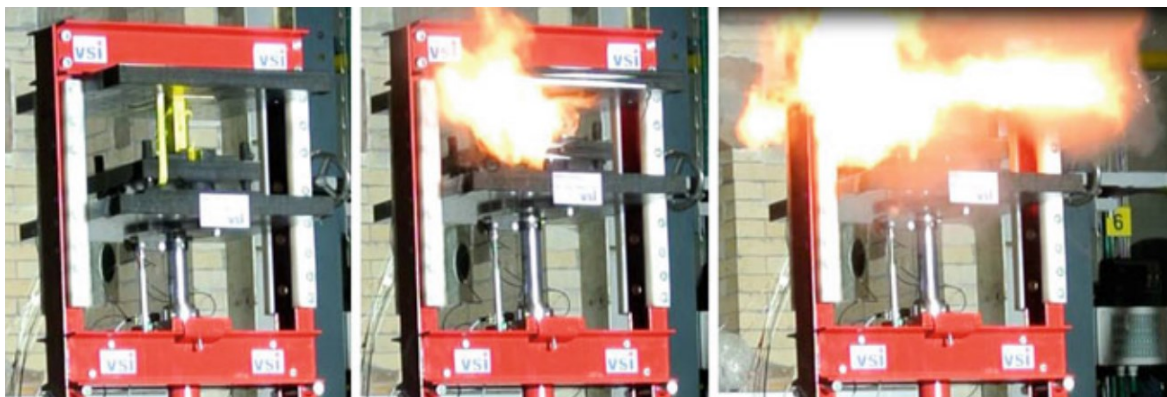
Snahy konstruktérů vyvinout elektromobil, který by svými výkonovými parametry a dojezdem konkuroval automobilům se spalovacími motory, se odrážejí v potřebě uchovávat velká množství elektrické energie, jakožto primárního zdroje energie pro tato vozidla. To si v současné době vynucuje spojování velkých množství lithium-iontových galvanických článků do bateriových modulů, jež se dále spojují a tvoří tzv. bateriové „packy“, kterým se někdy přezdívá také bateriové boxy. Jeden elektromobil tak může obsahovat hned několik takovýchto bateriových packů o celkové hmotnosti v řádech stovek kilogramů a zabírajících nemalý prostor. Jelikož deformace bateriového článku může vést k nebezpečným situacím (viz následující podkapitola), je jedním z cílů současného výzkumu zamezení jakékoliv významné deformace těchto článků v průběhu nárazových zkoušek a simulací. Toho lze dosáhnout dostatečně vysokou tuhostí bateriového boxu ve smyslu odolnosti vůči mechanické deformaci, k níž dochází v průběhu kolize vozidla s jiným vozidlem, stěnou, sloupem atp.⁷.

1.1 Rizika specifická pro elektrická vozidla

Je-li elektrický bateriový článek bezpečný a odolný vůči nárazu, pak to znamená, že po kolizi vozidla nevznikají na člancích nebezpečná napětí, nedochází k úniku plynů, vzniku přílišného tepla, nebo dokonce požáru a nemůže tak dojít ke vzniku dodatečných škod na vozidle, nebo okolí a že nehrozí další nebezpečí pasažérům, chodcům, nebo zasahujícím záchranářům. Toho může být dosaženo vhodným návrhem samotných galvanických článků, spolu s vhodným konstrukčním řešením bateriového boxu a jejich vhodnou implementací do návrhu vozidla jako celku⁷.

Nebezpečná napětí v řádech stovek Volt mohou vést ne jen ke zdravotní újmě lidí, nebo zvířat, ale také ke zkratům a jiskřením, která dále generují teplo a vyvolávají další nebezpečné jevy. Zkraty uvnitř aktivního materiálu bateriového článku, nebo vzájemný kontakt vodivých komponent s rozdílným elektrickým potenciálem, mohou způsobit vývin plynu z elektrolytu, což může vést až k odplynění či úniku vnitřních tekutin ze článku. Tyto uniklé tekutiny jsou hořlavé a mohou být i jedovaté a proto nesmějí přijít do styku s pasažéry. Nejhorším případem v případě kolize je kombinace unikajících tekutin z bateriových článků

s jiskřením a zvýšenou teplotou. Takováto kombinace může vést k požáru a exotermické reakci s nedomyslitelnými následky pro případné uvězněné pasažéry. Pro názornost je na Obr. 3 vyobrazena exotermická reakce jednoho samotného plně nabitého lithium-iontového kovo-oxidového galvanického článku, způsobená přílišnou deformací v laboratorních podmínkách⁷.



Obr. 3 Exotermická reakce jednoho plně nabitého bateriové článku z důvodu přílišné deformace, TU Graz, Vehicle Safety Institute⁷.

1.2 Stavba baterií elektrických vozidel

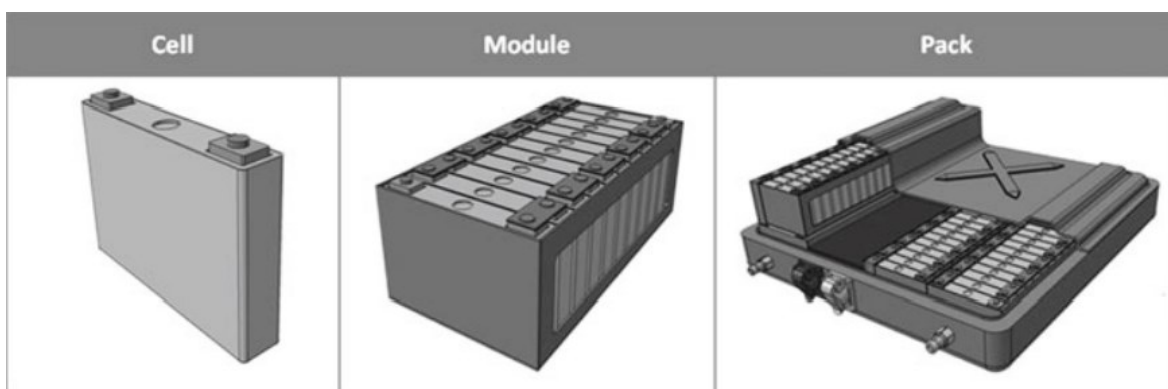
Bateriové články jsou základním stavebním kamenem baterií. Tři nejběžnější typy jsou články cylindrické, prizmatické a takzvané „pouch“, viz Obr. 4. Z důvodu jejich kovového pouzdra jsou články cylindrické a prizmatické odolnější vůči mechanickému namáhání nežli články typu „pouch“, ale jsou také těžší. Jejich plechové pouzdro bývá často vyrobeno z poměrně pevných hliníkových plátů, na rozdíl od polymerových obalů „pouch“ článků, jež svým vzhledem často připomínají čajový sáček. Takovýto bateriový článek svou vnitřní strukturou připomíná roládu (odtud anglické označení pro tuto koncepci „Jelly Roll“). Při výrobě článku se na tenkou vrstvu separátoru nanese vrstva, tvořící zápornou elektrodu (katoda). Na tuto vrstvu se opět nanese tenká vrstva separátoru, následovaná vrstvou, jež tvoří kladnou elektrodu (anoda). Po srolování vzniklého „souvrství“ se získá elektrochemický článek, jež spolu se sběrači proudu, póly, zmiňovaným pouzdem, izolací a bezpečnostním ventilem tvoří článek bateriový. Lithium-iontový článek běžně na svých pólech disponuje napětím přibližně $U_c \in \langle 2,5; 4,2 \rangle$ V v závislosti na chemickém složení, proudovém zatížení a stavu nabití. Jelikož motory elektrických vozidel pracují při napětí okolo $U_M \in \langle 200; 800 \rangle$ V, musí být pro jejich efektivní provoz sériově zapojeno hned

několik stovek kusů těchto článků. Bateriové články se uskupují do bateriových modulů z několika praktických důvodů, mezi něž patří zejména relativně malé elektrické napětí takového modulu ($U_m < 60 \text{ V}$) a malý objem a hmotnost, což usnadňuje manipulaci při výrobě i montáži^{7 8}.



Obr. 4 Tři hlavní typy bateriových článků, používaných v automobilovém průmyslu, zleva: cylindrický, prizmatický a typu „pouch“⁷.

Modulární stavba bateriových boxů dovoluje snížit množství rozdílných součástí a umožňuje navrhovat tyto packy pro splnění různých požadavků na hodnoty energetické kapacity, napětí a jiných konstrukčních požadavků, avšak vždy s využitím stejných základních modulů. Bateriový box obsahuje všechny články a moduly baterie. Také dále běžně obsahuje chlazení pro udržení článků v přípustném teplotním rozpětí a zařízení BMS (angl. battery management system, česky někdy nazýván balancér) hlídající napětí jednotlivých článků tak, aby při odběru elektrické energie z baterie napětí na žádném z článků nekleslo pod spodní hranici napětí (odpovídající tzv. hlubokému vybití) a aby naopak při nabíjení baterie napětí na žádném z článků nepřekročilo horní hranici napětí, neboť by tak mohlo dojít k trvalému poškození baterie. Na Obr. 5 jsou vyobrazeny základní konstrukční celky baterie s modulární stavbou^{7 8 9}.



Obr. 5 Modulové části baterie, zleva: bateriový článek, modul a pack, resp. box⁷.

Z důvodu bezpečnosti bývá bateriový box hermeticky uzavřen a vybaven odplyňujícími ventily, jež odvádějí případné plyny, vzniklé zplynatěním elektrolytu, pryč z bateriového boxu, avšak mimo prostor pro cestující. Bateriový subsystém tedy obsahuje vlastní bateriový box (pack), všechny elektrické kabely, zásuvky, zástrčky a senzory, situované napříč vozidlem, jež jsou nezbytné pro provoz baterie v systému vozidla jakožto celku⁷.

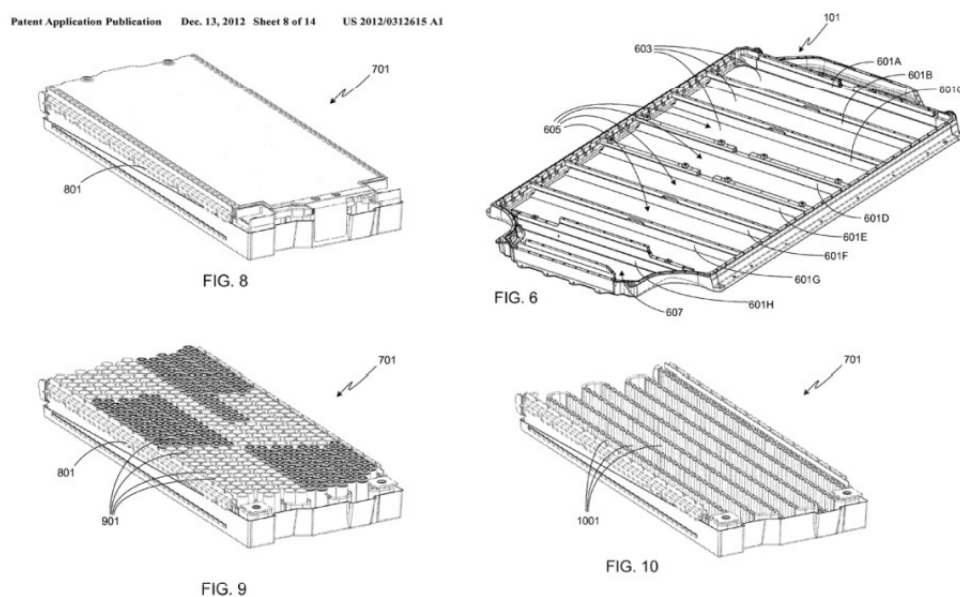
1.3 Bezpečnostní hlediska v návrhu energetických úložišť

Za účelem zvýšení bezpečnosti baterií při kolizích vozidel se musí předejít vzniku zkratů, či kontaktům katody s anodou v důsledku poškození separátoru, neboť mohou vést ke vzniku míst se zvýšenou teplotou (angl. hot spots) a k následné dekompozici elektrolytu za vzniku tepla a hořlavého a potenciálně také jedovatého plynu. Tudíž musejí být zkoumány vlivy, jež v bateriích způsobují výše popsané nežádoucí jevy a tomu patřičným způsobem přizpůsobit proces konstrukčního návrhu. Návrhové parametry na úrovni bateriového článku jsou velice omezeny požadavky souvisejícími s elektro-chemickým principem článku. Provedení pouzdra článku však má výrazný vliv jak na konečné konstrukční provedení bateriového modulu, tak i na charakteristiky poruch a selhání^{7 8}.

Bezpečnost bateriových modulů a boxů při kolizi i běžném provozu vozidel zůstává předmětem intenzivního vývoje. Zlepšení této bezpečnosti může být v současné době dosaženo patřičným návrhem pouzder bateriových článků, vodivých spojů a izolace. Cíle jsou zabránění možnému kontaktu nechráněných vodičů a vodivých spojů a omezení deformace bateriových článků na podkritickou úroveň. Konečně návrh geometrie, materiálu, uložení a pozice bateriového boxu, spolu s konstrukčním řešením zbytku vozidla, mají největší vliv na výslednou bezpečnost baterií. Z hlediska bezpečnosti je vhodné zamezit jakékoliv deformaci bateriových článků za účelem minimalizování šance na vznik jakéhokoliv dříve popsaného nebezpečného jevu. Z toho důvodu se bateriové články a moduly ve vozidlech umísťují do zpevněných míst se zvýšenou strukturální tuhostí, kde se neočekává žádná nadměrná deformace v průběhu standardizovaných crash testů⁷.

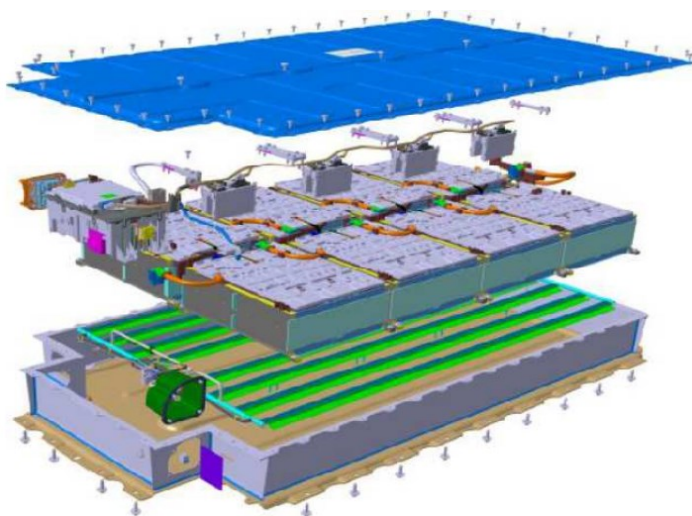
1.4 Přehled současného vývoje na poli baterií elektrických vozidel

Na Obr. 6 níže lze vidět náčrty, vyobrazující útroby bateriového packu elektrického vozidla Tesla Model S. Tento bateriový pack sestává z celkem 16 modulů, kdy každý je tvořen 444 cylindrickými články, jež dohromady dávají modulu napětí $U_m = 24\text{ V}$ a energetickou kapacitu $E_m = 5,3\text{ kW} \cdot \text{h}$. Hmotnost celého packu činí $m_p = 540\text{ kg}$ ^{10 11}.



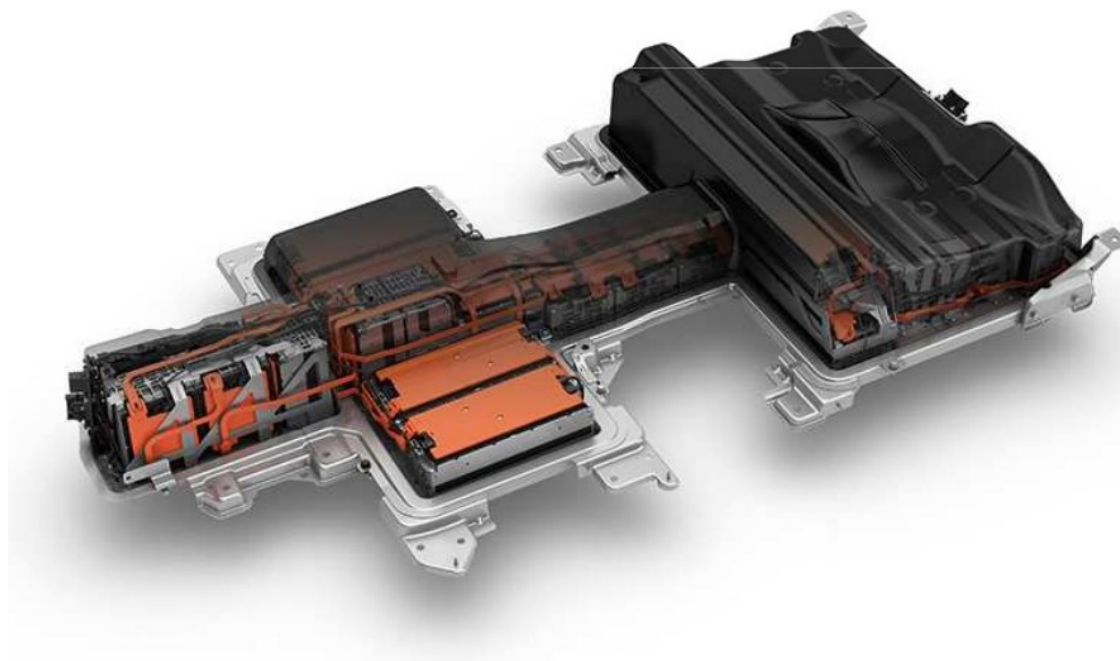
Obr. 6 Bateriový pack vozidla Tesla Model S¹⁰.

Obr. 7 ukazuje bateriový pack vozidla BMW i3. Tento pack je tvořen celkem 8mi moduly, kdy uvnitř každého z modulů se nachází 12 bateriových článků. Hmotnost celého packu je $m_p = 233\text{ kg}$ ^{10 12}.



Obr. 7 Bateriový pack vozidla BMW i3¹⁰.

Bateriový pack elektrického vozidla Volkswagen e-Golf lze spatřit na Obr. 8. Jeho hmotnost činí $m_p = 312$ kg. Je složen z celkem 264 prizmatických bateriových článků, uskupených do 27 modulů a každý z těchto modulů je tvořen buďto 6 nebo 12 články^{10 13}.



Obr. 8 Bateriový pack vozidla Volkswagen e-Golf¹⁰.

Z Obr. 9 je patrný bateriový pack vozidla Nissan Leaf. Tento pack se skládá z celkem 48 modulů. Uvnitř každého z modulů se nacházejí 4 elektrické články typu „pouch“. Hmotnost celého packu činí $m_p = 300$ kg^{10 14}.



Obr. 9 Bateriový pack vozidla Nissan Leaf¹⁰.

Ilustrace bateriového packu vozidla Chevrolet Bolt je zřejmá z Obr. 10. Bateriový pack tohoto vozidla je tvořen celkem 288 lithium-iontovými články, uspořádanými do 10 modulů. Hmotnost celého bateriového packu je $m_p = 485 \text{ kg}^{10 15}$.



Obr. 10 Bateriový pack vozidla Chevrolet Bolt¹⁰.

Tab. 1 níže ukazuje porovnání základních parametrů těchto battery packů.

	Kapacita E_p [kW · h]	Objem V_p [l]	Hmotnost m_p [kg]	Obj. hustota θ_p [W · h/l]	Hmot. hustota μ_p [W · h/kg]
Tesla model S	90	365	540	246	166
BMW i3	22	261	233	84	95
VW e-Golf	24	229	312	106	76
Nissan Leaf	30	–	300	–	100
Chevrolet Bolt	60	285	485	210	123

Tab. 1 Porovnání základních parametrů bateriových packů¹⁰.

2 Nelineární úlohy mechaniky

Při řešení praktických problémů z oblasti mechaniky těles se ve většině případů využívá lineárních výpočetních modelů. U těchto modelů se předpokládá, že materiál zatěžovaného tělesa je lineárně a ideálně pružný, dochází jen k „malým“ posunutím a natočením geometrických elementů tělesa a vazby mezi tělesy jsou reprezentovány lineárními rovnicemi v podobě okrajových podmínek úlohy. V technické praxi se však vyskytují i takové problémy, jejichž řešení vyžaduje užití modelů nelineárních. Jedná se o takové výpočtové modely, v nichž se u geometrických elementů těles předpokládají naopak „velká“ posunutí a natočení. Dále sem patří modely, jejichž materiálové vlastnosti jsou charakterizovány nelineární závislostí napětí na deformaci. Mezi nelineární modely patří také výpočtové modely kontaktních úloh, kde vazby mezi tělesy jsou reprezentovány nelineárními vztahy¹⁶.

V případě matematicky lineárních úloh vždy existuje řešení, které je jednoznačné. Výsledný stav modelu závisí pouze na hodnotách zadaných posunutí či natočení a sil či momentů. Nezávisí na způsobu zatěžování tělesa. U lineárních úloh lze rovněž výsledné řešení celé úlohy získat superpozicí několika dílčích úloh. Rovnice silové rovnováhy se zde vždy vztahují k nezdeformovanému stavu zatěžovaného tělesa. Používají se zde rovněž lineární vztahy mezi posuvy a deformacemi tělesa¹⁶.

Naproti tomu u úloh z matematického hlediska nelineárních není obecně zaručena existence řešení. Nelineární úlohy v metodě konečných prvků se obecně řeší iteračními numerickými postupy. Zde vyvstává problematika konvergence řešení a numerické stability úlohy. Nedojde-li při „malé“ změně vstupních hodnot úlohy k „velké“ změně hodnot výstupních, pak je úloha numericky stabilní. V opačném případě je úloha numericky nestabilní. Zdeformovaný stav nelineárního výpočtového modelu rovněž závisí na způsobu, kterým tohoto stavu bylo dosaženo. Statická rovnováha se zde vztahuje ke zdeformovanému stavu zatěžovaného tělesa, jenž však není předem znám. Rovněž i zde se používají matematické vztahy mezi posuvy a deformacemi, avšak nejsou již lineární. Nelinearity, vyskytující se v úlohách mechaniky pružných těles, lze tedy rozdělit na tři základní druhy. Tím prvním jsou tzv. *nelinearity geometrické*, druhým druhem jsou *materiálové nelinearity* a posledním druhem jsou tzv. *strukturální nelinearity*, mezi něž patří také kontaktní úlohy¹⁶.

2.1 Geometrické nelinearity

V případě geometricky nelineárních výpočtových modelů se musí brát v potaz nejen samotné změny tvaru sledovaného geometrického elementu zatěžovaného tělesa, ale také jeho posunutí a natočení jakožto tuhého celku, neboť tato posunutí a natočení již nelze, vzhledem k patřičným charakteristickým rozměrům tělesa, považovat za nevýznamná. „Velká“ posunutí jednotlivých bodů tělesa tak lze rozložit na posuv bodu v důsledku posunutí a natočení příslušného geometrického elementu tělesa, jakožto tuhého celku, a posuv v důsledku přetvoření tohoto elementu¹⁶.

Podle toho, zda v případě „velkých“ posunutí bodů zatěžovaného tělesa dochází také k „velkým“ přetvořením geometrických elementů tohoto tělesa, lze rozlišit dva rozdílné druhy geometrické nelinearity, a sice *velká posunutí a natočení* a *velká přetvoření*, jež jsou vždy doprovázena velkými posunutími a natočeními. V obou těchto případech se však materiál tělesa může, z hlediska závislosti napětí na deformaci, chovat lineárně nebo nelineárně. Úlohy, u kterých dochází pouze k velkým posunutím a natočením (tedy bez velkých přetvoření), představují valnou většinu praktických problémů z oblasti mechaniky těles. Mezi problémy technické praxe, jejichž řešení si vynucuje respektování velkých přetvoření, se řadí zejména simulace technologických procesů tváření a deformace součástí z pryží, plastů atp. V případě velkých přetvoření již nelze použít *Cauchyho tenzor přetvoření*, nýbrž je nutno využít některého ze složitějších tenzorů přetvoření, jako jsou např. *Greenův tenzor přetvoření*, nebo *Almasiho tenzor přetvoření*. Spolu s daným tenzorem přetvoření je však vždy nutno použít vhodný příslušný tenzor napětí^{16 17}.

K samotnému popisu kinematiky kontinua jako takového, jehož infinitesimální geometrické elementy jsou podrobeny takovému velkým posunutím, natočením a případně přetvořením, se užívají dvě rozdílné matematické metody. Účelem obou těchto metod je vyjádření pohybu bodů kontinua, jakožto funkce prostoru i času. První metodou je tzv. *Lagrangeův popis*. Tento způsob popisu kinematiky kontinua existuje ve dvou podobách. Tou první je tzv. *totální lagrangeovská formulace*. Tato formulace považuje za výchozí konfiguraci počáteční (nezdeformovaný) stav kontinua. Druhou obdobou této metody je tzv. *aktualizovaná lagrangeovská formulace*. Zde je pro změnu za výchozí konfiguraci považována geometrická konfigurace kontinua na počátku aktuálního přírůstku zatížení. Druhou metodou je tzv. *Eulerův popis*, užívaný zejména v mechanice tekutin¹⁶.

2.2 Materiálové nelinearity

Chování materiálu zatěžovaného tělesa bývá charakterizováno závislostí napětí na deformaci. Je-li tato závislost vyjádřena nelineárním matematickým vztahem, pak se hovoří o tzv. materiálové nelinearitě. Mimo Hookeův lineární elastický materiálový model existují rovněž *elastické modely nelineární*. Tyto materiálové modely se užívají k popisu chování materiálů, schopných „velkých“ pružných deformací, kde závislost napětí na deformaci je vysoce nelineární, jako jsou pryže, pěny, plasty, některé biomateriály atp. Častým zástupcem této třídy materiálů bývá právě pryž, u níž je vztah mezi napětím a deformací výrazně nelineární, je schopna velmi velkých deformací (až 500 %) a její materiálové chování je závislé na teplotě i čase. V důsledku toho se se zvyšující se frekvencí vibrací pryžových tlumících členů zvyšuje jejich tuhost. Pryž je rovněž téměř nestlačitelná. Materiálové modely pro popis takovýchto materiálů se často označují jako tzv. hyperelastické materiálové modely. Hyperelastické materiály se často vyznačují odlišným materiálovým chováním při různých základních typech zatěžování, jako je tah, tlak nebo smyk. Mezi užívané hyperelastické materiálové modely patří např. *Neo-Hookeovský model*, *Mooney-Rivlingův model*, dále *model Yeohův*, nebo *model Ogdenův*¹⁶.

Existují však také materiály, které vedle elastického (vratného) přetvoření vykazují zároveň viskózní (nevratné) přetvoření, které je závislé na čase. Takovéto materiály se nazývají viskoelastické a k jejich popisu se užívají *viskoelastické materiálové modely*. Je-li materiál tělesa, vykazující viskoelastické chování, namáhán konstantním zatížením tohoto tělesa, pak elastická složka výsledné deformace zůstává konstantní, ale viskózní složka deformace se s časem mění. Dochází-li při konstantním zatížení materiálu tělesa k nárůstu deformace, kdy rychlost této deformace se v čase mění, pak se hovoří o tzv. *tečení* (*angl. Creep*). Jestliže je však materiál tělesa namáhán konstantní deformací a napětí v materiálu tělesa s časem klesá, pak se jedná o tzv. *relaxaci napětí*. Je-li viskoelastický materiál namáhán cyklicky, dochází v něm zpravidla k maření (disipaci) energie, což se projevuje vznikem *hysterezní smyčky* mezi napětím a deformací. Tečení, relaxace napětí i hystereze jsou rovněž závislé také na teplotě. Viskoelastickými materiálovými modely se popisuje chování materiálů, jako jsou některé pryže, plasty, skla a skelné materiály, popřípadě i některé živé tkáně atp. Mezi takovéto modely se řadí např. *model Maxwellův*, či *Kelvin-Voightův model*¹⁶.

Překročí-li napětí v materiálu zatěžovaného tělesa mez pružnosti (mez úměrnosti), pak začne vedle elastické (vratné) deformace docházet k nárůstu deformace plastické (nevratné). Výsledná deformace je pak dána superpozicí obou těchto složek a vztah, popisující závislost napětí na deformaci se tak stává zpravidla nelineárním. Plastická deformace se projevuje trvalou změnou tvaru tělesa. Řada elasticko-plastických problémů vykazuje závislost deformace na rychlosti nárůstu zatížení. V takovémto případě se dvě totožná tělesa (co do geometrie, materiálových vlastností i zatížení), kdy zatížení u každého tělesa narůstá z nuly do své maximální hodnoty s různou rychlostí, zdeformují různě^{16 18}.

Pro řešení většiny elasticko-plastických úloh se v praxi využívá *časově nezávislá inkrementální teorie plasticity*. Napěťový stav v bodě tělesa se zde vyjadřuje ekvivalentním napětím. Tuto napjatost lze v prostoru hlavních napětí vyobrazit jako vektor. Narůstá-li zatížení, pak se koncový bod tohoto vektoru pohybuje po trajektorii, jež se nazývá *dráha zatěžování*. Oblast elastického chování je od oblasti chování plastického v tomto prostoru oddělena tzv. *plochou plasticity*. Ta bývá popsána analytickým vztahem zvaném *funkce plasticity*. Pro materiál ideálně plastický by při nárůstu zatížení nedocházelo ke změnám plochy plasticity. Kovy se však v plastické oblasti vyznačují zpevněním. Toto zpevnění se v této teorii modeluje třemi různými způsoby. V případě *izotropního zpevnění* dochází při nárůstu zatížení pouze ke zvětšování plochy plasticity. Z toho důvodu je vhodné toto zpevnění využívat v případech monotónního zatěžování. Pro případy cyklického zatížení je vhodné *kinematické zpevnění*, kde při změně zatížení dochází ke změně polohy plochy plasticity, čímž lze u materiálu popsat tzv. Bauschingerův efekt. Toto zpevnění však neumožňuje vystihnout cyklické zpevnění či změkčení, nebo cyklické tečení (angl. Ratcheting). V těchto případech je vhodné *kombinované zpevnění*. Jak název napovídá, tento model v sobě kombinuje izotropní i kinematické zpevnění. Při zatěžování dochází jak ke zvětšování plochy, tak i ke změně polohy plochy plasticity. Při odtěžování však dochází již pouze ke změně polohy této plochy. Jednotlivé přístupy v inkrementální teorii plasticity se liší nejčastěji pouze ve způsobu definice členů funkce plasticity a nazývají se modely zpevnění. Jmenujme autory těchto modelů např. *Besseling, Mroz, Dafalias-Popov, Prager, Armstrong-Frederic, Chaboche, Ohno-Wang* aj^{16 18}.

V případech, kdy vliv rychlosti deformace zanedbat nelze, je nutno využít materiálový model, jenž vliv rychlosti deformace respektuje. Mezi takovéto modely patří např. *Cowper-Symondsův model*, nebo *model Johnson-Cook*¹⁶.

2.3 Kontakty

Problematika kontaktu těles tvoří důležitou část mechaniky těles. Dané těleso může být v kontaktu s jiným tělesem nebo se sebou samým. V případě mechanického kontaktu dochází ke vzniku kontaktní plochy na povrchu kontaktujících se těles. Skrze tuto plochu se uskutečňuje přenos silového působení mezi tělesy a v důsledku toho na této ploše dochází k velké koncentraci napětí. Toto napětí lze rozložit na napětí normálové tlakové v případě přítomnosti tření také na napětí smykové. Na mechanický kontakt lze nahlížet jako časově proměnnou okrajovou podmínku. Velikost kontaktní plochy je v průběhu výpočtu proměnlivá. Může vzniknout nebo naopak zcela zaniknout. Při nepřítomnosti kontaktu zde neexistuje žádná kinematická podmínka, avšak v opačném případě zde figuruje kinematická vazba zabráňující pronikání kontaktních ploch skrze sebe. Na základě těchto skutečností je kontaktní úloha silně nelineární záležitostí¹⁶.

Prvním, kdo se zabýval problematikou mechanického kontaktu, byl německý fyzik Heinrich Rudolf Hertz. Jednalo se o kontakt elastických těles bez přítomnosti tření, vyjádřený analyticky. S rozvojem numerických metod však byly vyvinuty robustnější přístupy numerické. Kontaktní úlohy lze rozdělit dle několika hledisek. Nejčastěji se však kontaktní problémy dělí na dva základní druhy, a to *kontakt bez tření*, kdy je smyková složka napětí na kontaktní ploše nulová, a *kontakt se třením*, jenž zahrnuje i smykovou složku napětí na kontaktní ploše. Jiný způsob dělení kontaktních úloh závisí na charakteru kontaktujících se těles, a sice *kontakt deformovatelného a deformovatelného tělesa* a *kontakt deformovatelného tělesa s tělesem absolutně tuhým*, který se v technické praxi využívá zejména všude tam, kde se tuhost kontaktujících se těles výrazně liší¹⁶.

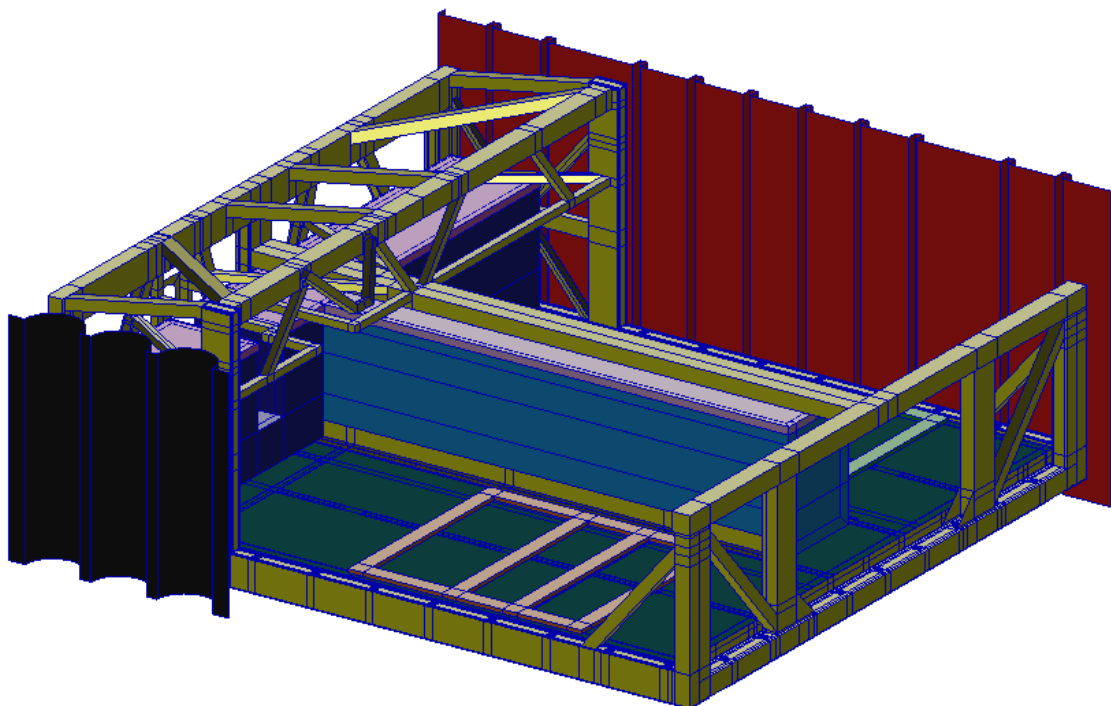
Při řešení kontaktní úlohy je obecně nejprve nutno zjistit které body na hranici tělesa vstupují do kontaktu a tím definovat kontaktní plochu. Následně je nutno splnit podmínku nepronikání hranic kontaktujících se těles skrze sebe. Při řešení kontaktních úloh metodou konečných prvků vyvstává problém s nepřesnou reprezentací normál mezi kontaktními plochami kontaktujících se těles v důsledku diskretizace těchto ploch konečnými prvky. Software MSC Marc dokáže směry normál volných ploch jednotlivých elementů, tvořících kontaktní plochu, zpřesnit prostřednictvím aproximace geometrie tělesa analytickými funkcemi. Pro řešení kontaktních úloh se užívají dva základní algoritmy. Prvním je tzv. *Metoda Lagrangeových multiplikátorů* a druhým tzv. *Pokutový přístup*^{16 19}.

3 Výpočtový model

Počítačová simulace zkoušky mechanické integrity bateriového boxu byla provedena s využitím metody konečných prvků po vzoru plánované zkoušky, jež byla blíže popsána v kapitole 4, a v souladu s ní byl simulovaný děj z hlediska mechaniky považován za kvazi-statický. Byly tak zanedbány dynamické účinky zatěžující síly na středovou část rámu vozidla s bateriovým boxem a bateriemi. Byl rovněž zanedbán vliv vlastní tíhy impaktoru, středové části rámu, bateriového boxu a bateriových modulů s příslušenstvím. Výpočtový model byl vytvořen v prostředí komerčního software MSC Patran²⁰.

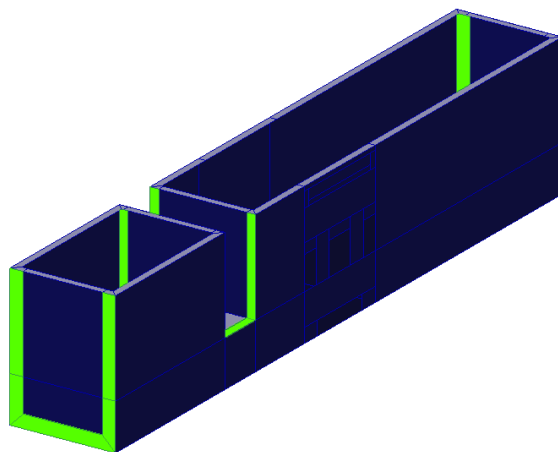
3.1 Geometrie

Geometrický model byl kompletně vytvořen v prostředí software MSC Patran dle předlohy v přestupném formátu STEP, vytvořené konstruktéry z Katedry materiálů a technologií pro automobily. Geometrický model celku bateriového boxu s rámem, společně s modelem podkladu a impaktoru je vidět na Obr. 11 a sestává se z 18 samostatných těles (součástí).



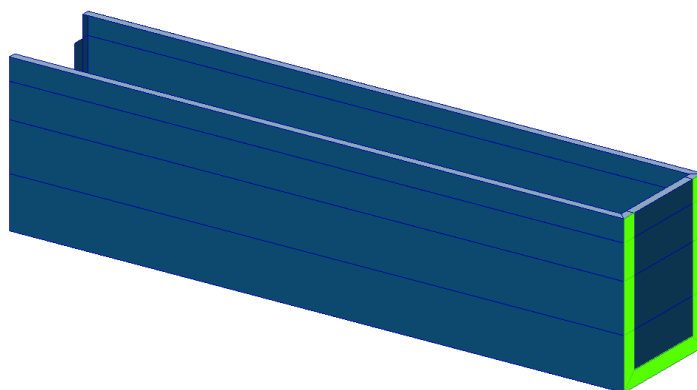
Obr. 11 Kompletní geometrický model bateriového boxu s rámem, podkladu a impaktoru.

Na Obr. 12 lze vidět geometrický model skříně příčného oddílu horní části bateriového boxu. Na základě této geometrie byl později pro tuto součást vytvořen konečno-prvkový model, tvořený prvky typu „Shell“. Z tohoto důvodu byla geometrie rozdělena na podoblasti, odpovídající prvkům s odlišnou tloušťkou skořepiny, nebo podoblasti, jež byly v kontaktu s dalšími součástmi modelu. Identickým způsobem byla vytvořena geometrie i všech ostatních součástí se dvěma výjimkami, viz dále. Navržená tloušťka plechu, z něhož by měla být skříně příčného i podélného oddílu horní části bateriového boxu vyrobena, zde činila $t_3 = 3 \text{ mm}$. Lepené spoje zde byly modelovány tak, že v místech lepených spojů byla uvažována dvojnásobná tloušťka plechu. Místa těchto spojů jsou na Obr. 12 a Obr. 13 vyznačeny žlutou barvou.



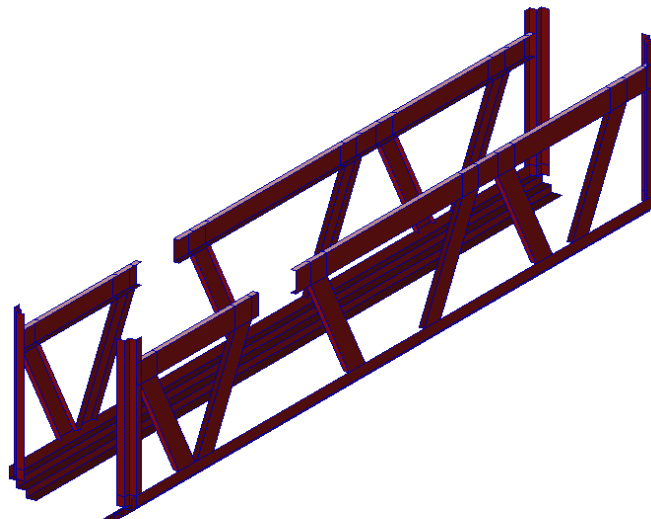
Obr. 12 Geometrický model skříně příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Obr. 13 ukazuje geometrický model skříně podélného oddílu horní části bateriového boxu.



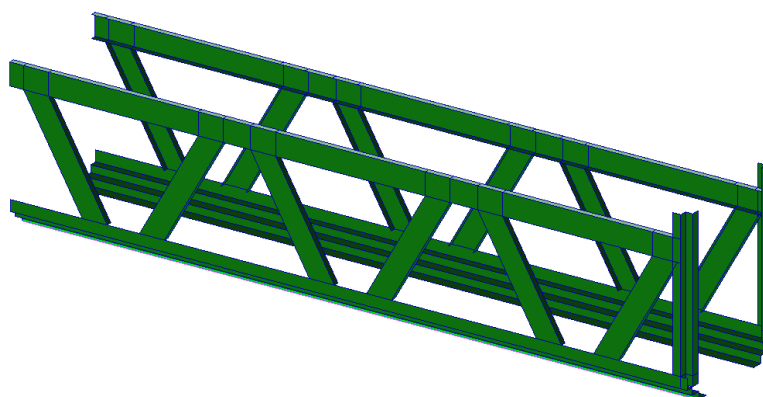
Obr. 13 Geometrický model skříně podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Geometrický model rámu skříně příčného oddílu horní části bateriového boxu je patrný z Obr. 14. Tloušťka plechu, z něhož by měl být tento rám vyroben, činila na všech místech $t_2 = 2 \text{ mm}$.



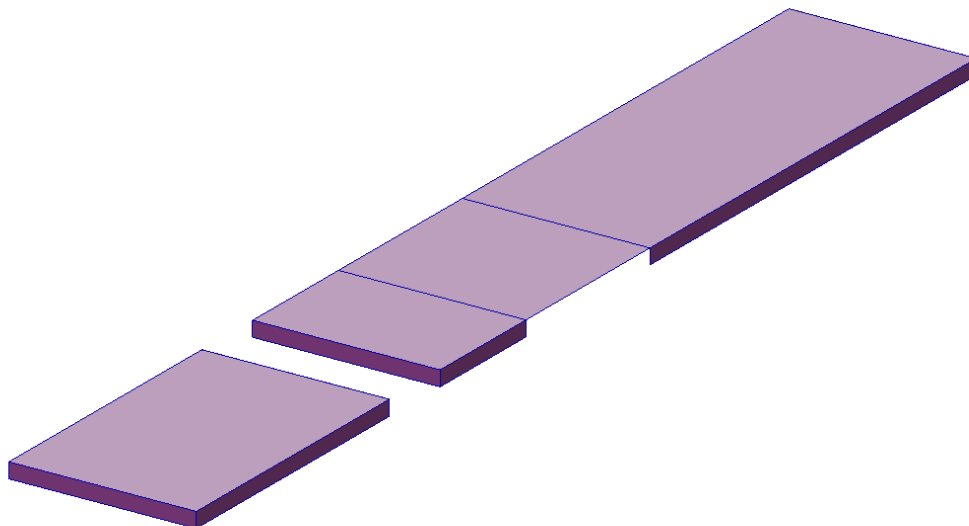
Obr. 14 Geometrický model rámu skříně příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Geometrický model rámu skříně podélného oddílu horní části bateriového boxu je dále zřejmý z Obr. 15. Tloušťka plechu, z něhož by měl být tento rám vyroben, zde opět činila na všech místech $t_2 = 2 \text{ mm}$.



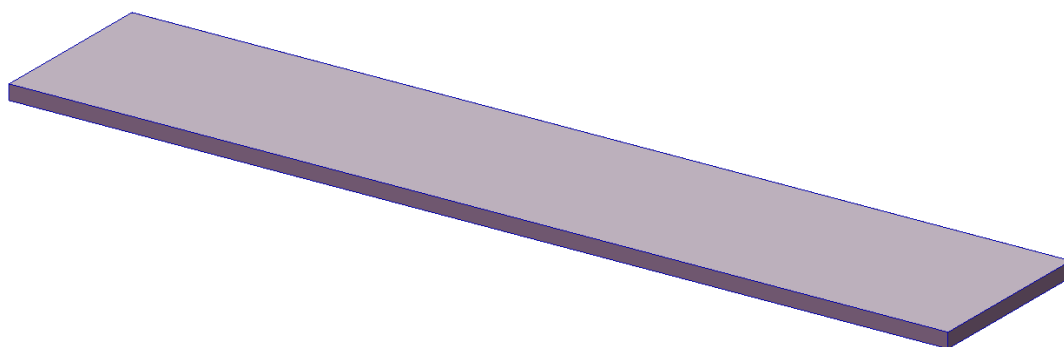
Obr. 15 Geometrický model rámu skříně podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Geometrický model víka příčného oddílu horní části bateriového boxu lze vidět na Obr. 16. Tloušťka plechu, z něhož by mělo být toto víko vyrobeno, zde činila $t_2 = 2$ mm.



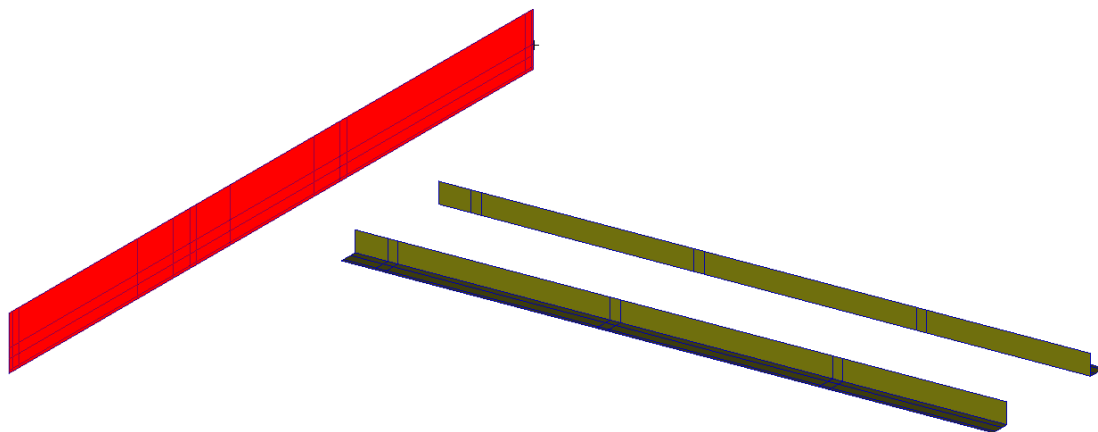
Obr. 16 Geometrický model víka příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Obr. 17 vyobrazuje geometrický model víka podélného oddílu horní části bateriového boxu. Tloušťka plechu, z něhož by mělo být toto víko vyrobeno, zde opět činila $t_2 = 2$ mm.



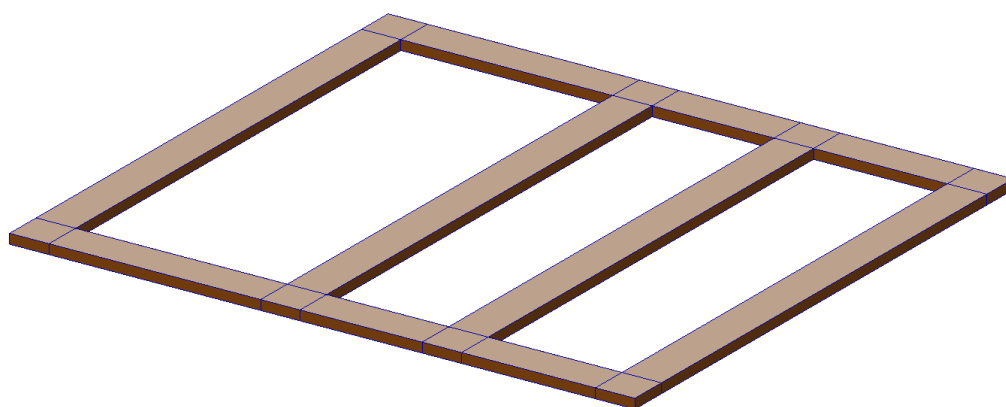
Obr. 17 Geometrický model víka podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Na Obr. 18 je vidět geometrický model tenkostěnných dílů, sloužících ke spojení horní a spodní části bateriového boxu. Tloušťka plechu, z něhož by měla být vyrobena čelní deska (na Obr. 18 zvýrazněna červenou barvou) byla $t_4 = 4$ mm. Zbylé dva díly (L profily) měly být vyrobeny z plechu o tloušťce $t_2 = 2$ mm.



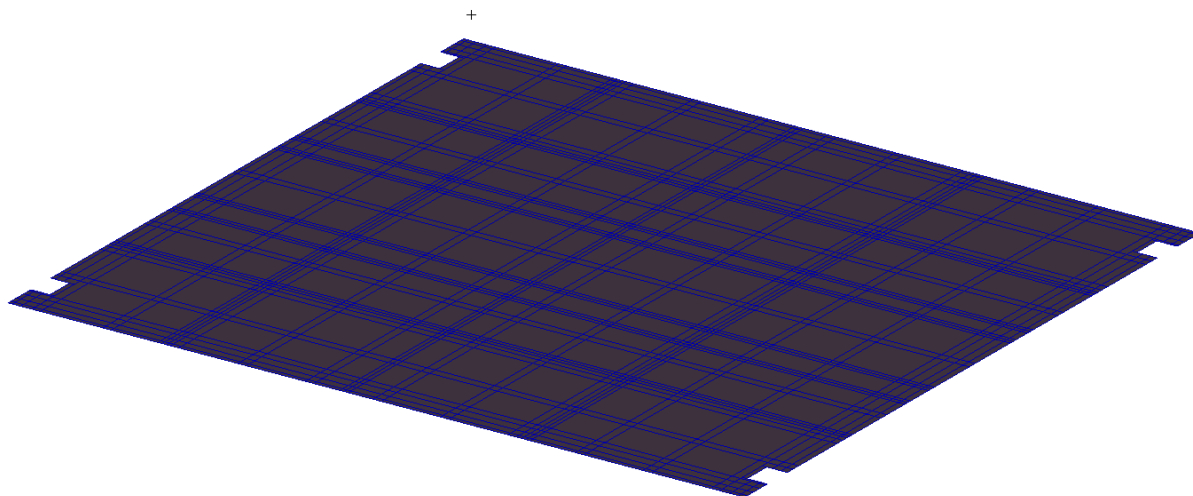
Obr. 18 Geometrický model spojovacích tenkostěnných dílů.

Obr. 19 ukazuje geometrický model rámu pro upevnění sedadla řidiče, jenž je totožný s geometrickým modelem rámu pro upevnění sedadla spolujezdce. Rám by měl být vyroben z trubek obdélníkového průřezu o tloušťce stěny $t_2 = 2$ mm.



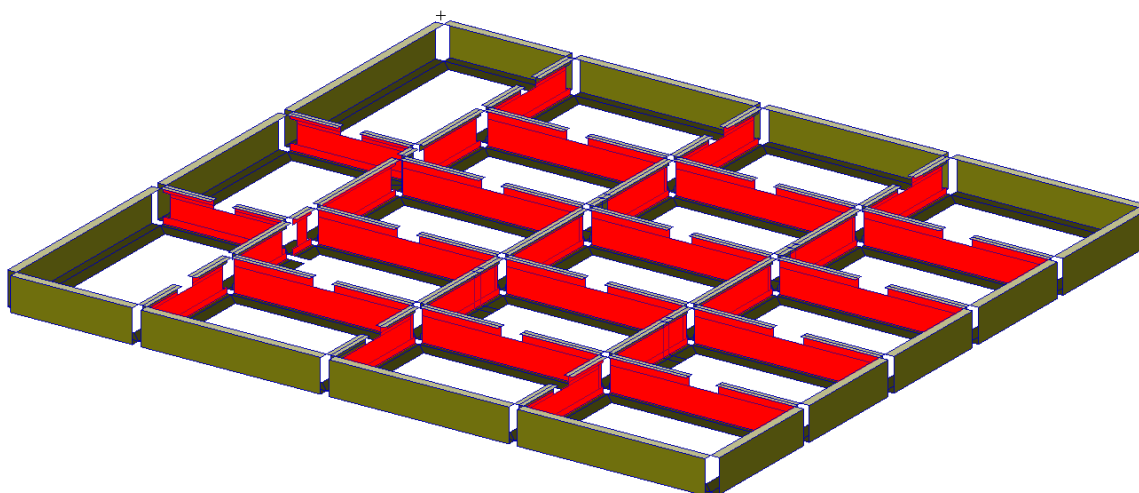
Obr. 19 Geometrický model rámu pro upevnění sedadla řidiče/ spolujezdce.

Z Obr. 20 je zřejmý geometrický model dna spodní části bateriového boxu. Toto dno by mělo být vyrobeno z plechu o tloušťce $t_4 = 4$ mm.



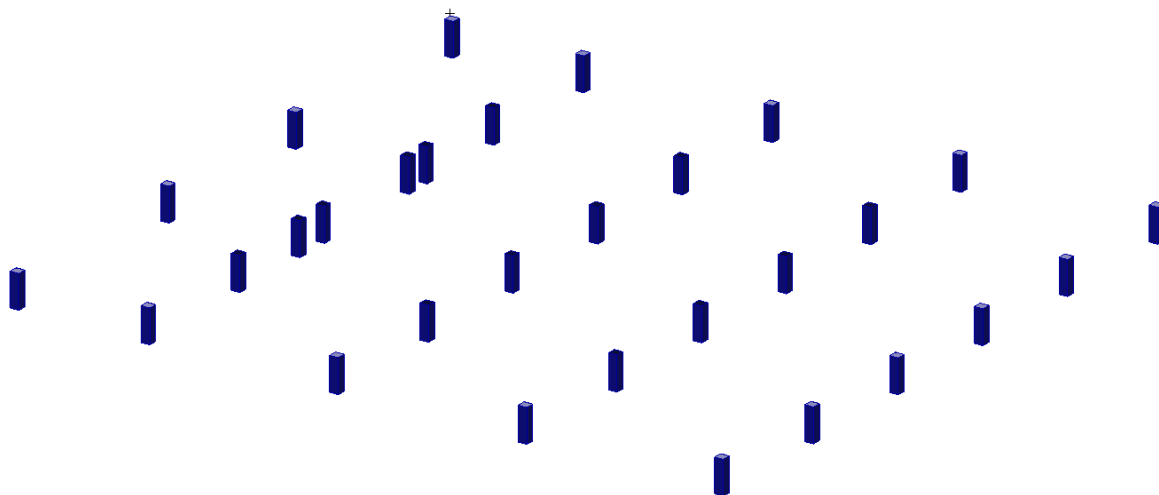
Obr. 20 Geometrický model dna spodní části bateriového boxu.

Geometrický model příček spodní části bateriového boxu, jež definují jednotlivé oddíly pro uložení baterií, je patrný z Obr. 21. Samotné příčky, s výjimkou těch obvodových, by měly být vyrobeny slepením dvou příček z plechu o tloušťce $t_2 = 2$ mm. Tyto lepené příčky byly v modelu uvažovány jako celistvé, z materiálu o tloušťce $t_4 = 4$ mm (na Obr. 21 vyznačeny červenou barvou). Obvodové příčky a chlopně na horním a spodním okraji příček měly poté být tvořeny plechem o tloušťce $t_2 = 2$ mm.



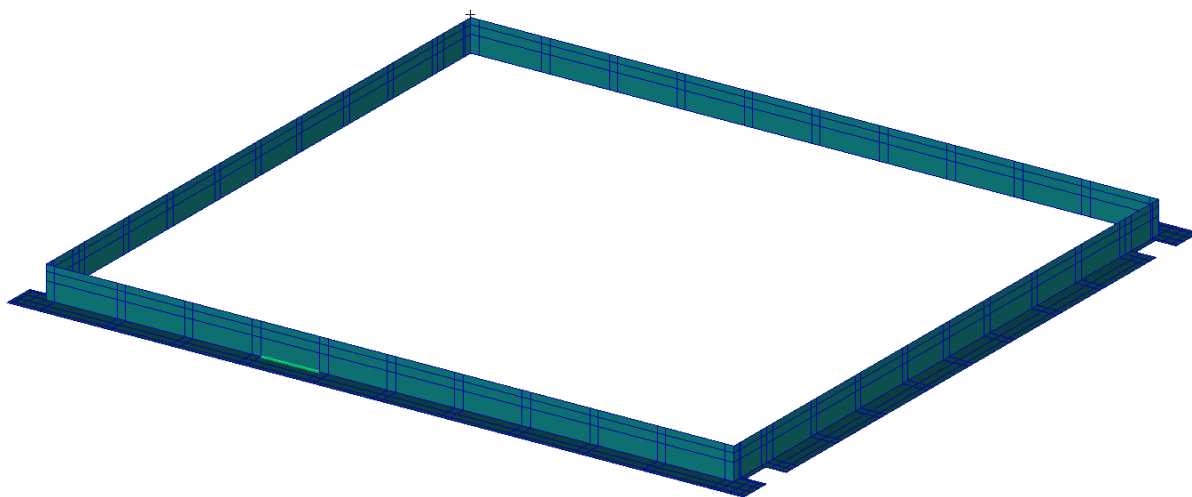
Obr. 21 Geometrický model příček spodní části bateriového boxu.

Geometrický model sloupků spodní části bateriového boxu, jež by v sobě měly nést závity šroubových spojů pro upevnění dna a víka spodní části bateriového boxu, je poté zřejmý z Obr. 22. Na základě této geometrie byla později pro tuto součást vytvořena konečno-prvková síť, tvořená prvky typu „solid“.



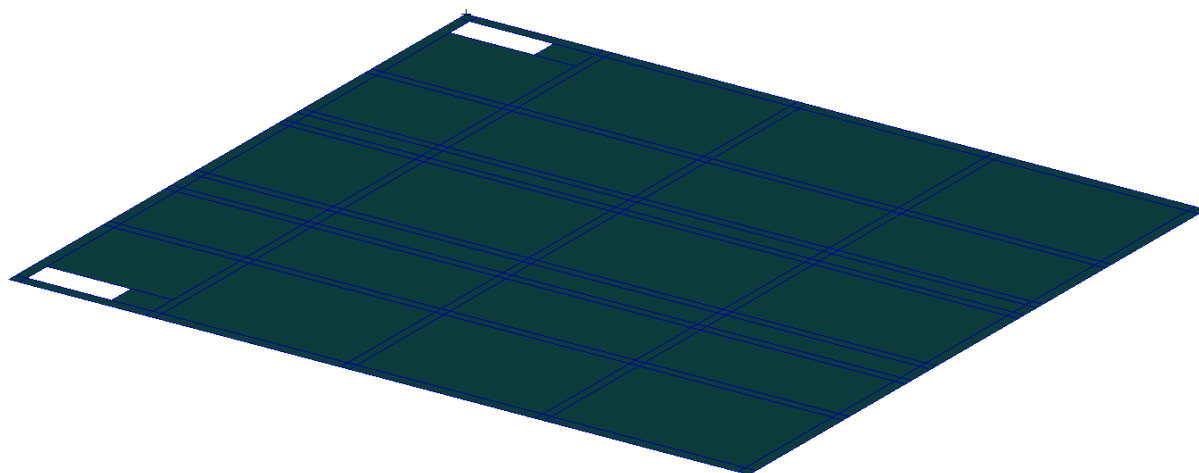
Obr. 22 Geometrický model sloupků spodní části bateriového boxu.

Geometrický model lemu spodní části bateriového boxu lze vidět na Obr. 23. Tento lem by měl být vyroben z plechu o tloušťce $t_2 = 2$ mm.



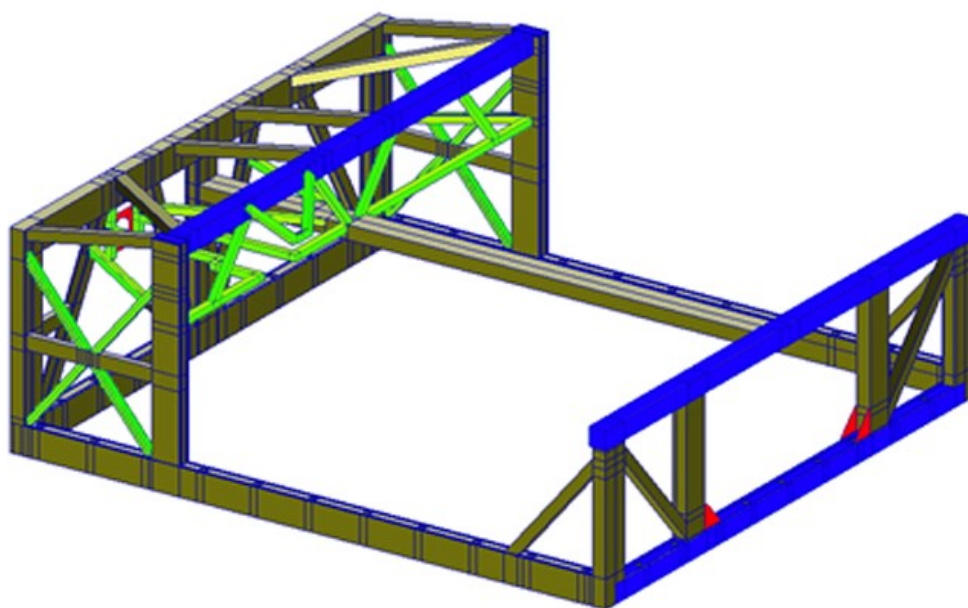
Obr. 23 Geometrický model lemu spodní části bateriového boxu.

Obr. 24 vyobrazuje geometrický model víka spodní části bateriového boxu. Toto víko by mělo být vyrobeno z plechu o tloušťce $t_4 = 4$ mm.



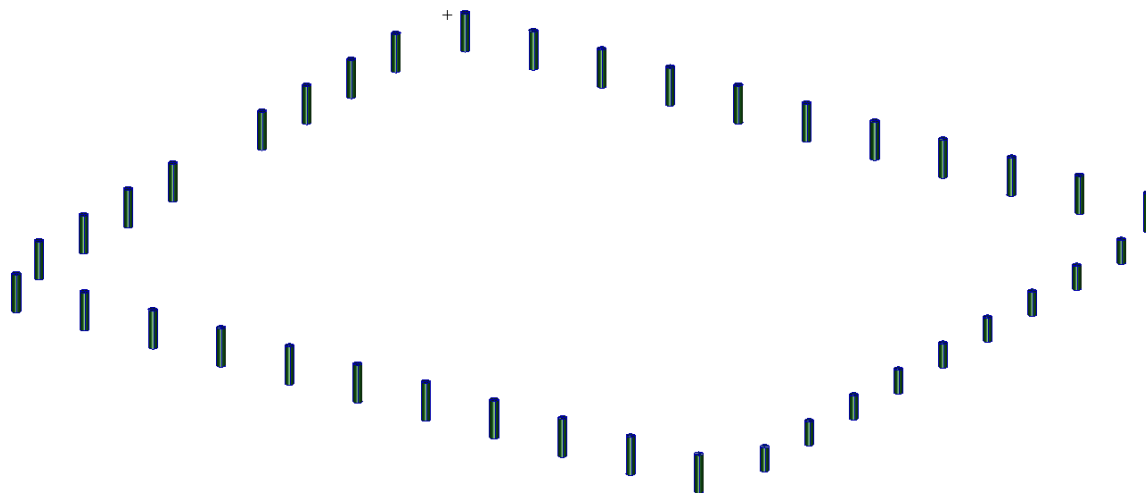
Obr. 24 Geometrický model víka spodní části bateriového boxu.

Na Obr. 25 je vidět geometrický model středové části rámu vozidla SCX 3.5. Rám byl vyroben z trubek obdélníkového a čtvercového průřezu o tloušťce stěny $t_{1,5} = 1,5$ mm (žlutá barva), $t_3 = 3$ mm (modrá barva) a $t_2 = 2$ mm. Několik dílů rámu bylo vyrobeno z plechu o tloušťce $t_5 = 5$ mm (červená barva) a $t_{10} = 10$ mm.



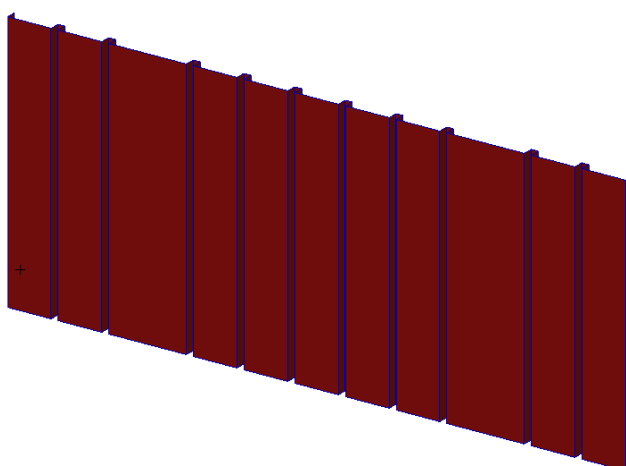
Obr. 25 Geometrický model středové části rámu vozidla SCX 3.5.

Na Obr. 26 níže lze vidět geometrický model vložek středové části rámu vozidla SCX 3.5, jež sloužily pro připojení bateriového boxu k rámu. Na základě této geometrie byla později pro tuto součást vytvořena konečno-prvková síť, tvořená prvky typu „solid“.



Obr. 26 Geometrický model vložek středové části rámu vozidla SCX 3.5.

Obr. 27 dále ukazuje geometrický model podkladu, na němž by měl v průběhu simulace setrvat celek bateriového boxu s rámem. Podklad byl uvažován jako absolutně tuhé těleso, a proto byl pro účely analýzy definován jako „geometrické těleso“, tedy bez konečno-prvkové sítě.



Obr. 27 Geometrický model podkladu.

Geometrický model impaktoru je patrný z Obr. 28. Obdobně jako podklad i impaktor byl uvažován jako absolutně tuhé „geometrické těleso“ bez sítě konečných prvků.



Obr. 28 Geometrický model impaktoru.

3.2 Materiálové vlastnosti

Pro výpočtový model byly definovány celkem tři materiály, a sice konstrukční ocel a dvě slitiny hliníku. Materiálový model byl ve všech případech uvažován jako elasticko-plastický, bilineární, izotropní a homogenní. Geometrické vlastnosti všech členů, kromě sloupců spodní části bateriového boxu a vložek středové části rámu, výpočtového modelu byly uvažovány jakožto skořepiny. Použité materiálové konstanty konstrukční oceli jsou vyobrazeny v Tab. 2. Konstrukční ocel S355 v modelu náležela sloupcům spodní části bateriového boxu, vložkám středové části rámu i středové části rámu samotné.

Konstrukční ocel S355			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Modul pružnosti v tahu	E^0	200 000	[MPa]
Poissonovo číslo	μ^0	0,3	[–]
Mez kluzu v tahu	R_e^0	355	[MPa]
Mez pevnosti v tahu	R_m^0	550	[MPa]
Tažnost	A^0	22	[%]
Plastický (tečný) modul	E_T^0	1 603	[MPa]

Tab. 2 Použité materiálové vlastnosti materiálového modelu konstrukční oceli S355^{21 22}.

První ze dvou použitých slitin hliníku s označením 5083-H22 náležela všem tenkostěnným dílům, na něž měl být aplikován technologický proces ohýbání. Tedy všechny díly bateriového boxu vyjma sloupků spodní části bateriového boxu (konstrukční ocel), čelní desky (na Obr. 18 vyznačena červenou barvou), dna a víka spodní části bateriového boxu. Použité materiálové parametry jsou zřejmé z Tab. 3.

Slitina hliníku 5083-H22			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Modul pružnosti v tahu	E^{H22}	71 000	[MPa]
Poissonovo číslo	μ^{H22}	0,33	[–]
Smluvní mez kluzu v tahu	$R_{p\ 0,2}^{H22}$	240	[MPa]
Mez pevnosti v tahu	R_m^{H22}	330	[MPa]
Tažnost	A^{H22}	6,3	[%]
Plastický (tečný) modul	E_T^{H22}	1 920	[MPa]

Tab. 3 Použité materiálové vlastnosti materiálového modelu slitiny hliníku 5083-H22²³.

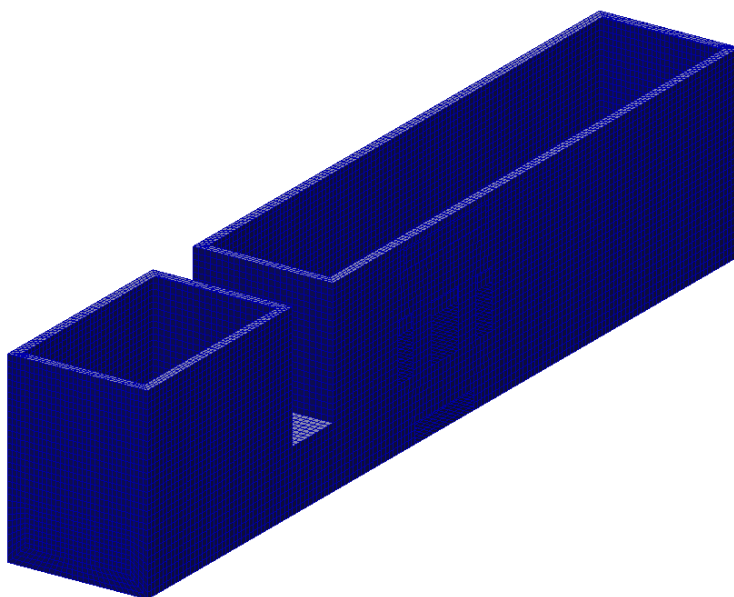
Druhá ze dvou použitých slitin hliníku nese označení 5754-H111 a náležela všem rovinným (neohýbaným) dílům. Tedy čelní deska, dna a víko spodní části bateriového boxu. Použité materiálové konstanty jsou patrné z Tab. 4.

Slitina hliníku 5754-H111			
Název	Značka	Hodnota	Jednotka
Modul pružnosti v tahu	E^{H111}	70 000	[MPa]
Poissonovo číslo	μ^{H111}	0,33	[–]
Smluvní mez kluzu v tahu	$R_{p\ 0,2}^{H111}$	76	[MPa]
Mez pevnosti v tahu	R_m^{H111}	180	[MPa]
Tažnost	A^{H111}	12	[%]
Plastický (tečný) modul	E_T^{H111}	1 259	[MPa]

Tab. 4 Použité materiálové vlastnosti materiálového modelu slitiny hliníku 5754-H111^{24 25}.

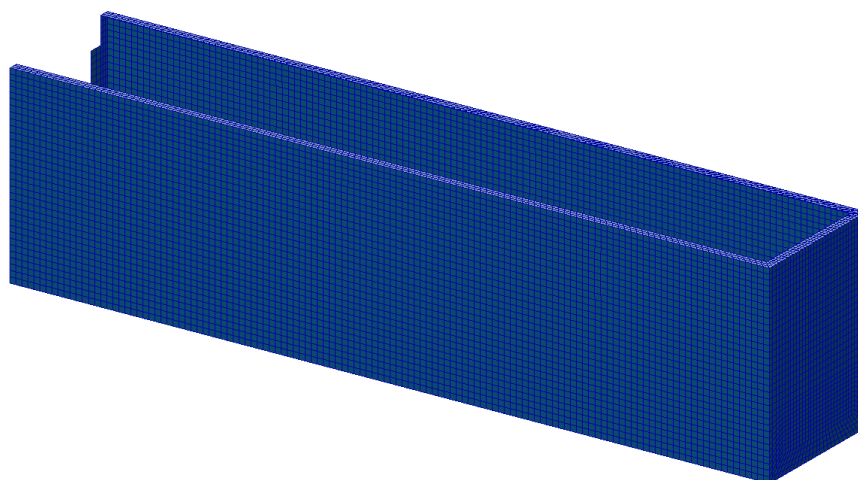
3.3 Konečno-prvková síť

Na základě geometrického modelu byla vytvořena síť konečných prvků. Konečno-prvková síť skříně příčného oddílu horní části bateriového boxu byla vytvořena z 2D prvků typu „Quad“ (čtyřúhelník) o průměrné velikosti prvku $h = 10$ mm. Výsledná síť je patrná z Obr. 29.



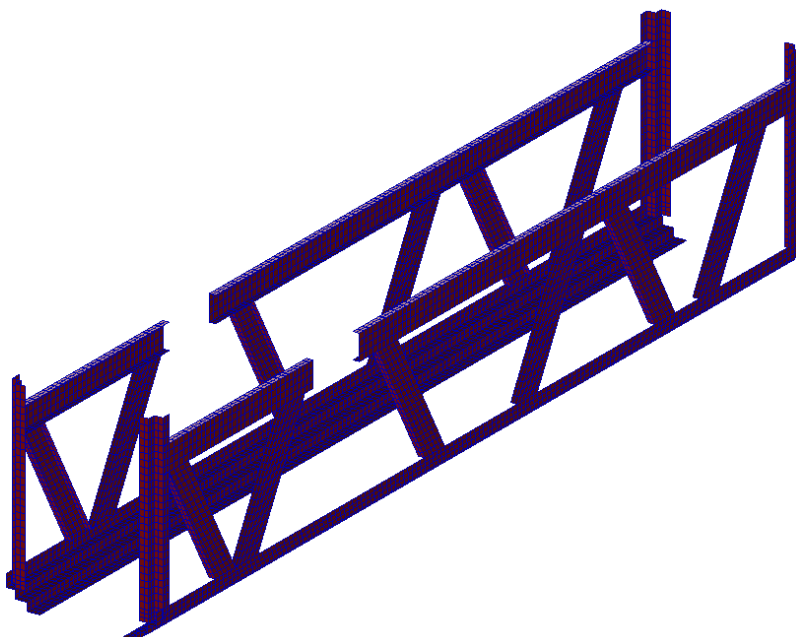
Obr. 29 Síť konečných prvků skříně příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Na Obr. 30 je patrná síť konečných prvků skříně podélného oddílu horní části bateriového boxu. Síť byla opět tvořena prvky typu „Quad“. Průměrná velikost prvku zde znovu odpovídala $h = 10$ mm.



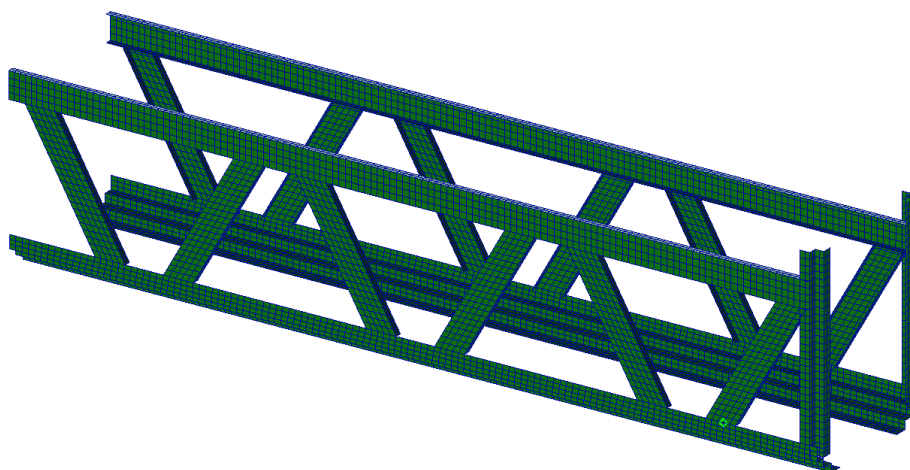
Obr. 30 Síť konečných prvků skříně podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Konečno-prvková síť rámu skříně příčného oddílu horní části bateriového boxu je vidět na Obr. 31. Síť zde byla opět tvořena prvky typu „Quad“ o průměrné velikosti prvku $h = 10$ mm.



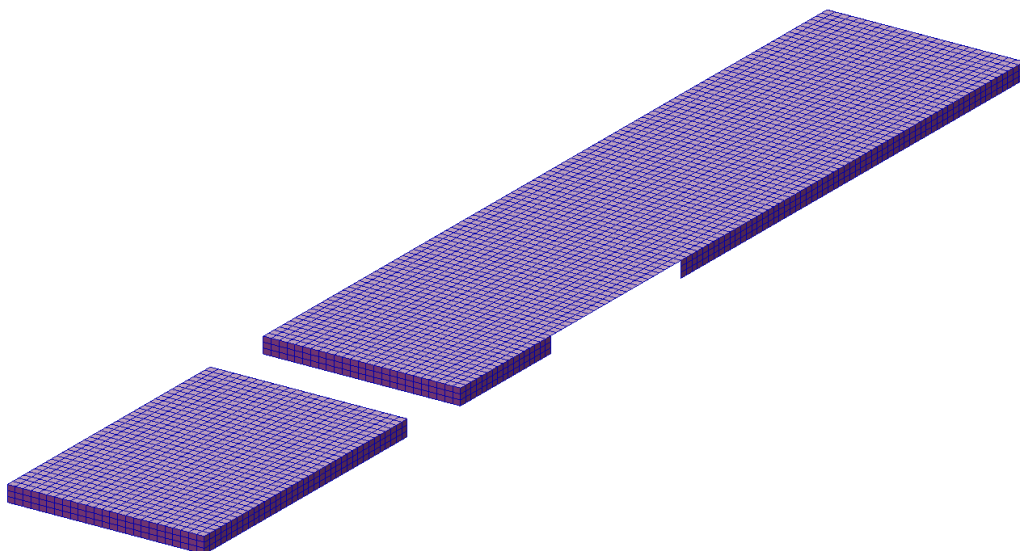
Obr. 31 Síť konečných prvků rámu skříně příčného oddílu horní části bateriového boxu.

V případě rámu skříně podélného oddílu horní části bateriového boxu byla opět konečno-prvková síť vytvořena z prvků typu „Quad“ o průměrné velikosti prvku $h = 10$ mm. Výsledná síť je patrná z Obr. 32.



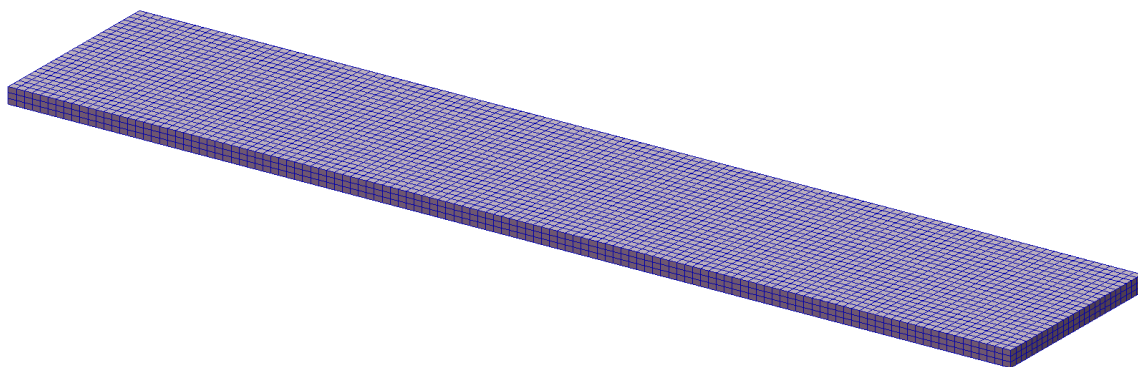
Obr. 32 Síť konečných prvků rámu skříně podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Obdobným způsobem byla z prvků typu „Quad“ o průměrné velikosti $h = 10$ mm vytvořena konečno-prvková síť víka příčného oddílu horní části bateriového boxu, jenž je zřejmá z Obr. 33.



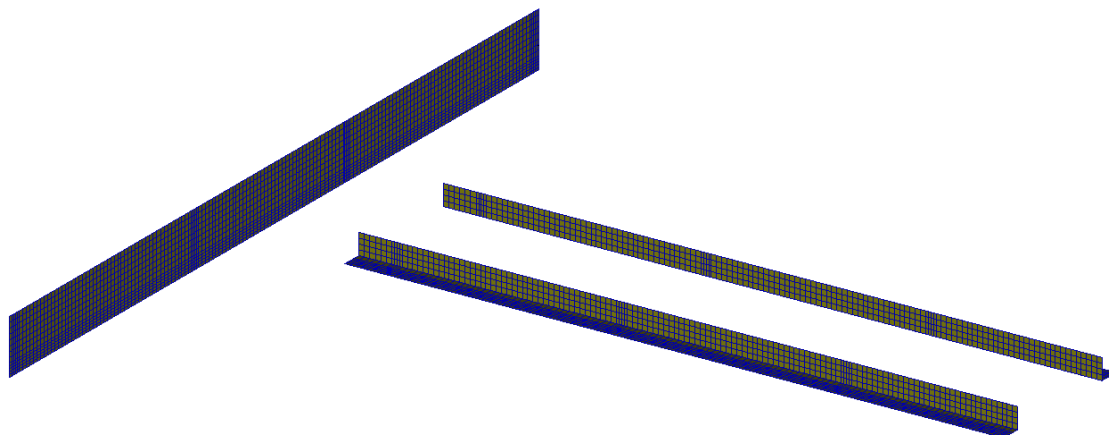
Obr. 33 Síť konečných prvků víka příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Stejně jako v předchozím případě i síť konečných prvků víka podélného oddílu horní části bateriového boxu byla vytvořena z prvků typu „Quad“ o průměrné velikosti $h = 10$ mm. Výslednou síť lze vidět na Obr. 34.



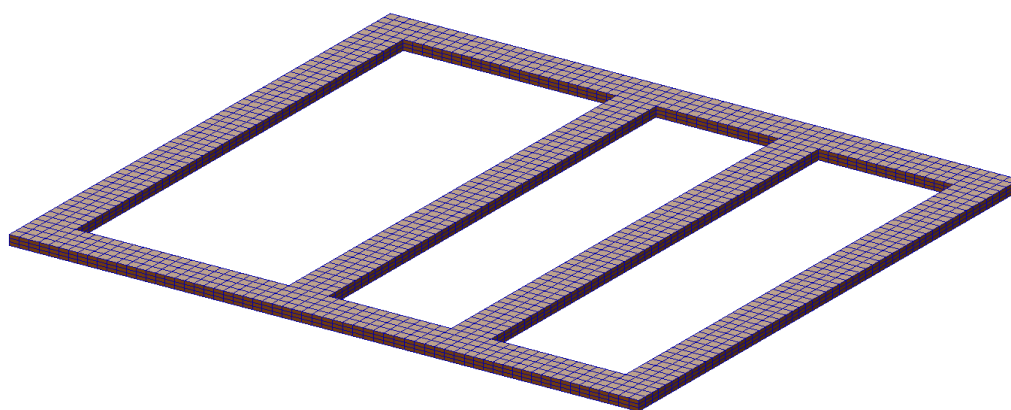
Obr. 34 Síť konečných prvků víka podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Níže na Obr. 35 je vidět síť konečných prvků tenkostěnných dílů, sloužících ke spojení horní a spodní části bateriového boxu. Síť byla i zde tvořena prvky typu „Quad“ o průměrné velikosti $h = 10$ mm. V místech budoucího kontaktu s lemem a víkem spodní části bateriového boxu byla síť záměrně zhuštěna na průměrnou velikost prvku $h' = 5$ mm.



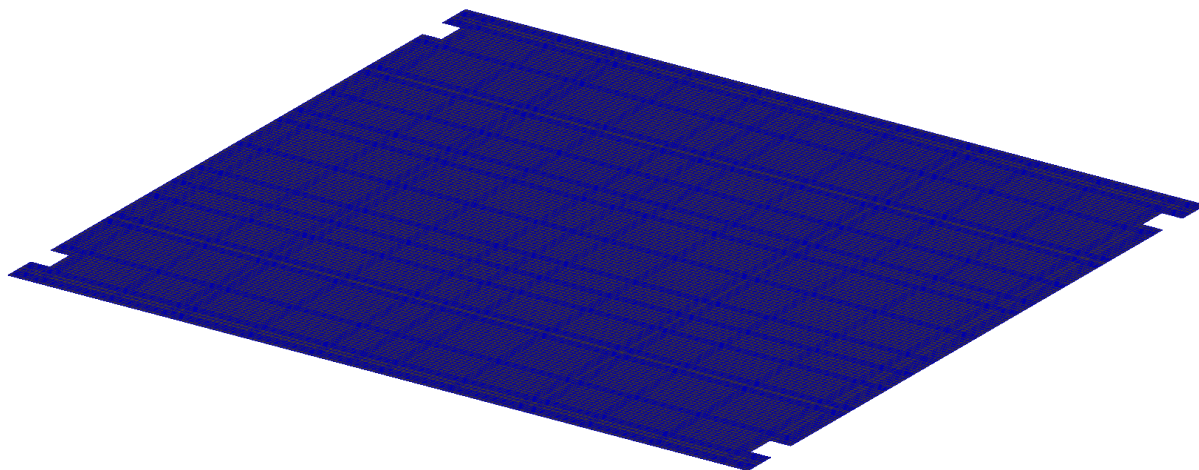
Obr. 35 Síť konečných prvků tenkostěnných spojovacích dílů.

Konečno-prvková síť rámu pro upevnění sedadla řidiče byla vytvořena, stejně jako v případě sítě konečných prvků sedadla spolujezdce, z prvků typu „Quad“ o průměrné velikosti $h = 10$ mm, viz Obr. 36.



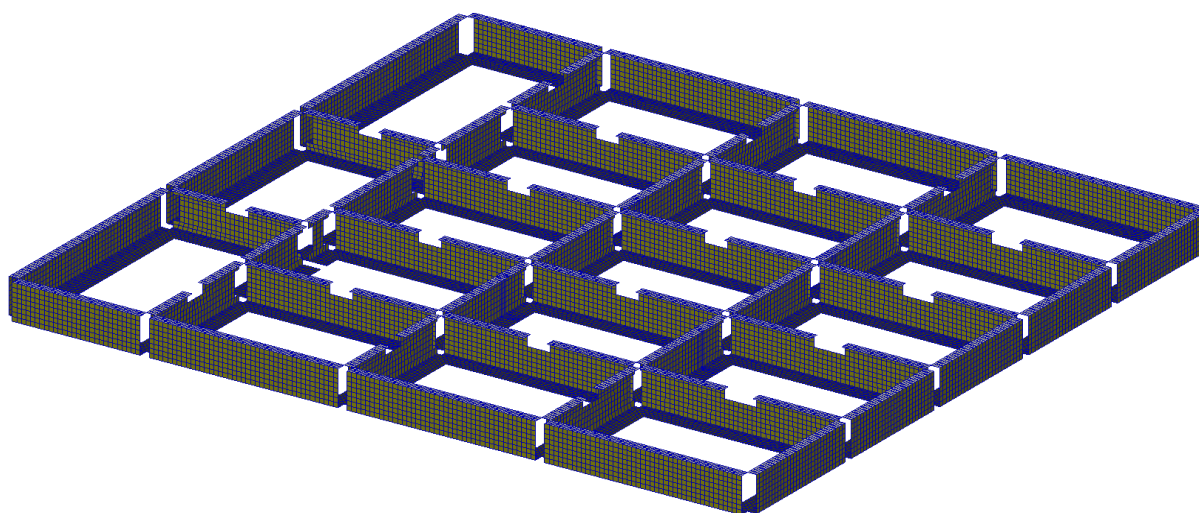
Obr. 36 Síť konečných prvků rámu pro upevnění sedadla řidiče/ spolujezdce.

Obdobným způsobem byla vytvořena také síť konečných prvků dna spodní části bateriového boxu, jež je patrná z Obr. 37. Síť byla znovu vytvořena z prvků typu „Quad“ o průměrné velikosti prvku $h = 10$ mm. V místech budoucího kontaktu s příčkami, lemem a sloupky spodní části bateriového boxu byla síť zhuštěna na průměrnou velikost prvku $h' = 5$ mm.



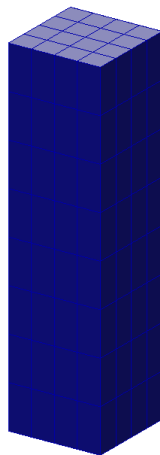
Obr. 37 Síť konečných prvků dna spodní části bateriového boxu.

Podobně byla vytvořena také síť konečných prvků příček spodní části bateriového boxu, viz Obr. 38. I zde byla síť tvořena prvky typu „Quad“ o průměrné velikosti prvku $h = 10$ mm.



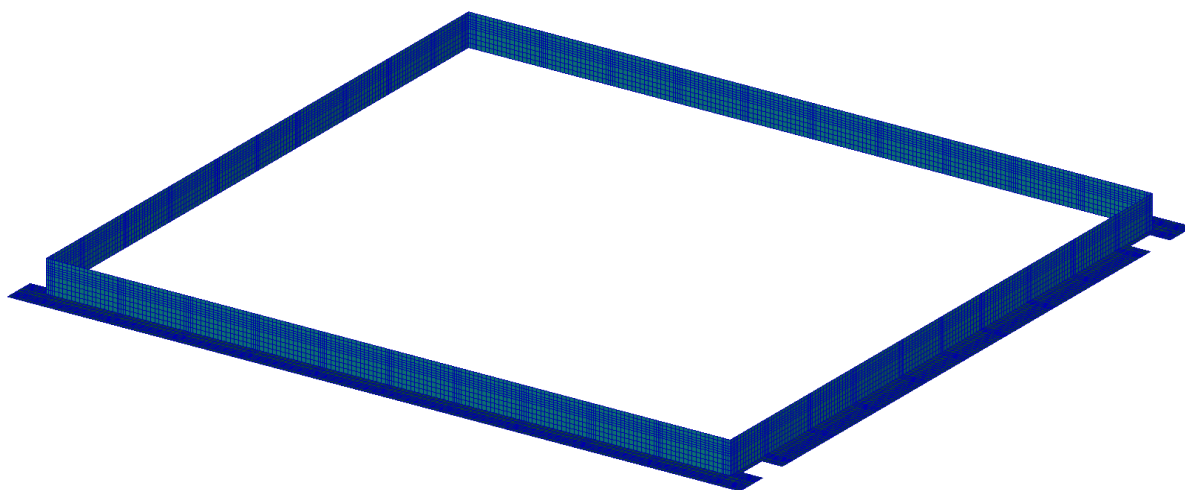
Obr. 38 Síť konečných prvků příček spodní části bateriového boxu.

Sít' konečných prvků sloupků spodní části bateriového boxu byla vytvořena ze 3D prvků typu „Hex“ (šestistěn) o průměrné velikosti prvku $h = 10$ mm. Výsledná sít' jednoho ze sloupků je patrná z Obr. 39.



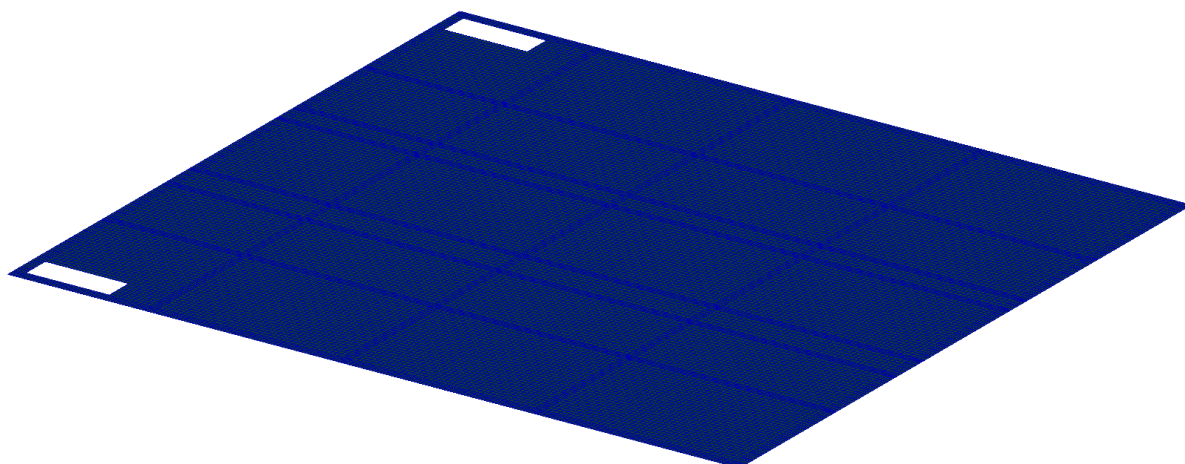
Obr. 39 Sít' konečných prvků jednoho ze sloupků spodní části bateriového boxu.

Na Obr. 40 je patrná sít' konečných prvků lemu spodní části bateriového boxu. Sít' byla tvořena prvky typu „Quad“ o průměrné velikosti prvku $h = 10$ mm. V místech budoucího kontaktu se dnem spodní části bateriového boxu a vložkami středové části rámu vozidla SCX 3.5 byla sít' záměrně zhuštěna na průměrnou velikost prvku $h' = 5$ mm.



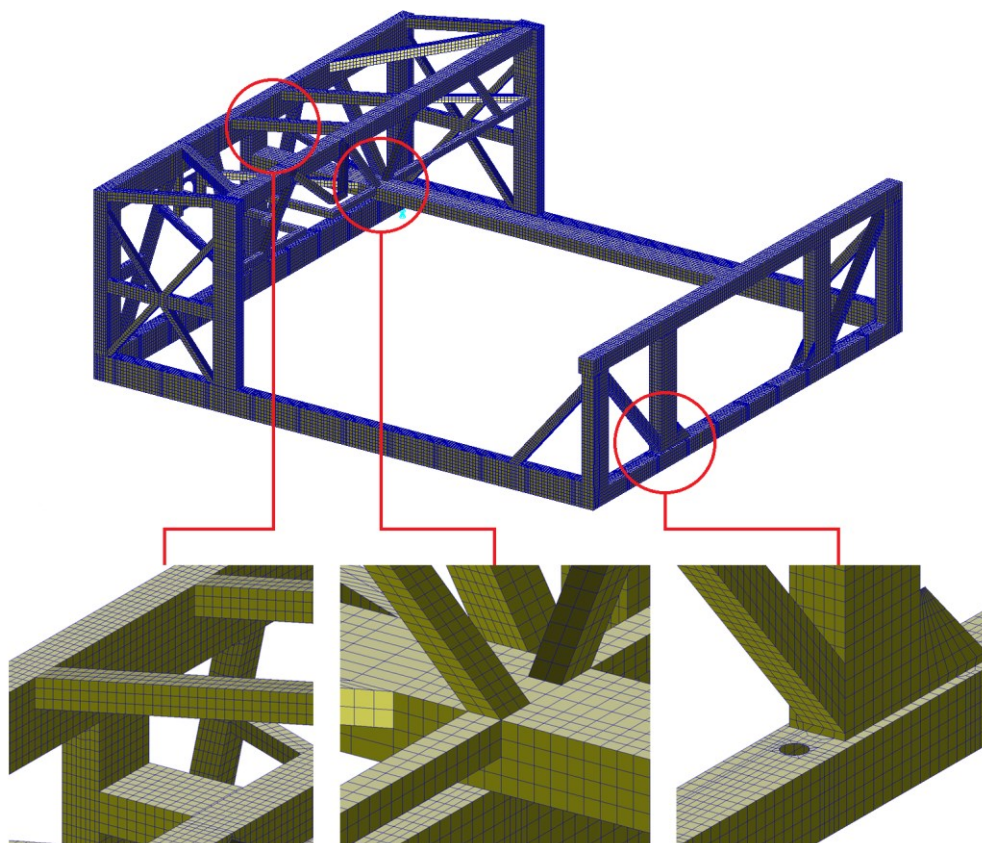
Obr. 40 Sít' konečných prvků lemu spodní části bateriového boxu.

Konečno-prvková síť víka spodní části bateriového boxu je vidět na Obr. 41. Síť byla opět tvořena prvky typu „Quad“ o průměrné velikosti prvku $h = 10$ mm.



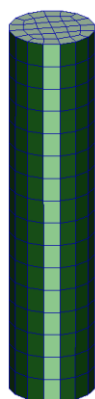
Obr. 41 Síť konečných prvků víka spodní části bateriového boxu.

V případě středové části rámu vozidla SCX 3.5 i zde byla konečno-prvková síť tvořena z prvků typu „Quad“ o průměrné velikosti $h = 10$ mm. Výsledná síť je patrná z Obr. 42.



Obr. 42 Síť konečných prvků středové části rámu vozidla SCX 3.5.

Níže na Obr. 43 je vidět konečno-prvková síť jedné z vložek středové části rámu vozidla SCX 3.5. Síť zde byla tvořena 3D prvky typu „Hex“ o průměrné velikosti $h = 10$ mm. Konečno-prvkový model vložek ve skutečnosti tvoří s konečno-prvkovým modelem středové části rámu jeden celek (odpovídající si uzly sítě obou součástí byly ztotožněny).



Obr. 43 Síť konečných prvků jedné z vložek středové části rámu vozidla SCX 3.5.

Na závěr jsou v Tab. 5 uvedeny některé statistické parametry konečno-prvkového modelu.

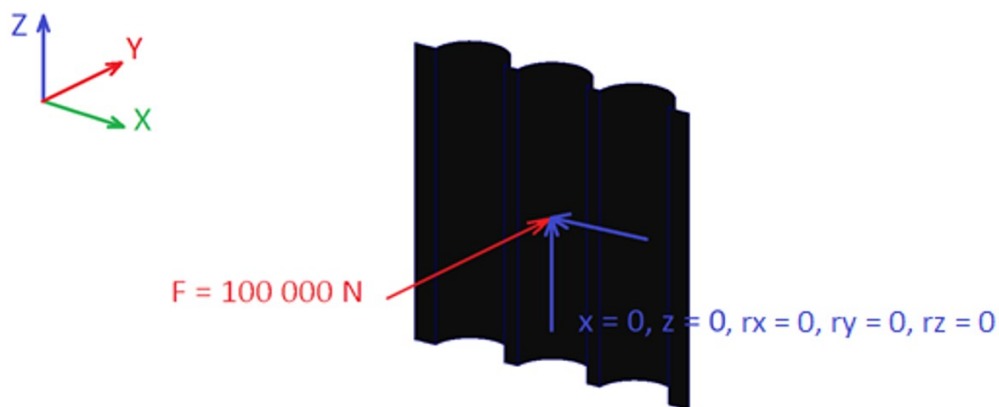
i	Entita	Počet prvků	Počet uzlů
1	Skříň příčného oddílu horní části battery boxu	17 287	17 567
2	Skříň podélného oddílu horní části battery boxu	13 802	14 010
3	Rám příčného oddílu horní části battery boxu	10 033	11 014
4	Rám podélného oddílu horní části battery boxu	8 456	9 270
5	Víko příčného oddílu horní části battery boxu	4 599	4 795
6	Víko podélného oddílu horní části battery boxu	3 981	4 136
7	Díly pro spojení horní a spodní části battery boxu	4 707	5 166
8	Rám sedadla řidiče a rám sedadla spolujezdce	4488×2	$4 484 \times 2$
9	Dno spodní části battery boxu	39 755	40 184
10	Příčky spodní části battery boxu	33 957	37 271
11	Sloupky spodní části battery boxu	3 840	6 750
12	Lem spodní části battery boxu	13 478	13 360
13	Víko spodní části battery boxu	28 452	28 842
14	Středová část rámu vozidla SCX 3.5	73 875	74 279
15	Vložky středové části rámu vozidla SCX 3.5	15 776	24 969
	Celkem	283 438	300 581

Tab. 5 Nejdůležitější statistické parametry konečno-prvkového modelu.

3.4 Okrajové podmínky a kontakty

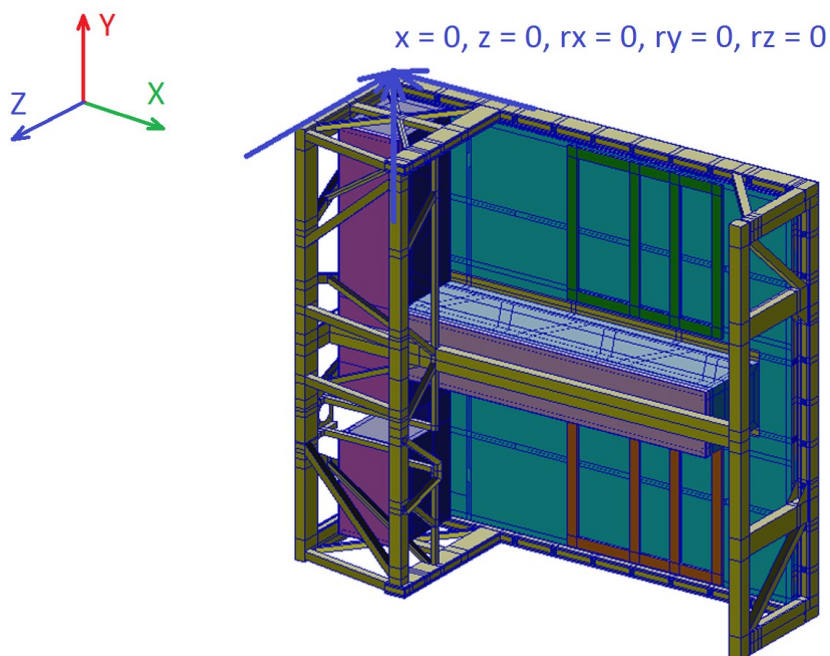
Okrajové podmínky zde představovaly vazby a zatěžující síla. Ve výpočtovém modelu se nacházely celkem tři vazby. První vazba omezovala počet stupňů volnosti impaktoru tak, aby se tento mohl pohybovat pouze ve směru síly, jíž byl skrze impaktor zatěžován bateriový box s rámem. Druhá vazba obdobným způsobem zamezovala pohybu bateriového boxu s rámem vzhledem k podkladu. Poslední vazba poté odejímalala všech šest stupňů volnosti podkladu.

Na Obr. 44 jsou vyobrazeny okrajové podmínky pro impaktor. Impaktor byl v rámci kontaktní analýzy uvažován jako geometrické (dokonale tuhé) těleso, na nějž byla aplikována vazba, zamezující rotacím okolo všech os a posuvům ve směru os x a z (globálního souřadného systému) tak, aby se impaktor mohl pohybovat pouze ve směru síly F , tedy ve směru osy y , viz Obr. 44. Samotná síla F byla zavedena do uzlu, vytvořeného speciálně pro tento účel. Tento uzel byl dále využit pro řízení pohybu geometrického kontaktního tělesa impaktoru, tímto způsobem tedy síla působila skrze impaktor na bateriový box s rámem.



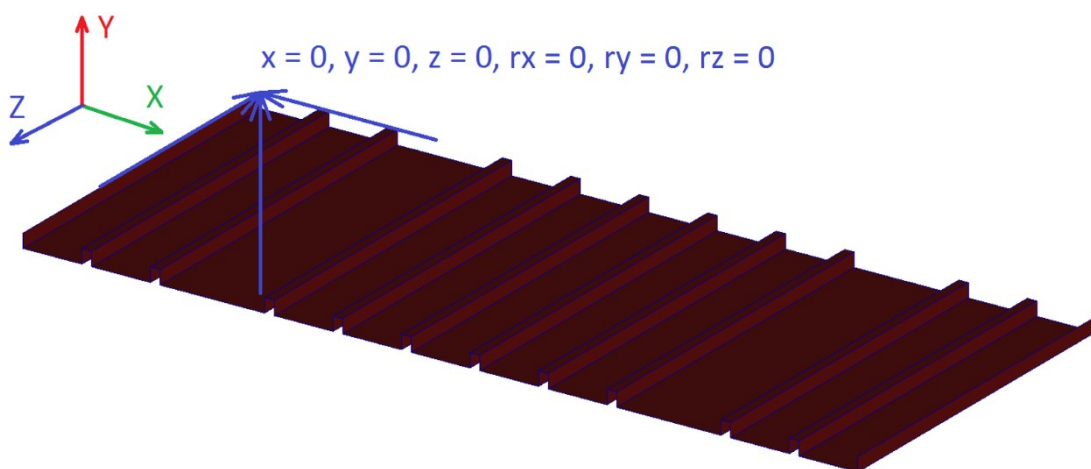
Obr. 44 Okrajové podmínky pro impaktor.

Obdobným způsobem jako v případě impaktoru byly několika uzlům celku bateriového boxu s rámem prostřednictvím vazby odejmuty možné posuvy ve směru os x a z a rotace okolo těchto os, viz Obr. 45.



Obr. 45 Okrajové podmínky pro celek bateriového boxu s rámem.

Zrovna tak jako impaktor i podklad byl v rámci kontaktní analýzy uvažován jako geometrické těleso, na nějž byla aplikována vazba odnímající podkladu všech šest možných pohybů (posuvy ve směru os x, y, z a rotace okolo těchto os), viz Obr. 46.



Obr. 46 Okrajové podmínky pro podklad.

V neposlední řadě bylo nutno také do výpočtového modelu zahrnout způsob vzájemného spojení jednotlivých, dříve popsaných, částí modelu.

Většina spojení měla být později realizována lepením. V návrhu se však vyskytovalo také několik šroubových spojů. Jmenovitě víko spodní části bateriového boxu a čelní deska (na Obr. 18 červenou barvou) měly být přišroubovány ke sloupkům spodní části bateriového boxu. Také lem spodní části bateriového boxu měl být přišroubován k vložkám středové části rámu vozidla. Tyto spoje byly zjednodušeně modelovány definováním kontaktu typu „glued“ mezi těmito korespondujícími si částmi. Obdobně také lepené spoje byly do modelu zahrnuty prostřednictvím kontaktu typu „glued“.

V modelu se mimo deformovatelných kontaktních těles, složených z konečných prvků a uzlů, nacházela také celkem dvě kontaktní tělesa nedeformovatelná. Jednalo se o kontaktní tělesa impaktoru a podkladu. Tato tělesa byla naproti tomu definována pouze svou geometrií. Mezi těmito dvěma tělesy a kontaktním tělesem středové části rámu byl dále definován kontakt typu touch. Kontakt typu touch byl rovněž definován mezi víkem spodní části bateriového boxu a příčkami spodní části bateriového boxu, stejně jako mezi lemem spodní části bateriového boxu a středovou částí rámu vozu. V celém modelu se nacházelo celkem 18 kontaktních těles a 24 kontaktních párů.

V Tab. 6 byly přehledně vypsány kontaktní páry včetně jejich typů a vzájemných interakcí.

První těleso (Master)	Druhé těleso (Slave)	Charakter kontaktu	Součinitel tření [-]
Dno spodní části bateriového boxu	Příčky spodní části bateriového boxu	Glued	-
Dno spodní části bateriového boxu	Sloupky spodní části bateriového boxu	Glued	-
Dno spodní části bateriového boxu	Lem spodní části bateriového boxu	Glued	-
Příčky spodní části bateriového boxu	Víko spodní části bateriového boxu	Touch	$f_{hh} = 0,3$
Příčky spodní části bateriového boxu	Lem spodní části bateriového boxu	Glued	-
Sloupky spodní části bateriového boxu	Víko spodní části bateriového boxu	Glued	-
Sloupky spodní části bateriového boxu	Lem spodní části bateriového boxu	Glued	-
Víko spodní části bateriového boxu	Rám pro upevnění sedadla řidiče	Glued	-
Víko spodní části bateriového boxu	Rám pro upevnění sedadla spolujezdce	Glued	-
Víko spodní části bateriového boxu	Skříň příčného oddílu horní části bateriového boxu	Glued	-
Víko spodní části bateriového boxu	Skříň podélného oddílu horní části bateriového boxu	Glued	-
Lem spodní části bateriového boxu	Středová část rámu vozu	Touch	$f_{ho} = 0,61$
Lem spodní části bateriového boxu	Vložky středové části rámu vozu	Glued	-
Lem spodní části bateriového boxu	Díly pro spojení horní a spodní části bateriového boxu	Glued	-

Tab. 6 Kontakty definované pro oba dva zátěžné stavy případu zadní nápravy²⁶.

V Tab. 7 pokračuje výpis kontaktů, jejich typů a vzájemných interakcí.

První těleso (Master)	Druhé těleso (Slave)	Charakter kontaktu	Součinitel tření [-]
Víko spodní části bateriového boxu	Díly pro spojení horní a spodní části bateriového boxu	Glued	-
Středová část rámu vozu	Impaktor	Touch	$f_{oo} = 0,78$
Středová část rámu vozu	Podklad	Touch	$f_{oo} = 0,78$
Skříň příčného oddílu horní části bateriového boxu	Skříň podélného oddílu horní části bateriového boxu	Glued	-
Skříň příčného oddílu horní části bateriového boxu	Víko příčného oddílu horní části bateriového boxu	Glued	-
Skříň příčného oddílu horní části bateriového boxu	Rám příčného oddílu horní části bateriového boxu	Glued	-
Skříň podélného oddílu horní části bateriového boxu	Víko podélného oddílu horní části bateriového boxu	Glued	-
Skříň podélného oddílu horní části bateriového boxu	Rám podélného oddílu horní části bateriového boxu	Glued	-
Skříň příčného oddílu horní části bateriového boxu	Díly pro spojení horní a spodní části bateriového boxu	Glued	-
Skříň podélného oddílu horní části bateriového boxu	Díly pro spojení horní a spodní části bateriového boxu	Glued	-

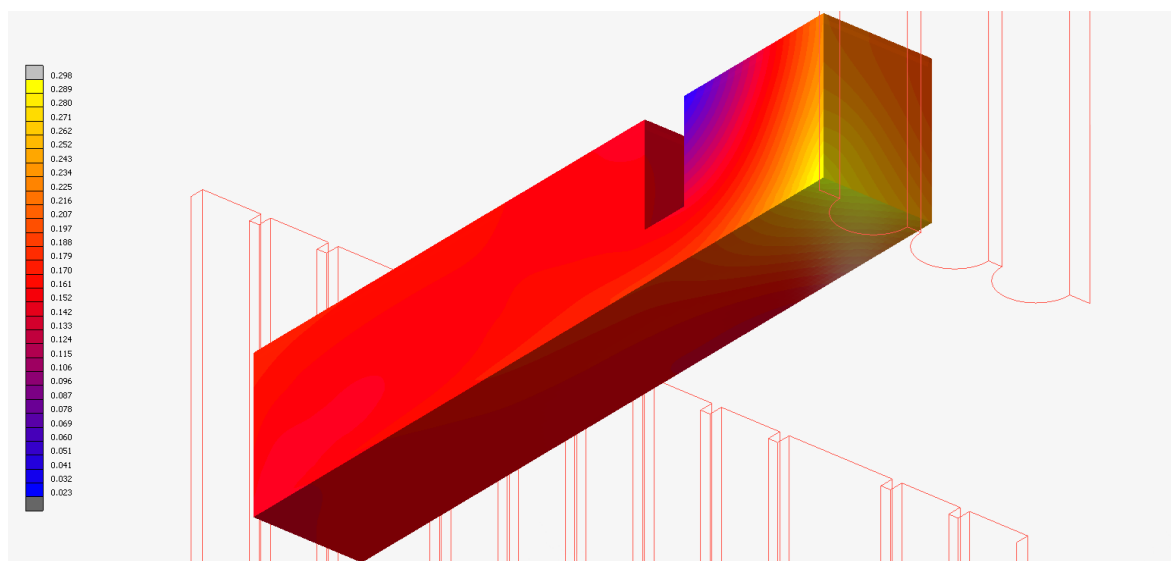
Tab. 7 Kontakty definované pro oba dva zátěžné stavy případu přední nápravy²⁶.

4 Analýza a výsledky

Po sestavení modelu přišla na řadu samotná analýza, provedená postupně v řešiči MSC Marc. Nejdříve byl vyřešen případ, kdy všechny materiály byly uvažovány pouze jako lineárně elastické, nikoliv elasticko-plastické, při uvažování malých deformací a použití zjednodušených okrajových podmínek. Ty znamenaly vypuštění kontaktních těles podkladu a impaktoru z modelu s tím, že na uzly konečno-prvkového modelu středové části rámu, jenž by obvykle byly v kontaktu s podkladem, byla aplikována dodatečná okrajová podmínka zamezení posuvu ve směru normály styčné plochy podkladu. Dále také zatěžující síla F byla se shodnou orientací aplikována přímo na elementy konečno-prvkového modelu středové části rámu, jejichž uzly by jinak byly v kontaktu s tělesem impaktoru. Účelem tohoto snažení bylo zjednodušit úlohu z hlediska kontaktní analýzy a soustředit se nejprve na vyladění kontaktů v rámci bateriového boxu se středovou částí rámu. Následně byl tento zjednodušený model rozšířen o plastické chování všech materiálů v modelu a předpoklad velkých deformací. Po úspěšném vyřešení tohoto případu byly nakonec z modelu vypuštěny výše zmiňované zjednodušené okrajové podmínky a zpět zahrnuty kontaktní tělesa podkladu a impaktoru se svými původními okrajovými podmínkami a úloha byla následně vyřešena.

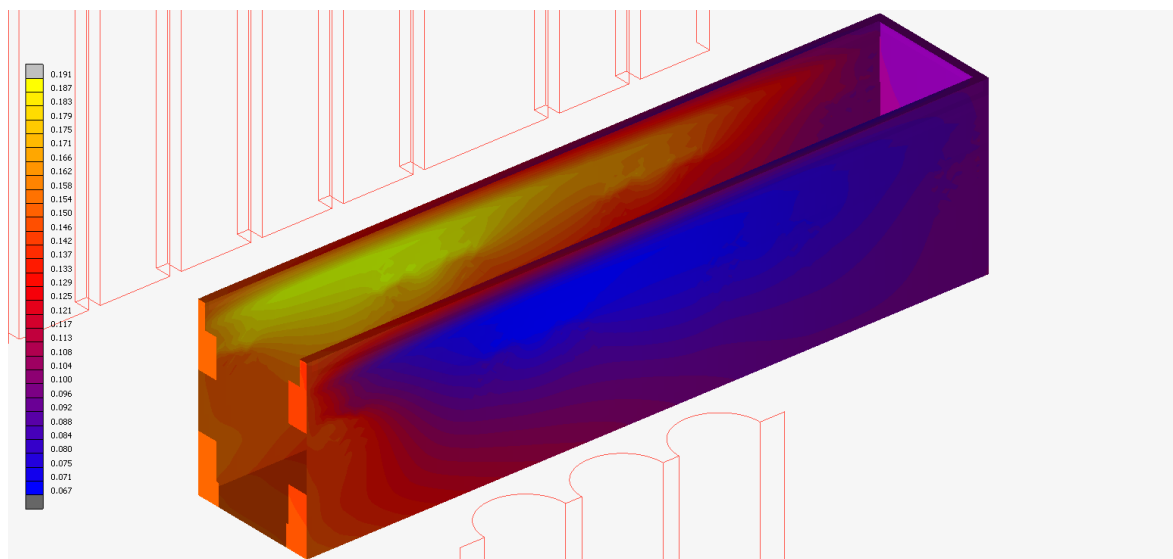
4.1 Posuvy

Na Obr. 47 lze vidět výsledné posuvy na tělese příčného oddílu horní části bateriového boxu.



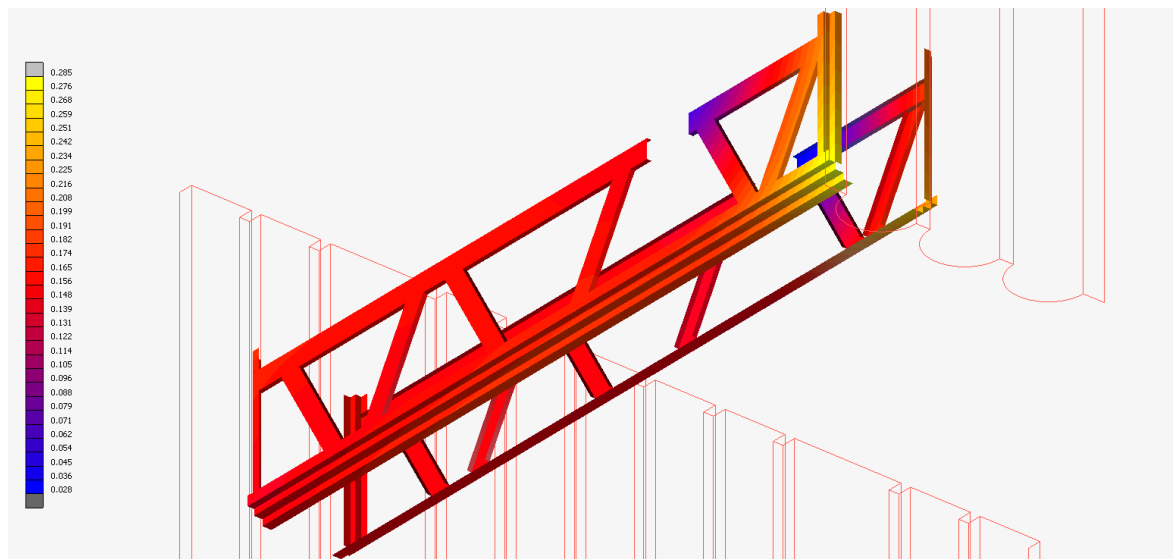
Obr. 47 Výsledné posuvy na tělese příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Obr. 48 ukazuje posuvy na tělese podélného oddílu horní části bateriového boxu. Na obrázcích Obr. 47 až Obr. 80 byla pro snazší orientaci vyobrazena rovněž tělesa podkladu a impaktoru.



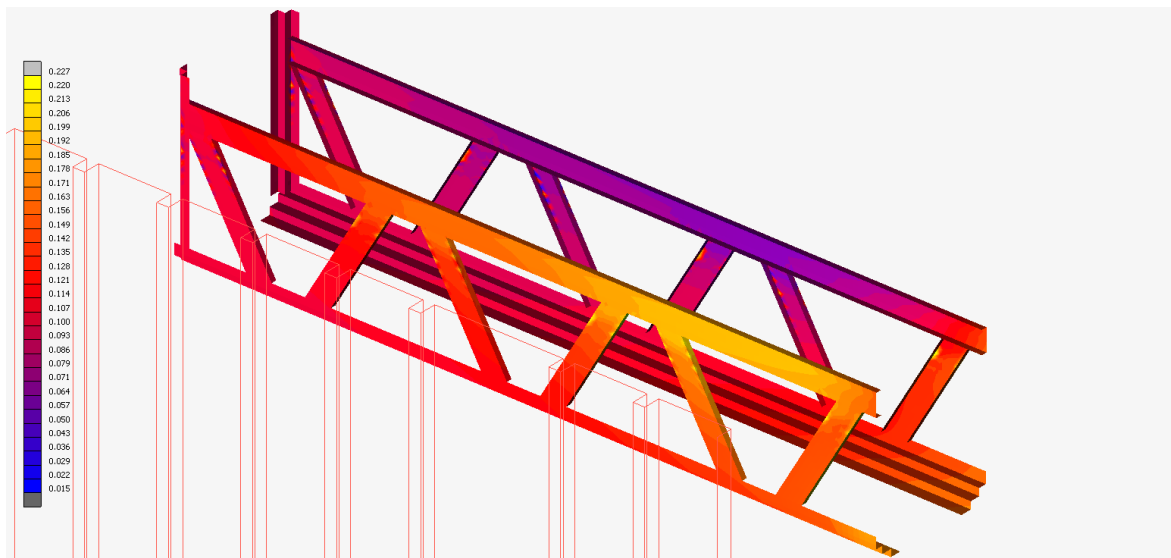
Obr. 48 Výsledné posuvy na tělese podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Z Obr. 49 jsou patrné posuvy na tělese rámu příčného oddílu horní části bateriového boxu.



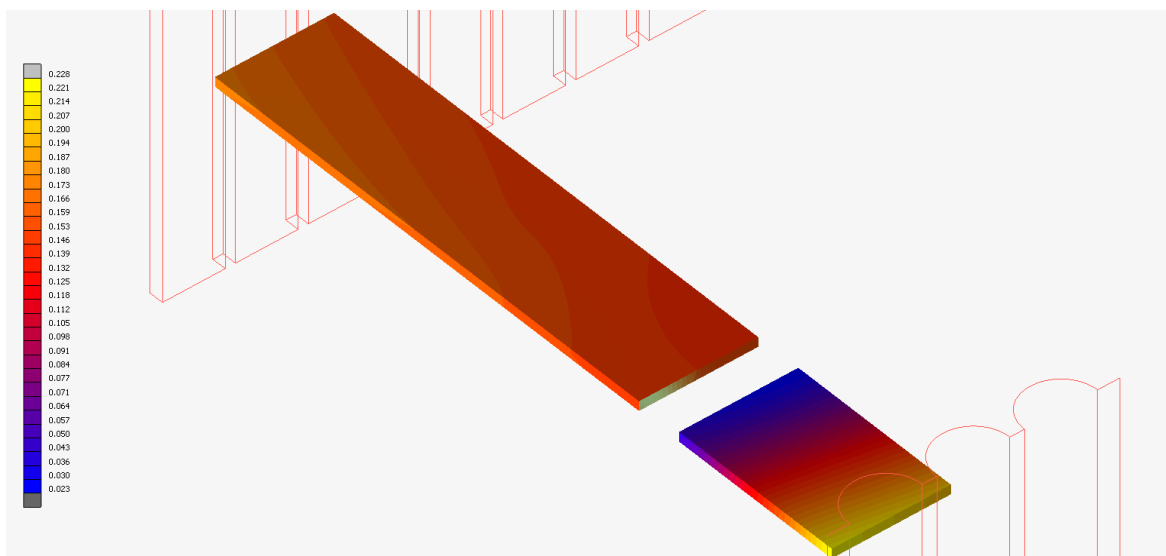
Obr. 49 Výsledné posuvy na tělese rámu příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Výsledné posuvy pro těleso rámu podélného oddílu horní části bateriového boxu jsou zřejmé z Obr. 50.



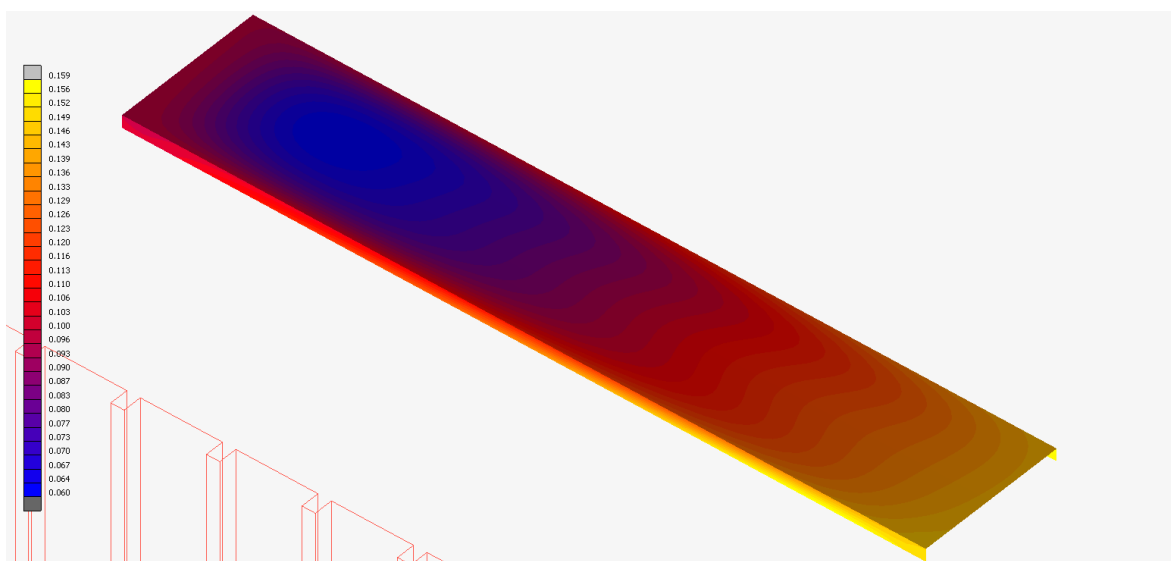
Obr. 50 Výsledné posuvy pro těleso rámu podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Posuvy víka příčného oddílu horní části bateriového boxu jsou vyobrazeny na Obr. 51.



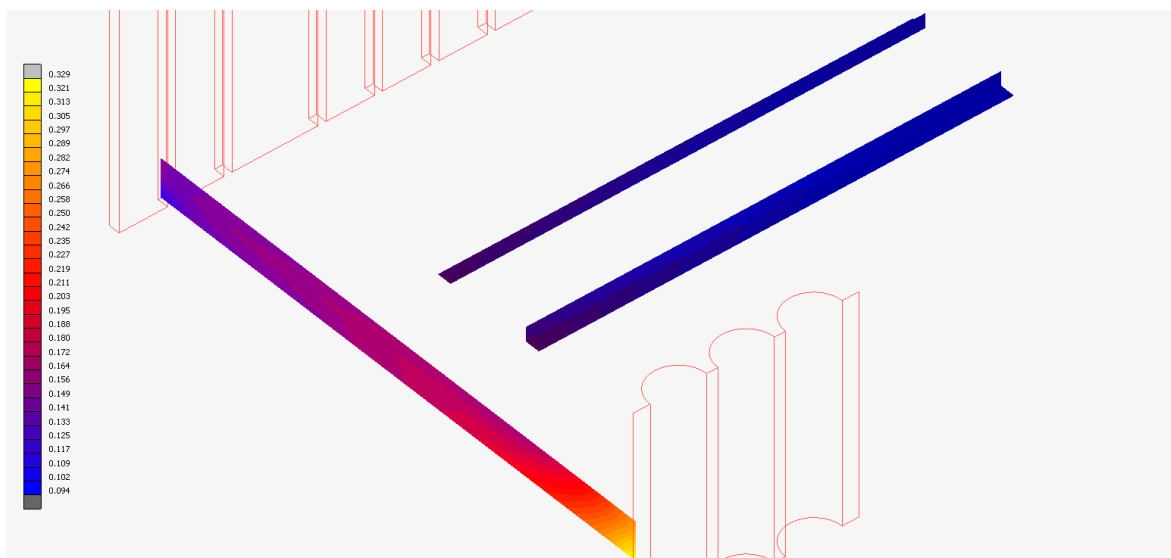
Obr. 51 Výsledné posuvy pro těleso víka příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Vyřešené posuvy víka podélného oddílu horní části bateriového boxu lze spatřit na Obr. 52.



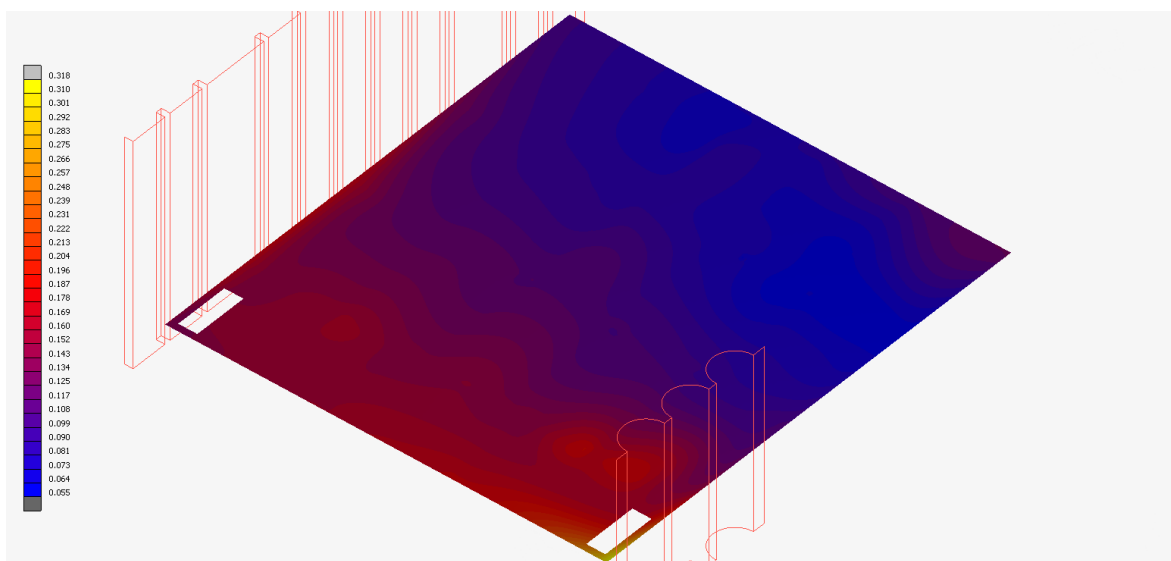
Obr. 52 Výsledné posuvy na tělese víka podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Posuvy na tělesech tenkostěnných dílů, sloužících pro zpevnění vzájemného spojení horní a spodní části bateriového boxu, lze vidět na Obr. 53.



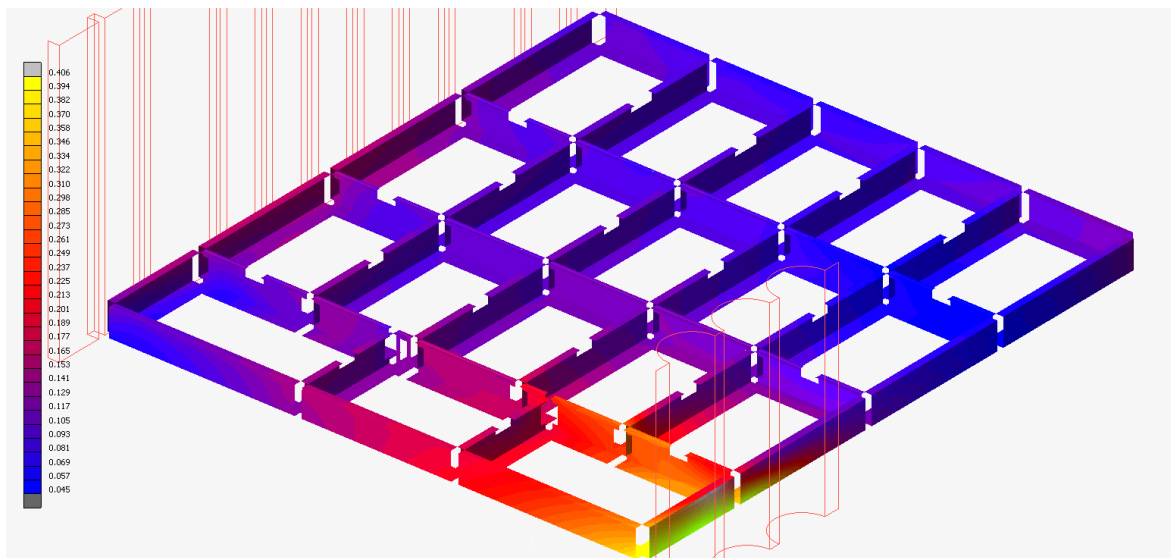
Obr. 53 Výsledné posuvy na tělesech tenkostěnných dílů pro spojení horní a spodní části bateriového boxu.

Výsledné posuvy na tělese víka spodní části bateriového boxu ukazuje Obr. 54.



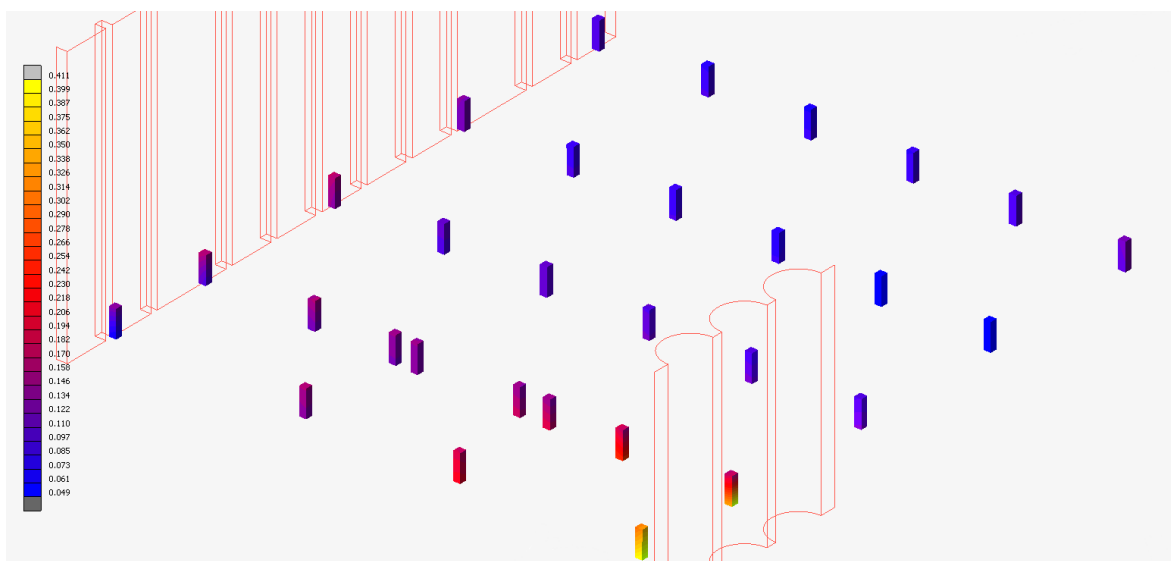
Obr. 54 Výsledné posuvy na tělese víka spodní části bateriového boxu.

Na Obr. 55 lze vidět výsledné posuvy na tělese příček spodní části bateriového boxu.



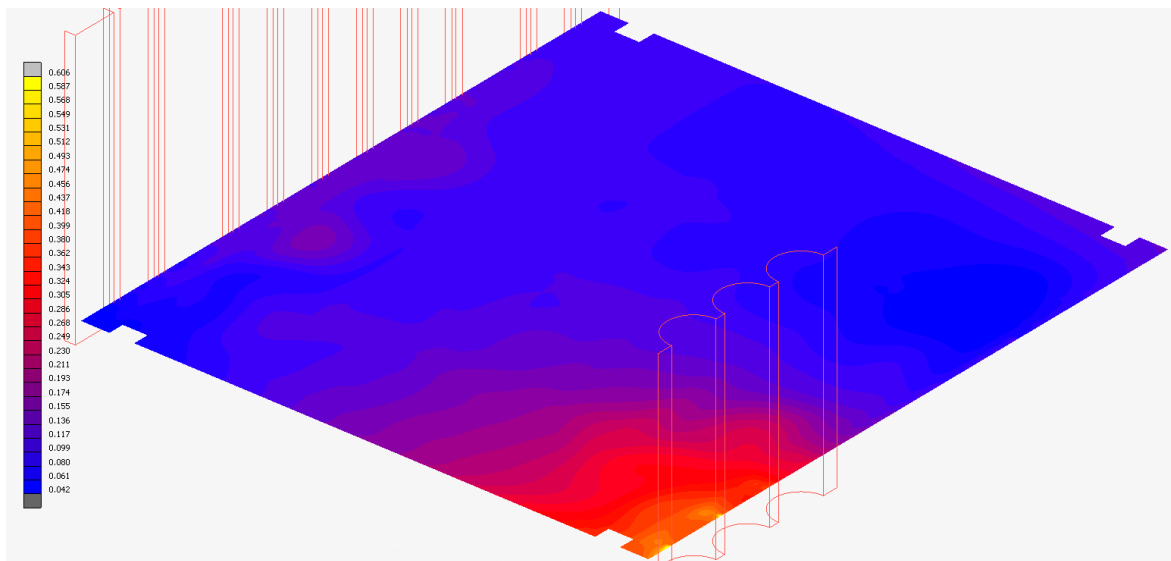
Obr. 55 Výsledné posuvy na tělese příček spodní části bateriového boxu.

Obr. 56 ukazuje posuvy na tělesech sloupků spodní části bateriového boxu.



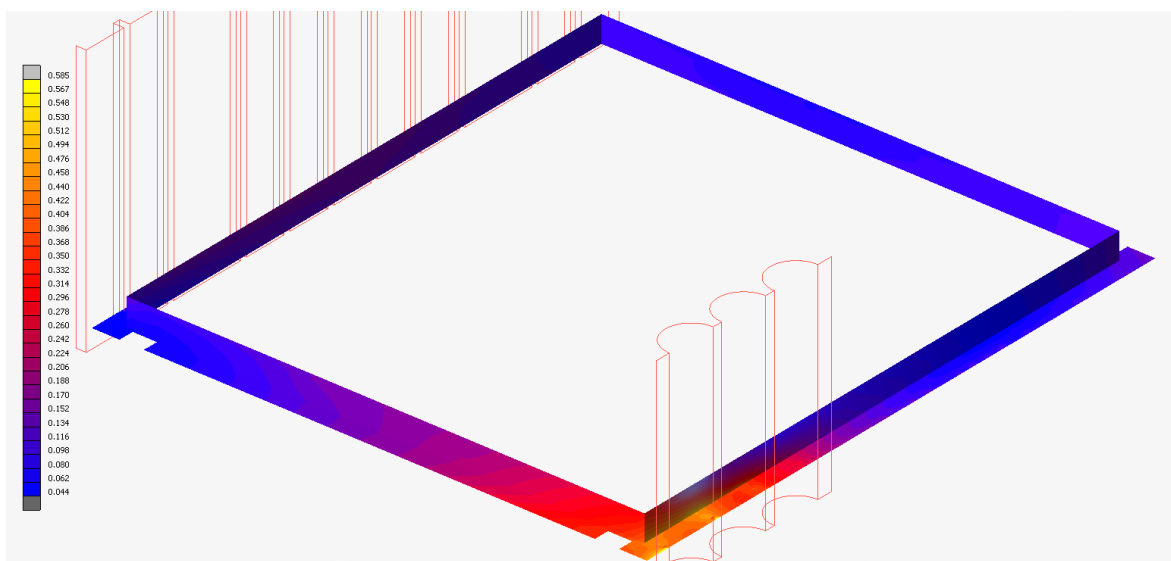
Obr. 56 Výsledné posuvy na tělesech sloupků spodní části bateriového boxu.

Z Obr. 57 jsou patrné posuvy tělesa dna spodní části bateriového boxu.



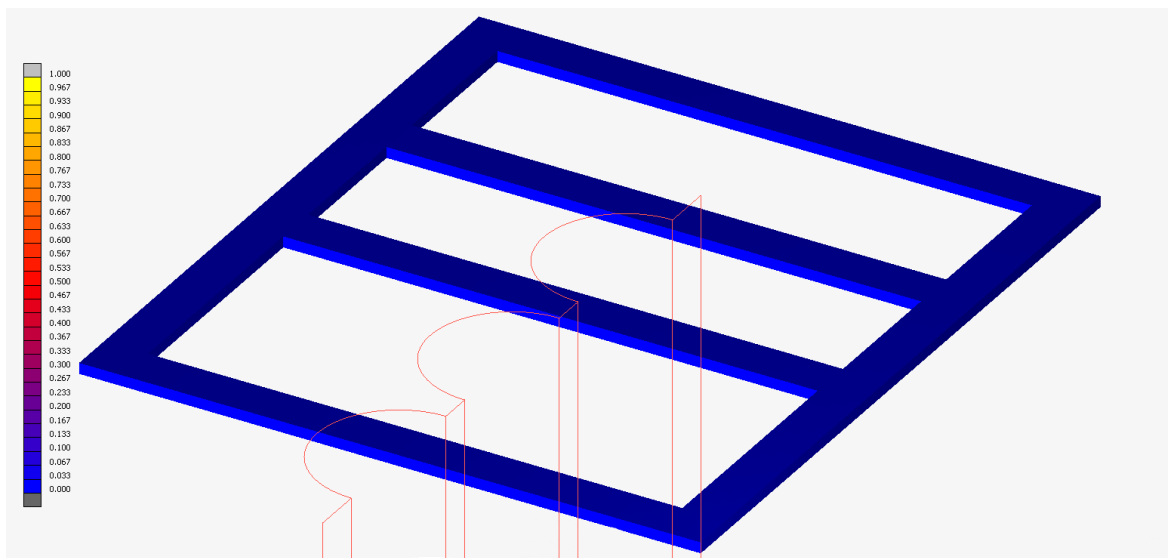
Obr. 57 Výsledné posuvy na tělese dna spodní části bateriového boxu.

Výsledné posuvy pro těleso lemu spodní části bateriového boxu jsou zřejmé z Obr. 58.



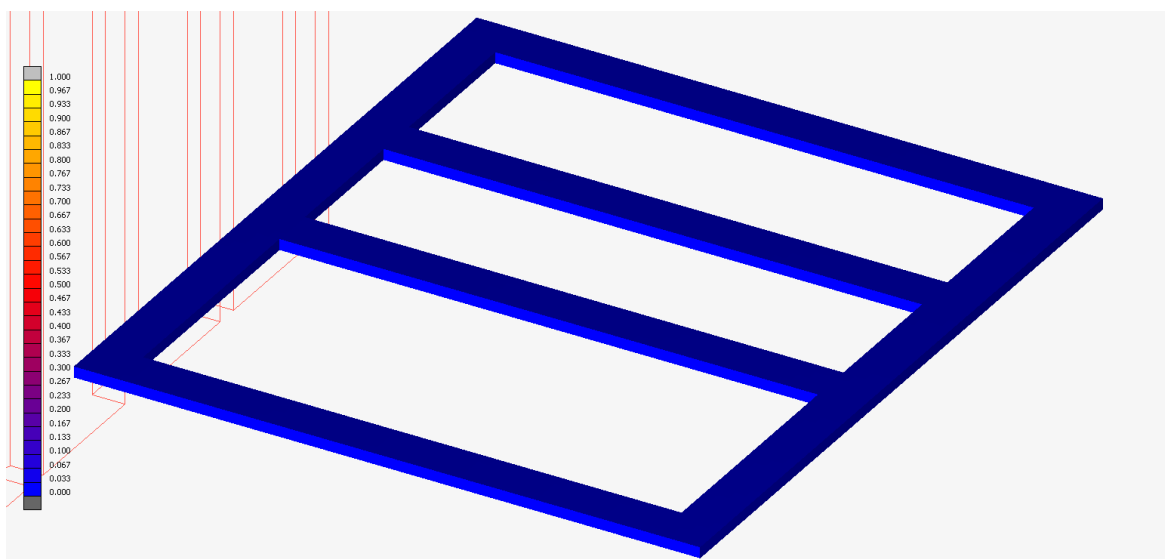
Obr. 58 Výsledné posuvy na tělese lemu spodní části bateriového boxu.

Posuvy tělesa rámu pro upevnění sedadla řidiče jsou vyobrazeny na Obr. 59.



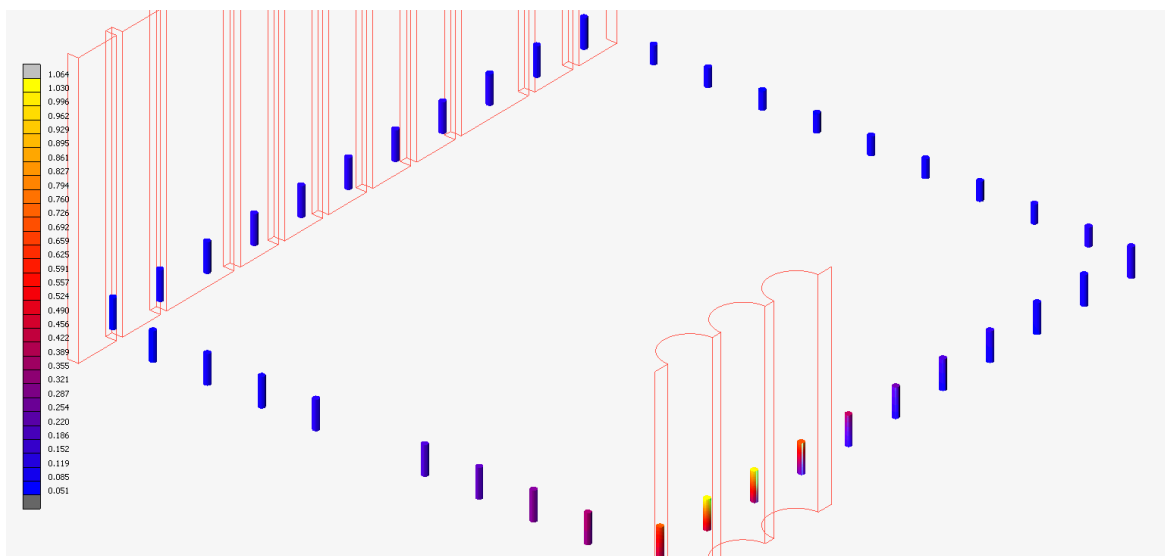
Obr. 59 Výsledné posuvy na tělese rámu pro upevnění sedadla řidiče.

Vyřešené posuvy tělesa rámu pro upevnění sedadla spolujezdce lze spatřit na Obr. 60.



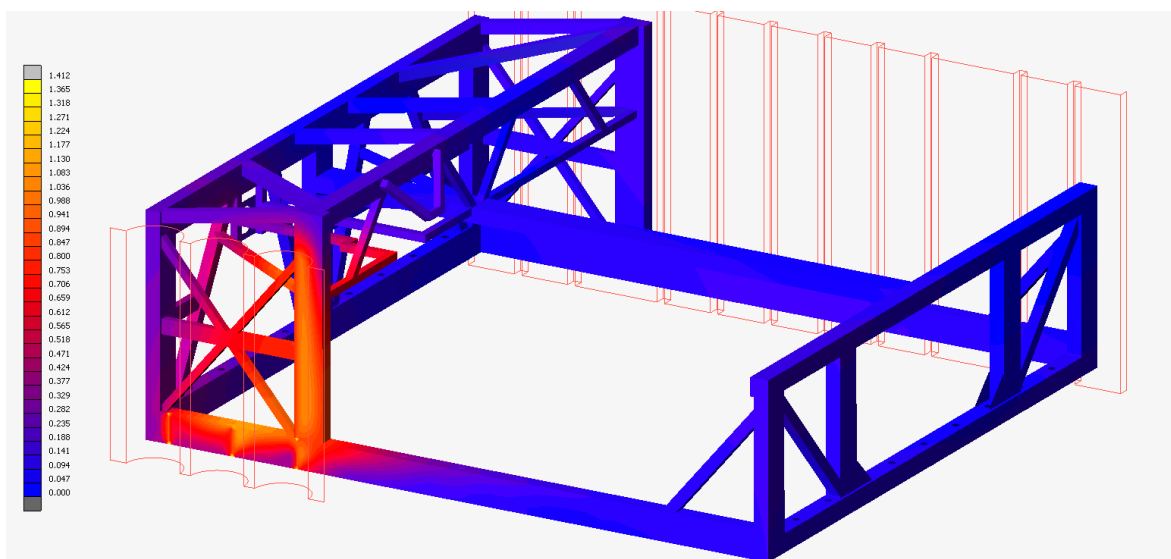
Obr. 60 Výsledné posuvy na tělese rámu pro upevnění sedadla spolujezdce.

Posuvy na tělesech vložek středové části rámu, sloužících pro připevnění bateriového boxu ke středové části rámu vozidla, lze vidět na Obr. 61.



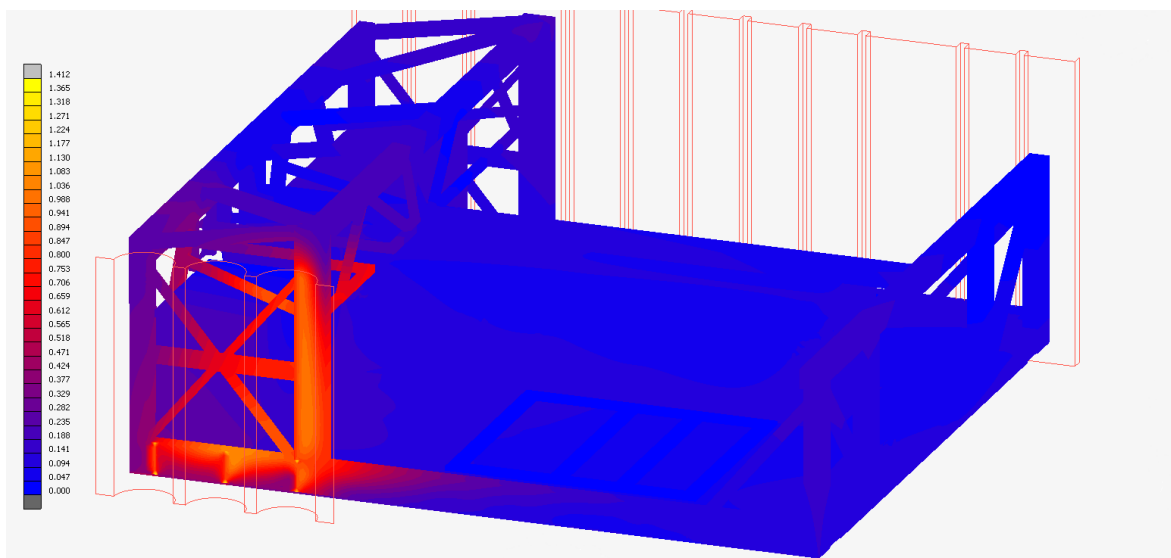
Obr. 61 Výsledné posuvy na tělesech vložek středové části rámu vozidla.

Výsledné posuvy na tělese středové části rámu vozidla ukazuje Obr. 62.



Obr. 62 Výsledné posuvy na tělese středové části rámu vozidla.

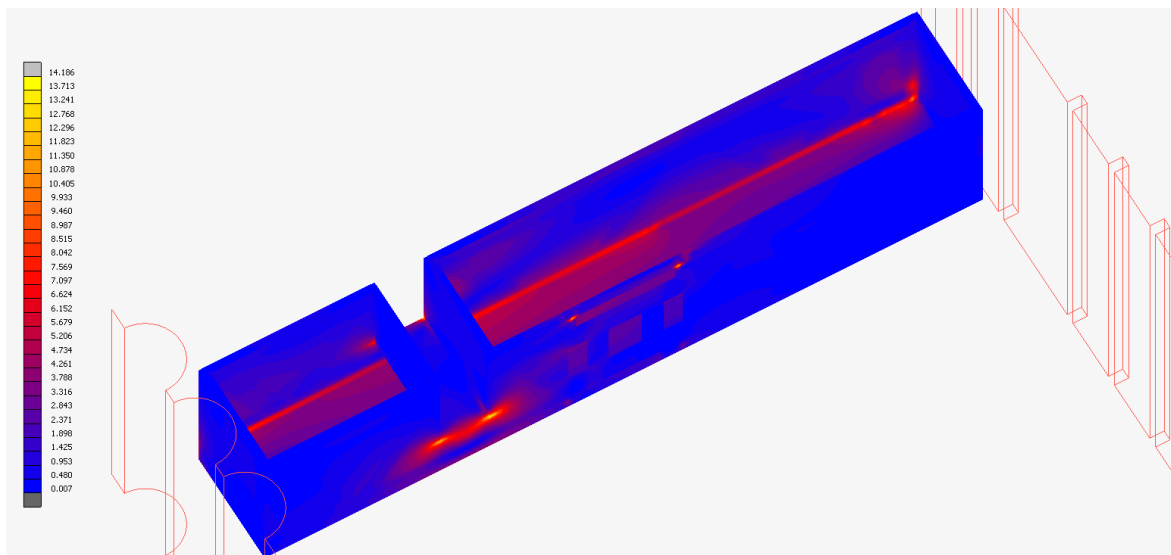
Pro celkovou představu jsou na Obr. 63 vyobrazeny posuvy všech součástí celku bateriového boxu společně se středovou částí rámu vozidla.



Obr. 63 Výsledné posuvy na celku bateriového boxu a středové části rámu vozidla.

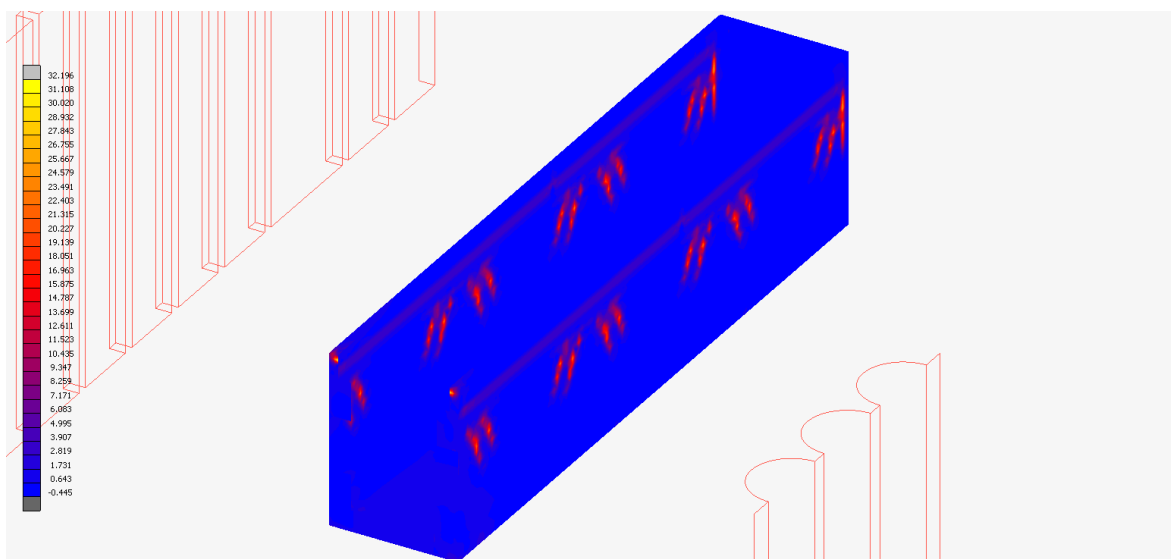
4.2 Napětí

Na Obr. 64 lze vidět výsledná napětí, redukováná dle hypotézy HMM, na tělese příčného oddílu horní části bateriového boxu.



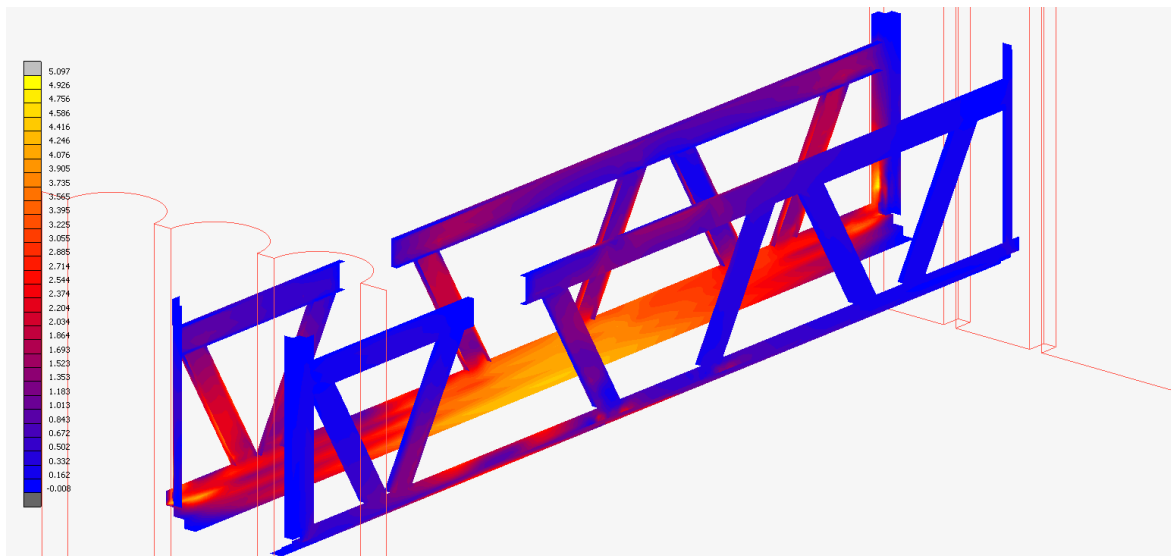
Obr. 64 Výsledná redukováná napětí (HMM) na tělese příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Níže na Obr. 65 lze spatřit napětí, redukováná dle hypotézy HMM, na tělese podélného oddílu horní části bateriového boxu.



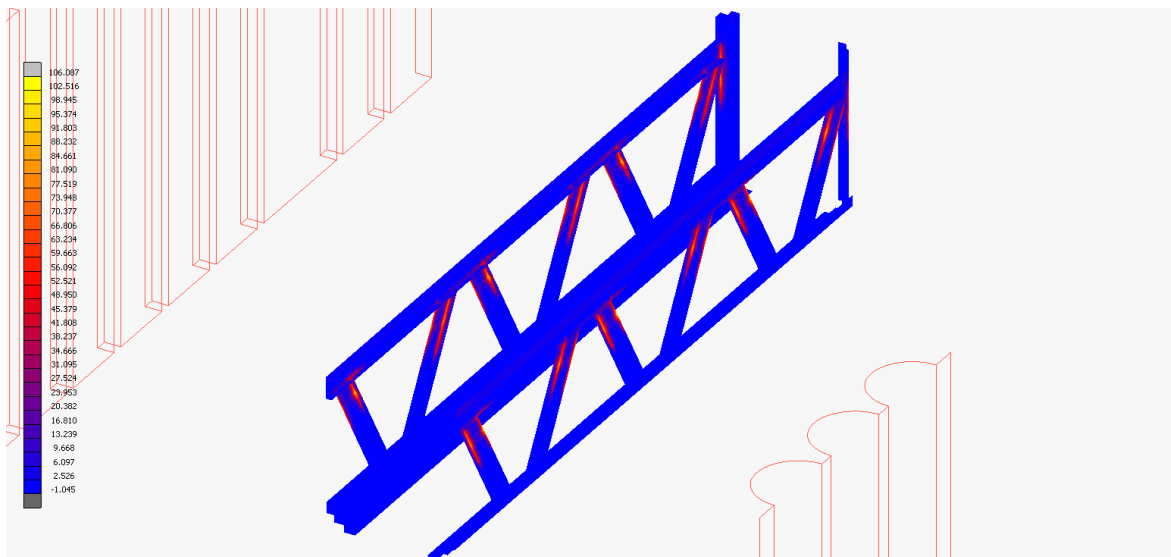
Obr. 65 Výsledná redukováná napětí (HMM) na tělese podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Obr. 66 ukazuje napětí, redukovaná dle hypotézy HMH, na tělese rámu příčného oddílu horní části bateriového boxu.



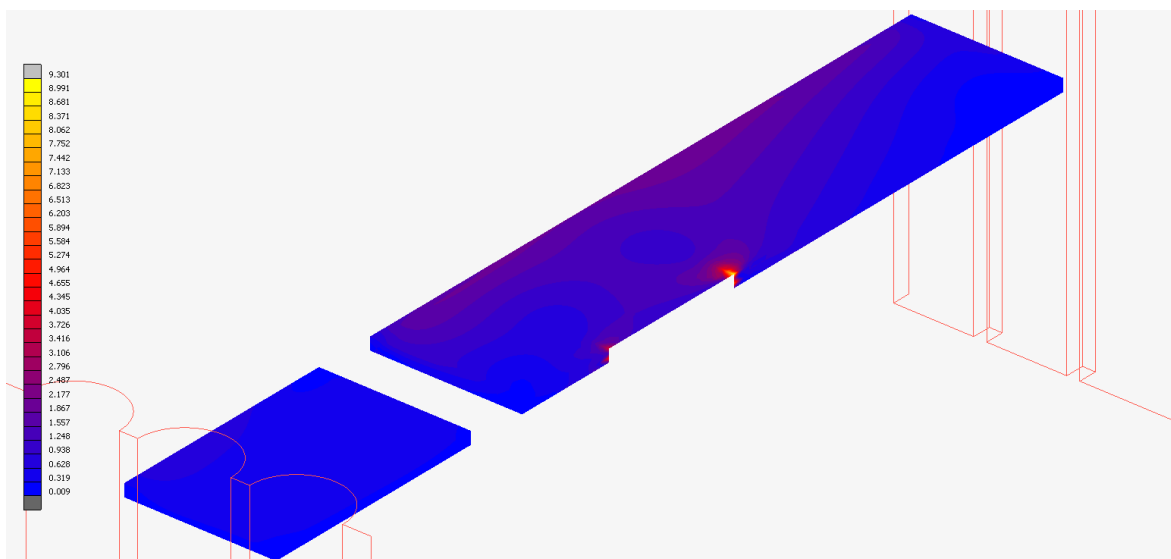
Obr. 66 Výsledná redukovaná napětí (HMH) na tělese rámu příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Z Obr. 67 jsou patrná vyřešená redukovaná napětí dle hypotézy HMH, vyobrazená na tělese rámu podélného oddílu horní části bateriového boxu.



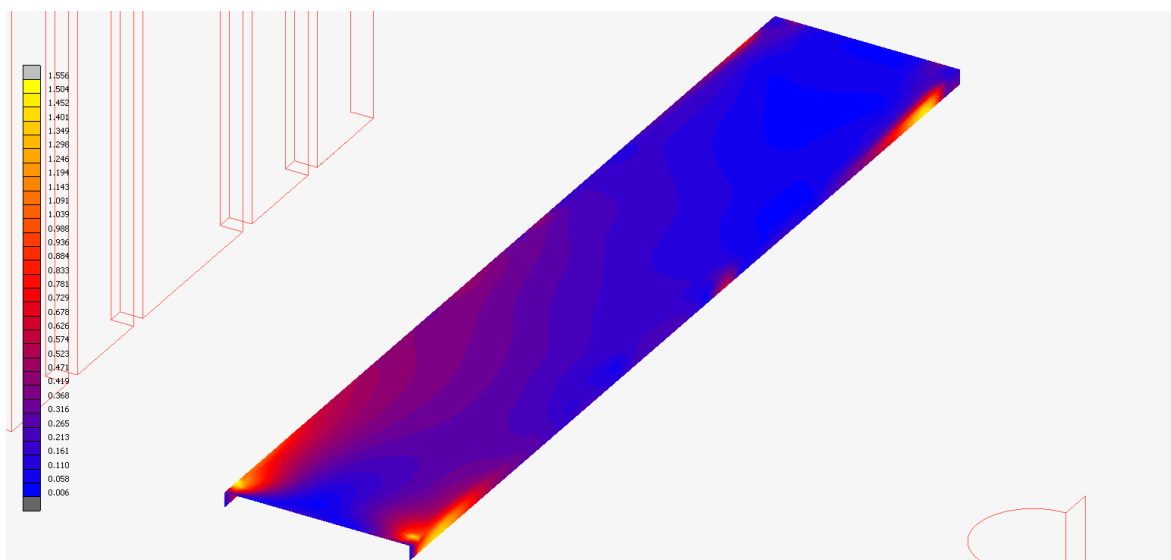
Obr. 67 Výsledná redukovaná napětí (HMH) na tělese rámu podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Výsledná redukovaná napětí dle hypotézy HMM pro těleso víka příčného oddílu horní části bateriového boxu lze vidět na Obr. 68.



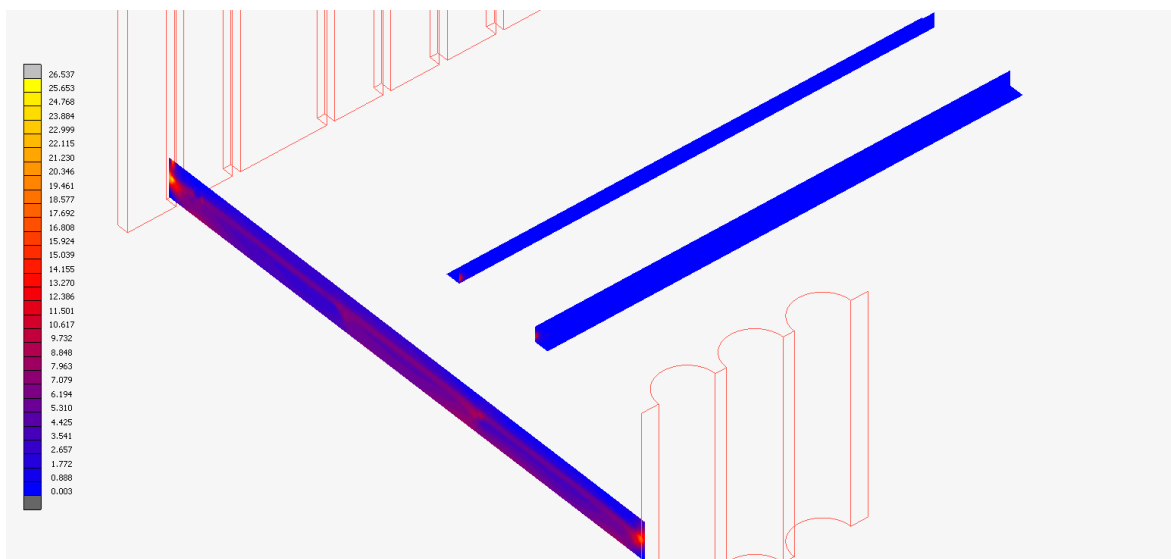
Obr. 68 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělese víka příčného oddílu horní části bateriového boxu.

Vyřešená napětí, redukovaná dle hypotézy HMM, na tělese víka podélného oddílu horní části bateriového boxu jsou k vidění na Obr. 69.



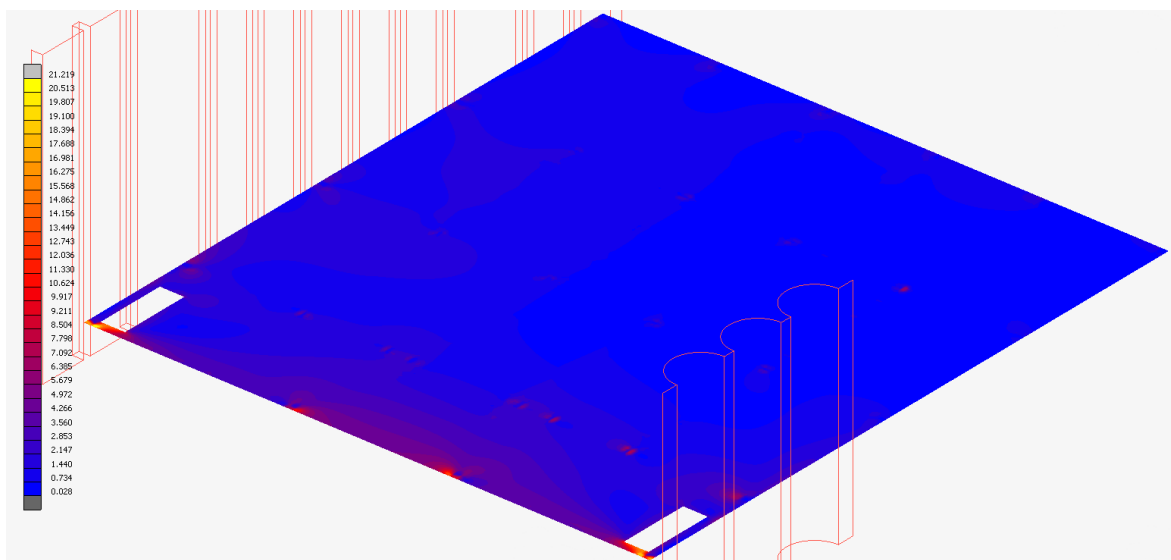
Obr. 69 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělese víka podélného oddílu horní části bateriového boxu.

Vyřešená redukovaná napětí (dle hypotézy HMH) pro tělesa tenkostěnných dílů, sloužících pro zpevnění spojení horní a spodní části bateriového boxu, jsou zřejmá z Obr. 70.



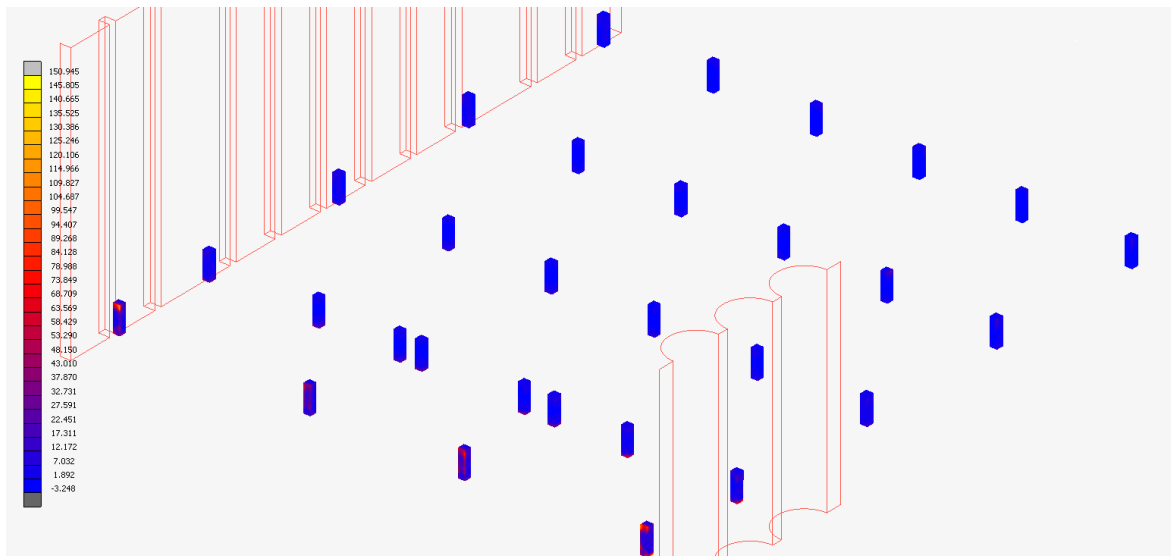
Obr. 70 Redukovaná napětí (HMH) na tělesech tenkostěnných dílů pro spojení horní a spodní části boxu.

Redukovaná napětí (dle hypotézy HMH) jsou viditelná na tělese víka spodní části bateriového boxu na Obr. 71.



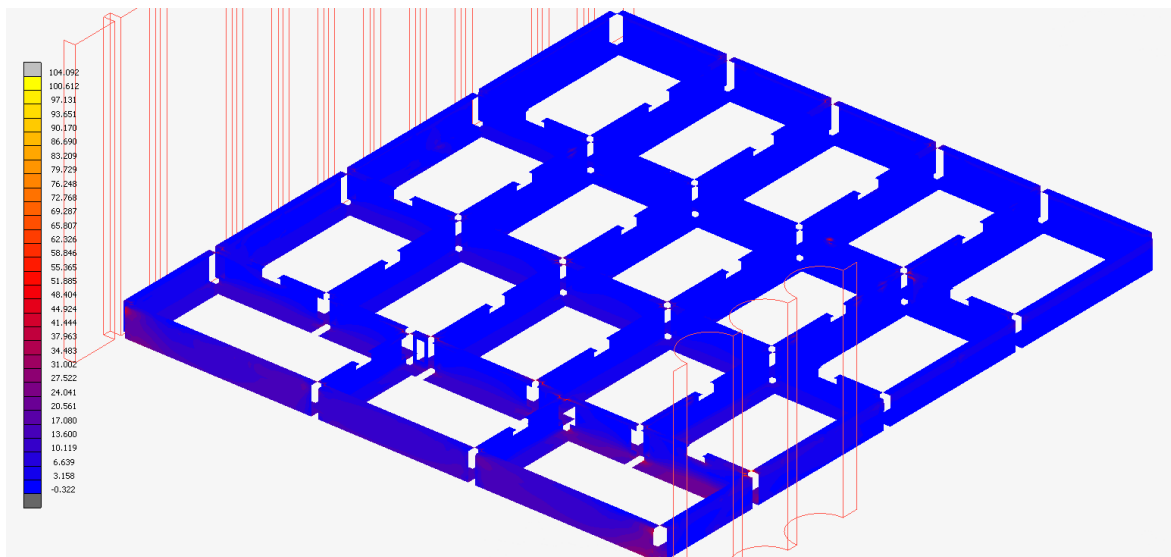
Obr. 71 Výsledná redukovaná napětí (HMH) na tělese víka spodní části bateriového boxu.

Na Obr. 72 níže lze vidět redukovaná napětí (dle hypotézy HMM) na tělesech sloupků spodní části bateriového boxu.



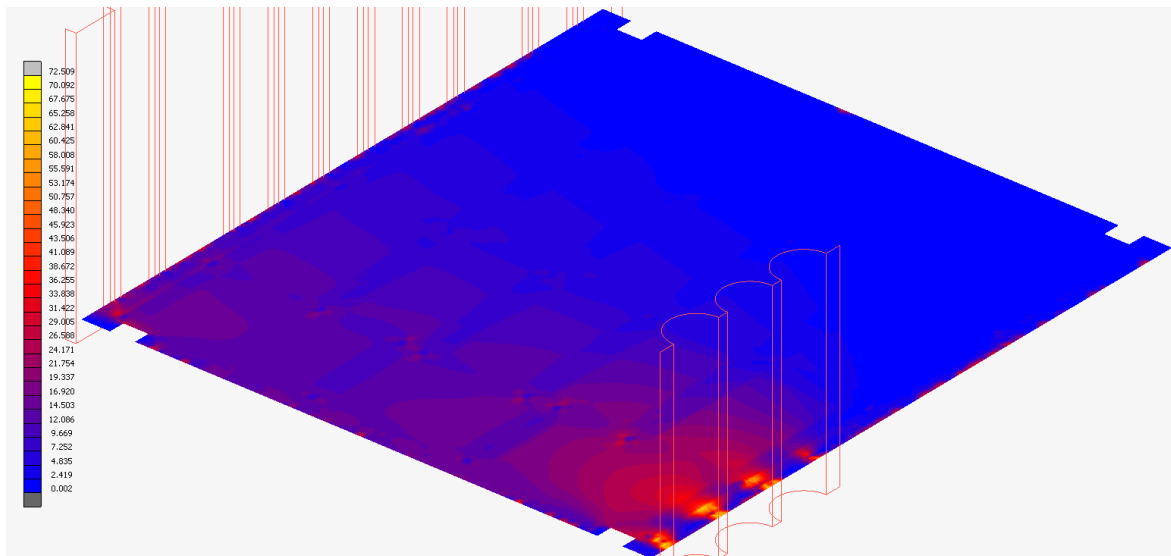
Obr. 72 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělesech sloupků spodní části bateriového boxu.

Obr. 73 ukazuje výsledná napětí, redukovaná dle hypotézy HMM, na tělese příček spodní části bateriového boxu.



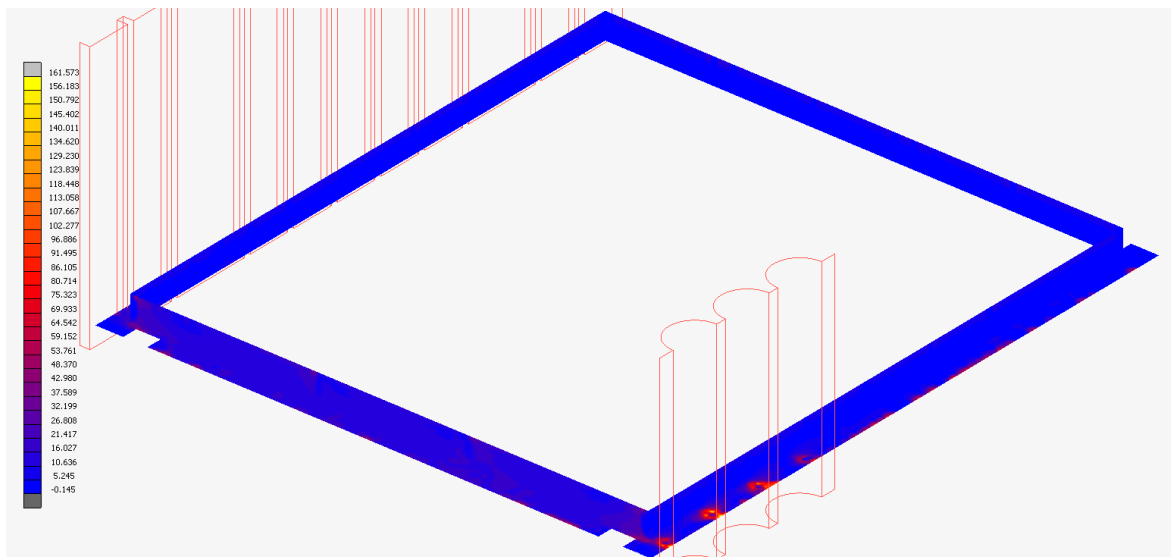
Obr. 73 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělese příček spodní části bateriového boxu.

Z obrázku Obr. 74 lze vyčíst hodnoty napětí, redukovaných dle hypotézy HMM, na tělese dna spodní části bateriového boxu.



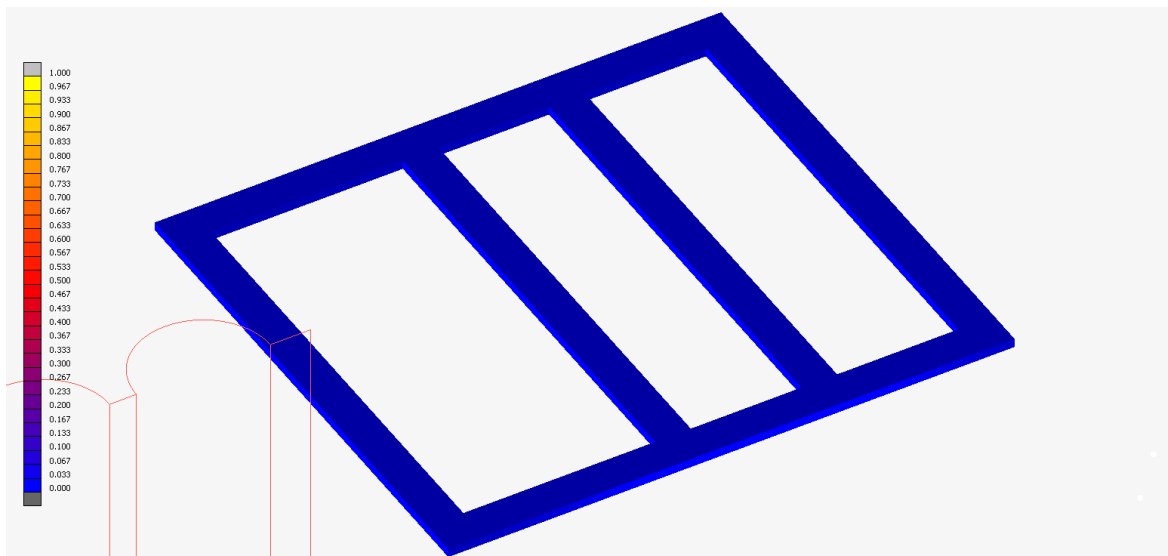
Obr. 74 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělese dna spodní části bateriového boxu.

Výsledná napětí, redukovaná dle hypotézy HMM, jsou pro těleso lemu spodní části bateriového boxu viditelná na Obr. 75.



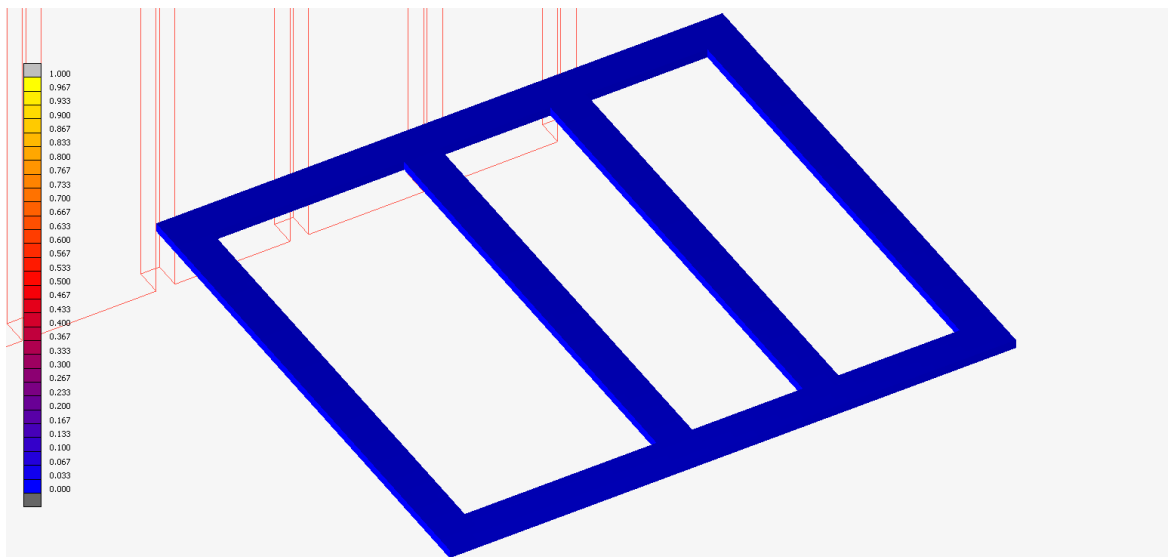
Obr. 75 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělese lemu spodní části bateriového boxu.

Výsledná napětí, redukovaná dle hypotézy HMM a vyobrazená na tělese rámu pro upevnění sedadla řidiče, lze vidět na Obr. 76.



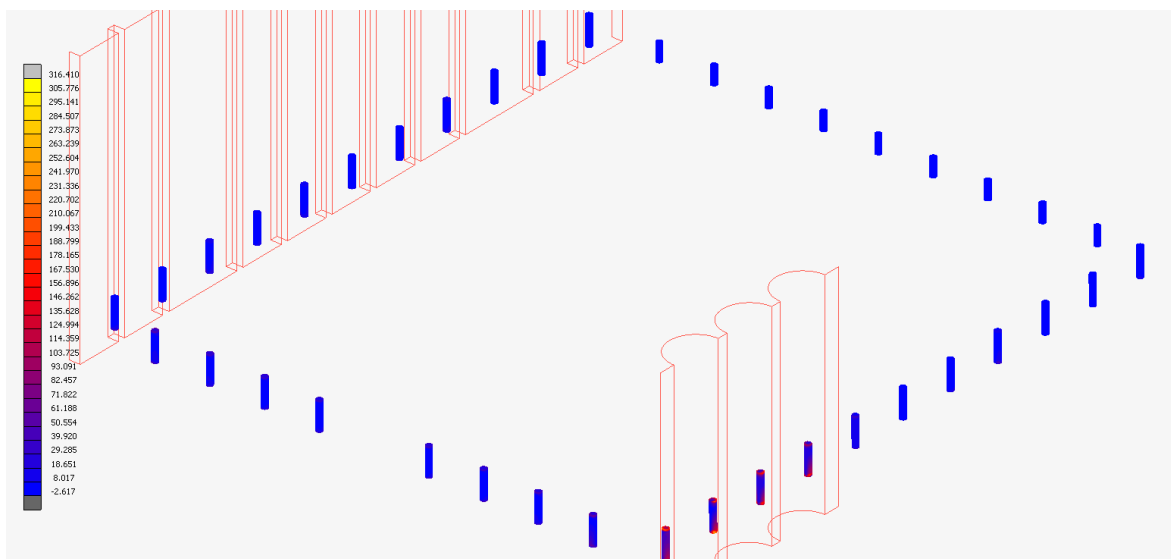
Obr. 76 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělese rámu pro upevnění sedadla řidiče.

Na Obr. 77 lze vidět napětí, redukovaná dle hypotézy HMM, na tělese rámu pro upevnění sedadla spolujezdce.



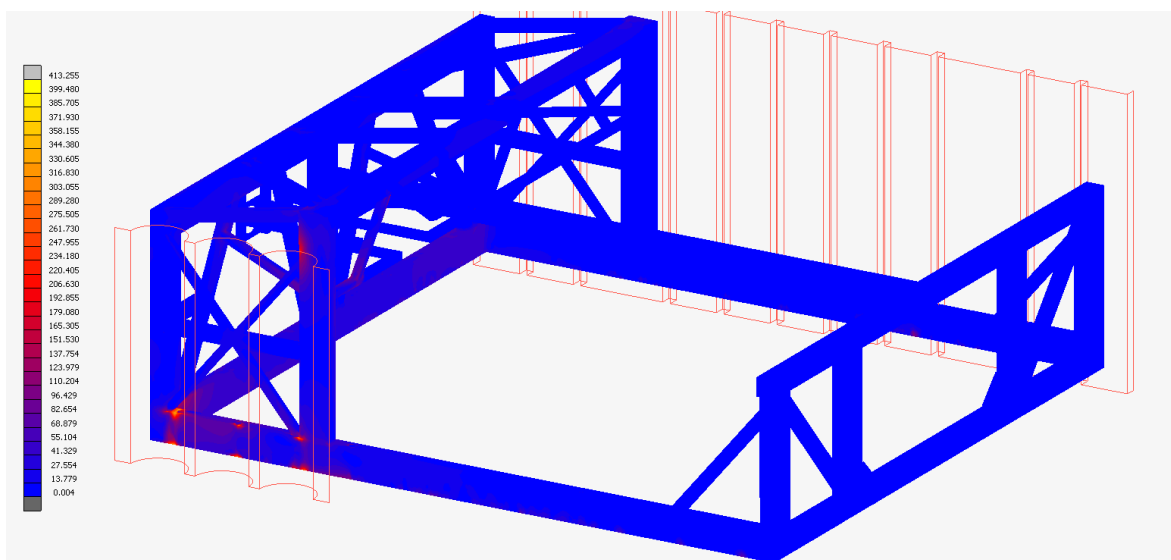
Obr. 77 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělese rámu pro upevnění sedadla spolujezdce.

Napětí, redukovaná dle hypotézy HMM, lze pro případ vložek středové části rámu spatřit na Obr. 78.



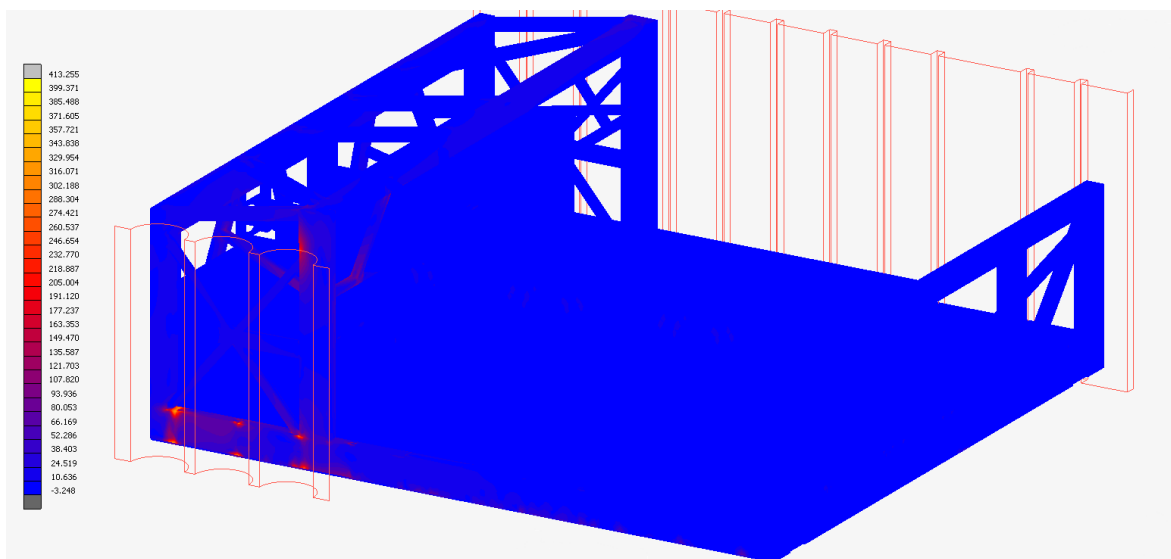
Obr. 78 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělesech vložek středové části rámu vozidla.

Vyřešená napětí, redukovaná dle hypotézy HMM, jsou pro těleso středové části rámu vozidla vyobrazena na Obr. 79.



Obr. 79 Výsledná redukovaná napětí (HMM) na tělese středové části rámu vozidla.

Pro celkovou představu jsou tentokrát výsledná napětí, redukováná dle hypotézy HMH, vyobrazena na celku bateriového boxu společně se středovou částí rámu vozidla, viz Obr. 80.

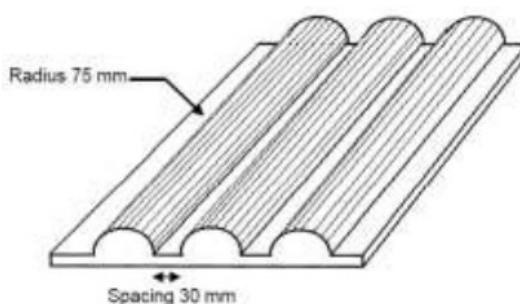


Obr. 80 Výsledná redukováná napětí (HMH) na tělese středové části rámu vozidla.

5 Experimentální část

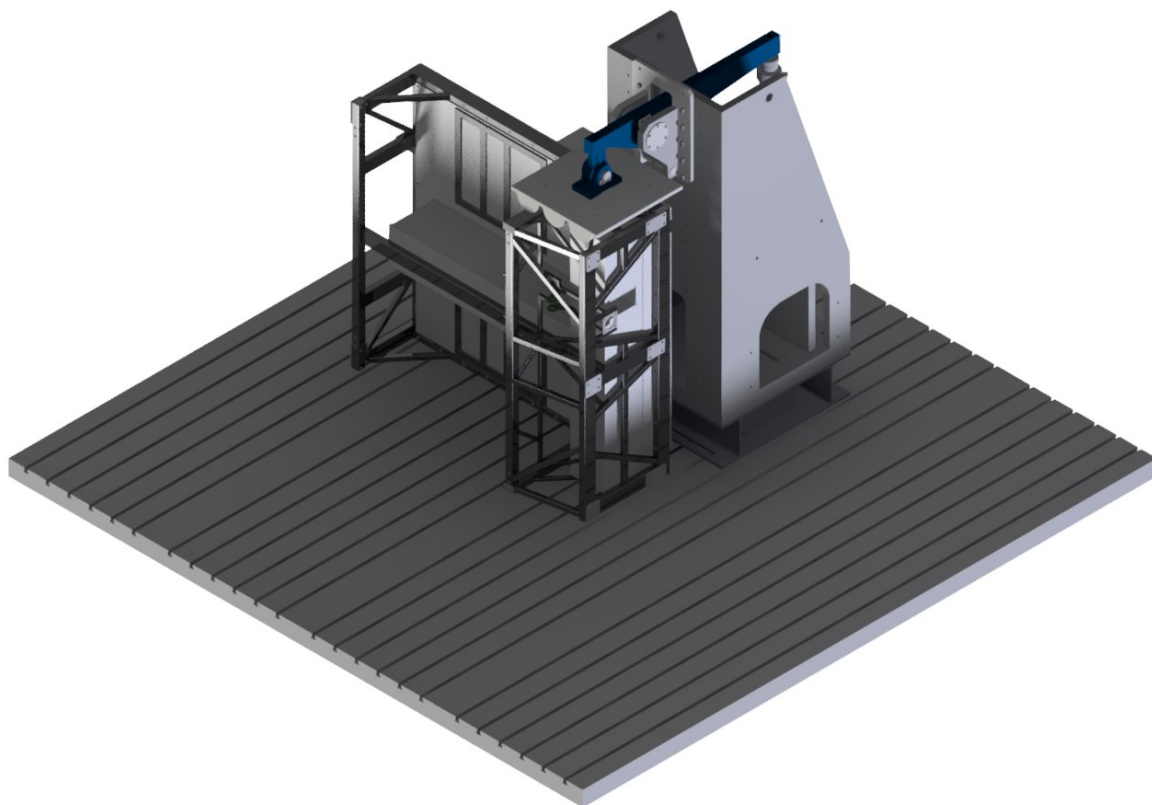
Účelem provedení zkoušky mechanické integrity bateriového boxu vozidla SCX 3.5 mělo být ověření bezpečnosti baterií v průběhu mechanického kontaktu vozidla s jiným tělesem nebo soustavou těles (jiné vozidlo, sloup, stěna atd.), k němuž by mohlo dojít v průběhu kolize tohoto vozidla. Bezpečnosti baterií vůči vzniku jevů, popsaných v kapitole 1.1, mělo být dosaženo zejména minimalizací jakékoliv mechanické deformace bateriových článků uvnitř modulů bateriového boxu. Toto by bylo splněno vhodným konstrukčním návrhem a vhodným uložením bateriového boxu, spolu se správným uspořádáním a uložením bateriových modulů uvnitř tohoto boxu tak, aby v případě kolize vozidla a deformace bateriového boxu nedošlo k deformacím bateriových modulů z důvodu jejich mechanického kontaktu se sousedními moduly, nebo s tělesem bateriového boxu²⁷.

Zkouška měla být provedena dle normy E/ECE/324/Rev.2/Add.99/Rev.2-E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.99/Rev.2 na kompletním bateriovém boxu, vybaveném veškerými bateriovými moduly a články, spolu s veškerou kabeláží a příslušnou elektronikou, a to při teplotě prostředí $T = 20 \pm 10$ °C. Všechny součásti vozidla, jež by měly vliv na funkci bateriového boxu a výsledek testu měly být v provozuschopném stavu zahrnuty do zkoušky, což by v tomto případě představoval bateriový box s moduly, články a příslušenstvím a středová část rámu vozidla. Testovaný bateriový box měl být v souladu s normou zatížen skrze impaktor, jež lze vidět na Obr. 81, silou F , a to s nárůstem této síly z nuly na hodnotu $F_{\max} \in \langle 100; 105 \rangle$ kN za dobu $t_a < 180$ s a následnou výdrží na této hodnotě po dobu $t_b \in \langle 0,1; 10 \rangle$ s, po níž by došlo k odtížení. Tato síla měla být vůči bateriovému boxu orientována tak, aby nositelka této síly byla kolmá na pomyslný směr jízdy vozidla, jehož je bateriový box součástí, a rovnoběžná s rovinou, po níž se kola tohoto vozidla při jízdě odvalují. Zkouška měla být završena pozorováním o době trvání $t_c = 1$ h²⁷.



Obr. 81 Schéma impaktoru²⁷.

V průběhu psaní této práce však bylo na Katedře materiálů a technologií pro automobily rozhodnuto o odkladu realizace této zkoušky z důvodu nutnosti provedení zásadních změn v návrhu bateriového boxu. Zkouška tak nebyla provedena před dokončením této práce a nebyla proto k dispozici experimentální data, s nimiž by bylo možno porovnat výsledky počítačové simulace. Na obrázku Obr. 82 je tak alespoň k dispozici počítačová vizualizace této plánované zkoušky.



Obr. 82 Grafická reprezentace zkoušky mechanické integrity bateriového boxu.

6 Závěr

Cílem této práce bylo provedení počítačové simulace plánované zkoušky mechanické integrity bateriového boxu vozidla SCX 3.5 s využitím metody konečných prvků. Účelem této zkoušky je ověření bezpečnosti bateriových článků v průběhu mechanického kontaktu vozidla s jiným tělesem nebo soustavou těles (jiné vozidlo, sloup, stěna atd.), k němuž by mohlo dojít v průběhu kolize tohoto vozidla. V takovémto případě by v důsledku případného poškození galvanických článků mohlo dojít k úniku hořlavých a potenciálně toxických vnitřních tekutin z článku, nebo k vývoji plynu z elektrolytu. Toto by v kombinaci s možnými zkraty a jiskřením mohlo vyvolat exotermickou reakci s nedomyslitelnými následky pro případně uvězněné pasažéry ve vozidle, nebo zasahující záchranáře. Těmto scénářům lze předejít zabráněním přílišné deformace bateriových článků. Toho lze docílit nejen vhodnou konstrukcí obalů těchto článků, nebo individuálních bateriových modulů, do kterých jsou sdruženy, ale zejména také vhodným konstrukčním řešením celku bateriového boxu, v němž jsou všechny moduly i se svými články uloženy. Zmiňovaná zkouška má poté za cíl prostřednictvím standardizovaného testu toto ověřit v praxi. V průběhu této zkoušky by byl celek bateriového boxu s bateriemi a příslušenstvím, společně se středovou částí rámu vozidla, zatěžován skrze těleso impaktoru silou F o maximální hodnotě $F_{\max} \in \langle 100; 105 \rangle$ kN, a to ve směru kolmém na pomyslný směr jízdy vozidla a rovnoběžném s pomyslnou rovinou, po níž se kola vozidla při jízdě odvalují. Zatěžující síla F by pak v souladu s příslušnou normou v průběhu zkoušky postupně narůstala z nuly na svou maximální hodnotu po dobu $t_a < 180$ s.

Na základě výše uvedeného byl simulovaný děj z hlediska mechaniky považován za kvazi-statický. Byly tak zanedbány dynamické účinky zatěžující síly na středovou část rámu vozidla s bateriovým boxem a bateriemi. Byl rovněž zanedbán vliv vlastní tíhy impaktoru, středové části rámu, bateriového boxu a bateriových modulů s příslušenstvím. Materiálový model byl ve všech případech uvažován jako elasticko-plastický, bilineární, izotropní a homogenní. Geometrické vlastnosti všech členů výpočtového modelu s konečno-prvkovou sítí byly až na dvě výjimky uvažovány jakožto skořepin.

Po sestavení modelu přišla na řadu samotná analýza, jenž byla provedena postupně. Nejdříve byl vyřešen případ, kdy všechny materiály byly uvažovány pouze jako lineárně elastické, nikoliv elasticko-plastické, při uvažování malých deformací a použití

zjednodušených okrajových podmínek. Ty znamenaly vypuštění kontaktních těles podkladu, skrze něž by obvykle zatěžující síla na celek středové části rámu vozidla a bateriového boxu působila, a impaktoru, o něž by se obvykle celek středové části rámu s bateriovým boxem opíral, z modelu s tím, že na uzly konečno-prvkového modelu středové části rámu, jenž by obvykle byly v kontaktu s podkladem, byla aplikována dodatečná okrajová podmínka zamezení posuvu ve směru normály styčné plochy podkladu. Dále také zatěžující síla F byla se shodnou orientací aplikována přímo na elementy konečno-prvkového modelu středové části rámu, jejichž uzly by jinak byly v kontaktu s tělesem impaktoru. Účelem tohoto snažení bylo zjednodušit úlohu z hlediska kontaktní analýzy a soustředit se nejprve na vyladění kontaktů v rámci bateriového boxu se středovou částí rámu. Následně byl tento zjednodušený model rozšířen o plastické chování všech materiálů v modelu a předpoklad velkých deformací. Po úspěšném vyřešení tohoto případu byly nakonec z modelu vypuštěny výše zmiňované zjednodušené okrajové podmínky a zpět zahrnuty kontaktní tělesa podkladu a impaktoru se svými původními okrajovými podmínkami a úloha byla následně vyřešena.

Výsledky analýzy se oproti očekáváním dosti lišily. Očekávalo se, že posuvy v modelu bateriového boxu a středové části rámu vozidla dosáhnou hodnot v řádu desítek milimetrů, že dojde ke ztrátě stability tvaru některých z řady tenkostěnných ocelových trubek, tvořících středovou část rámu vozidla, a plechových stěn bateriového boxu. V takovémto případě by existovalo reálné riziko toho, že dojde k přílišné deformaci některých bateriových článků, zkratu apod. Místo toho však maximální posuv v celém modelu dosahuje hodnoty $u_{\max} = 1,412$ mm, viz Obr. 47. Co se týče výsledných posuvů v rámci jednotlivých částí bateriového boxu, maximální posuv na tělese příčného oddílu horní části bateriového boxu činí $u_{\max}^1 = 0,298$ mm. V případě podélného oddílu horní části bateriového boxu je maximální posuv $u_{\max}^2 = 0,191$ mm. Největší hodnota posuvů se dále v rámci dna spodní části bateriového boxu, k němuž by měly být bateriové moduly spodní části bateriového boxu připevněny, nachází dle očekávání u okraje, nejbliže impaktoru, viz Obr. 57 a má hodnotu $u_{\max}^9 = 0,606$ mm. Vzhledem k tomu, že mezi jednotlivými bateriovými moduly navzájem a bateriovými moduly a stěnami bateriového boxu se nacházejí mezery o velikostech v řádu desítek, nejméně však jednotek, milimetrů, lze na základě získaných výsledků prohlásit, že tato simulace nepředpověděla, že by v průběhu reálné zkoušky mechanické integrity zkoumaného bateriového boxu mělo dojít ke kontaktu bateriových modulů se stěnami bateriového boxu, či se sebou navzájem. Tím pádem by dle výsledků této simulace rovněž nemělo dojít k žádné, potenciálně nebezpečné, deformaci bateriových článků uvnitř těchto modulů, či dalšího příslušenství uvnitř bateriového boxu.

7 Poděkování

Autor by chtěl touto cestou poděkovat Ing. Martinu Fuskovi, Ph.D. za ochotu podělit se o své znalosti a zkušenosti, za odborné vedení práce, cenné rady a podporu při jejím vypracování. Dále celému týmu StudentCar za poskytnuté podklady a informace.

8 Seznam použité literatury

1. BENZ, Karl Friedrich. *Fahrzeug mit Gasmotorentrieb*. 1886. Deutschen Reiche. 37435 Klasse 46: Luft- und Gaskraftmaschinen. Uděleno 29. Januar 1886. Zapsáno 2. November 1886.
2. Historie elektromobilismu. *Elektromobily: informace* [online]. 2010 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://elektromobil.vseznamu.cz/historie-elektromobilismu>
3. OLŠANSKÝ, Milan. Camille Jenatzy: „Le Diable Rouge“. *Automotorevue: autocz* [online]. 2014 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/truck-bus/historie/camille-jenatzy-le-diable-rouge_43477.html
4. VOKÁČ, Luděk. První hybridní vůz postavil Čech. Buď Křížík nebo Porsche. *Auto.: iDNES.cz* [online]. 2009 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/prvni-hybridni-vuz-postavil-cech-bud-krizik-nebo-porsche-pey-/automoto.aspx?c=A091023_002851_automoto_vok
5. Model S. *Tesla* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/models>
6. StudentCar. *StudentCar* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://www.studentcar.cz/lang/cs/projekty/studentcar&gws_rd=cr&ei=RyryWLT-D8jhaKmXkdgH
7. TRATTNIG, Gernot a Werner LEITGEB. Battery Modelling for Crash Safety Simulation. THALER, A. a D. WATZENIG. *Automotive battery technology* [online]. Springer, 2014, s. 19-35 [cit. 2017-04-17]. SpringerBriefs in applied sciences and technology. ISBN 978-3-319-02522-3. Dostupné z: http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloadaddocument/9783319025223-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1441006-p175487506

8. PORAMAPOJANA, Poowanart. *A Structure of Cylindrical Lithium-ion Batteries* [online]. State College [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: http://sites.psu.edu/pxp940/wp-content/uploads/sites/14275/2014/08/Poowanart_Assignment_4_revised.pdf. Pennsylvania State University.
9. Battery Management Systems. *ENGINEERING.com: INFORM.INSPIRE*. [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.engineering.com/ProductShowcase/BatteryManagementSystems.aspx>
10. JANDURA, Pavel. *Trendy v designu energetických úložišť pro elektrická vozidla*. 2016. Dostupné také z: http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2016/Perspektivy_emobility_Amper_2016/08_JANDURA_prezentace.pdf
11. wk057. Pics/Info: Inside the battery pack. *Tesla Motors Club* [online]. 2014 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/pics-info-inside-the-battery-pack.34934/>
12. BMW i3 Battery pack. *Enipedia* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://enipedia.tudelft.nl/wiki/BMW_i3_Battery_pack
13. 2015 E-GOLF PRESS KIT: 2015 VOLKSWAGEN E-GOLF: VERSATILE, FUN-TO-DRIVE, AND WITH ZERO TAILPIPE EMISSIONS. *Volkswagen: US Media Site* [online]. 2015 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://media.vw.com/model/pack/92/>
14. Nissan Leaf Batteries. *Hybrid Auto Center* [online]. [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://hybridautocenter.com/HAC4/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=631
15. DRIVE UNIT AND BATTERY AT THE HEART OF CHEVROLET BOLT EV: Engineers focus on careful balance of range and performance. *Chevrolet Pressroom* [online]. 2016 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://media.chevrolet.com/media/us/en/chevrolet/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2016/Jan/naias/chevy/0111-bolt-du.htmlu.html>

16. FUSEK, Martin a Radim HALAMA. *MKP a MHP* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf

17. ZIENKIEWICZ, O. C. a Y. K. CHEUNG. *The Finite Element method in Structural and Continuum Mechanics: Numerical solution of problems in structural and continuum mechanics*. Maidenhead: McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1967.

18. SEDLÁK, Josef a Radim HALAMA. *Základy inkrementální teorie plasticity: Teoretický základ* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Teorie-plasticity_Zaklady-inkrementalni-teorie-plasticity.pdf

19. Marc: Advanced Nonlinear Simulation Solution. *MSC Software* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.mssoftware.com/product/marc>

20. Patran: Complete FEA Modeling Solution. *MSC Software* [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.mssoftware.com/product/patran>

21. S355 S355J2 S355J2+N Steel. *West Yorkshire Steel: The largest knowledge of steel grades online* [online]. Wetherby [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.westyorkssteel.com/carbon-steel/s355/>

22. S355JR STEEL GRADE, MECHANICAL PROPERTIES, CHEMICAL COMPOSITION, GRADE EQUIVALENT. *B2Bmetal.eu: Online metal marketplace* [online]. 2014 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/147/>

23. 5083-H22 Aluminum. *MakeItFrom.com* [online]. 2009 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/5083-H22-Aluminum>

24. 5754 (AlMg3, 3.3535, A95754) Aluminum. *MakeItFrom.com* [online]. 2009 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/5754-AlMg3-3.3535-A95754-Aluminum>

25. Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 5754 - H111 Treadplate. *Aalco: The UK's largest independent multi-metals stockholder* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-5754-H111-Treadplate_142.ashx
26. KRATINA, Jakub. SOUČINITEL TŘENÍ: Tabulka hodnot součinitele (koeficientu) smykového tření pro různé kombinace materiálů. *E-konstrukér: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 2013 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
27. E/ECE/324/REV.2/ADD.99/REV.2-E/ECE/TRANS/505/REV.2/ADD.99/REV.2. *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train. 2.* United Nations, 2013. Dostupné na adrese: <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R100r2e.pdf>