

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Konstruování strojů a technických zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Hrubá stavba skříně železničního vozu ComplexTrans

Autor: Ondřej KOSTKA
Vedoucí práce: Ing. Jiří Kořínek

Akademický rok 2022/2023

Zadání bakalářské práce

Jméno studenta: Ondřej Kostka

Studijní číslo: S22B0022P

Název tématu: Hrubá stavba skříně železničního vozu ComplexTrans

Název tématu anglicky: Carbody of the railway carriage ComplexTrans

Poznámka: ComplexTrans je globální dopravní systém, založený na vzájemném přizpůsobení a hluboké spolupráci silničních a železničních vozidel, jehož cílem je řešit většinu problémů evropské pozemní dopravy.

Navrhnout: Hrubou stavbu skříně železničního vozu ComplexTrans.

Zásady pro vypracování

Vyjděte z modelu skříně z bakalářské práce Pavla Nového 2020/2021 a respektujte všechny rozměry.

Na základě rešerše a konzultací proveďte zhodnocení různých druhů hrubé stavby, zvolte ten nejvhodnější a volbu zdůvodněte.

Berte přitom v úvahu funkci, minimalizaci hmotnosti, minimalizaci nákladů a požadovanou životnost. Maximální nápravové zatížení vozu při plném ložení je 17 t.

Navrhněte konstrukci vozu, proveďte výpočet MKP, proveďte hrubou optimalizaci a stanovte hmotnost hrubé stavby.

Konstrukce skříně musí vyhovovat evropským normám zejména pro:

- pevnostní požadavky
- dynamické požadavky
- crashovou odolnost

Požadované výsledky práce:

- 3D-model skříně
- 2D- výkres s hlavními rozměry
- MKP výpočet a následná optimalizace
- zpráva v rozsahu 30-40 stran s následujícími kapitolami
 - o úvod - současný stav obecně, zadání, stručný popis systému ComplexTrans, ..
 - o rešerše podobných a souvisejících výrobků a řešení
 - o stručný návrh řešení (funkce a parametry) a diskuze zvoleného návrhu řešení
 - o detailní řešení a souhlas s normami
 - o Obhajoba řešení
 - o závěr - zhodnocení řešení a jeho možnosti

Vedoucí práce:

- Jiří Kořínek, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, KKS
jkorinek@kks.zcu.cz

Konzultanti:

- Jiří Hofman, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, KKS
jihofman@kks.zcu.cz
- Petr Heller, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, RTI
pheller@kks.zcu.cz

Vedoucí bakalářské práce: Jiří Kořínek

Student: Ondřej Kostka

V Plzni: 30.10.2022

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Jiřímu Kořínkovi a Ing. Jiřímu Hofmanovi za odborné rady, připomínky a pomoc během zpracování bakalářské práce. Nadále děkuji pánům doc. Petru Hellerovi a Ing. Jiřímu Lehečkovi za odborné konzultace.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kostka	Jméno Ondřej
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Kořínek	Jméno Jiří
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST – KKS	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Hrubá stavba skříně železničního vozu ComplexTrans	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	106	TEXTOVÁ ČÁST	105	GRAFICKÁ ČÁST	1
---------------	-----	---------------------	-----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce obsahuje návrh a výpočty pomocí metody konečných prvků specifického kolejového vozu ComplexTrans, který přepravuje nejen běžné cestující, ale také cestující s jejich e-automobily (tzv. kupémobily) nebo nákladní přepravní moduly či zásilkové boxy se zbožím z důvodu efektivnějšího zapojení železnice do regionální, národní a evropské dopravy.</p> <p>Cílem práce je navrhnout, prověřit a optimalizovat hrubou stavbu z pohledu funkce, hmotnosti a splnění pevnostních požadavků.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Hrubá stavba železničního vozu, FEM analýza (MKP), dvoupodlažní kolejová vozidla, ComplexTrans</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Kostka	Name Ondřej	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Kořínek	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Rough structure (box) of the railway carriage ComplexTrans		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKS	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	106	TEXT PART	105	GRAPHICAL PART	1
----------------	-----	------------------	-----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The bachelor thesis includes the design and calculations using the finite element method of a specific rail car ComplexTrans, which transports not only ordinary passengers, but also passengers with their e-cars (so-called coupe cars) or freight transport modules or parcel boxes with goods for a more efficient integration of rail into regional, national and European transport.</p> <p>The aim of the work is to design, verify and optimize the rough structure in terms of function, weight and meeting strength requirements.</p>
KEY WORDS	Rough construction of a railway car, FEM analysis (MKP), double decker rolling stock, ComplexTrans

Obsah

Zadání bakalářské práce	2
Prohlášení o autorství	5
Poděkování	6
Obsah	9
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	18
Seznam grafů	19
Seznam příloh	19
Úvod	20
Projekt ComplexTrans	21
Cíl práce	23
1 Rešerše dvoupodlažních kolejových vozidel provozovaných v Evropě	24
1.1 CityElefant – řada 471	24
1.2 Stadler KISS	25
1.3 SJ X40	27
1.4 TGV M Avelia Horizon	28
1.5 Caravaggio (ETR. 421, 521, 621)	29
1.6 Desiro HC	31
1.7 Konkurenční požadavky na hrubou stavbu	32
2 Nároky na skříň kolejových vozidel	33
2.1 Důvody pro lehkou stavbu	34
2.1.1 Technické důvody	34
Hmotnost všech dopravních prostředků, včetně kolejových vozidel, je důležitým parametrem, který odráží jejich technickou úroveň. Tato hmotnost úzce souvisí s jízdním odporem a má přímý vliv na spotřebu energie (Heller, 2017-2021)	34
2.1.2 Ekologické důvody	35
2.1. Konstrukční nároky na skříň kolejového vozidla	35
2.1.3 Definice konstrukčních hmotností	35
2.1.4 Souřadnicový systém vozidla	39
2.1.5 Požadavky na pevnost stabilitu konstrukce skříň kolejového vozidla	39
2.1.6 Ověření statické pevnosti vozidla	40
2.1.7 Ověření odolnosti konstrukce vůči výjimečným zatížením	40
2.1.8 Ověření stability konstrukce	41
2.1.9 Zhodnocení únavové pevnosti	41

2.1.10	Metody hodnocení	41
2.1.11	Podélná statická zatížení	42
2.1.12	Svislá statická zatížení skříně vozidla.....	44
2.1.13	Mezní statická zatížení vazeb	45
2.1.14	Druhy základních únavových zatížení skříně vozidla	47
2.1.15	Shrnutí nároků na skříně kolejových vozidel.....	50
3	Hrubé stavby skříní kolejových vozidel	51
3.1.	Technologický vývoj hrubé stavby	51
3.1.	Diferenciální hrubá stavba skříně.....	53
3.1.1	Ocelová diferenciální stavba skříně	53
3.1.2	Hliníková diferenciální stavba	55
3.1.	Integrální stavba	56
3.2	Hybridní stavba	58
3.3	Materiály na skříně osobních vozidel.....	60
3.3.1	Kovové materiály	60
3.3.2	Nekovové materiály	62
4	Podlaha skříně nákladního vozu	63
4.1	Materiály skříní nákladních vozů.....	63
5	Výběr varianty hrubé stavby skříně.....	64
	Ocelová diferenciální	64
	Hliníková integrální	64
	Kombinace ocelové diferenciální a hliníkové integrální	64
5.1	Vyhodnocení výsledku analýzy a rozhodnutí o provedení hrubé stavby.....	65
6	Konstrukční návrh	65
6.1	Řešení dílčích konstrukčních celků.....	65
6.2	Spojení základních částí skříně	66
6.3	Obrázky z 3D dat.....	72
7	Kontrolní výpočet pomocí metody konečných prvků	75
7.1	FEM analýza dvou variant	75
7.1.1	Zatížení od vlastní hmotnosti + užité zatížení	75
7.1.2	Zatížení od vlastní hmotnosti + užitečné zatížení + tlaková síla 1500 kN 83	
7.1.3	Zatížení od vlastní hmotnosti + užitečná zatížení + tahová síla 1500kN ...	90
7.2	FEM analýza samotného spodního patra (VARIANTA C)	97
8	Vyhodnocení výsledků a návrh úprav konstrukce.....	98

8.1	Návrh úprav horního patra	100
8.2	Návrh úprav ocelová spodní část	100
	Závěr	101
	Bibliografie	102

Přehled použitých zkratk a symbolů

ISO	International Organization for Standardization
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
EU	Evropská unie
FST	Fakulta strojní
KKS	Katedra konstruování strojů
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Ilustrační obrázek k systému ComplexTrans, jenž kombinuje silniční a železniční dopravu na základě vzájemného přizpůsobení silničních i železničních vozidel a styčných dvoupatrových terminálů. (Hofman).....	22
Obrázek 2 - Osobní automobil systému ComplexTrans (tzv. kupémobil) a nákladní přepravní modul dvou délek se zatažitelnými nápravami (Hofman, 2020)	22
Obrázek 3 – Typový výkres jednotky Škoda CityElefant (Švestka, 2004-2023)	24
Obrázek 4 - Elektrická jednotka Škoda CityElefant (Švestka, 2004-2023).....	25
Obrázek 5 - Stadler KISS (Gubler, 2023)	26
Obrázek 6 - Přehledový obrázek Stadler KISS (KISS Double-Decker Electric Multiple Unit EMU).....	26
Obrázek 7 – SJ X40 (Tellerup, 2004)	27
Obrázek 8 - Půdorys vlaku SJ X40 (X40, 2015).....	28
Obrázek 9 – Avelia Horizon (HIGH SPEED First TGV M unveiled by Alstom and SNCF, 2022).....	29
Obrázek 10 - Design vozu Avelia Horizon (Concours, 2020)	29
Obrázek 11 – Vůz Caravaggio ETR521.035 (Claudio z Trenomanie, 2020).....	30
Obrázek 12 - Vestibule/Doorway Area (Vestibule/Doorway Area, 1994-2023).....	30
Obrázek 13 – Řez skříní vozu Caravaggio (Hitachi, 2015)	31
Obrázek 14 – Půdorys a bokorys vozu Desiro HC (Desiro HC, 2015)	31
Obrázek 15 - Vůz Desiro HC (Desiro HC, 2015)	32
Obrázek 16 Souřadnicový systém skříně vozidla (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)..	39
Obrázek 17 - Postup vývoje technologií výroby hrubých staveb skříní vozů (Heller, 2017-2021).....	52
Obrázek 18 - Přehled technologií výroby hrubých staveb skříní kolejových vozidel (Heller, 2017-2021)	52
Obrázek 19 - Vzor diferenciální konstrukce skříně kolejového vozidla (Heller, 2017-2021)	53
Obrázek 20 Ocelová, svařovaná skřín vozu Railjet (ČD, SIEMENS) s vypálenými odlehčujícími otvory (Šindelář, 2017)	54
Obrázek 21 - Hliníková diferenciální stavba skříně vagonu (metro Mnichov) (Heller, 2017-2021).....	55
Obrázek 22 - Řez integrální hliníkovou konstrukcí skříně (Heller, 2017-2021)	56
Obrázek 23 - Detail svaru hliníkových profilů (Heller, 2017-2021)	57
Obrázek 24 Vlevo je detail svaru na konstrukci a vpravo je odříznutá část (Heller, 2017-2021).....	57
Obrázek 25 – Řez skříní vozu z Kalininského závodu (1963) (Heller, 2017-2021).....	58
Obrázek 26 - Koncept současné hybridní skříně (Heller, 2017-2021)	59

Obrázek 27 – Princip a funkce sendviče [1 – jádro (honey comb core), 2 – potahy (face sheet)] (Heller, 2017-2021).....	62
Obrázek 28 - Schéma podvozku nákladního vozu.....	63
Obrázek 29 Rozstřel šroubového spoje (Catia V5).....	66
Obrázek 30 - Šroubový spoj M20 - pohled z 3D modelu (vlevo), rozměry (uprostřed) řez (vpravo).....	66
Obrázek 31 - Schéma zatížení šroubu (Catia V5).....	68
Obrázek 32 - Schéma rozložení šroubů M20 (Catia V5).....	69
Obrázek 33 - Kóty k obrázku Obrázek 32 - Schéma rozložení šroubů M20 (Catia V5) (Catia V5).....	69
Obrázek 34 - Minimální tloušťka namáhaná na otláčení (Siemens NX 12).....	70
Obrázek 35 - Drážka pro M20 šrouby	71
Obrázek 36 - ISO 1 pohled na skříň kolejového vozu (Catia V5).....	72
Obrázek 37 - ISO 2 pohled na skříň vozu (Catia V5).....	72
Obrázek 38 - Pohled zepředu a vlevo (Catia V5)	72
Obrázek 39 - Pohled zezadu a vpravo (Catia V5).....	73
Obrázek 40 - Pohled zespu (Catia V5).....	73
Obrázek 41 - Řez skříní vozu v ose x (Catia V5)	73
Obrázek 42 - ISO pohled v řezu, spodní patro (Catia V5).....	73
Obrázek 43 - ISO pohled v řezu, horní patro (Catia V5).....	74
Obrázek 44 - Popis materiálů pro FEM analýzu (Siemens NX 12).....	75
Obrázek 45 - Schéma zatížení ve směru osy z spodního patra (Siemens NX 12).....	76
Obrázek 46 - Schéma zatížení horního patra (Siemens NX 12)	77
Obrázek 47 – Varianta A výpočtový model s uzavřeným nosníkem v podlaze (Siemens NX 12).....	77
Obrázek 48 – Varianta B výpočtový model bez uzavřeného nosníku v podlaze (Siemens NX 12).....	77
Obrázek 49 – VARIANTA B - Posunutí při zatížení užitečným zatížením bez uzavřeného nosníku (Simcenter Nastran).....	78
Obrázek 50 – VARIANTA A - Posunutí při zatížení užitečným zatížením s uzavřeným nosníkem (Simcenter Nastran).....	78
Obrázek 51 - VARIANTA B - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečným zatížením varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran).....	79
Obrázek 52 - VARIANTA A - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečným zatížením varianta s nosníkem v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran).....	79
Obrázek 53 - VARIANTA B - Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran). 80	

Obrázek 54 - VARIANTA A - Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení varianta s nosníkem v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran) ..	80
Obrázek 55 - VARIANTA B - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečným zatížením varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	81
Obrázek 56 - VARIANTA A - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečným zatížením varianta s nosníkem v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	81
Obrázek 57 - VARIANTA B - Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran).....	82
Obrázek 58 - VARIANTA A - Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení varianta s nosníkem v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran).....	82
Obrázek 59 - Schéma zatížení prvního patra včetně tlakové síly 1500 kN (Siemens NX 12)	83
Obrázek 60 - VARIANTA B – Posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (Simcenter Nastran)	84
Obrázek 61 - VARIANTA A – Posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (Simcenter Nastran)	84
Obrázek 62 – VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran).....	85
Obrázek 63 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran).....	85
Obrázek 64 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran).....	86
Obrázek 65 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran).....	86
Obrázek 66 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	87
Obrázek 67 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	87
Obrázek 68 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	88

Obrázek 69 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	88
Obrázek 70 - VARIANTA A -Porovnání hodnot při uvažování čepu a bez uvažování čepu při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tlakovou silou 1 500 kN (Simcenter Nastran)	89
Obrázek 71 - VARIANTA A – Hodnota napětí na druhém čepu při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tlakovou silou 1 500 kN (Simcenter Nastran)	89
Obrázek 72 - Schéma zatížení spodního patra + tahová síla 1500 kN (Siemens NX 12).	90
Obrázek 73 - VARIANTA B – Posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (Simcenter Nastran)	91
Obrázek 74 - VARIANTA A – Posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (Simcenter Nastran)	91
Obrázek 75 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran).....	92
Obrázek 76 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran).....	92
Obrázek 77 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran).....	93
Obrázek 78 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran).....	93
Obrázek 79 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	94
Obrázek 80 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	94
Obrázek 81 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	95
Obrázek 82 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)	95
Obrázek 83 - VARIANTA A -Porovnání hodnot při uvažování čepu a bez uvažování čepu při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tahovou silou 1 500 kN (Simcenter Nastran)	96

Obrázek 84 - VARIANTA A – Hodnota napětí na druhém čepu při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tlakovou silou 1 500 kN (Simcenter Nastran).....	96
Obrázek 85 - VARIANTA C - Posunutí při zatížení vlastní hmotností a užitečné zatížení varianta C (pouze spodní patro) (Simcenter Nastran).....	97
Obrázek 86 - VARIANTA C - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečné zatížení varianta s nosníkem v podlaze(pouze spodní patro) (Simcenter Nastran).....	97
Obrázek 87 - Návrh úpravy hliníkových profilů (Siemens NX 12).....	100
Obrázek 88 – Návrh úprav spodní ocelové části (Siemens NX 12).....	100

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Parametry vozidla Škoda CityElefant (Švestka, 2004-2023)	24
Tabulka 2 – Parametry vozidla SBB Stadler KISS (KISS Double-Decker Electric Multiple Unit EMU).....	25
Tabulka 3 – Parametry vozu SJ X40 (X40, 2015)	27
Tabulka 4 - Parametry vozu Avelia Horizon (Avelia Horizon, 2022).....	28
Tabulka 5 – Parametry vozu Caravaggio (Hitachi, 2015)	30
Tabulka 6 – Parametry vozu Desiro HC (Desiro HC, 2015)	31
Tabulka 7 - Kategorie vozidel (ČSN EN 15663+A1:2019, 2019).....	36
Tabulka 8 - Definice konstrukčních hmotností (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	36
Tabulka 9 - Spotřební materiál, posádka a opotřebení (ČSN EN 15663+A1:2019, 2019)	37
Tabulka 10 - Užitečná zatížení (ČSN EN 15663+A1:2019, 2019).....	38
Tabulka 11 - Validační program (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015).....	39
Tabulka 12 - Tlaková síla v místech uchycení nárazníků a/nebo spráhel (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	42
Tabulka 13 - Tlaková síla pod úrovní nárazníků a/nebo spráhel (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	42
Tabulka 14 - Tlaková síla působící na uchycení nárazníků úhlopříčně (pokud jsou nárazníky umístěny na jednom nebo obou koncích samotného vozidla) (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	42
Tabulka 15 - Tahová síla na uchycení spráhla (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015).....	43
Tabulka 16 - Tlaková síla v oblasti čelníku 150 mm nad úrovní podlahy (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	43
Tabulka 17 - Tlaková síla ve výšce spodního rámu okna (dolního okraje okna) (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015).....	43
Tabulka 18 - Tlaková síla v úrovni vaznice (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015).....	43
Tabulka 19 - Maximální provozní zatížení (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015).....	44
Tabulka 20 - Zdvihání a zvedání ve stanovených místech na jednom konci vozidla (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015).....	44
Tabulka 21 - Zdvihání a zvedání celého vozidla ve stanovených místech (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	44
Tabulka 22 - Kombinace druhů statických zatížení skříní vozidel (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	45
Tabulka 23 - Zrychlení ve směru osy x (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	46
Tabulka 24 - Zrychlení ve směru osy y (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	46
Tabulka 25 - zrychlení ve směru osy z (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	46
Tabulka 26 - Zrychlení ve směru osy y (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	49

Tabulka 27 - Zrychlení ve směru osy z (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	49
Tabulka 28 - Zrychlení ve směru osy x (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)	50
Tabulka 29 - Vícekriteriální analýza	64
Tabulka 30 - Dovolená napětí a přípustné hodnoty posunutí	98
Tabulka 31 - Hodnoty dovolených napětí v místech svarů	98
Tabulka 32 - Popisky zkratk použitých v tabulce „ – Vyhodnocení výsledků FEM analýz“	98
.....
Tabulka 33 – Vyhodnocení výsledků FEM analýz, porovnání variant A, B a pouze spodní části	99

Seznam grafů

Graf 1 - Vliv svaru na mechanické vlastnosti materiálů (Meyer, 2006)	61
--	----

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1 - Výkres navržené hrubé skříně ComplexTrans	93
---	----

Úvod

Moderní dopravní systémy se stále vyvíjejí s cílem zlepšit efektivitu, bezpečnost a udržitelnost veřejné dopravy. V rámci tohoto vývoje nabízí projekt ComplexTrans nadstandardně pokrokový koncept v oblasti železniční dopravy, který kombinuje inovativní design, pokročilou technologii a optimalizaci výkonu a užité hodnoty.

Tento projekt se zaměřuje na návrh a optimalizaci hrubé stavby skříně železničního vozu ComplexTrans, který představuje novou generaci železničních vozidel.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout hrubou stavbu skříně železničního vozu ComplexTrans v souladu s platnými normami a požadavky a optimalizovat ji z pohledu hmotnosti pomocí metody konečných prvků. Tento výzkumný projekt si klade za cíl přispět k rozvoji inovativních a efektivních dopravních systémů, které budou splňovat požadavky moderní doby, včetně snižování emisí a zvyšování efektivity přepravy.

Práce se bude zabývat analýzou stávajících železničních vozidel, studiem požadavků na konstrukci a technických specifikací skříně vlaků ComplexTrans a následným návrhem hrubé stavby skříně tohoto železničního vozu s důrazem na nízkou hmotnost. Metoda konečných prvků (Finite Element Method - FEM) bude použita pro numerickou analýzu a simulaci chování strukturálního systému vozu při vybraných podmínkách zatížení.

Výsledkem této práce bude návrh hrubé stavby skříně železničního vozu ComplexTrans, včetně provedení analýz, simulací a optimalizací z hlediska hmotnosti. Výsledky tohoto výzkumu budou sloužit jako podklad pro další vývoj a zdokonalování tohoto pokrokového železničního vozidla.

Projekt ComplexTrans

Projekt ComplexTrans představuje inovativní dopravní systém s využitím synergie silniční a železniční dopravy pro přepravu osob a nákladu. Propojuje silniční a železniční dopravu, využívá přínosy ze železniční dopravy, kterými jsou nízká energetická náročnost, bezpečnost a nízký dopad na životní prostředí, a zároveň využívá výhod individuální silniční dopravy, jimiž jsou možnost nezávislé pohodlné soukromé přepravy ode dveří ke dveřím kdykoli a téměř kamkoli.

Silniční součást systému ComplexTrans tvoří uzpůsobená silniční elektrická vozidla pro přepravu osob (tzv. kupémobily) a nákladní přepravní moduly. Jejich nejvýznamnějším specifickým znakem jsou výsuvné nápravy, které umožňují příčnou nakládku a vykládku do vlaků ComplexTrans vlastní silou a zároveň jen minimálně omezují přepravní kapacitu vozidel.

Kupémobily jsou prostorná elektricky poháněná vozidla s vhodným vybavením, jako jsou otočné sedačky, sklápěcí stůl, topení, klimatizace, osvětlení, rádio atd. Díky prostornému interiéru a uspořádání dveří a sedadel umožňují rychlé a pohodlné nastupování cestujících. Jejich přibližné rozměry se zasunutými nápravami jsou 2,2 x 2 x 1,9 metru (d x š x v) a jsou vhodné pro přepravu až 5 osob. Mají také malou půdorysnou plochu, což znamená, že potřebují méně místa při parkování a místo jednoho běžného automobilu mohou být zaparkovány dva kupémobily. Díky výměnnému (vlastně hybridnímu) pohonu jsou schopné čistě elektrické jízdy na vzdálenosti do cca 200 km a zároveň mohou překonávat velké vzdálenosti, pokud baterii vymění za tzv. range extender (elektrocentrála poháněná vodíkem, syntetickým či fosilním palivem). Energie do baterií vozidel může být snadno doplňována připojením k elektrické síti (i při přepravě vlakem) nebo výměnou baterie, čímž je umožněna 100% elektrifikace silniční dopravy. Kupémobily jsou navrženy s ohledem na pohodlí a komfort posádky nejen při přepravě, ale i při využívání ke kancelářské práci, studiu, odpočinku či spánku. Mohou tak být aktivně využívány při přepravě ve vlacích ComplexTrans, a později i ve vícepatrových administrativních a obytných budovách či dokonce i v ubytovacích zařízeních. Nákladní přepravní moduly mají rozměry 2,6 x 2,55 x 1,9 m (krátké) nebo 5,2 x 2,55 x 1,9 m a jsou optimalizovány pro přepravu zboží v europaletách. I jejich pohon je elektrický a nápravy a pohon jsou odvozeny od kupémobilu.

Vlaky ComplexTrans jsou navrženy pro provozní rychlosti až 230 km/h pro osobní dopravu i nákladní dopravu. Tato vyšší rychlost umožňuje efektivnější přepravu osob i nákladů. Jak je vidět z ilustračního obrázku Obrázek 1 v prvním patře dvoupatrového vlaku ComplexTrans je umístěn kupémobil, ve druhém patře budou sedět cestující. Tato vozidla jsou schopna spolupráce s běžnými nástupišti o výšce 550 mm. Pro plnohodnotný intermodální provoz však bude potřeba vybudovat na okrajích měst jednoduché intermodální terminály s dvoupatrovými nástupišti. Výměna osob a vykládka a nakládka vozidel se uskuteční během 3 minut.

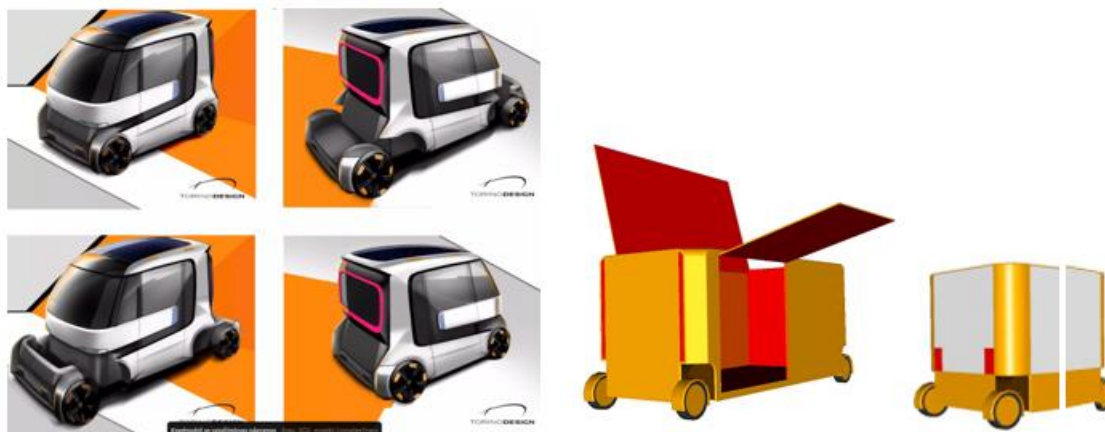
Elektrifikace je důležitou součástí projektu ComplexTrans, která ve spolupráci s obnovitelnými zdroji přináší možnost odstranění spotřeby ropných produktů a emisí skleníkových plynů.

Tento inovativní dopravní systém má též potenciál podstatného zlepšení městského provozu (parkování, hustota provozu, integrace individuální a hromadné dopravy), energeticky efektivnější přepravu osob i nákladů a samofinancovatelnost železnice a rozšíření jejího podílu na přepravních výkonech. Projekt ComplexTrans je stále ve vývoji a prověřování. Jeho

zavedení bude vyžadovat další studie, spolupráci železničního a automobilového sektoru a podporu (zejména evropské) veřejné správy.



Obrázek 1 - Ilustrační obrázek k systému ComplexTrans, jenž kombinuje silniční a železniční dopravu na základě vzájemného přizpůsobení silničních i železničních vozidel a styčných dvoupatrových terminálů. (Hofman)



Obrázek 2 - Osobní automobil systému ComplexTrans (tzv. kupémobil) a nákladní přepravní modul dvou délek se zatažitelnými nápravami (Hofman, 2020)

Cíl práce

Návrh hrubé stavby železničního vozu ComplexTrans je klíčovým prvkem tohoto inovativního dopravního prostředku. Jeho správná konstrukce a pevnost jsou zásadní pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti při provozu. V této části práce bude proveden návrh hrubé stavby, který zahrnuje strukturální komponenty, spoje a další důležité prvky vozu a který bude zaměřen na minimalizaci hmotnosti.

Po dokončení návrhu bude proveden základní pevnostní výpočet. Pevnostní výpočet je nezbytný k posouzení, zda je navržená struktura dostatečně pevná a odolná proti vnějším silám a zatížení. Bude provedena analýza namáhání strukturálních prvků vozu, aby se určilo maximální napětí, deformace a další parametry. Tímto způsobem lze identifikovat případná místa překročení napětí nebo deformací a určit jejich příčiny.

V případě zjištění rozsáhlých překročení napětí či deformací bude provedena první optimalizace. Cílem optimalizace je odstranit tyto nedostatky a zajistit, aby struktura vozu splňovala stanovená pevnostní kritéria. Bude provedeno revizní a úpravné řešení problematických oblastí, například změnou tvaru, tloušťky nebo materiálu strukturálních prvků či vložením dalších prvků. Následně bude proveden opětovný pevnostní výpočet, aby se ověřila efektivnost provedených úprav a zajištění požadované pevnosti.

Tímto postupem se očekává, že budou identifikovány případné nedostatky a provedeny první kroky ke zlepšení pevnosti a spolehlivosti hrubé stavby železničního vozu ComplexTrans. Výsledkem bude optimalizovaná struktura s přijatelnou hmotností, která bude schopna odolávat požadovaným zatížením a poskytnout bezpečnou a spolehlivou dopravu.

1 Rešerše dvoupodlažních kolejových vozidel provozovaných v Evropě

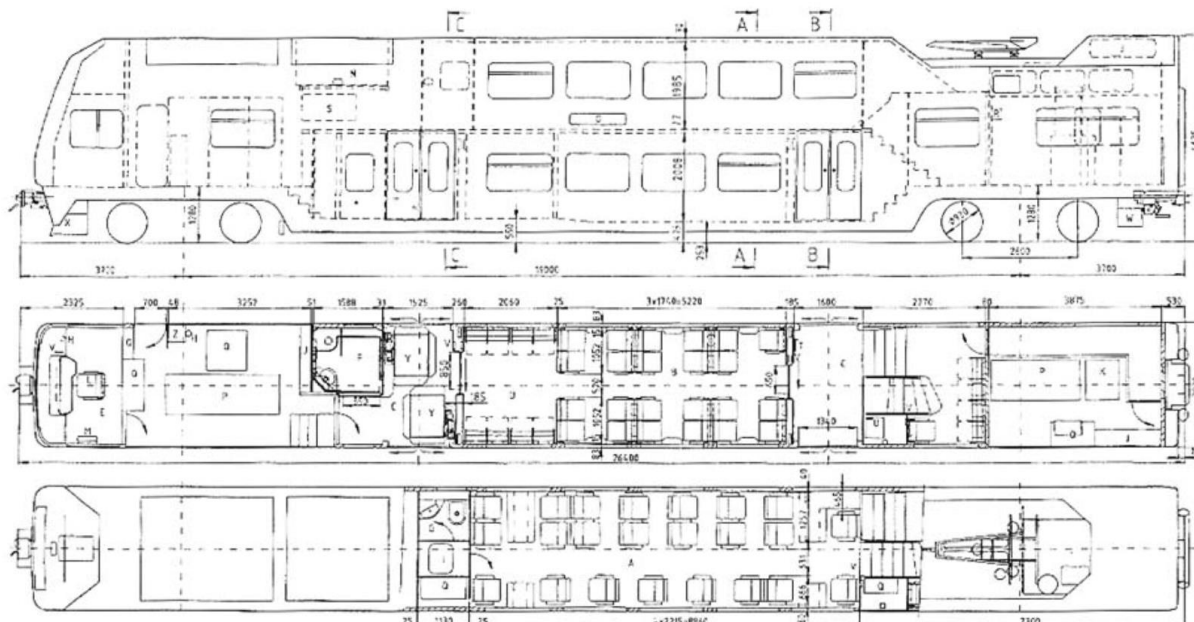
1.1 CityElefant – řada 471

Jedná se o dvoupodlažní elektrickou jednotku, která je primárně určena k příměstské osobní dopravě. Výrobce je Škoda Transportation a.s.

Skříň kolejových vozů jsou vyrobeny z lehké samonosné konstrukce z velkoplošných hliníkových extrudovaných profilů. Přední čela hnacích a řídicích vozů jsou vyrobena z kompozitních materiálů a mají lepená bezpečnostní dvojskla. Skříň vozů spočívá na dvou dvounápravových podvozcích s dvojitým vypružením pomocí otočných čepů umístěných v hlavním příčniku skříň. Podvozek je vybaven pneumatickými pružinami. (Švestka, 2004-2023)

Tabulka 1 – Parametry vozidla Škoda CityElefant (Švestka, 2004-2023)

Technický údaj	Škoda CityElefant
Roky výroby	1997-2008
Výška se staženými sběrači	4 635 mm
Délka přes nárazníky	26 400 mm
Šířka	2 820 mm
Vzdálenost otočných čepů	19 000 mm
Míst k stání	65
Míst k sezení	59
Služební hmotnost	62,7 t
Maximální rychlost	140 km/h



Obrázek 3 – Typový výkres jednotky Škoda CityElefant (Švestka, 2004-2023)



Obrázek 4 - Elektrická jednotka Škoda CityElefant (Švestka, 2004-2023)

1.2 Stadler KISS

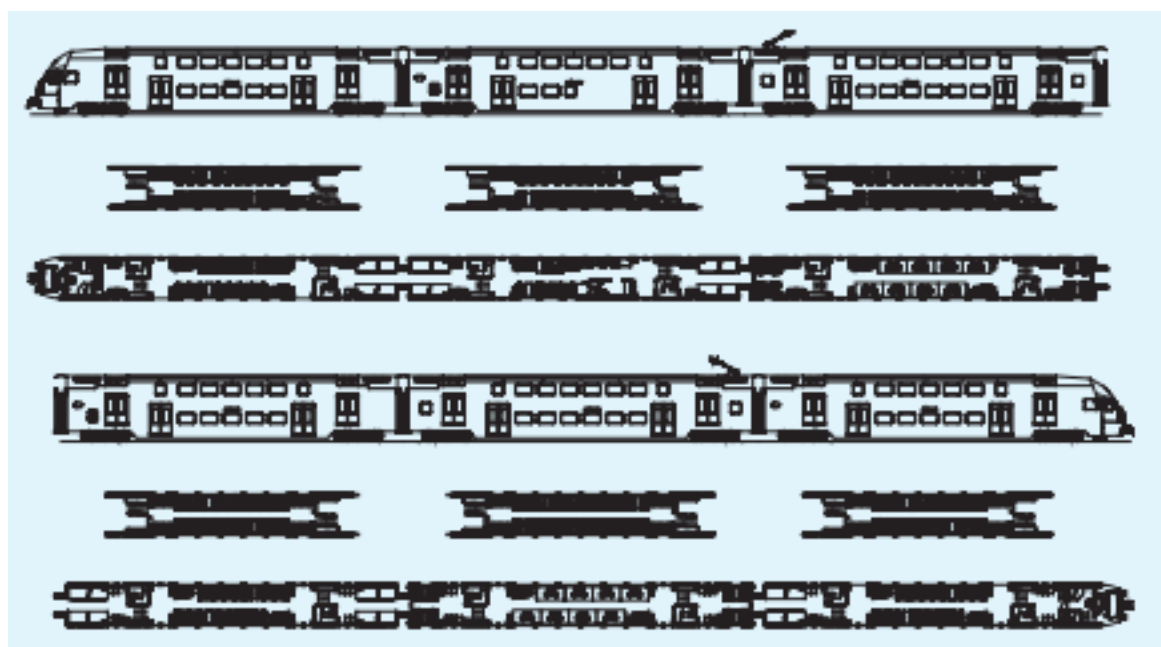
Je to 3. generace skupiny vozů, která je v provozu ve společnosti S-Bahn Zürich. Výrobce je Stadler Rail AG. Pro firmu Swiss Federal Railways service je znám pod názvem RABe 511. Vůz je poháněn elektrickou trakcí. Skříň vozu je integrální hliníková. (KISS Double-Decker Electric Multiple Unit EMU)

Tabulka 2 – Parametry vozidla SBB Stadler KISS (KISS Double-Decker Electric Multiple Unit EMU)

Technický údaj	Stadler KISS
Roky výroby	2011-2018
Výška se staženými sběrači	4 595 mm
Délka přes nárazníky	25 000 mm
Šířka	2 780 mm
Vzdálenost otočných čepů	18 200 mm
Míst k stání	-
Míst k sezení	87
Služební hmotnost	54.3 t
Maximální rychlost	200 km/h



Obrázek 5 - Stadler KISS (Gubler, 2023)



Obrázek 6 - Přehledový obrázek Stadler KISS (KISS Double-Decker Electric Multiple Unit EMU)

1.3 SJ X40

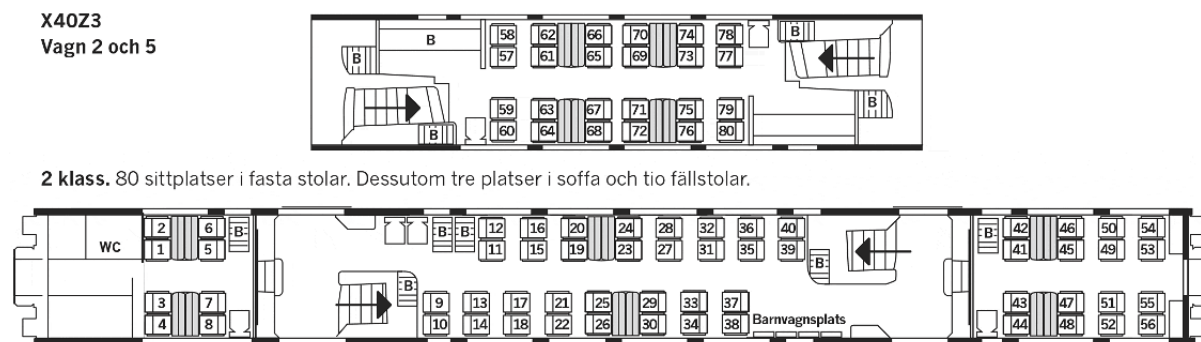
Tento vůz ze Švédska byl ve své době (šedesátá léta minulého století) teprve druhým dvoupatrovým vozem, který firma Alstom vyrobila. Vlaky se skládají ze dvou nebo tří vozů. Všechny vozy mají motory v jednom z podvozků. Všechny vlaky byly vyrobeny pro Švédskou společnost SJ AB, což je státní podnik. (X40, 2015)

Tabulka 3 – Parametry vozu SJ X40 (X40, 2015)

Technický údaj	SJ X40
Roky výroby	2011-2018
Výška se staženými sběrači	-
Délka přes nárazníky	-
Šířka	-
Vzdálenost otočných čepů	-
Míst k stání	-
Míst k sezení	77
Služební hmotnost	72 t
Maximální rychlost	200 km/h



Obrázek 7 – SJ X40 (Tellerup, 2004)



Obrázek 8 - Půdorys vlaku SJ X40 (X40, 2015)

1.4 TGV M Avelia Horizon

Tyto vozy jsou naplánovány uvést do provozu v roce 2024 společností SNCF ve Francii. Výrobce je Alstom. Vůz je plně elektrický. Jedná se o nejrychlejší dvoupatrový vůz na světě. (Avelia horizon, 2023)

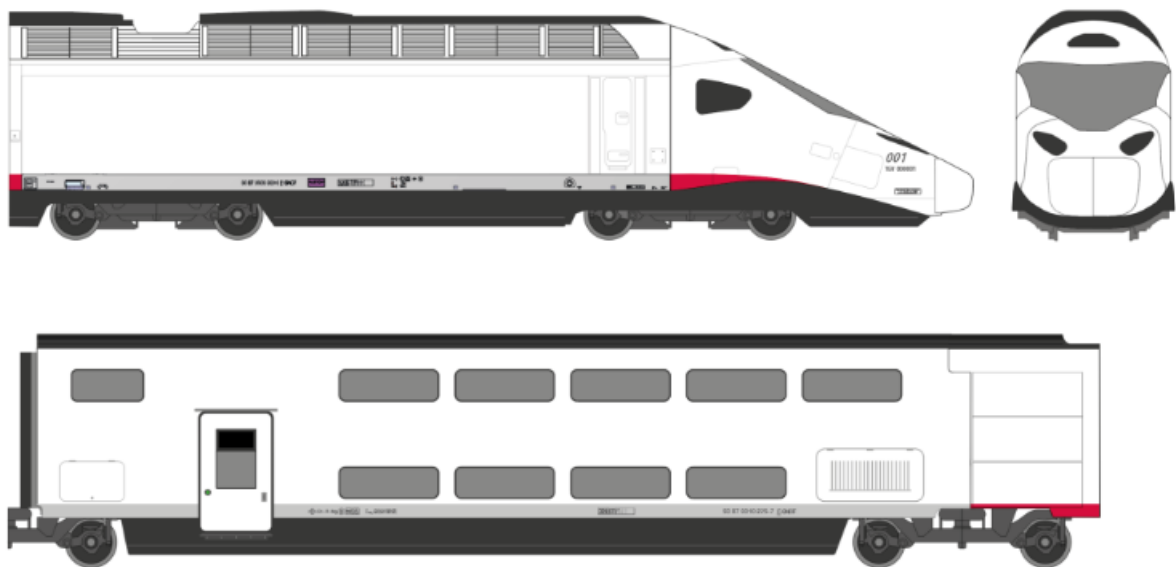
Díky svému kloubovému uspořádání snižuje Avelia Horizon provozní náklady. Vlak má totiž méně podvozků, které představují 30% nákladů na preventivní údržbu, a má nižší hmotnost ve srovnání s konvenčními uspořádáními, má integrální hliníkovou stavbu. Avelia Horizon nabízí až o 40% více kapacity než vlaky s jedním patrem při stejné úrovni služeb a komfortu, a proto přináší nejnižší investiční a provozní náklady na jedno sedadlo. Díky vysoké kapacitě pasažérů dosahuje nízkých nákladů na jednoho cestujícího. (Avelia Horizon, 2022)

Tabulka 4 - Parametry vozu Avelia Horizon (Avelia Horizon, 2022)

Technický údaj	TGV M
Roky výroby	2020-
Výška se staženými sběrači	-
Délka přes nárazníky	-
Šířka	2 900 – 3 200 mm
Vzdálenost otočných čepů	-
Míst k stání	-
Míst k sezení	-
Služební hmotnost	-
Maximální rychlost	350 km/h



Obrázek 9 – Avelia Horizon (HIGH SPEED First TGV M unveiled by Alstom and SNCF, 2022)



Obrázek 10 - Design vozu Avelia Horizon (Concours, 2020)

1.5 Caravaggio (ETR. 421, 521, 621)

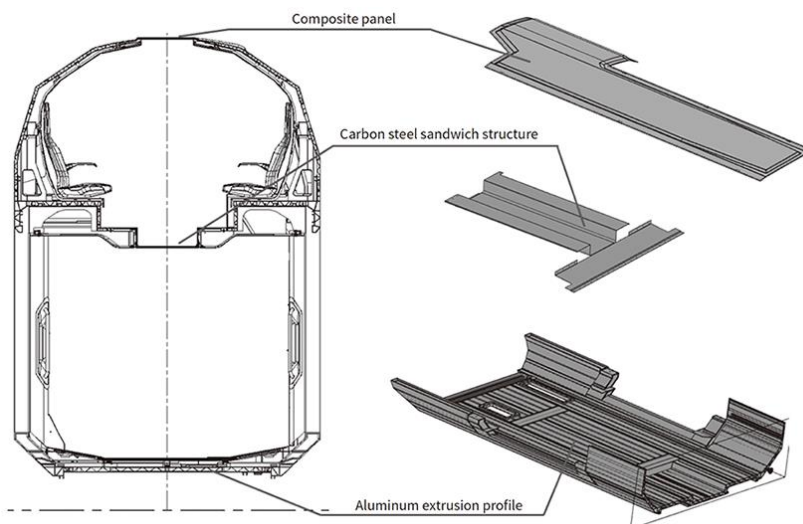
Tento vlak je příkladem dvoupodlažního elektrického vozu vyrobeného v Itálii firmou Hitachi Rail STS. I přes relativně vysokou hmotnost je konstrukce vozu integrální hliníková. Vybavení pneumatiky, hydrauliky a elektroniky je umístěno na střeše vozu. (Scalaenne, 2020)

Tabulka 5 – Parametry vozu Caravaggio (Hitachi, 2015)

Technický údaj	Caravaggio
Roky výroby	2017-
Výška se staženými sběrači	4 300 mm
Délka přes nárazníky	27 600 mm
Šířka	2 800 mm
Vzdálenost otočných čepů	19 500 mm
Míst k stání	-
Míst k sezení	150
Služební hmotnost	74 t
Maximální rychlost	160 km/h



Obrázek 11 – Vůz Caravaggio ETR521.035 (Claudio z Trenomanie, 2020)



Obrázek 12 - Vestibule/Doorway Area (Vestibule/Doorway Area, 1994-2023)



Obrázek 13 – Řez skříní vozu Caravaggio (Hitachi, 2015)

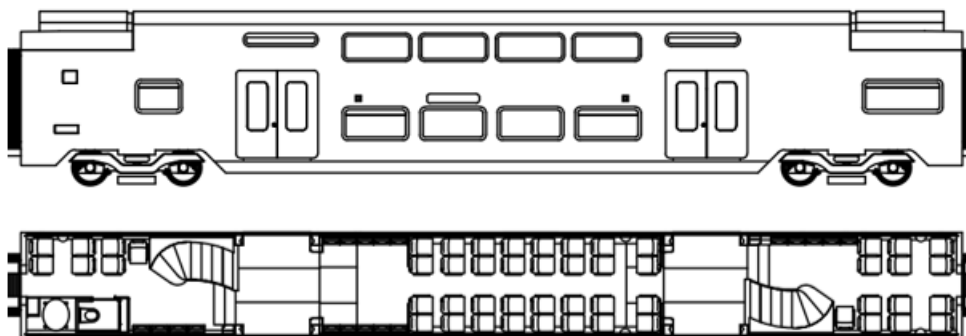
1.6 Desiro HC

Desiro HC je elektrická jednotka vyráběná firmou Siemens Mobility. Tento typ jezdí v Německu v dopravní společnosti National Express.

Konstrukce je odlehčená a základem je integrální hliníková hrubá stavba. Je posazená na vzduchovém podvozku.

Tabulka 6 – Parametry vozu Desiro HC (Desiro HC, 2015)

Technický údaj	Desiro HC
Roky výroby	2017-
Výška se staženými sběrači	4 640 mm
Délka přes nárazníky	-
Šířka	2 820 mm
Vzdálenost otočných čepů	-
Míst k stání	-
Míst k sezení	84
Služební hmotnost	50 t
Maximální rychlost	160 km/h



Obrázek 14 – Půdorys a bokorys vozu Desiro HC (Desiro HC, 2015)



Obrázek 15 - Vůz Desiro HC (Desiro HC, 2015)

1.7 Konkurenční požadavky na hrubou stavbu

Vedle pevnostních požadavků, které jsou kladeny na vůz z důvodu legislativy, jsou zde i požadavky díky rozsáhlé konkurenci. Hlavními prioritami jsou pro zákazníky:

- Modularita jednotek
- Celkové provozní náklady na jednoho pasažéra
- Málo frekventovaná a snadná údržba
- Vzhled vozu
- Interiér
- Bez bariérový přístup
- Toalety
- Spolehlivost a bezpečnost
- Rychlost vlaku

Vlak ComplexTrans splňuje všechny výše zmiňované požadavky zákazníků. Pouze vlak Avelia Horizon bude jezdit značně rychleji, ale pouze v oblastech se speciálními vysokorychlostními kolejemi. Když ovšem připočteme vlaku ComplexTrans schopnost převážet i automobily, dokáže nabídnout i jistou výhodu oproti ostatním vlakům. Při nedostatečném vytížení od vozidel dokáže nabídnout prostor pro převoz balíčků dopravních společností.

2 Nároky na skříň kolejových vozidel

Provozní požadavky na skříň kolejových vozidel se postupem času vyvíjejí směrem ke snižování hmotnosti při dodržení požadavků na pevnost, dynamickou stabilitu, crashovou odolnost atd. Velmi důležitou roli hraje v posledních letech i vliv skříňe na životní prostředí. Právě kolejová vozidla s nízkou hmotností skříňe, snižují energetickou náročnost a náklady na provoz, snižují zatížení kolejnic a umožňují dosažení vyšších rychlostí vlaku. (Heller, 2017-2021)

Stavební sktruktura hrubé stavby kolejového vozidla začíná za soustavou vypružení a zahrnuje všechny pevně připojené stavební orgány, které často přispívají k pevnosti, tuhosti a stabilitě této konstrukce vozidla. (Heller, 2017-2021)

Hrubá stavba skříňe kolejového vozidla se podílí na celkové hmotnosti vozidla mezi 12 až 20 %, proto je potřeba minimalizovat její hmotnost. (Heller, 2017-2021)

Dále budeme uvažovat pouze hrubou stavbu skříňe kolejového vozidla, který se skládá ze spodku nebo hlavního rámu, bočnice, čelnice a střechy. (Heller, 2017-2021)

U dvoupodlažních vozů je v hrubé stavbě zahrnuta ještě podlaha druhého patra.

2.1 Důvody pro lehkou stavbu

Dále jsou nastíněny hlavní důvody pro lehkou stavbu vozidla.

2.1.1 Technické důvody

Hmotnost všech dopravních prostředků, včetně kolejových vozidel, je důležitým parametrem, který odráží jejich technickou úroveň. Tato hmotnost úzce souvisí s jízdním odporem a má přímý vliv na spotřebu energie (Heller, 2017-2021)

Jízdní odpor je přibližně:

$$W = \underbrace{c_1 \cdot m \cdot g}_{\text{Odpor valení}} \pm \underbrace{s \cdot g \cdot m}_{\text{Odpor stoupání}} \pm \underbrace{a \cdot m}_{\text{Odpor zrychlení}} + \underbrace{C_1 \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2}_{\text{Odpor prostředí}} [N]$$

kde:

m – celková hmotnost vozidla $m = (m_1 + m_2)$,

m_1 – vlastní hmotnost vozidla,

m_2 – užitečná hmotnost zařízení, cestujících nebo nákladu

c_1 – součinitel odporu valení,

C_1 – součinitel odporu vzduchu (u aut označovaný C_x),

A – čelní plocha,

ρ – hustota vzduchu,

s – stoupání tratě.

Z rovnice pro jízdní odpor vyplývá, že pod celkovou hmotností m , která se ve výpočtu vyskytuje 3x, se ukrývá vlastní hmotnost vozidla m_1 . Její podíl na jízdním odporu je významný, protože následně ovlivňuje celkovou spotřebu energie po dobu životnosti vozidla. Přitom v odporu zrychlení musíme vzít v úvahu také podíl rotačních hmot, který zejména u trakčních vozidel je značný. (Heller, 2017-2021)

Celková spotřeba energie:

$$E = f(W, l, v) [kWh]$$

Celková spotřeba energie je funkcí jízdního odporu, délky ujeté dráhy a rychlosti po dobu životnosti vozidla.

„Hmotnost některých trakčních vozidel, zejména elektrických lokomotiv, je omezena maximálním nápravovým zatížením, které je dáno únosností železničního svršku, na kterém je vozidlo provozováno. Pro současné lokomotivy o výkonu 5 až 6 MW bývá omezeno hodnotou 21,5 t, což dává maximální hmotnost čtyřnápravové lokomotivy 86 t. Hmotnost a objem elektrické asynchronní výzbroje dosahuje takové hodnoty, že maximální hmotnost lokomotivy je obvyklými prostředky obtížně dosažitelná. Proto i zde je aktuální lehká konstrukce skříně.“ (Heller, 2017-2021)

Nízká hmotnost skříně má za následek nízkou spotřebu materiálu při výrobě vozidla, ale především energetickou úspornost při provozu; usnadňuje rovněž manipulovatelnost se skříní. Nižší hmotnost samotné skříně umožňuje též vyšší užité zatížení. Vozidlo s nižší hmotností sekundárně způsobuje nižší opotřebení dvojkolí, koleje i dalších částí kolejového vozidla a kolejového svršku.

2.1.2 Ekologické důvody

Minimalizace spotřeby energie na výrobu polotovarů, jejich přepravu a v neposlední řadě také zpracování. Další důležitý fakt je i recyklovatelnost použitých materiálů. Na ekologii vozu má skřín vliv především svojí hmotností, která má vliv na spotřebu energie v provozu.

Je však třeba vzít v potaz, že např. hliníkové lehké konstrukce mohou být ve výrobě energeticky více náročné, než těžší konstrukce ocelové, protože výroba samotného hliníku je energeticky velmi náročná.

2.1. Konstrukční nároky na skříně kolejového vozidla

Konstrukce musí především splňovat požadavky zákazníka, různé normy a zákonné předpisy země/í, ve které/ých bude vůz jezdit a samozřejmě nabídnout něco navíc oproti konkurenčním skříním.

Zde jsou některé z pevnostních norem:

ČSN EN 12 663-1 (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Rozděluje vozidla z pohledu pevnostních nároků na kategorie:

- Lokomotivy
 - Kategorie **L** – Lokomotivy a hnací jednotky
- Osobní vozy
 - Kategorie **P-I** – Osobní vozy
 - Kategorie **P-II** – Ucelené jednotky a osobní vozy
 - Kategorie **P-III** – Vozidla metra, rychlodrážní a lehké konstrukce
 - Kategorie **P-IV** – Lehká vozidla metra a vozidla tramvajové rychlodráhy
 - Kategorie **P-V** – Tramvajová vozidla

ČSN EN 12 663-2 (Nákladní vozy r.2015)

- Kategorie **F-I** – Vozidla bez omezení při posunu
- Kategorie **F-II** – Vozidla se zákazem posunu, odrazem a jízdy přes svážný pahrbek

2.1.3 Definice konstrukčních hmotností

Dle ČSN EN 15 663 pro skupinu **M-II** (osobní vozy jiné než vysokorychlostní jednotky a dálkové vlaky) platí následující viz. tabulky Tabulka 8 a Tabulka 9.

Tabulka 7 - Kategorie vozidel (ČSN EN 15663+A1:2019, 2019)

Kategorie vozidla		Četnost cestujících	Příklady a vysvětlení
M-I	Vysokorychlostní jednotky a dálkové vlaky	Normální	U všech jednotek se nepředpokládá nasazení v předměstské dopravě a v dopravě do zaměstnání
M-II	Osobní vozy jiné než vysokorychlostní jednotky a dálkové vlaky	vysoká	Zaměstnanecká a předměstská doprava (francouzská síť RER nebo TER, pro německou síť S-Bahn nebo některé RB a RE vlaky), metro tramvaje
M-II	Nákladní vozy	-	Vozy a nákladní motorizované jednotky

Tabulka 8 - Definice konstrukčních hmotností (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Referenční hmotnosti	Konstrukční podmínky	Provozní podmínky
Vlastní hmotnost	Vlastní hmotnost (m_1) Vozidlo ve výrobním stavu bez spotřebního materiálu a bez posádky	
Hmotnost v provozním stavu	Konstrukční hmotnost v provozním stavu (m_2)	Provozní hmotnost v provozním stavu (m_2')
Hmotnost při normálním užitečném zatížení	Konstrukční hmotnost při normálním užitečném zatížení (m_3)	Provozní hmotnost při normálním užitečném zatížení (m_3')
Hmotnost při výjimečném užitečném zatížení	Konstrukční hmotnost při výjimečném užitečném zatížení (m_4)	Nepoužije se

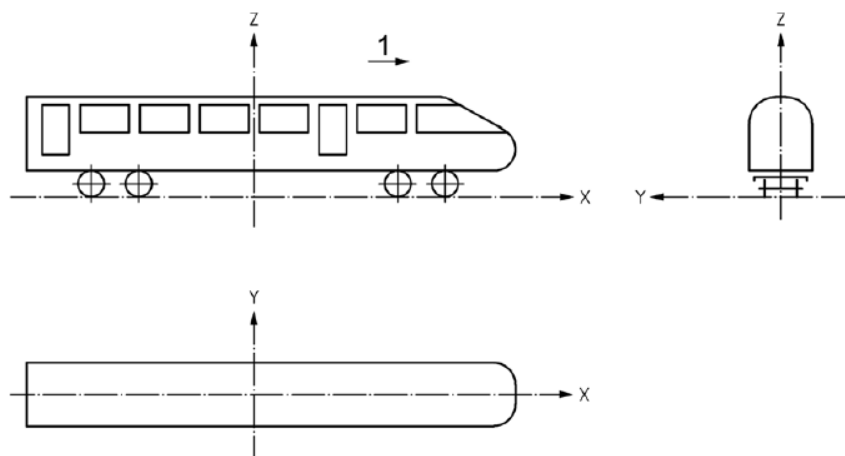
Tabulka 9 - Spotřební materiál, posádka a opotřebení (ČSN EN 15663+A1:2019, 2019)

Položka	Konstrukční hmotnost	Provozní hmotnost
Posádka: Strojvedoucí Posádka vlaku Obsluha při stravování	80 kg na osobu (zahrnuje osobní věci i zavazadla)	
Palivo	Maximální konstrukční množství	2/3 maximálního konstrukčního množství
Písek	Maximální konstrukční množství	2/3 maximálního konstrukčního množství
Jídlo a nápoje včetně vody na pití a vaření.	Maximální konstrukční množství	1/2 maximálního konstrukčního množství
Čistá voda v nádržích pro umyvadla a v nádržích pro toalety a mytí nádobí.	Maximální hodnota z: Konstrukčního množství všech nádrží na vodu nebo konstrukční množství všech odpadních nádrží na vodu	Maximální hodnota z: Konstrukčního množství všech nádrží na vodu nebo
Obsah zásobních nádrží toalet s řízením odpadu CET s recirkulací nebo bez ní.		1/2 konstrukčního množství všech odpadních nádrží na vodu
Voda na omývání čelního skla	Maximální konstrukční množství	2/3 maximálního konstrukčního množství
Spotřební materiál neuvedený v seznamu	Maximální konstrukční množství	2/3 maximálního konstrukčního množství
Opotřebení	Bez opotřebení	Omezení na 1/2 z hodnoty maximálního opotřebení

Tabulka 10 - Užitečná zatížení (ČSN EN 15663+A1:2019, 2019)

Užitečná zatížení	Konstrukční podmínka	Provozní podmínka
<p>Normální užitečná zatížení</p>	<p>Normální konstrukční užitečná zatížení</p> <p>Hmotnost cestujícího = 70 kg (uvažovaná zavazadla jsou definována níže)</p> <p>100 % obsazenost sedadel</p> <p>U sklopných sedadel se nepředpokládá, že jsou obsazena, pokud toto není součástí specifikace vozidla</p> <p>280 kg/m² v prostorech pro stání pokud nejsou určeny jiné, konkrétní hodnoty. Tyto hodnoty musí být v rozsahu od 140 do 420 kg/m² (2 až 6 cestujících/m²).</p> <p>300 kg/m² v zavazadlových oddílech 100 kg/m² pro každou plochu v prostorech pro zavazadla</p>	<p>Normální provozní užitečná zatížení</p> <p>Hmotnost cestujícího = 70 kg (uvažovaná zavazadla jsou definována níže)</p> <p>80 % z normálního užitečného zatížení od hmotností cestujících (sedící i stojící)</p> <p>300 kg/m² v zavazadlových oddílech 100 kg/m² pro každou plochu v prostorech pro zavazadla</p>
<p>Výjimečná užitečná zatížení</p>	<p>Výjimečná užitečná zatížení</p> <p>Hmotnost cestujícího = 70 kg (uvažovaná zavazadla jsou definována níže)</p> <p>100 % obsazenost sedadel</p> <p>U sklopných sedadel se nepředpokládá, že jsou obsazena, pokud to není provozovatelem stanoveno jinak.</p> <p>500 kg/m² v prostorech pro stání pokud nejsou určeny jiné, konkrétní hodnoty. Tyto hodnoty musí být v rozsahu od 350 do 700 kg/m² (5 až 10 cestujících/m²).</p> <p>300 kg/m² v zavazadlových oddílech 100 kg/m² pro každou plochu v prostorech pro zavazadla</p>	<p>Nepoužije se</p>

2.1.4 Souřadnicový systém vozidla



Legenda

- 1 orientace směru jízdy
- X orientace podélného směru
- Y orientace příčného směru
- Z orientace svislého směru

Obrázek 16 Souřadnicový systém skříně vozidla (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.5 Požadavky na pevnost stabilitu konstrukce skříně kolejového vozidla

Statická pevnost se prokazuje výpočtem dle validačního programu viz. Tabulka 11 nebo zkouškami.

Tabulka 11 - Validační program (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

	Úplná konstrukční analýza	Díličí nebo celková srovnávací konstrukční analýza	Statické zkoušky	Únavové a/nebo provozní zkoušky
Nová konstrukce	ano	nevztahuje se	ano	Vyžadují se pouze v případě, že jiné metody neumožňují prokázat dostatečnou bezpečnost
Upravená konstrukce a/nebo jiné použití Původní konstrukce a jiné použití	ne	ano	ne, popřípadě zkouška s redukovaným programem	vyžadují se pouze v případě, že jiné metody neumožňují prokázat dostatečnou bezpečnost
Upravená konstrukce, podobné použití	ne	ano	ne, popřípadě zkouška s redukovaným programem	ne

POZNÁMKA Novou konstrukcí je výrobek (vozidlo nebo konstrukční část), který je nově vyvinut a nemá přímou spojitost s jakýmkoli podobným výrobkem. Upravená konstrukce je výrobek (vozidlo nebo konstrukční část), který vychází ze stávajícího podobného výrobku a má na něj návaznost.

2.1.6 Ověření statické pevnosti vozidla

Konstrukce vozidla při předepsaných zatíženích musí odolávat po celou dobu životnosti bez významné trvalé deformace nebo přesažení kritických hodnot napětí na mezi pružnosti a nebo mezi kluzu. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Pro ověření konstrukce výpočtem musí bezpečnostní součinitel S_1 pro všechny jednotlivé zátěžové stavy nabývat minimální hodnoty 1,15. Při ověření pevnosti konstrukce zátěžovou zkouškou je tato hodnota snížena na 1.0. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

$$U = \frac{\sigma_c S_1}{R} \leq 1$$

kde:

U využití materiálu;

S_1 bezpečnostní součinitel pro mez pružnosti nebo kluzu;

R mez pružnosti (R_{eH}) nebo 0.2% smluvní meze kluzu ($R_{p0.2}$) materiálu (podle definice v EN 10002-1);

σ_c vypočítané napětí v MPa.

2.1.7 Ověření odolnosti konstrukce vůči výjimečným zatížením

Výpočet pro odolnost vůči nadměrnému zatížení, při kterém nesmí dojít k porušení konstrukce. Součinitel bezpečnosti musí být zvolen dostatečně velký, aby využití materiálu bylo maximálně 1. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

$$U = \frac{\sigma_c S_2}{R_m} \leq 1$$

kde:

U využití materiálu;

S_2 bezpečnostní součinitel pro mezní poruchu;

R_m mezní zatížení materiálu v MPa;

σ_c vypočítané napětí v MPa při výjimečném zatížení.

Pro ověření pomocí výpočtu je bezpečnostní součinitel obvykle roven hodnotě 1,5, pro ověření pomocí zkoušky nebo když spojitost mezi zkouškou a výpočtem byla dostatečně prokázána, lze použít 1,3. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Výše zmíněné není platné pro konstrukční prvky, které jsou navrženy jako deformovatelné z důvodu absorpce energie při nehodě dle normy ČSN EN 15 227. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.8 Ověření stability konstrukce

Stabilita konstrukce je určena tuhostí konstrukce. Z důvodu výskytu místních nestabilit ve formě pružné deformace je možné zabezpečit jiné trasy šíření přítomného zatížení, které splňují kritéria pro mez pružnosti nebo mez kluzu. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

$$U = \frac{\sigma_c S_3}{\sigma_{cb}} \leq 1 \text{ nebo } U = \frac{L_c S_3}{L_{cb}} \leq 1$$

kde:

- U využití materiálu;
 S_3 bezpečnostní součinitel pro nestabilitu;
 σ_{cb} kritické deformační napětí v MPa;
 σ_c vypočítané napětí v MPa;
 L_{cb} kritické deformační zatížení v N;
 L_c vypočítané zatížení v N.

Bezpečnostní součinitel se musí volit $S_3 = 1,5$.

Ověření stability se nevztahuje na díly, určené k řízené deformaci při nehodě vozu.

2.1.9 Zhodnocení únavové pevnosti

2.1.9.1 Souhrn

Konstrukce kolejových vozidel jsou po celou dobu životnosti vystaveny cyklickému dynamickému namáhání proměnlivé velikosti. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Nejvíce se vliv cyklického zatížení projevuje v následujících kritických místech:

- Působíště zatížení (včetně úchyťů vybavení);
- Spoje konstrukčních prvků (např. svary, šroubové spoje);
- Tvarové přechody vyvolávající zvýšené koncentrace napětí (např. rohy dveří a oken).

Únavová pevnost prokazuje pomocí následujících metod:

- Metoda mezní trvalé pevnosti
- Metoda kumulativního poškození

2.1.10 Metody hodnocení

2.1.10.1 Metoda mezní trvalé pevnosti

Může být použita pro všechny konstrukční celky kde jejich dynamické zatížení po celou dobu životnosti nepřekročí mez trvalé pevnosti, která když není definován počet zatěžovacích cyklů je použita hodnota 10^7 cyklů. Pokud je definován vyšší počet cyklů, než 10^7 použije se právě tato hodnota. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Únavová pevnost je prokázána, když napětí při všech kombinacích únavových zatížení nebo při měření nepřesáhne hodnu meze trvalé pevnosti. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.10.2 Metoda kumulativního poškození

Je třeba zohlednit reprezentativní časový průběh všech definovaných typů zatížení a počet cyklů. Je nutné brát v úvahu kombinaci všech současně působících zatížení. V takových případech je následně provedeno zpětné posouzení každého poškození a celkového poškození na základě S-N grafu (Wöhlerovy křivky) daného materiálu. To je provedeno v souladu s platnou hypotézou kumulace poškození (Palmgren-Minerova hypotéza). (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Časový průběh a kombinace zatížení lze zjednodušit bez vlivu na správnost výsledků. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Prokázání požadované únavové pevnosti je splněno, pokud je celkové poškození jakéhokoli kritického prvku v důsledku všech relevantních kombinací únavových zatížení menší než jedna. Stejně tak je nutné, aby kumulativní poškození u těchto prvků bylo menší než jedna, což se stanovuje na základě cyklů zatížení naměřených během testů, přičemž trvanlivostní pevnost se extrapoluje na celou životnost vozidla. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.11 Podélná statická zatížení

2.1.11.1 Podélné síly v prostoru nárazníků a/nebo spřáhel

Tabulka 12 - Tlaková síla v místech uchycení nárazníků a/nebo spřáhel (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Síla v kilonewtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
2 000	2 000	1 500	800	400	200	2 000 ^a	1 200 ^a
a Tlaková síla působící na dorazy táhlového ústrojí „c“, pokud jsou dorazy táhlového ústrojí použity (viz EN 12663-2). Jestliže tlaková síla působí na nárazníky, musí se pro každý nárazník použít v jeho ose poloviční hodnota.							

Tabulka 13 - Tlaková síla pod úrovní nárazníků a/nebo spřáhel (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Síla v kilonewtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
-	-	-	-	-	-	-	-
a 50 mm pod osou nárazníku. Jestliže tlaková síla působí na nárazníky, musí se pro každý nárazník použít v jeho ose poloviční hodnota.							

Tabulka 14 - Tlaková síla působící na uchycení nárazníků úhlopříčně (pokud jsou nárazníky umístěny na jednom nebo obou koncích samotného vozidla) (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Síla v kilonewtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
500 ^a	500 ^a	500 ^a	-	-	-	400	400
a Toto zatížení platí pouze pro nárazníky zařazené do normálního provozu.							

Tabulka 15 - Tahová síla na uchycení spráhla (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Síla v kilonewtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
1 000 ^a	1 000 ^a	1 000	600 ^b	300 ^b	150 ^b	1 500 ^c 1 000 ^d	1 500 ^c 1 000 ^d
<p>a Pro určité typy spráhel může být nutná vyšší síla (např. 1 500 kN).</p> <p>b Tyto hodnoty lze upravit, ale musí pokrývat maximální sílu dosažitelnou v běžném provozu nebo v nouzovém případě.</p> <p>c Tahová síla 1 500 kN působící na dorazy táhlového ústrojí „a“, pokud jsou dorazy táhlového ústrojí použity (viz EN 12663-2)</p> <p>d Tahová síla 1 000 kN působící na dorazy táhlového ústrojí „b“, pokud jsou dorazy táhlového ústrojí použity, a pro jiné typy uchycení spráhla (viz EN 12663-2)</p>							

2.1.11.2 Tlakové síly na čelní stěně

Tlaková síla viz. tabulky Tabulka 16, Tabulka 17 a Tabulka 18 musí být zachycena na úrovni spráhla/nárazníků na opačném konci skříně vozidla.

V případech kdy je konstrukce navržena jako nárazuvzdorná podle normy EN 15227, je povoleno použít zatížení na čelní stěnu vozidla buď před navrženými deformovatelnými oblastmi nebo za nimi. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Tabulka 16 - Tlaková síla v oblasti čelníku 150 mm nad úrovní podlahy (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Síla v kilonewtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
400 ^a	400	400	-	-	-	-	-
a Platí pouze pro čelní kabiny.							

Tabulka 17 - Tlaková síla ve výšce spodního rámu okna (dolního okraje okna) (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Síla v kilonewtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
300 ^{a, b}	300 ^b	300 ^b	300 ^b	-	-	-	-
<p>a Platí pouze pro čelní kabiny.</p> <p>b U kabiny strojvedoucího/řidiče musí být toto zatížení zachyceno spodním rámem čelního okna.</p>							

Tabulka 18 - Tlaková síla v úrovni vaznice (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Síla v kilonewtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
-	300	300	150	-	-	-	-

2.1.12 Svislá statická zatížení skříně vozidla

2.1.12.1 Maximální provozní zatížení

Tabulka 19 odpovídá výjimečnému užitečnému zatížení vozidla.

Tabulka 19 - Maximální provozní zatížení (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zatížení v newtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$1,3 \times g \times m_1$	$1,3 \times (m_1 + m_4)$					$1,3 \times g \times (m_1 + m_3)^a$	
a Jestliže při používání dochází k většímu meznímu zatížení (např. v důsledku dynamických vlivů nebo stavu ložení), musí se použít vyšší hodnota definovaná ve specifikaci.							

2.1.12.2 Zdvihání a zvedání

Tabulky Tabulka 20 a Tabulka 21 obsahují síly představující tíhu zvedaných hmotností. Rovnice platí pro dvoupodvozková vozidla.

Zvedaná hmotnost se vypočítává jako hmotnost prázdného vozidla, s výjimkou nákladních vozů v loženém stavu. V některých provozních požadavcích není nutné zahrnovat podvozky nebo plné užitečné zatížení. V těchto případech se hodnoty m_2 a/nebo m_3 v následujících tabulkách nahrazují nulovými nebo sníženými hodnotami. Pokud je nutné zvedat vozidla třídy P-I až P-V v loženém stavu, musí být tato skutečnost specifikována. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Tabulka 20 - Zdvihání a zvedání ve stanovených místech na jednom konci vozidla (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zatížení v newtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$1,1 \times g \times (m_1 + m_2)$						$1,0 \times g \times (m_1 + m_2 + m_3)$	
a U vozidel osobní dopravy se zavazadlovým oddílem nebo s prostorem vyhrazeným pro zavazadla podle EN 15663 se musí přepočíst hmotnost m_5 definovaná v Tabulka 8, tj. $1,1 \times g \times (m_1 + m_2 + m_5)$.							

Tabulka 21 - Zdvihání a zvedání celého vozidla ve stanovených místech (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zatížení v newtonech

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$1,3 \times g \times (m_1 + 2 \times m_2)$						$1,0 \times g \times (m_1 + 2 \times m_2 + m_3)$	

2.1.12.3 Zdvihání a zvedání při posunutí opěrného místa

Při situaci, kdy se jedno zvedací místo posouvá svisle nad rovinu zbývajících tří opěrných míst, je nutné zohlednit zatížení podle tabulky Tabulka 21. Při analýze pro čtvrté zvedací místo se volí jeho svislé zvednutí nad rovinu ostatních tří zvedacích míst o hodnotu 10 mm, nebo takovou hodnotu, při které se projevuje náznak zvedání jiného zvedacího místa, v závislosti na tom, která hodnota je nižší. Pokud je požadována vyšší hodnota zvednutí, musí být tato skutečnost specifikována. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.12.4 Kombinace druhů statických zatížení skříně vozidla

Každá skříň kolejového vozidla musí splňovat kritéria pro nejnepříznivější druhy zatížení stanovená v tabulce Tabulka 22.

Tabulka 22 - Kombinace druhů statických zatížení skříní vozidel (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zatížení v newtonech

Kombinace	Lokomotivy Kategorie L	Kolejová vozidla osobní dopravy Kategorie P-I, P-II, P-III, P-IV, P-V	Nákladní vozy Kategorie F-I, F-II
Tlaková síla a svislé zatížení	-	Tabulka 12 a g x ($m_1 + m_4$)	Tabulka 12 a g x ($m_1 + m_4$) Tabulka 13 a g x ($m_1 + m_4$)
Tahová síla a svislé zatížení	-	Tabulka 15 a g x ($m_1 + m_4$)	Tabulka 15 a g x ($m_1 + m_4$)

2.1.13 Mezní statická zatížení vazeb

2.1.13.1 Druhy mezních zatížení spojení skříně s podvozkem

Spojení mezi skříní a podvozkem musí odolat zatížení viz. Tabulka 19 a Tabulka 20. Kromě zatížení m_1 při zrychlení 1 g ve směru osy z musí skříň vozidla odolat zatížením způsobeným: (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

- Maximálním zrychlením podvozku ve směru osy x, odpovídajícím kategorii podle tabulky Tabulka 23, v případě hnacích podvozků se minimální zrychlení pro kategorii P-I rovná 5 g. V případě vozidel posunovaných za těžkých podmínek (např. při spouštění ze svážného pahrbku) se musí brát v úvahu vyšší hodnoty. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)
- Příčnou silou na každém podvozků, odpovídající výjimečné příčné síle podle definice v EN 13749, nebo silou vyvolanou na podvozků hmotou m_2 při 1 g, podle toho, která je větší. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.13.2 Druhy mezních zatížení v místech uchycení vybavení

Při výpočtech sil v místech uchycení vybavení za provozu vozidla se musí hmotnosti prvků vynásobit hodnotami zrychlení, stanovenými v tabulkách Tabulka 23, Tabulka 24 a Tabulka 25. Zatížení se musí použít jednotlivě. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Minimálním požadavkem je, že každé zatížení vyvolané zrychlením definovaným v tabulkách Tabulka 23, Tabulka 24 a Tabulka 25 se musí individuálně posuzovat v kombinaci s maximálním zatížením, jaká může vyvolávat vlastní vybavení. Pro kombinace se zatížením vyvolávaným svislým zrychlením $1 g$ se musí brát v úvahu zrychlení definovaná v tabulkách Tabulka 23 a Tabulka 24. Zatížení definované v tabulce Tabulka 25 se týká vlastní hmotnosti vybavení. Jestliže může hmotnost vybavení nebo způsob jeho uchycení měnit dynamické vlastnosti vozidla, musí se přezkoumat vhodnost stanovených hodnot zrychlení. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Tabulka 23 - Zrychlení ve směru osy x (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zrychlení v m/s^2

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$\pm 3 g$	$\pm 5 g$	$\pm 3 g$	$\pm 3 g$	$\pm 2 g$	$\pm 2 g$	$\pm 5 g$	

Tabulka 24 - Zrychlení ve směru osy y (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zrychlení v m/s^2

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$\pm 1 g$							

Tabulka 25 - zrychlení ve směru osy z (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zrychlení v m/s^2

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$(1 \pm c) \times g^a$							
^a $c = 2$ na konci vozidla a lineárně klesá na $0,5$ ve středu vozidla.							

2.1.13.3 Druhy mezních zatížení otočných uložení článkových jednotek

Otočná uložení musí odolat maximálnímu zatížení mezi skříněmi vozidel podle požadavků na podélné, příčné a svislé zatížení a podle požadavků na zvedání. Druhy zatížení se musí odvodit na základě rozboru druhů zatížení v této oblasti v souladu s druhem spoje a způsobem otočného uložení skříní vozidel. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Pro účely prokázání dostatečné statické pevnosti otočných uložení se musí brát v úvahu minimálně kombinace statických zatížení, uvedené v tabulce Tabulka 22. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Pro každý druh se musí analyzovat horší z obou (předního a zadního vozidla na společném podvozku). (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Pro otočná uložení a konstrukce sousedních vozidel se musí použít síly a momenty vyvolávané v prvcích vazeb při maximálním natočení. Natočení musí odpovídat minimálnímu poloměru oblouku v provozované koleji. Kromě toho se musí brát v úvahu natačení vyvolávaná změnami sklonu. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.13.4 Druhy mezních zatížení stanovených prvků nákladních vozů

Mezní konstrukční zatížení stanovených prvků nákladních vozů jsou uvedena v EN 12663-2. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.14 Druhy základních únavových zatížení skříně vozidla

2.1.14.1 Zdroje zatížení

Musí se popsat všechny zdroje cyklického zatížení, které mohou vyvolat únavové poškození. Při posuzování únavových poškození konstrukce vozidla se musí brát v úvahu následující stanovené vstupy. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.14.2 Spektrum užitečného zatížení

Pokud se užitečné zatížení významně nemění, lze pro kategorie P-I až P-V, F-I a F-II použít normální konstrukční užitečné zatížení m_3 za celou dobu provozní životnosti. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Pokud se užitečná zatížení významně mění, musí se ve formě vhodné pro výpočetní účely ve specifikaci definovat užitečná zatížení a příslušná doba jejich trvání na každé úrovni. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Významné změny užitečného zatížení se mohou vyskytovat nejčastěji v rychlé dopravě/metru a v některých případech nákladní dopravy. V těchto případech může být nutným stanovení více konstrukčních užitečných zatížení (vyjádřených jako m_3 a/nebo m_4) odpovídajících jednotlivými typickým časovým úsekům provozu. U jiných druhů vozidel obvykle postačí brát v úvahu konstantní užitečné zatížení po celou dobu provozní životnosti. Úrovně užitečných zatížení se mají vyjadřovat jako podíly hodnot m_3 nebo m_4 , podle účelu. Kde je to účelné, musí se brát v úvahu změny rozložení nákladů o různých hmotnostech. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.14.3 Cykly stavů ložený/prázdný

Pro účely analýzy se mají stanovit a vhodným způsobem vyjádřit cykly stavů ložený/prázdný. Únavové poškození vyvolané cykly stavů ložený/prázdný lze považovat za významné v případech, kdy vozidla mají vysoký poměr hmotnosti v loženém stavu k hmotnosti v prázdném stavu a dochází u nich k častým změnám užitečného zatížení. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.14.4 Zatížení vyvolaná kolejí

zatížení vyvolaná svislými a příčnými nerovnostmi a zborcením koleje lze stanovit na základě: (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

- a) Dynamického modelování (s využitím údajů týkajících se geometrie a nerovností koleje);
- b) údajů změřených na určené nebo podobné trati;
nebo vycházející z
- c) empirických údajů (zrychlení, výchylek atd.).

Charakter údajů se bude lišit podle toho, zda se pro konstrukční únavu použije metoda kumulativního poškození nebo metoda trvalé pevnosti. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Jestliže soubor druhů únavových zatížení je pro určitý druh vozidla dostatečně ověřený během předchozího používání, lze tyto druhy zatížení použít jako výchozí pro následný návrh. Alternativní druhy zatížení se mají používat pouze v případě jednoznačně potvrzených změn. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

V tabulkách Tabulka 26 a Tabulka 27 jsou uvedeny empirické úrovně svislých a příčných zrychlení, vhodné pro metodu trvalé pevnosti, odpovídající běžnému provozu v Evropě, které se musí použít, pokud nejsou k dispozici vhodnější údaje (uvedené výše). Pro některá použití lze ve specifikaci definovat vyšší hodnoty a má se vzít v úvahu také vliv zborcení koleje. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Pro ekvivalentní dynamické zatížení lze při analýze kumulativního poškození použít příslušné úrovně zrychlení v tabulkách Tabulka 26 a Tabulka 27 a v obou případech zvolit jejich působení po dobu 10^7 cyklů. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Tabulka 26 - Zrychlení ve směru osy y (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zrychlení v m/s^2

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$\pm 0,2 g$	$\pm 0,15 g$					$\pm 0,2 g$	$\pm 0,2 g^a$
^a Platí pro úchyty vybavení, ale pro podvozková vozidla a dvounápravové vozy se zdokonaleným vypružením může být nižší.							

Tabulka 27 - Zrychlení ve směru osy z (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zrychlení v m/s^2

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$(1 \pm 0,25) \times g$	$(1 \pm 0,15) \times g$			$(1 \pm 0,15) \times g^a$		$(1 \pm 0,3) \times g^b$	
^a $(1 \pm 0,18) \times g$ pro provoz na žlábkových kolejích ^b Pro nákladní vůz s dvoustupňovým vypružením $(1 \pm 0,25) \times g$. Jestliže provoz vykazuje vyšší činitel dynamického zatížení (např. vlivem dynamických účinků nebo stavu ložení), musí se použít hodnota definovaná ve specifikaci.							

2.1.14.5 Aerodynamické zatížení

Významná aerodynamická zatížení se vyskytují v následujících případech: (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

- Vlaky jedoucí vysokou rychlostí;
- Projíždění tunelem;
- Působení silného bočního větru.

U takových zatížení se musí brát v úvahu jejich závažnost a v případě nutnosti se pro účely musí vhodným způsobem vyjádřit jejich účinek. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

2.1.14.6 Vyvíjení tažné síly a brždění

Běžně se musí ve specifikaci definovat počet a velikost zatěžovacích cyklů vyvolaných rozjížděním a zastavováním. V úvahu se musí brát neplánovaná přerušení. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Pokud nejsou k dispozici určité údaje, musí se použít úrovně zrychlení v tabulce Tabulka 28, působící po dobu 10^7 cyklů. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

V případě vozidel vybavených magnetickými kolejnicovými brzdami se jako mezní zatížení musí brát v úvahu maximální hodnoty zrychlení při nouzovém brždění. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Musí se posoudit výskyt podélných zrychlení v důsledku vzájemného dynamického působení vozidel a jím vyvolaných účinků, pokud jsou příčinou významných zatížení. (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Tabulka 28 - Zrychlení ve směru osy x (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015)

Zrychlení v m/s^2

Lokomotivy	Kolejová vozidla osobní dopravy					Nákladní vozy	
Kategorie L	Kategorie P-I	Kategorie P-II	Kategorie P-III	Kategorie P-IV	Kategorie P-V	Kategorie F-I	Kategorie F-II
$\pm 0,15 g$	$\pm 0,15 g$			$\pm 0,15 g^a$	$\pm 0,2 g$	$\pm 0,3 g^b$	
^a V případě, že vozidla mají přecházet do pouličního provozu, musí být navržena pro $\pm 0,2 g$. ^b Platí pouze pro úchyty vybavení.							

2.1.15 Shrnutí nároků na skříň kolejových vozidel

Nejdůležitější informace získané z norem jsou tyto:

- Kategorie vozu dle ČSN 12 663-1 je P-II - Ucelené jednotky a osobní vozy
- Kategorie vozu dle ČSN 15 663 je M-II - Osobní vozy jiné než vysokorychlostní jednotky a dálkové vlaky
- Byla nadefinována konstrukční hmotnost dle ČSN 12 663-1
- Definování souřadnicového systému
- Pro ověření konstrukce výpočtem musí bezpečnostní součinitel $S_1 = 1,15 [-]$
- Podélná statická zatížení dle ČSN 12 663-1 jsou 1 500 kN
- Mezní zatížení ve směru osy x je rovno 3g

3 Hrubé stavby skříní kolejových vozidel

3.1. Technologický vývoj hrubé stavby

Během dlouhého vývoje kolejových vozidel se konstrukce skříní ustálila na několika základních koncepcích, které budou podrobně popsány v následujících odstavcích. Abychom zahrnuli širší problematiku skříní, rozdělíme je do jednotlivých skupin. (Heller, 2017-2021)

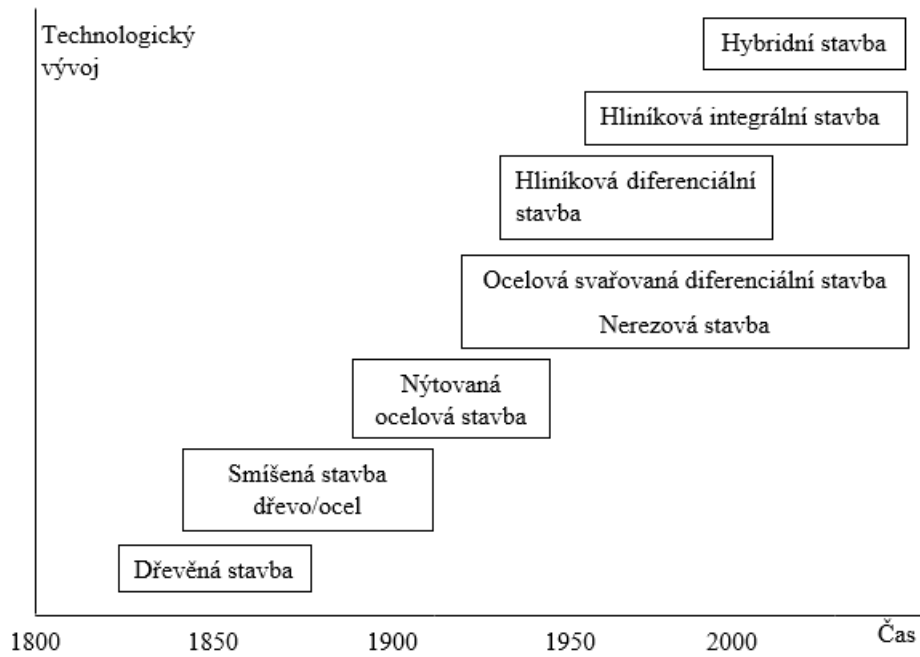
- **Hrubá stavba** se skládá z hlavního rámu, bočnic, čelnic a střechy. Jsou to nosné prvky, které přenášejí všechna svislá, podélná i příčná zatížení. (Heller, 2017-2021)
- **Vnitřní obložení** se skládá obložení bočnic a čelnic, stropu, podlahy, příčky, tepelné a hlukové izolace. (Heller, 2017-2021)
- **Vybavení interiéru** se skládá ze sedadel, oken, dveří, toalety. (Heller, 2017-2021)

Zadáním této práce je **hrubá stavba skříně kolejového vozu viz. Zadání bakalářské práce**. Obrázek Obrázek 17 - Postup vývoje technologií výroby hrubých staveb skříní vozů přehledně znázorňuje vývoj hrubé stavby skříně od počátku 19. století až do současnosti. Zobrazuje současné 3 hlavní směry stavební struktury hrubé stavby skříně (ocelová stavba svařovaná, diferenciální; hliníková stavba integrální; hybridní stavba), které jsou vhodné pro různé aplikace dle jejich specifikací. (Heller, 2017-2021)

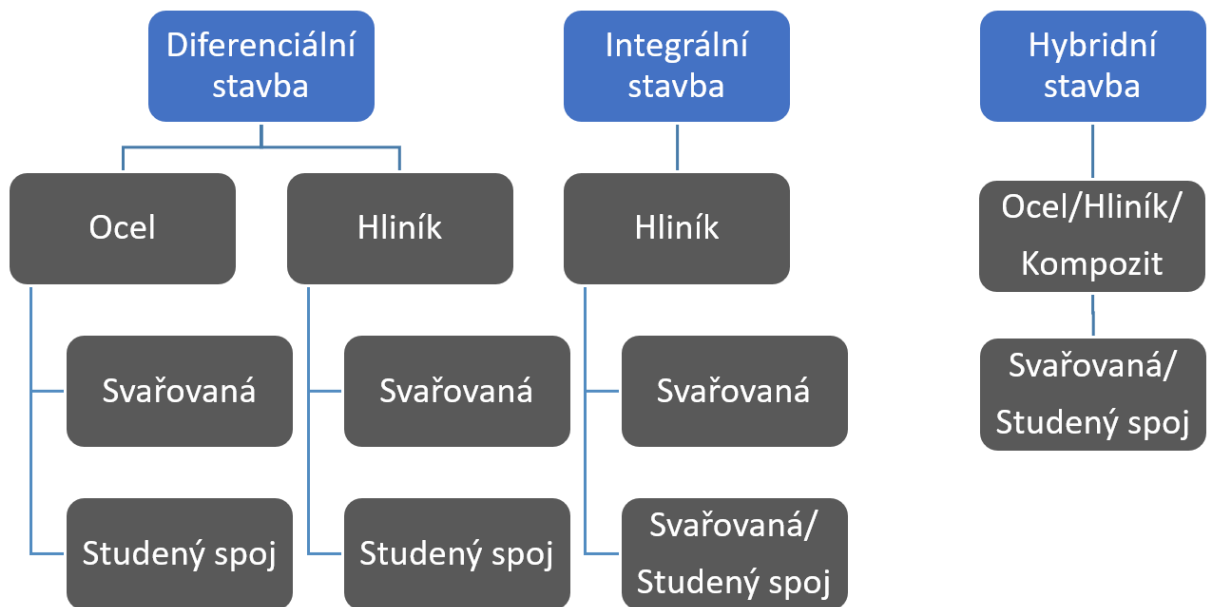
Základní informace k jednotlivým stavebním strukturám:

- Na **ocelovou diferenciální** stavbu lze použít ocel obvyklé meze kluzu, nebo lze použít ocel se zvýšenou mezí kluzu až 700 MPa. Tuto stavbu lze lokálně dobře vyztužit nebo lokálně opravit. Nevýhodou svařovaných spojů je obecně pokles mechanických vlastností v místech spojů. (Heller, 2017-2021)
- **Hliníkovou integrální** stavbu lze opravovat pouze velmi málo a jen malé části. Při opravě plamenem by došlo k velkým deformacím. (Heller, 2017-2021)
- **Hybridní stavba** využívá různých vlastností různých materiálů pro různé části skříně. (Heller, 2017-2021)

Obrázek Obrázek 18 - Přehled technologií výroby hrubých staveb skříní kolejových vozidel názorně zobrazuje technologie výroby hrubých staveb skříní kolejových vozidel. Studeným spojením je v zde myšlen nýtový, lepený nebo šroubový spoj.



Obrázek 17 - Postup vývoje technologií výroby hrubých staveb skříní vozů (Heller, 2017-2021)



Obrázek 18 - Přehled technologií výroby hrubých staveb skříní kolejových vozidel (Heller, 2017-2021)

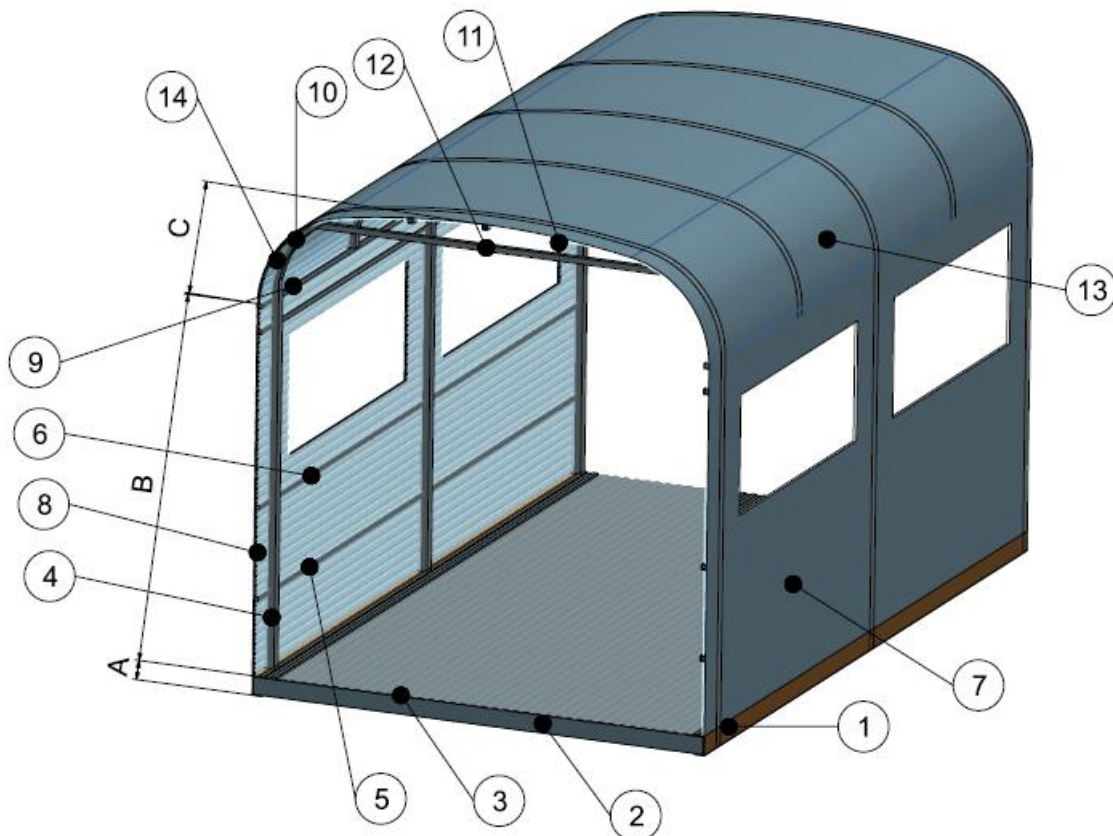
3.1. Diferenciální hrubá stavba skříně

3.1.1 Ocelová diferenciální stavba skříně

Tento typ konstrukce vznikl v šedesátých letech minulého století, je dodnes využíván s úpravami díky výpočetní technice a technickému pokroku. Jedná se o samonosnou ocelovou konstrukci složenou ze spodku s vlnitou podlahou, bočnic, čelnic a střechy. Název "diferenciální" pochází z rozdílných (diferencovaných) funkcí jednotlivých konstrukčních prvků. Lze ho definovat následovně: každý stavební díl vzniká spojením jednotlivých prvků. (Heller, 2017-2021)

Složení diferenciální stavby dle obrázku Obrázek 19 :

- **Spodek** vozu (A), jenž je složen z:
 - Podélníků (1) (ohraňovaný nebo válcovaný U nebo Z profil),
 - Příčnicků (2) (ohraňované profily U) navzájem svařených
 - Vlnitá podlaha (3) (přenáší až 1/3 podélných sil na spráhlo, tloušťka plechu je 1 – 1,5 mm) je vložena mezi podélníky (Heller, 2017-2021)



Obrázek 19 - Vzor diferenciální konstrukce skříně kolejového vozidla (Heller, 2017-2021)

- **Bočnice (B)** je příhradová kostra s oplechováním složená z :
 - Kostry, jež je složená ze sloupků (4) a podélné výztuhy (5) (nese sedadla a vytápěcí kanály)
 - Podélné výztuhy (6) (nachází se pod okny)
 - Oplechování bočnice hladké (7) nebo signované (8)
- **Střecha (C)** je složena z :
 - Kostry složené z dvou vaznic (9) a několika kružin (10)
 - Podélných výztuh (11) (nutné v případě hladkého oplechování (13), oproti signovanému plechu (14) je nižší počet výztuh)
 - Nosiče stropu (12)

Na obrázku Obrázek 20 Ocelová, svařovaná skříň vozu Railjet (ČD, SIEMENS) s vypálenými odlehčujícími otvory je vidět moderní obdoba ocelové diferenciální konstrukce, kterým je výřez otvorů v místech nižších koncentrací napětí pro dosažení optimální hmotnosti.



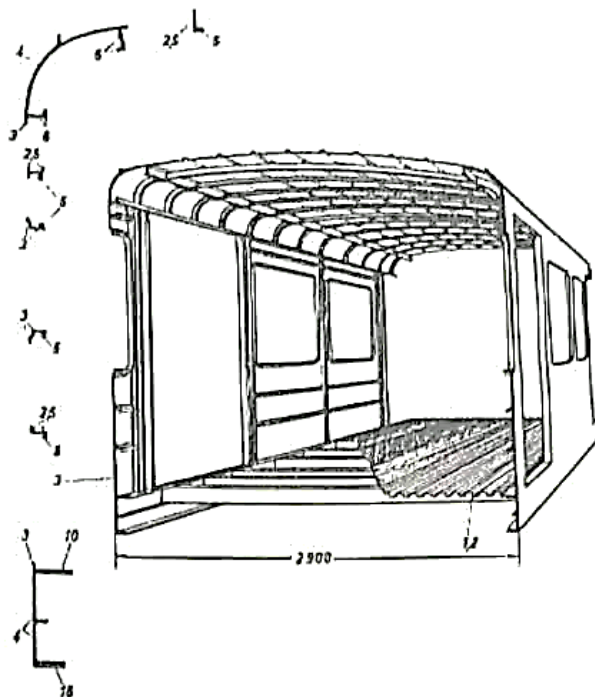
Obrázek 20 Ocelová, svařovaná skříň vozu Railjet (ČD, SIEMENS) s vypálenými odlehčujícími otvory (Šindelář, 2017)

3.1.2 Hliníková diferenciální stavba

V sedmdesátých letech minulého století byl učiněn první krok při hledání možností snížení hmotnosti hrubé stavby vagonové skříně. Tento krok spočíval v jednoduché substituci oceli hliníkem, při zachování principu diferenciální konstrukce. V tomto případě však samotná hmotnost použitých materiálů neklesala. Ocel, která se tehdy používala, měla mez kluzu kolem 300 MPa, zatímco hliník měl mez kluzu kolem 200 MPa. Za účelem zachování stejné tuhosti (s ohledem na to, že modul pružnosti v tahu u oceli je přibližně 3krát vyšší než u hliníku) bylo nezbytné zvětšit příčné průřezy hliníkové diferenciální konstrukce přibližně o 30 až 50 procent. (Heller, 2017-2021)

Hustota hliníkových slitin je okolo $2\,700\text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$, zatímco hustota oceli je $7\,850\text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$, což je téměř třikrát vyšší hodnota vůči hliníkové slitině. Vyplyvá z toho tedy úvaha, že při zvětšení průřezu hliníkové stavby o 50 % vůči ocelové stavbě je ("1,5 · 2 700 = 4050") je její hmotnost přibližně poloviční.

Na obrázku Obrázek 21 je znázorněn princip diferenciální hliníkové konstrukce, které bylo využívání spíše pro vozidla metra. Na bočnice se používal hliníkový plech o tloušťce 3 mm a 4 mm na vaznice, z důvodu tehdejšího stavu technologie svařování. Kvůli náročné výrobě a velkým deformacím, z důvodu svařování, byly tyto skříně odsouzeny ke konci využívání v praxi. (Heller, 2017-2021)



Obrázek 21 - Hliníková diferenciální stavba skříně vagonu (metro Mnichov) (Heller, 2017-2021)

3.1.2.1 Výhody diferenciální stavba:

- Používání normalizovaných profilů a plechů (Heller, 2017-2021)
- Lze ji lokálně vyztužit (Heller, 2017-2021)
- Nízké náklady na přípravky a nářadí (Heller, 2017-2021)
- Jednoduchá a snadná opravitelnost (Heller, 2017-2021)

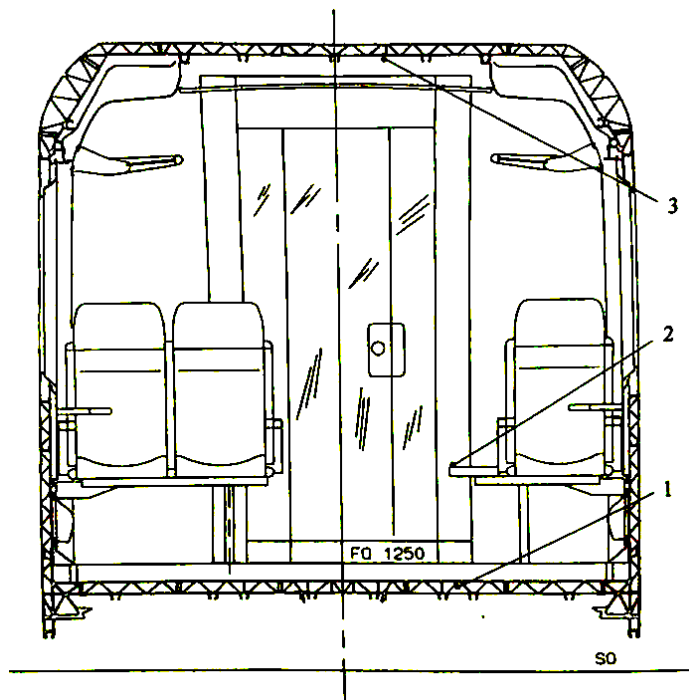
3.1.2.2 Nevýhody diferenciální stavba:

- Zvýšené náklady, především z důvodu velkého množství svarů (Heller, 2017-2021)
- Ploché vnější plechy se musí předepínat – složitější výroba (Heller, 2017-2021)

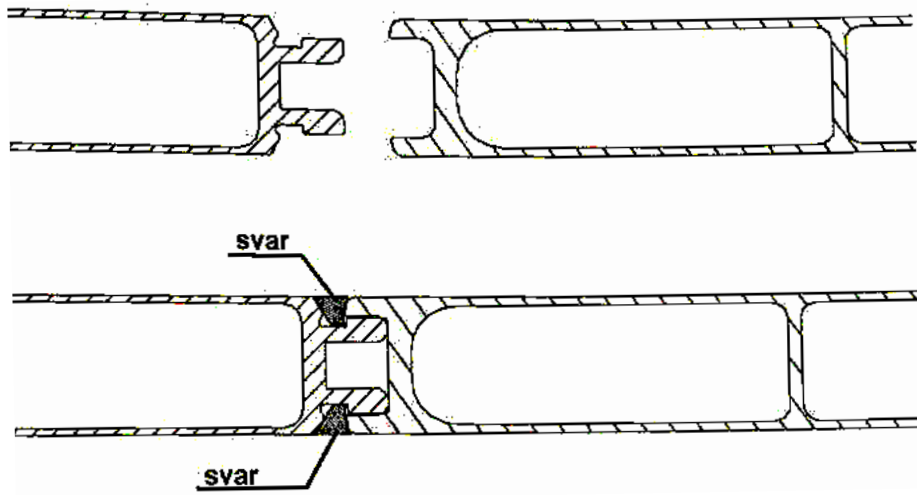
3.1. Integrální stavba

Princip integrované hrubé stavby skříně je zcela odlišný od předchozího. Definice tohoto principu uvádí, že každý stavební díl se skládá z jednoho stavebního prvku. Základem této konstrukce jsou integrované, hliníkové protlačované profily, které probíhají po celé délce vozové skříně. Tyto profily slouží jako nosná struktura skříně a integrují několik funkcí. V sobě mají prvky pro upevnění interiérového vybavení a vybavení pod vozem. (Heller, 2017-2021)

Obrázek 22 názorně ukazuje základní princip hliníkové integrální konstrukce, která je složena z podlahové desky (1), bočnice (2) a střechou (3). Na obrázku Obrázek 23 - Detail svaru hliníkových profilů je zachyceno spojení dvou hliníkových profilů v řezu, na obrázku Obrázek 24 Vlevo je detail svaru na konstrukci a vpravo je odříznutá část spojení zachyceno jak vypadá svar ve skutečnosti. Kvůli technologickým možnostem tažení profilů lze vyrobít profil s maximálním průměrem průřezu 600 mm, společnost Welsper Profile GmbH je schopná vyrobít profil délky až 27 000 mm. Materiál, z kterého je vyroben profil bývá ze skupiny EN AW 6XXX T6.



Obrázek 22 - Řez integrální hliníkovou konstrukcí skříně (Heller, 2017-2021)



Obrázek 23 - Detail svaru hliníkových profilů (Heller, 2017-2021)



Obrázek 24 Vlevo je detail svaru na konstrukci a vpravo je odříznutá část (Heller, 2017-2021)

3.1.2.3 Výhody integrální stavby:

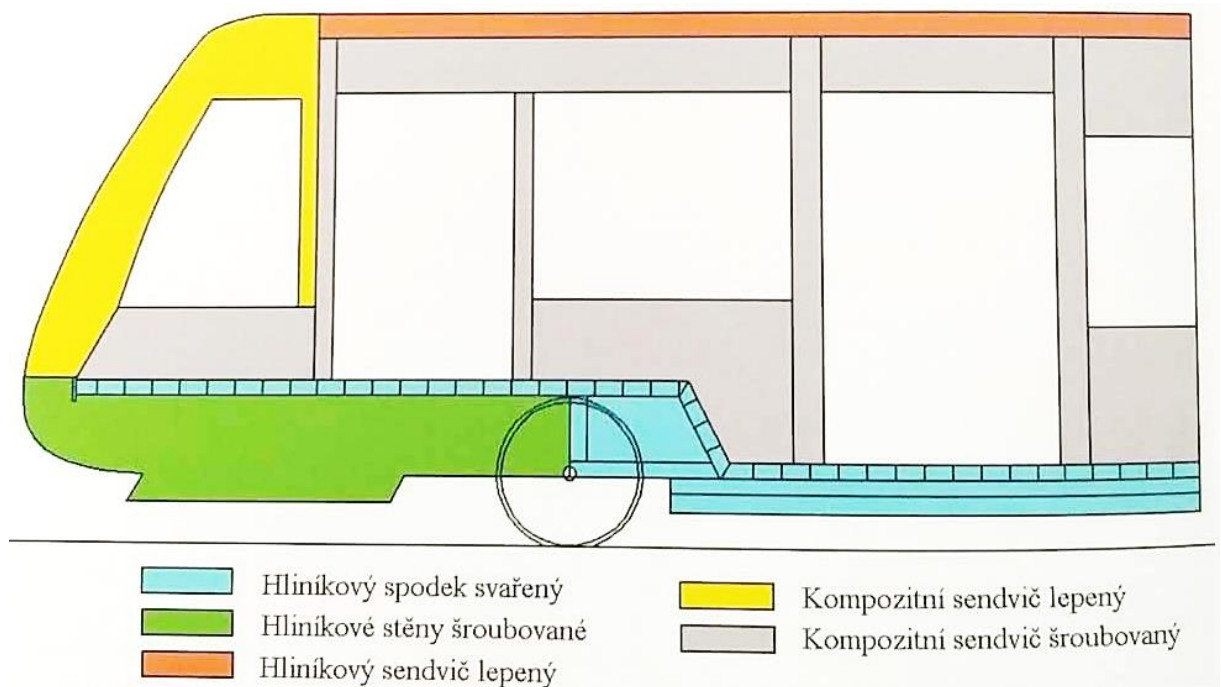
- Nízké výrobní náklady díky jednoduché montáži (Heller, 2017-2021)
- Snadno automatizovatelná konstrukce (Heller, 2017-2021)
- Drážky zjednodušují montáž interiéru viz. Obrázek 22 - Řez integrální hliníkovou konstrukcí skříně (Heller, 2017-2021)
- Bočnicové a střešní profily tvoří samotný design vozidla (Heller, 2017-2021)

3.1.2.4 Nevýhody integrální stavby:

- Profily jsou pouze ze slitin hliníku (Heller, 2017-2021)
- Vysoké náklady na materiál a přípravky (Heller, 2017-2021)
- Nelze měnit tloušťku profilu ve směru tažení (Heller, 2017-2021)
- Nelze opravit větší poškození (Heller, 2017-2021)

3.1.2.5 Pravděpodobné uplatnění integrální stavby

- Pro dlouhé skříně bez dveří uprostřed a s relativně malými okny, této specifikaci nejvíce vyhovují vysokorychlostní vozidla jako TGV nebo Pendolino (Heller, 2017-2021)
- Pro dlouhé a vysoké skříně, které mají velký kvadratický moment průřezu (Heller, 2017-2021)



Obrázek 26 - Koncept současné hybridní skříně (Heller, 2017-2021)

3.2.1.1 Výhody hybridní skříně

- Snadno optimalizovatelné vlastnosti jednotlivých dílů (Heller, 2017-2021)
- Nízké náklady na přípravky a nářadí (Heller, 2017-2021)
- Malé deformace skříně díky studeným spojům (Heller, 2017-2021)

3.2.1.2 Nevýhody hybridní skříně

- Náročná recyklace materiálů (Heller, 2017-2021)
- Konstrukčně složitější spoje (Heller, 2017-2021)

3.3 Materiály na skříně osobních vozidel

Při výběru materiálu pro jednotlivé díly musí být brány na zřetel požadavky na provozní teploty (-40 až + 80 °C, vrubová houževnatost musí být vyšší, než $K_{CV} = 27 \text{ Jcm}^{-2}$), životnost 30 let a s tím spojené cyklické zatížení [dle (ČSN EN 12 663-1+A1:2015, 2015) je počet cyklů trvalé pevnosti materiálu stanoven na 10^7], tuhost z důvodu vibrací a deformací a chemické stálosti z důvodu agresivního prostředí.

3.3.1 Kovové materiály

3.3.1.1 Ocely

Ocelové plechy tlusté:

- ČSN 11 503.1 (EN P355NL1, ISO 1.0566)
- ČSN 11 523.1 [EN S355J0+N, ISO 1.0553] (EN S355J2+N, ISO 1.0570)]

Ocelové plechy tenké:

- ČSN 11 375.21 (EN HC220P-A-m, ISO 1.0397)
- ČSN 11 523.21 (EN HC340LA, ISO 1.0548)

Nerezové ocelové plechy tenké:

- ČSN 17 240.4 (EN X5CrNi18-10, ISO 1.4301)
- ČSN 17 350.4 (ENX2CrNiMo18-14-3, ISO 1.4435)
- ČSN 17 020.1 (EN X6Cr13, ISO 1.4000)

Běžné oceli pro ocelové díly:

- ČSN 11 503 A ČSN 11 523 (EN S355J2+N, ISO 1.0570)
- EN S355NC (ISO 1.0977)

Speciální ocel:

- KODUR 700 MC, EN S700MC (ISO 1.8974)

3.3.1.2 Slitiny hliníku

Plechy ze slitin hliníku:

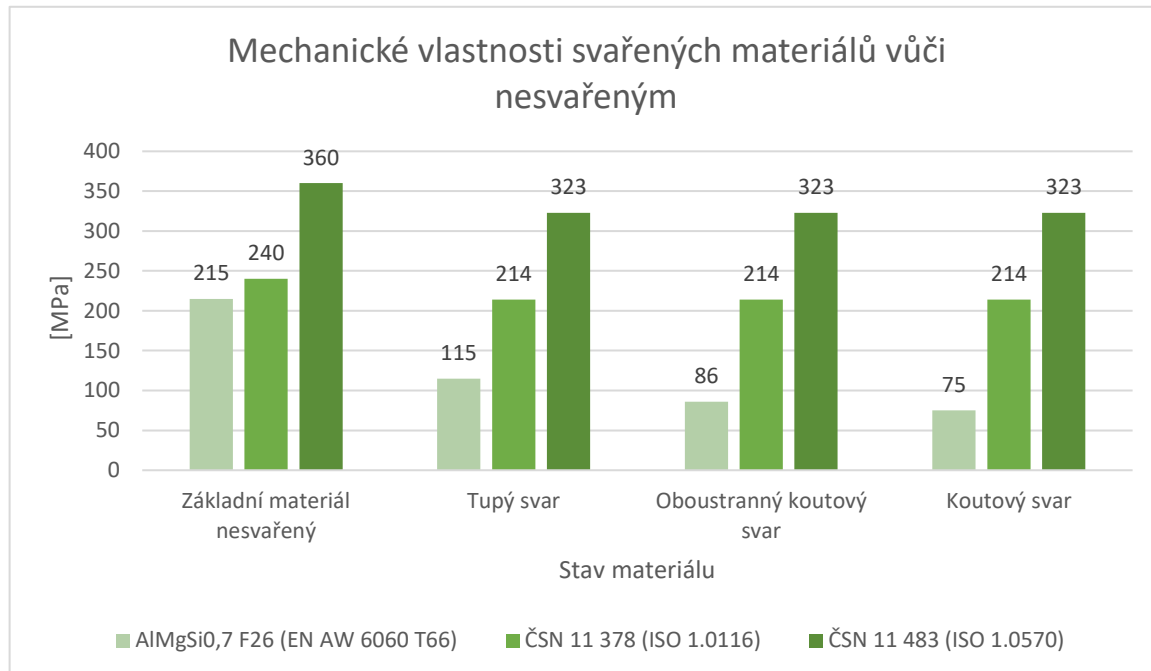
- EN AW 6082 T6 (ISO AlSi1MgMn)
- EN AW 5083 H111 (ISO AlMg4,5Mn0,7)
- EN AW 5083 H321

Materiály tažených profilů:

- EN AW 6005A T6 [ISO AlSiMg(A)]
- EN AW 6082 T6 (ISO AlSi1MgMn)
- EN AW 6060 T6 (ISO AlMgSi)
- EN AW 6008 T6 (ISO AlSiMgV)
- EN AW 6106 T6 (ISO AlMgSiMn)

3.3.1.3 Vliv svaru na mechanické vlastnosti kovových materiálů

Graf 1 - Vliv svaru na mechanické vlastnosti materiálů názorně ukazuje pokles mechanických vlastností u vybraných materiálů při použití tzv. „teplého“ spoje, svaření. Nejméně vhodný je koutový svar. Tento Graf 1 - Vliv svaru na mechanické vlastnosti materiálů bude jako vzor pro vyhodnocování výsledků svarů v konstrukci.



Graf 1 - Vliv svaru na mechanické vlastnosti materiálů (Meyer, 2006)

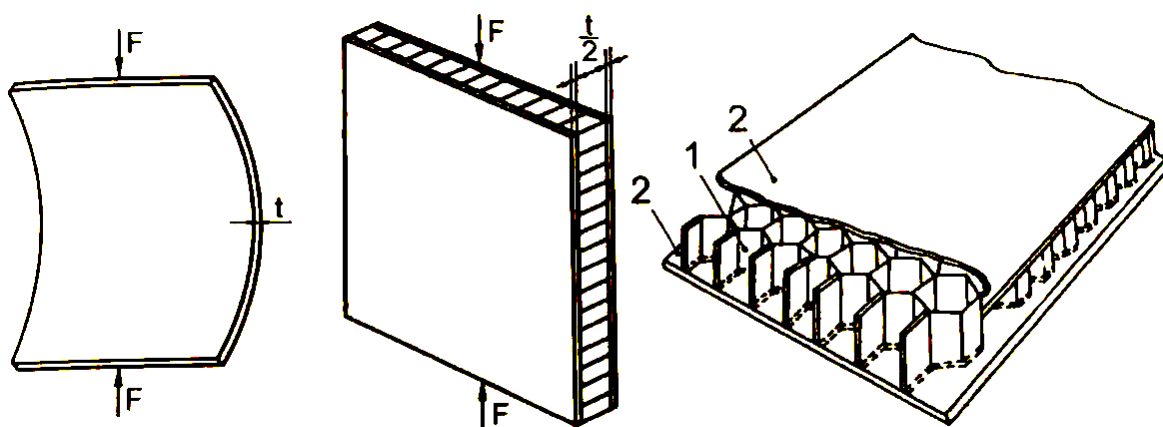
3.3.2 Nekovové materiály

Z nekovových materiálů se pro skříňové kolejových vozů používají například **skelný laminát** pro složitě tvarované díly, u nekonstrukčních dílů stačí jedna vrstva o tloušťce 4mm. Výroba dílu z laminátu je poměrně drahá kvůli nutnosti výroby formy, ale lze dosáhnout speciálního designu. Je potřeba vodotěsně spojit ocelovou část s laminátem a upevnit okno. (Heller, 2017-2021)

Zátěžné části bývají z kompozitu neboli laminátového sendviče, který vyztuží konstrukci v příčném směru. Pro dosažení vyšší příčné tuhosti tenkých plechů nebo laminátů ve vzpěru a smyku se často využívají sendvičové konstrukce. (Mráz, 2006)

Na obrázku Obrázek 27 – Princip a funkce sendviče [1 – jádro (honey comb core), 2 – potahy (face sheet)] je znázorněn princip sendvičové konstrukce, kde při stejném zatížení dochází k výrazné deformaci u plechu tloušťky t , ale u sendvičové konstrukce s tloušťkou stěny potahu na obou stranách je $t/2$ nedochází k výrazné deformaci. Potahy sendvičových konstrukcí slouží k přenosu tahových a tlakových sil, zatímco jádro s nízkou hmotností zajišťuje přenos smykových sil mezi potahy. Ohybová tuhost sendvičového panelu je přímo úměrná druhé mocnině jeho tloušťky. Díky nízké měrné hmotnosti jádra (cca 80 kgm^{-3}) je přírůstek hmotnosti panelu zanedbatelný. (Heller, 2017-2021)

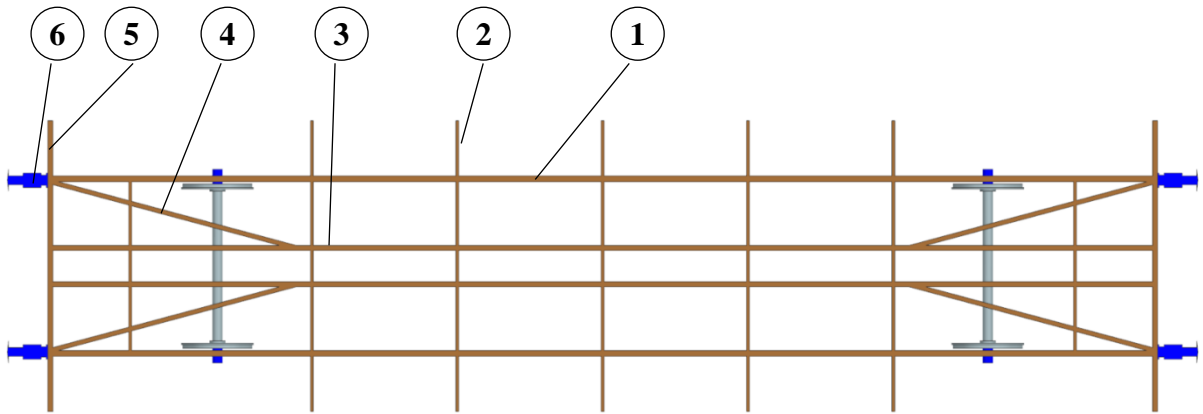
Smyková pevnost jádra sendviče roste s jeho hustotou, což je klíčové pro dimenzování konstrukce. Při tlakovém namáhání sendviče ve směru jeho tloušťky hrají roli pevnost jádra v tlaku, tuhost a tloušťka potahů. Voštinové jádro vykazuje lepší mechanické vlastnosti než pěnové jádro při stejné měrné hmotnosti. Volba jádra je ovlivněna i dalšími faktory, jako je tepelná vodivost, nehořlavost, tepelná a zvuková izolace. Tvar sendviče také výrazně ovlivňuje volbu jádra. Pro ploché sendviče jsou vhodné papírové nebo hliníkové voštiny, zatímco pro tvarované sendviče se nejčastěji používají pevná pěnová jádra z lehčeného polyuretanu (PUR), polyvinylchloridu (PVC), polyetylenu (PE) atd. Potah je lepen na jádro. (Heller, 2017-2021)



Obrázek 27 – Princip a funkce sendviče [1 – jádro (honey comb core), 2 – potahy (face sheet)] (Heller, 2017-2021)

4 Podlaha skříně nákladního vozu

Hlavní rám je složen z dílů znázorněných na obrázku Obrázek 28. Hlavní podélníky (1) a střední podélníky (3) přenáší především tažné síly. Čelník (5) společně s šikmou výztuhou (4) přenáší zatížení v tlaku, která jsou ztlumena nárazecími ústrojími (6). Celou konstrukci ztužují příčníky (2), které pomáhají vyztužit podlahu i v ose z. (Heller, 2017-2021)



Obrázek 28 - Schéma podvozku nákladního vozu

- 1 – Hlavní podélník; 2 – Příčník; 3 – Střední podélník; 4 – Šikmá výztuha;
5 – Čelník; 6 – Nárazecí ústrojí

4.1 Materiály skříní nákladních vozů

Pro skříně nákladních kolejových vozidel se používá materiál ČSN EN 10025-2 S355J2+N, což je svařitelná konstrukční ocel. Pro plechy o tloušťce menší, než 8 mm se používá materiál s požadavkem na zaručený obsah mědi, čímž se zajistí vyšší korozní odolnost. (Heller, 2017-2021)

5 Výběr varianty hrubé stavby skříně

Diferenciální ocelová konstrukce je vyráběna z různých ocelových slitin, které mají různé mechanické vlastnosti v různých částech konstrukce. To umožňuje optimalizovat pevnost a hmotnost konstrukce, což je zvláště užitečné v případech, kdy je potřeba vyrobit lehkou konstrukci s vysokou pevností. Na nákladní kolejová vozidla je výhradně používána diferenciální ocelová konstrukce, díky své vysoké pevnosti Ocelová konstrukce je také odolná vůči korozivním vlivům a má dlouhou životnost.

Na druhé straně, integrální hliníková stavba je vyráběna svařováním profilů, které jsou z jednoho kusu hliníkové slitiny. Tento materiál je známý pro svou vysokou pevnost a nízkou hmotnost. Integrální hliníková konstrukce se často využívá v leteckém průmyslu, kde je důležitá kombinace odolnosti a lehkosti. Hliník je také odolný vůči korozivním vlivům, což zajišťuje dlouhou životnost konstrukce. Další výhodou integrální hliníkové konstrukce je snadné zabudování interiéru.

Hlavním úkolem je minimalizace hmotnosti, samozřejmě při splnění všech ostatních požadavků. Za účelem rozhodnutí o provedení hrubé stavby byla provedena vícekriteriální analýza na jejíž základě bylo rozhodnuto.

Tabulka 29 - Vícekriteriální analýza

Kritérium Hrubá stavba	Výrobní náklady (2)		Snadná montáž interiéru (4)		Možnosti optimalizace (5)		Opravitelnost (1)		Dopady na životní prostředí (3)		Suma B (součet bodů)	PB (přepočtené body)	Součet výsledků
	volba	Váha důležitosti kritérií	volba	Váha důležitosti kritérií	volba	Váha důležitosti kritérií	volba	Váha důležitosti kritérií	volba	Váha důležitosti kritérií			
Ocelová diferenciální	3	(6)	3	(12)	5	(25)	5	(5)	4	(12)	20	60	80
Hliníková integrální	5	(10)	5	(20)	2	(10)	1	(1)	4	(12)	17	53	70
Kombinace ocelové diferenciální a hliníkové integrální	4	(8)	5	(20)	4	(20)	3	(3)	4	(12)	20	63	83

Bodovací škála voleb od 1-5 (1 – nejhorší, 5 – nejlepší)

Bodovací škála váhy důležitosti kritéria 1-25 (1 – nejhorší, 25 – nejlepší)

5.1 Vyhodnocení výsledku analýzy a rozhodnutí o provedení hrubé stavby

Na základě vícekritériální analýzy viz. tabulka Tabulka 29 -Vícekritériální analýza bylo rozhodnuto pro kombinaci ocelové diferenciální stavby spodní části a integrální hliníkové stavby horní části dvoupodlažního vozu. Tato kombinace umožňuje využít výhody obou materiálů a dosáhnout optimálního poměru pevnosti, stability a hmotnosti. Ocelová část poskytuje vysokou pevnost tam, kde je to nezbytné, zatímco hliníková část snižuje celkovou hmotnost a přispívá ke zvýšení tuhosti.

Toto rozhodnutí bylo přijato na základě výsledku analýzy a také úvahy, kdy v prvním patře jsou ve stavbě velké vstupní/výstupní otvory, čímž je jiná, než ocelová diferenciální stavba, vyloučena. Ve druhém patře je situace přesně opačná, což přináší výhodu při použití hliníkové integrální stavby. Dále bude tedy zpracována kombinace ocelové diferenciální konstrukce (spodní patro) a integrální hliníkové stavby (horní patro).

6 Konstrukční návrh

Konstrukční návrh kolejového vozidla ComplexTrans představuje pokrokovou inovaci v oblasti železniční dopravy. Toto vozidlo je vyvíjeno s cílem poskytnout spolehlivý, pohodlný, rychlý a efektivní způsob přepravy osob (případně včetně jejich automobilů/(kupémobilů) a/nebo nákladních přepravních modulů a zásilkových boxů se zbožím střední a malé velikosti. V rámci tohoto konstrukčního návrhu byly pečlivě zváženy různé faktory, jako je bezpečnost, energetická efektivita, spolehlivost a životnost vozidla, aby se zajistilo optimální spojení mezi technickými parametry a provozními požadavky.

Komplexní konstrukce vozidla je navržena tak, aby splňovala nejvyšší standardy pevnosti, stability a bezpečnosti. Hlavními materiály použitými při konstrukci jsou hliníkové slitiny a ocel. Horní patro je navrženo z lehké a pevné hliníkové slitiny, která zajišťuje dostatečnou ohybovou tuhost, snížení hmotnosti vozidla a zvýšení energetické efektivity. Ocelové nosníky hlavního rámu jsou pak zodpovědné za stabilitu a podélnou pevnost vozidla.

Vzhledem k rostoucím environmentálním obavám je energetická efektivita jedním z klíčových hledisek při konstrukci kolejových vozidel. Vozidlo ComplexTrans využívá moderních technologií a inovativních řešení, které minimalizují spotřebu energie a emise skleníkových plynů. Díky lehkým hliníkovým slitinám se podařilo dosáhnout významného snížení hmotnosti.

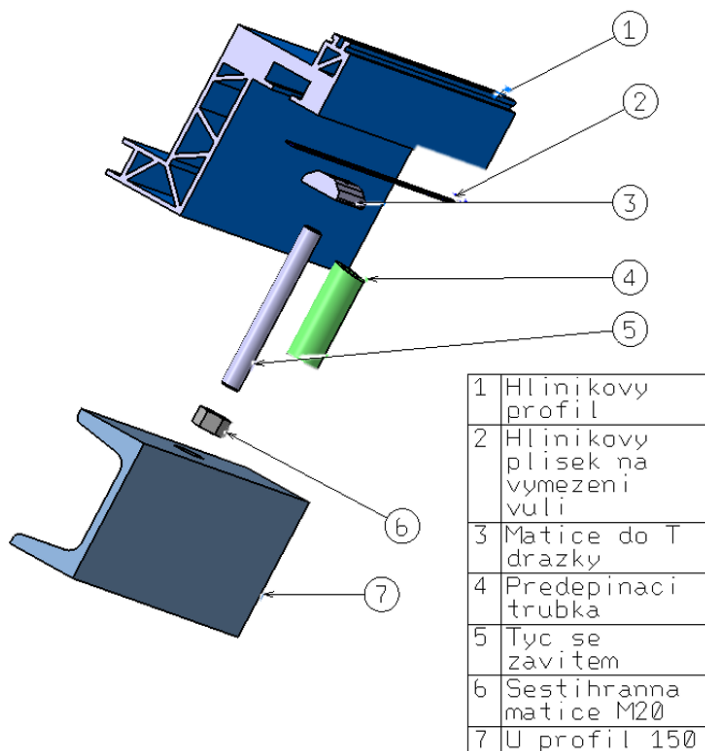
6.1 Řešení dílčích konstrukčních celků

Při řešení dílčích konstrukčních celků je nezbytné brát v úvahu požadavky na funkčnost, spolehlivost, životnost, bezpečnost a estetický vzhled. Každý konstrukční celek musí být navržen tak, aby plnil svou specifickou roli a přispíval k celkovému výkonu a efektivitě zařízení.

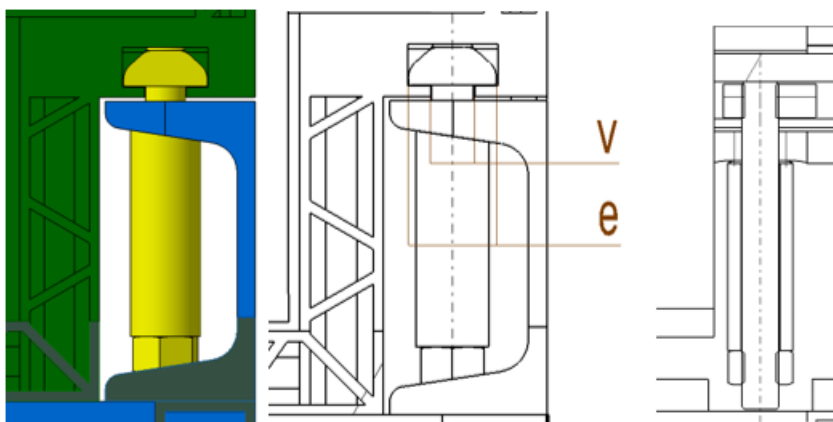
V případě konstrukce kolejových vozidel se jedná především o výběr materiálu včetně povrchových úprav, výběr vhodných metod spojování prvků (studený vs horký spoj) a návrh designu.

6.2 Spojení základních částí skříně

Pro spojení horního patra hliníkové integrální konstrukce a spodního patra ocelové diferenciální konstrukce je použito šroubových spojů viz obrázky Obrázek 29 Rozstřel šroubového spoje a Obrázek 30 - Šroubový spoj M20 - pohled z 3D modelu (vlevo), rozměry (uprostřed) řez (vpravo). Z obrázku je patrné spojení podlahy hliníkového patra, předepínací trubka má zajistit odolnost šroubového spoje vůči míjivému zatížení (ložený/ prázdný, léto/zima).



Obrázek 29 Rozstřel šroubového spoje (Catia V5)



Obrázek 30 - Šroubový spoj M20 - pohled z 3D modelu (vlevo), rozměry (uprostřed) řez (vpravo)

Počet šroubů je navržen pro zatížení 3g viz tabulka Tabulka 23 - Zrychlení ve směru osy x a přenos příčného zatížení na jeden šroub je dle normy DIN 25201-2:2015-12 (DIN 25201-2:2015-12, 2015). Hmotnost horního patra je přibližně 6,3 tun.

$$n_{\xi} = s_{\xi} \cdot \frac{F_x}{F_{\xi x}} = s_{\xi} \cdot \frac{m_h \cdot 5 \cdot g}{F_{\xi x}} = 1,15 \cdot \frac{6\,300 \cdot 3 \cdot 9,83}{15\,000} \approx 14,2 \Rightarrow 25 \text{ šroubů}$$

kde:

n_{ξ} ...je teoretický počet potřebných šroubů,

F_x ...síla vyvolaná při nouzovém zastavení vozu, která působí na horní patro,

$F_{\xi x}$...síla, kterou šroub dokáže přenést v tečném směru (platí pro šroub M20 materiálu 10.9) (DIN 25201-2:2015-12, 2015),

m_h [kg]...hmotnost horního patra v kg,

S_{ξ} [-]...koeficient bezpečnosti počtu šroubů,

g [$m \cdot s^{-2}$]...tíhové zrychlení.

Počet šroubů vypočtený je 14,2 zvolil jsem 25 z důvodu připevnění horního patra v místech sloupků viz obrázky Obrázek 42, na koncích vozu a v prostorech výřezů v integrální stavbě.

Pro snadné ustavení šroubů na svojí pozici a jejich následnou montáž budou vyfrézovány otvory do hliníkové konstrukce, kudy bude možno hlavy šroubů snáze zavést do C-drážky.

Po stanovení počtu šroubů je zapotřebí ověřit zda minimální průměr šroubu M20 vyhoví. Pro šroub zatížený tečně na jeho osu je vztah pro porovnání dovoleného smykového napětí a skutečného smykového napětí uveden níže.

$$\tau_{ds} \geq \tau_{SS} = \frac{F_{x1}}{A_{min}} = \frac{\frac{F_x}{n_{\xi}}}{\pi \cdot \frac{d_{min}^2}{4}} = \frac{\frac{3 \cdot g \cdot m_h}{n_{\xi}}}{\pi \cdot \frac{d_{min}^2}{4}} = \frac{\frac{3 \cdot 9,83 \cdot 6300}{25}}{\pi \cdot \frac{16,625^2}{4}} \approx 34,2 \text{ [MPa]}$$

kde:

$\tau_{DS} = 60$ [MPa]...je dovolené napětí ve smyku,

τ_{SS} [MPa]...skutečné smykové napětí pro jeden šroub,

F_x [N]...celková síla působící na horní patro ve směru osy x,

F_{x1} [N]...síla působící ve směru pohybu vozidla (osa x viz. obrázek Obrázek 16 Souřadnicový systém skříně vozidla),

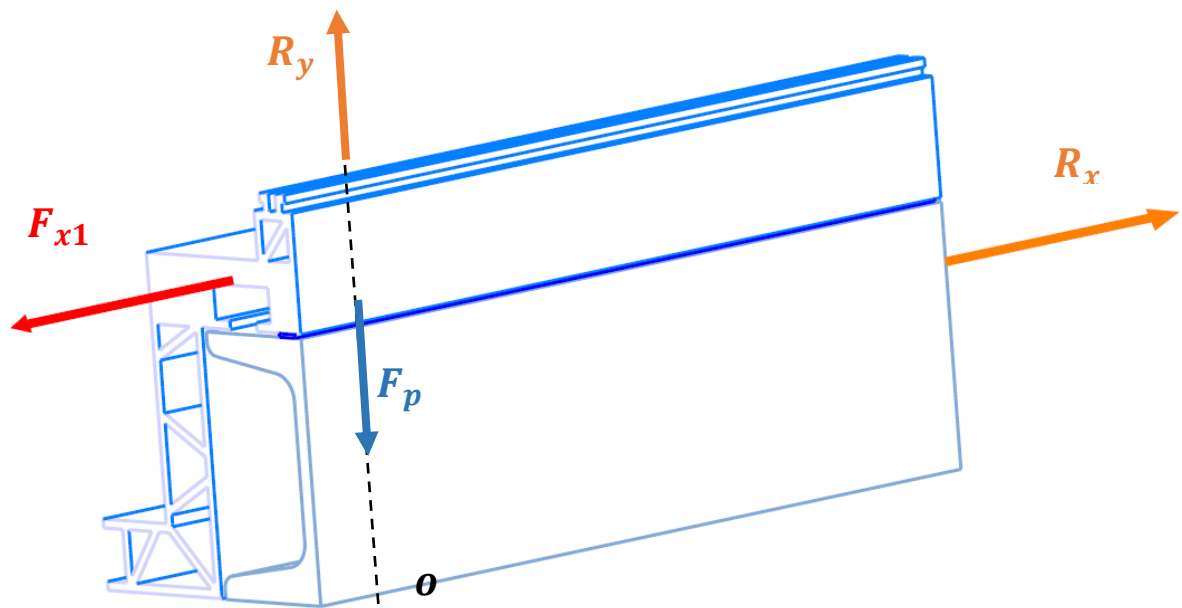
d_{min} [mm]...průměr dříku šroubu M20 [16,625; (ČSN ISO 965-2 general purpose metric screw threads, 1998)],

A_{min} [mm²]...plocha průřezu dříku šroubu,

n_{ξ} [-]...počet šroubů,

m_h [kg]...hmotnost horního hliníkové patra,

g [$m \cdot s^{-2}$]...tíhové zrychlení.



Obrázek 31 - Schéma zatížení šroubu (Catia V5)

Skutečné (vypočtené) napětí je menší, než dovolené. Spoj tedy vyhovuje.

Dále je potřeba ověřit otláčení v hliníkové drážce od předepnutí šroubu. Schéma zatížení viz. Obrázek 31 - Schéma zatížení šroubu $136,4 [MPa] = \sigma_{d,dov} \geq \frac{F_p}{A_d} = \frac{F_p}{(e-v) \cdot l} = \frac{166\,000}{(40-21) \cdot 65} \approx 134,4 [MPa]$

kde:

$$\sigma_{Ddov} = \frac{R_{p0,2}}{s_e} = \frac{150}{1,1} = 136,4 [MPa] \dots \text{je dovolené napětí hliníkové T drážky,}$$

$R_{p0,2h} = 160 [MPa]$...mez kluzu v tahu pro EN AW 6060 T6,

s_e ...koeficient bezpečnosti vůči mezi kluzu,

F_p ...předepnávací síla šroubu (DIN 25201-2:2015-12, 2015),

A_d ...Plocha namáhaná na otláčení v T drážce,

e ...šířka C matice,

v ...šířka otvoru pro šroub,

l ...délka C matice.

Spoj vyhovuje na otláčení hliníkové drážky.

Dále je potřeba rovněž ověřit otláčení šroubového spoje v závitech. Tlak v závitech není potřeba počítat, protože jsou použity normalizované matice ze stejného materiálu, z kterého je i tyč se závitem. Výpočet je uveden níže.

$$p_{dov} \geq p_o = \frac{F_{x1}}{S_d} = \frac{\frac{F_x}{n_s}}{t_{min} \cdot d_d} = \frac{\frac{3 \cdot g \cdot m_h}{n_s}}{t_{min} \cdot d_d} = \frac{\frac{3 \cdot 9.83 \cdot 6300}{25}}{15,4 \cdot 20} \approx 24,1 \text{ [MPa]}$$

kde:

p_{dov} [MPa]...je dovolený tlak v otláčení,

p_o [MPa]...vypočítaný tlak na otláčení,

S_d [mm²]...průřezová plocha namáhaná na otláčení,

F_{x1} [N]...síla kolmá na osu šroubu, která působí na jeden šroub,

F_x [N]...síla kolmá na osu šroubu, která působí na jeden šroub,

n_s [-]...počet šroubů,

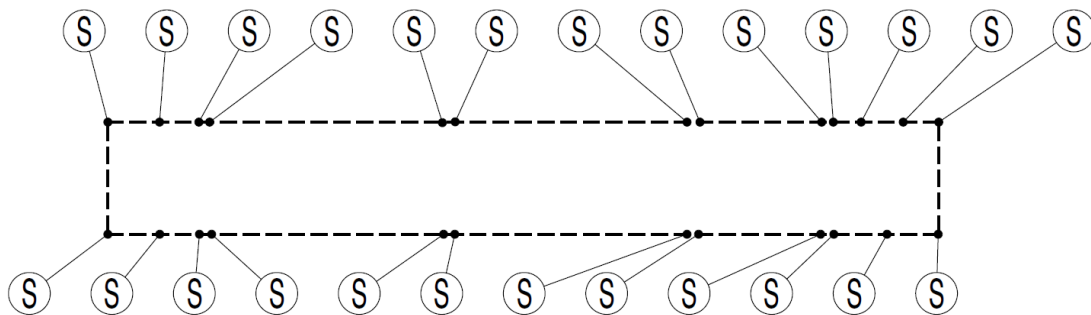
t_{min} [mm]...minimální tloušťka materiálu ve šroubovém spoji,

d_d [mm]...průměr dřívku,

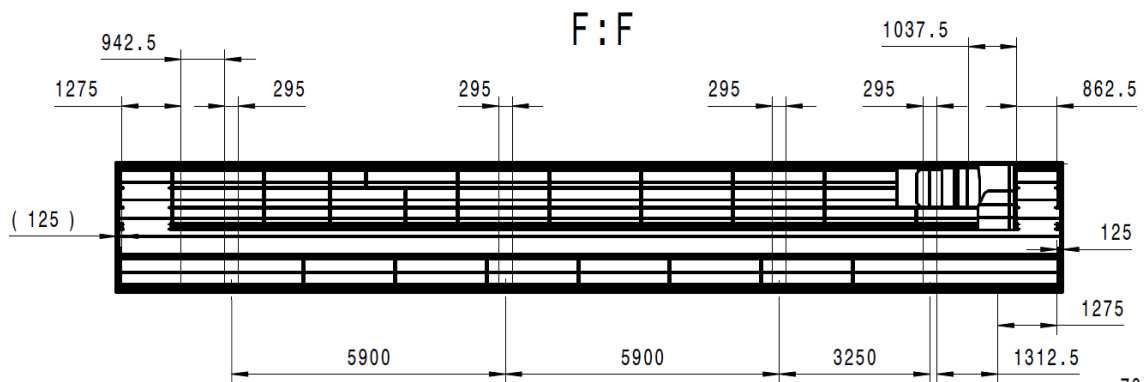
g [kg · m · s⁻²]...tíhové zrychlení,

m_h [kg]...hmotnost hliníkového patra.

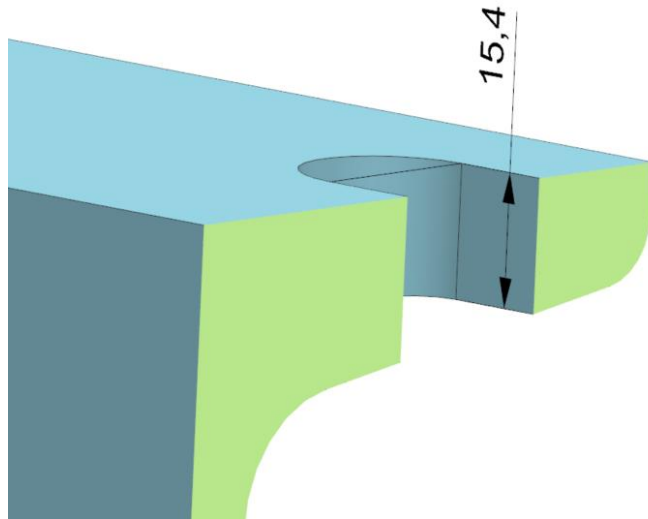
Schema rozlozeni sroubovych spoju M20



Obrázek 32 - Schéma rozložení šroubů M20 (Catia V5)



Obrázek 33 - Kóty k obrázku Obrázek 32 - Schéma rozložení šroubů M20 (Catia V5)



Obrázek 34 - Minimální tloušťka namáhaná na otláčení (Siemens NX 12)

Při návrhu bylo zapotřebí vyřešit problém v rozdílných teplotních roztažnostech hliníkové slitiny a oceli. U dlouhých konstrukcí je tento vliv značný, při uvažování počáteční střední teploty z hodnot $t_1 = -50^\circ\text{C}$ a $t_2 = 80^\circ\text{C}$ ($t_s = 15^\circ\text{C}$). Níže je uveden výpočet rozdílu prodloužení.

$$\begin{aligned}\Delta l_k &= \Delta l_h - \Delta l_o = \alpha_h \cdot l_{h0} \cdot \Delta t - \alpha_o \cdot l_{o0} \cdot \Delta t = (\alpha_h - \alpha_o) \cdot l_0 \cdot (t_2 - t_s) \\ &= (2,4 \cdot 10^{-5} - 1,2 \cdot 10^{-5}) \cdot 20,4 \cdot (80 - 15) \approx 16 \cdot 10^{-3} [\text{m}] \Rightarrow \Delta l_k \\ &= 16 [\text{mm}]\end{aligned}$$

kde:

$\Delta l_k [\text{m}]$...je rozdíl prodloužení mezi hliníkovou stavbou a ocelovou,

$l_{h0} \equiv l_{o0} \equiv l_0 [\text{m}]$...délka prodlužovaného úseku hliníkové části \equiv délka prodlužovaného úseku ocelové části \equiv délka prodloužení vlaku,

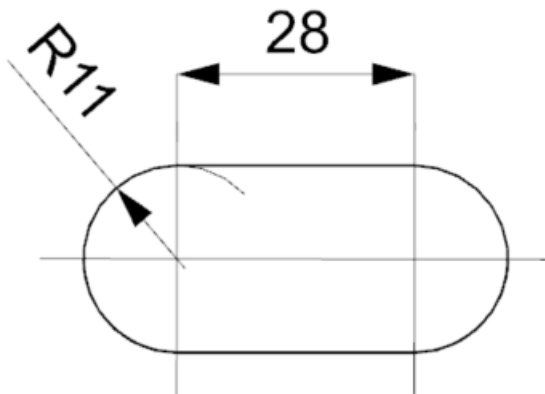
$\alpha_h [\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$...součinitel teplotní délkové roztažnosti hliníku a jeho slitin,

$\alpha_o [\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$... součinitel teplotní délkové roztažnosti oceli,

$t_2 [^\circ\text{C}]$...nejvyšší provozní teplota,

$t_s [^\circ\text{C}]$...střední provozní teplota.

Z důvodu tolerancí drážek a snadné montáže je zvolen otvor o rozměrech viz obrázek
Obrázek 35 - Drážka pro M20 šrouby.



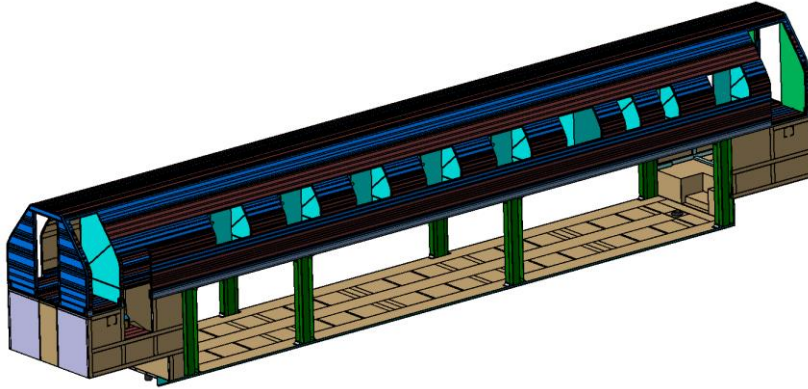
Obrázek 35 - Drážka pro M20 šrouby

Při odchylce provozní teploty od teploty montáže se do konstrukce vnese přídavné namáhání, protože posun ve šroubových spojích pod zatížením by nejspíš znamenal skřípání a na koncích hliníkového tubusu by musely být pružné elementy. Prostřední šroubový spoj by posun neumožňoval, ostatní pak ano. Toto zatížení nebylo zohledněno a bude zpracováno v další práci.

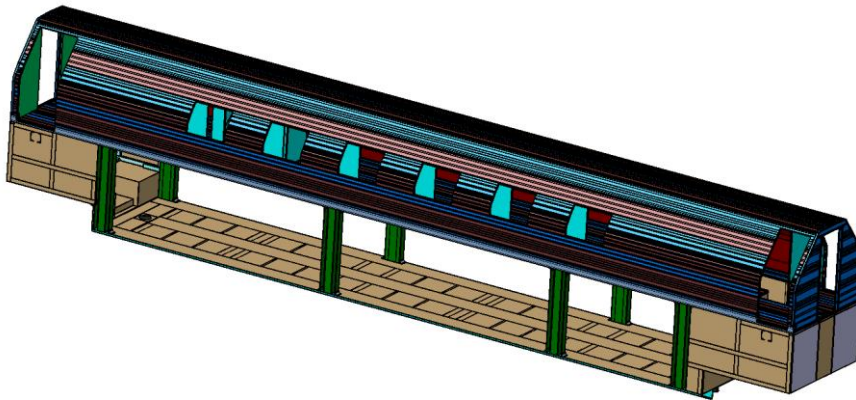
Ověření šroubových spojů druhého patra bude provedeno rovněž v navazující práci.

6.3 Obrázky z 3D dat

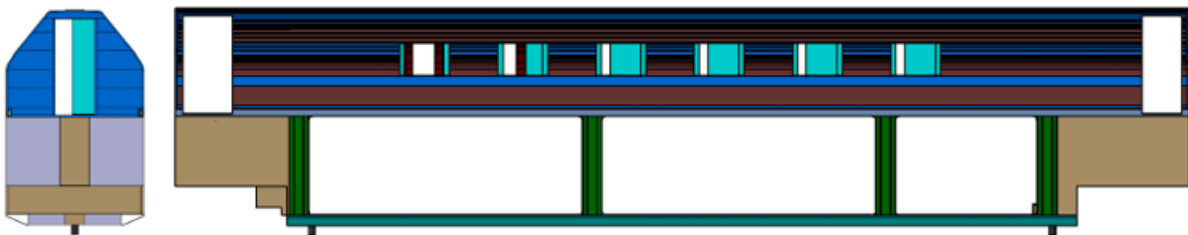
Níže jsou vybrané obrázky z modelu v (Catia V5).



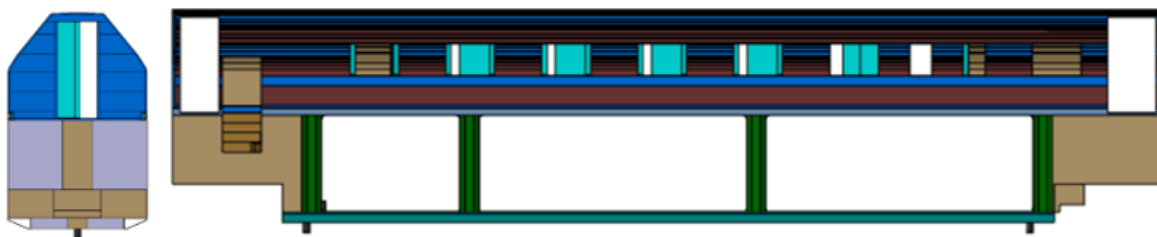
Obrázek 36 - ISO 1 pohled na skříň kolejového vozu (Catia V5)



Obrázek 37 - ISO 2 pohled na skříň vozu (Catia V5)



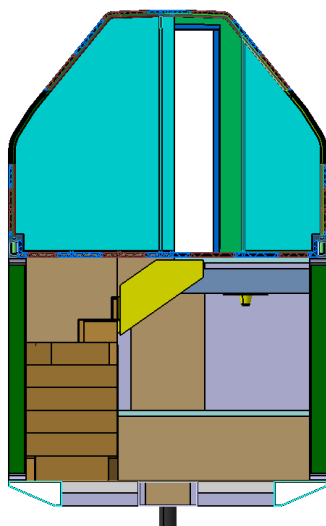
Obrázek 38 - Pohled zepředu a vlevo (Catia V5)



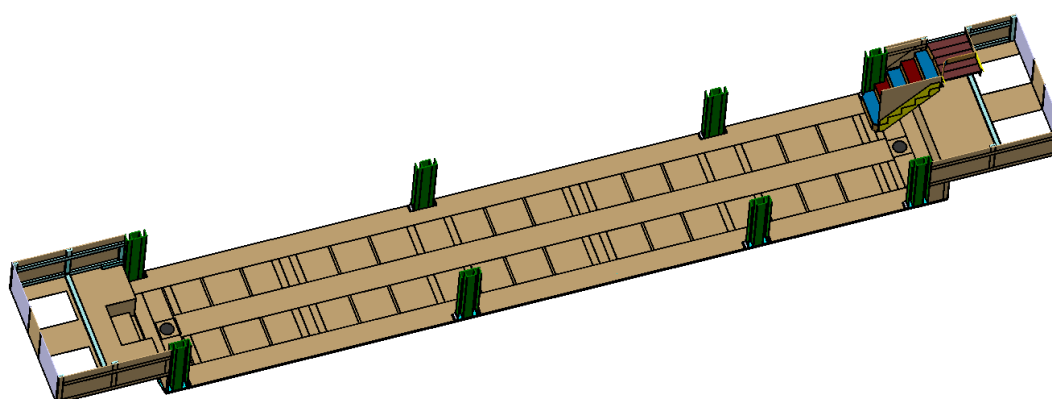
Obrázek 39 - Pohled zezadu a vpravo (Catia V5)



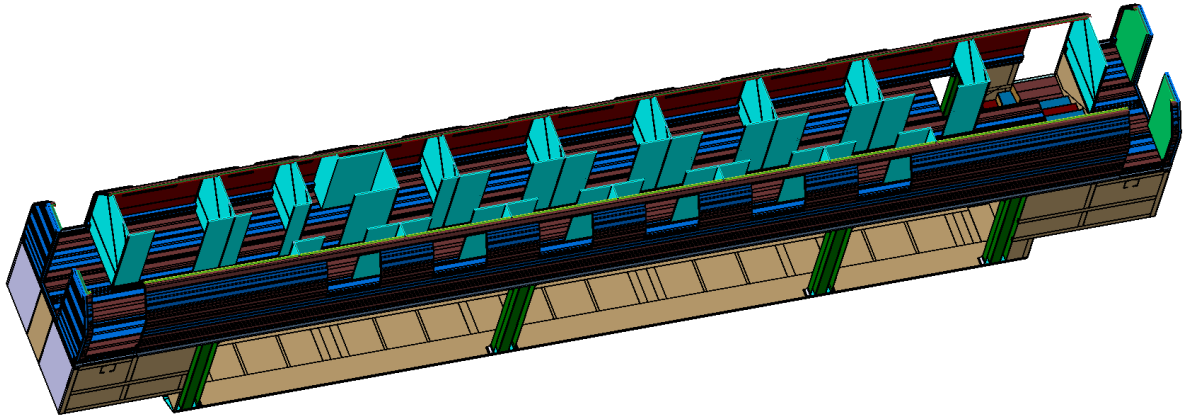
Obrázek 40 - Pohled zespu (Catia V5)



Obrázek 41 - Řez skříní vozu v ose x (Catia V5)



Obrázek 42 - ISO pohled v řezu, spodní patro (Catia V5)



Obrázek 43 - ISO pohled v řezu, horní patro (Catia V5)

Výpočtová hmotnost současného provedení hrubé stavby skříně u varianty výpočtu A dle obrázku Obrázek 48 je 13 081,8 [kg] a u varianty B dle obrázku Obrázek 47 je 14 309,4 [kg]. Pro výpočet hmotnosti bylo použito hodnot hustoty pro ocel $\rho_o = 7\,850 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ a pro sloučeniny hliníku hodnota $\rho_h = 2\,700 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$. V následné kapitole bude ověřena pevnost vytvořeného modelu.

7 Kontrolní výpočet pomocí metody konečných prvků

Pro ověření konstrukce byl využit program (Simcenter Nastran). Pomocí lineární statické analýzy a vybraných stavů zatížení.




Statická analýza hrubé stavby kolejového vozidla ComplexTrans představuje důležitý krok při posuzování jeho pevnosti a spolehlivosti za běžných provozních podmínek. Tato analýza se zaměřuje na statické zatížení vozidla a jeho odezvu na vnější zatížení včetně vlastní hmotnosti.

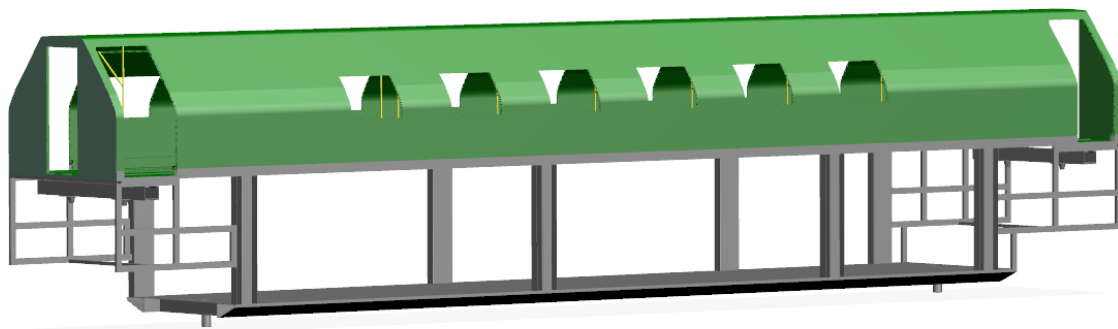
V rámci statické analýzy jsou prováděny výpočty, které zahrnují vlastnosti materiálů použitých ve stavbě, jako je modul pružnosti a pevnost. Tyto materiálové parametry jsou pak použity k modelování chování jednotlivých komponent vozidla. Následně jsou na základě předpokládaného zatížení provedeny výpočty deformací a napětí v konstrukci.

Cílem statické analýzy je získat informace o deformacích, napětích a odchylkách v konstrukci vozidla.

Současná hmotnost hrubé stavby(VARIANTA A) je 14,3 tuny, což je přijatelná hodnota, avšak je zapotřebí ověřit její funkčnost (odolávat zatížením)

Na obrázku Obrázek 44 - Popis materiálů pro FEM analýzu jsou barevně odlišené základní materiály hrubé stavby.

-  Ocelové díly S355NC - $R_e = 355 [MPa]$ (S355NC (1.0977), 2011-2023)
-  Díly ze slitiny hliníku EN AW 6060 T6 $R_e = 150 [MPa]$ (EN AW-6060 | Data Sheet, 2020)
-  Profily horního patra z oceli S355NC $R_e = 355 [MPa]$ (S355NC (1.0977), 2011-2023)



Obrázek 44 - Popis materiálů pro FEM analýzu (Siemens NX 12)

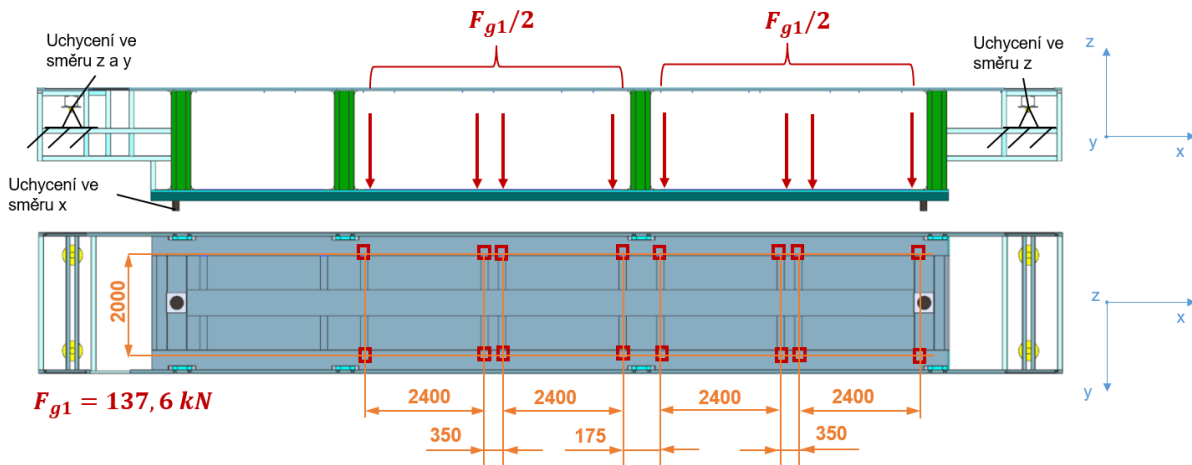
7.1 FEM analýza dvou variant

7.1.1 Zatížení od vlastní hmotnosti + užité zatížení

Na obrázku Obrázek 45 - Schéma zatížení ve směru osy z spodního patra názorně zobrazeno schéma zatížení spodního patra od přepravovaných nákladních vozidel. Zatížení je aplikováno na plochy v místě kol (malé čtverečky o délce strany 100mm) rovnoměrně, je uvažována i vlastní hmotnost všech dílů.

Dále je zde patrné podepření skříňe ve směru osy z v místech spojení s podvozky, kde bude skříň připojena pomocí vzduchových pružin. Uchycení ve směru osy x je realizováno pomocí jednoho z čepů, druhý je uvolněn z důvodu logiky výpočtu v tomto programu.

Velikost zatížení od přepravovaných vozidel je určeno z maximální možné hmotnosti vozidla, které mohou řídit osoby s řidičským průkazem skupiny B, tj. 3,5 t. Na vyhrazená místa se umístí v počtu 4 kusů, tedy celkové zatížení prvního patra činí 14 t, neboli $F_{g1} = m_{kupémobil} \cdot g = 14 \cdot 9.83 = 137,6 \text{ [kN]}$.



Obrázek 45 - Schéma zatížení ve směru osy z spodního patra (Siemens NX 12)

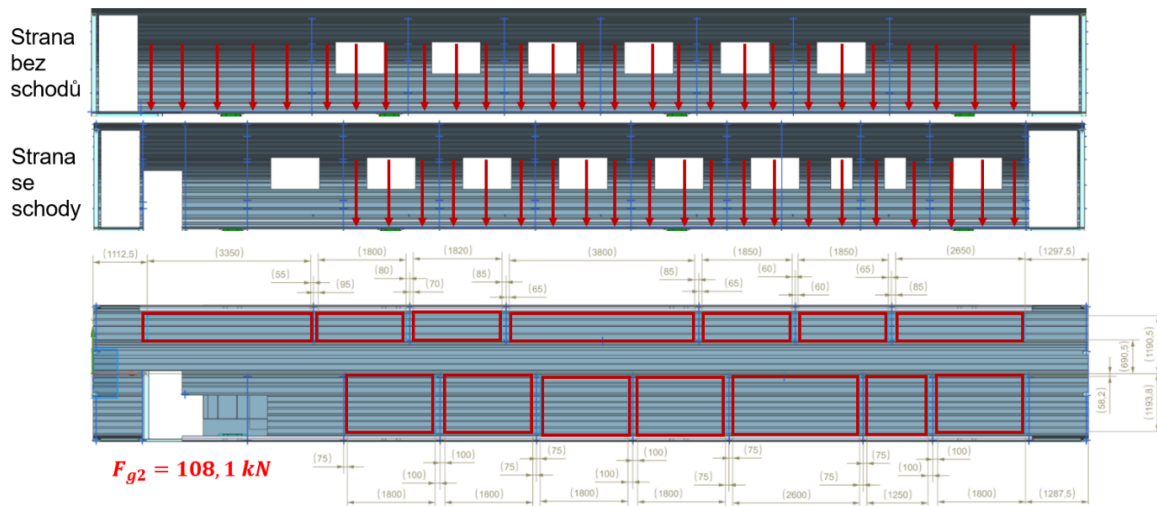
Na obrázku Obrázek 45 - Schéma zatížení ve směru osy z spodního patra je zachyceno schéma zatížení horního patra od cestujících včetně zavazadel. Zatížení je aplikováno na plochy rovnoměrně, je uvažována i vlastní hmotnost všech dílů. Horní patro je k spodnímu patru připevněno pomocí 25 šroubů M20 viz kapitola „Spojení základních částí skříňe“.

Zatěžovací síla je určena zatížením od cestujících v horním patře. Jejich počet je plánován na 45 osob, hmotnost osob včetně zavazadel je definována hodnotou 0,1 t. (v normě ČSN EN 12 663-1 je zatížení jednoho cestujícího včetně zavazadla 70 kg viz. tabulka Tabulka 10 - Užitečná zatížení)

Zatížení od výbavy (sedadel, přepážek, dveří, oken, vzduchotechniky, kabeláže, izolace atd.) je odhadnuto na 4,5t.

Dále bude skříň zatížena od výbavy strojoven o hmotnosti rovněž 2 t. Pro zjednodušení výpočtu toto zatížení rovněž rozprostřeme plošně stejně jako výbavu a zatížení od cestujících.

$$F_{g2} = (m_{vybavení} + m_{strojoven} + 45 \cdot m_{cestující+zavazadlo}) \cdot g = (4,5 + 2 + 45 \cdot 0,1) \cdot 9.83 \approx 108,1 \text{ [kN]}$$

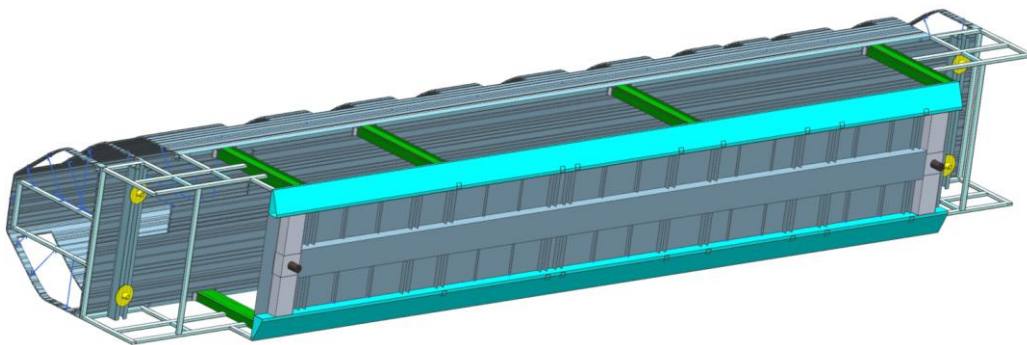


Obrázek 46 - Schéma zatížení horního patra (Siemens NX 12)

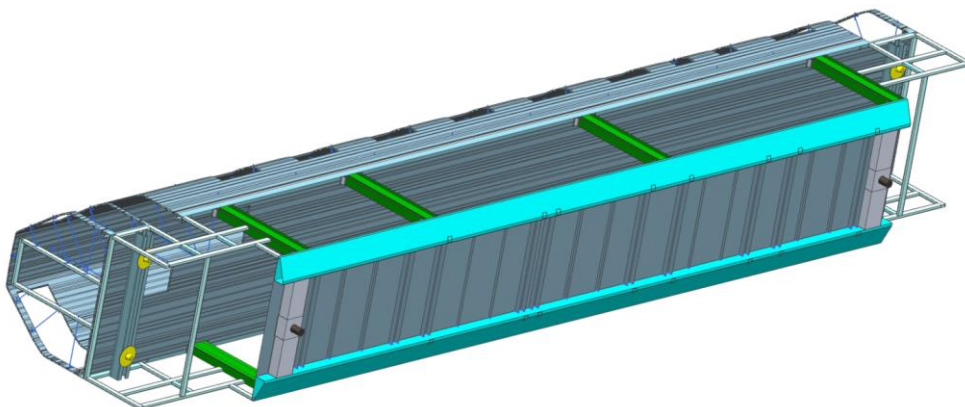
Výpočty byly provedeny na dvou variantách hrubé stavby.

Při jednom byl v podlaze prvního patra zabudován uzavřený nosník VARIANTA A - viz Obrázek 47,

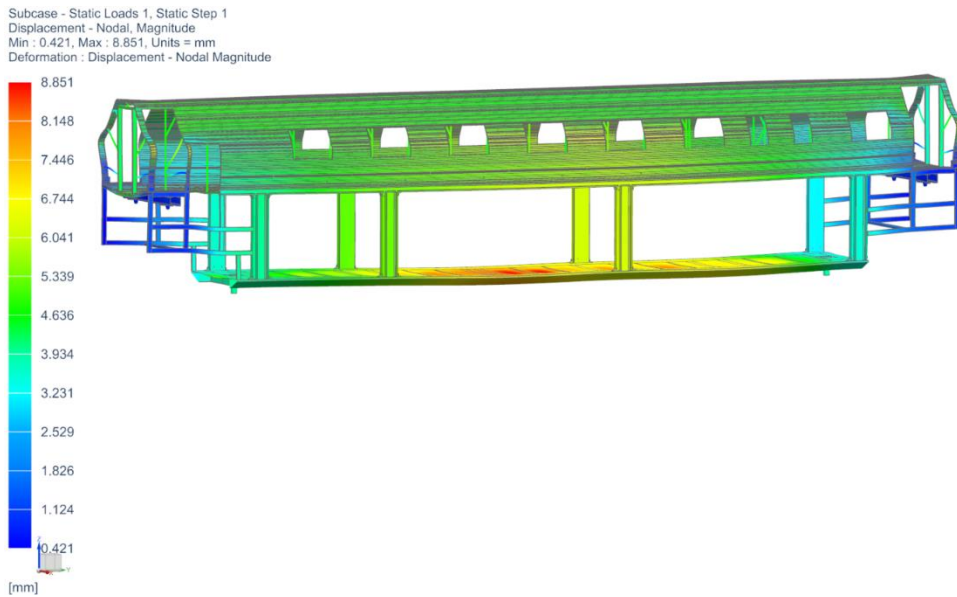
při druhém nebyl nosník implementován uvažován VARIANTA B - viz Obrázek 48.



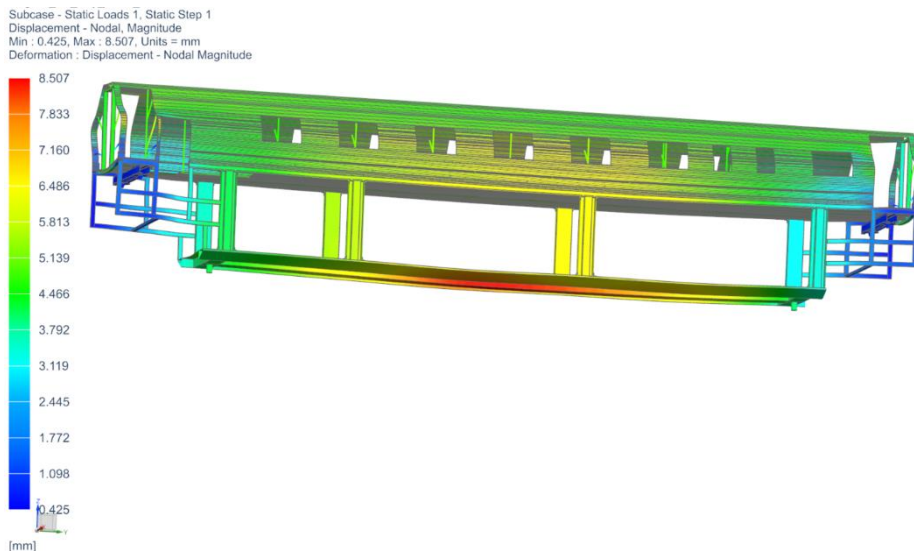
Obrázek 47 – Varianta A výpočtový model s uzavřeným nosníkem v podlaze (Siemens NX 12)



Obrázek 48 – Varianta B výpočtový model bez uzavřeného nosníku v podlaze (Siemens NX 12)

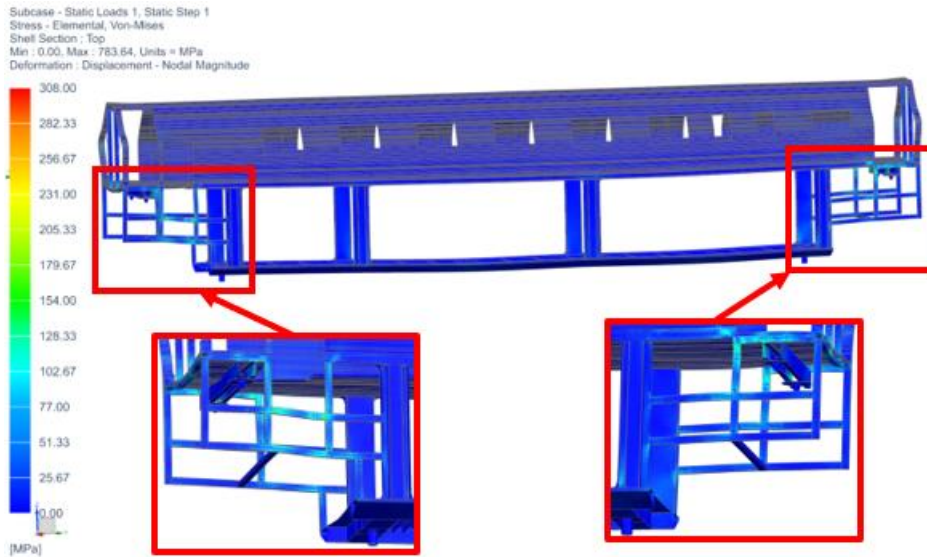


Obrázek 49 – VARIANTA B - Posunutí při zatížení užitečným zatížením bez uzavřeného nosníku (Simcenter Nastran)

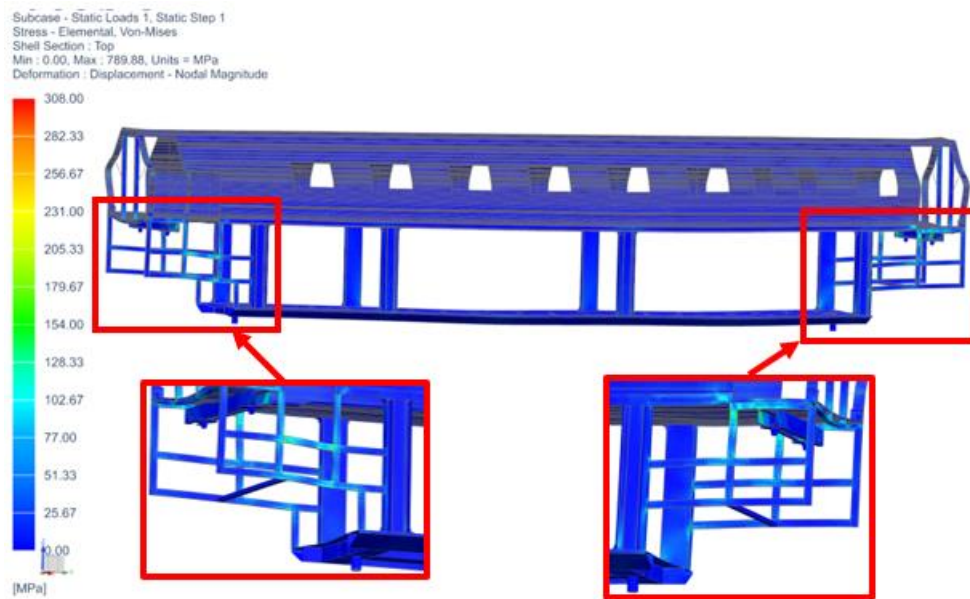


Obrázek 50 – VARIANTA A - Posunutí při zatížení užitečným zatížením s uzavřeným nosníkem (Simcenter Nastran)

Na obrázcích Obrázek 49 – VARIANTA B - Posunutí při zatížení užitečným zatížením bez uzavřeného nosníku a Obrázek 50 jsou výsledky celkových posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení dle obrázků Obrázek 45 - Schéma zatížení ve směru osy z spodního patra a Obrázek 46 - Schéma zatížení horního patra . Posunutí jsou na obrázcích v měřítku 1:30. Dále bude pro posunutí použito pouze dané měřítko. Z obrázků je patrný pouze malý rozdíl v hodnotě největšího posunutí, v tomto smyslu uzavřený nosník v podlaže prvního patra nemá významný vliv na tuhost, při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení.

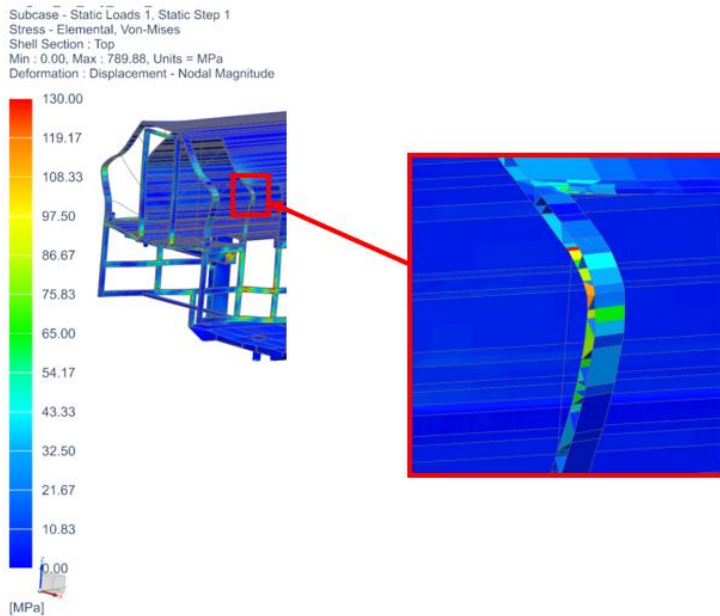


Obrázek 51 - VARIANTA B - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečným zatížení varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran)

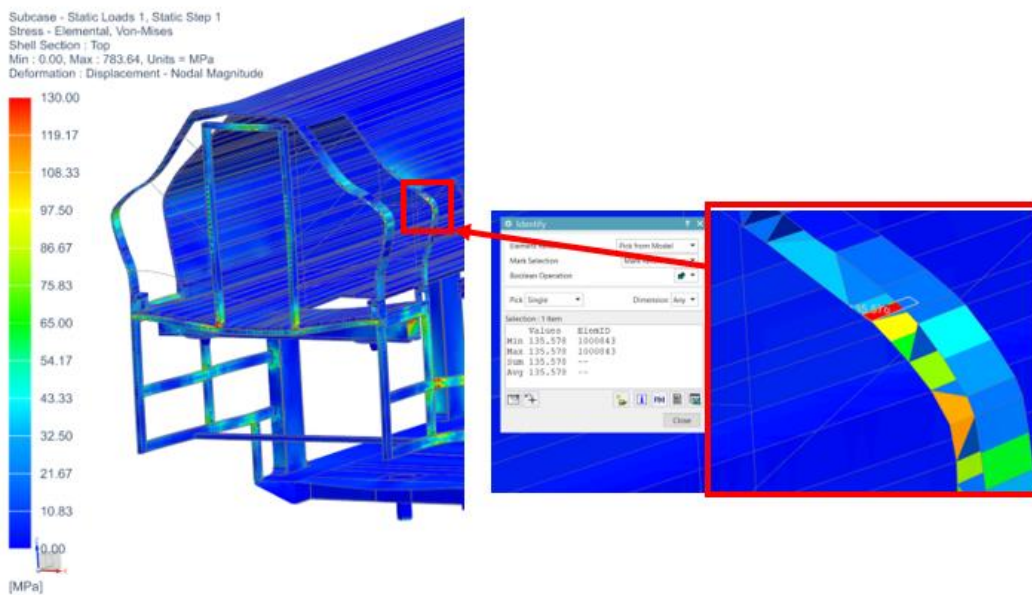


Obrázek 52 - VARIANTA A - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečným zatížení varianta s nosníkem v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran)

Při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení (Obrázek 51 a Obrázek 52) nejsou překročeny hodnoty dovoleného napětí v ocelovém materiálu.

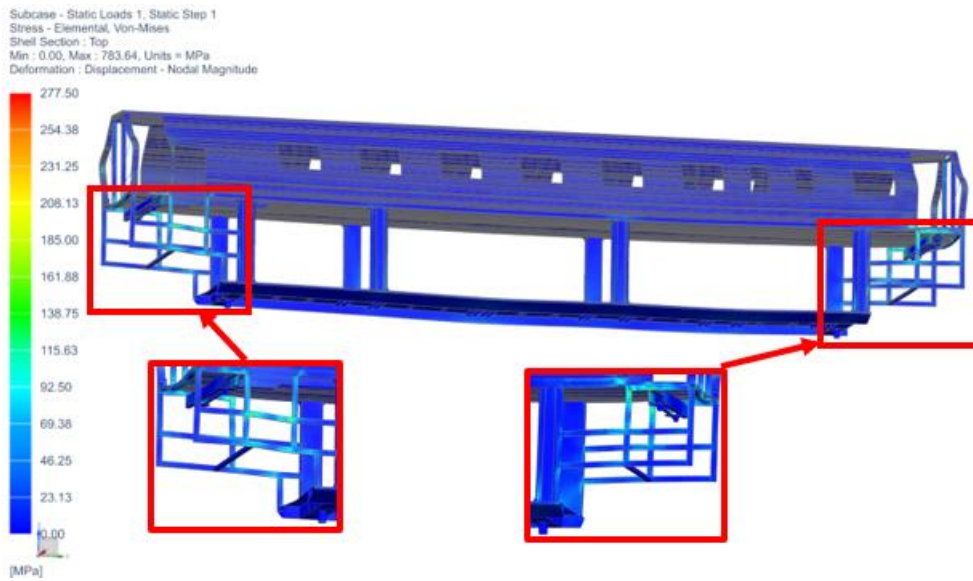


Obrázek 53 - VARIANTA B - Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran)

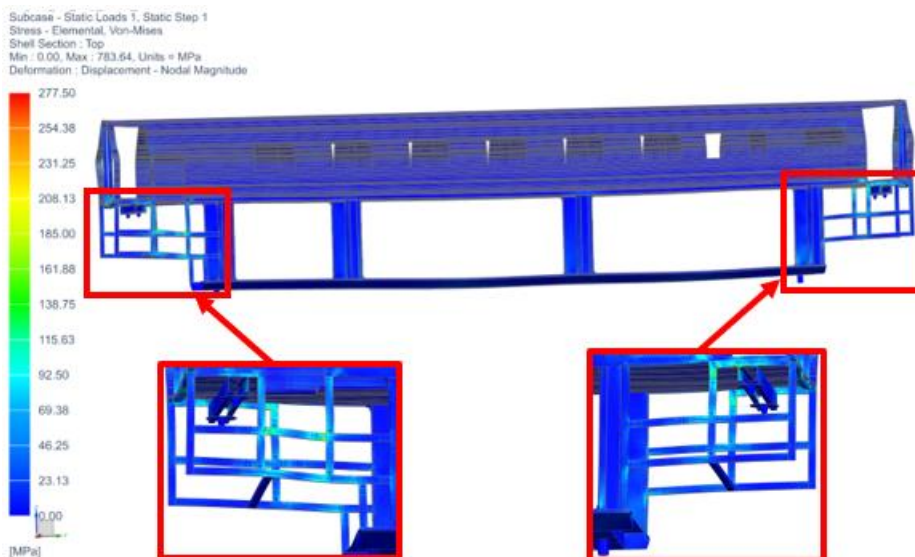


Obrázek 54 - VARIANTA A - Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení varianta s nosníkem v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran)

Rozdíly hodnot napětí mezi oběma variantami (Obrázek 53 a Obrázek 54) jsou zanedbatelné. Hodnoty napětí významně překračují přípustné hodnoty. Bude zapotřebí změnit design hliníkové stavby v místech okenních otvorů viz.“ Vyhodnocení výsledků a návrh úprav“.

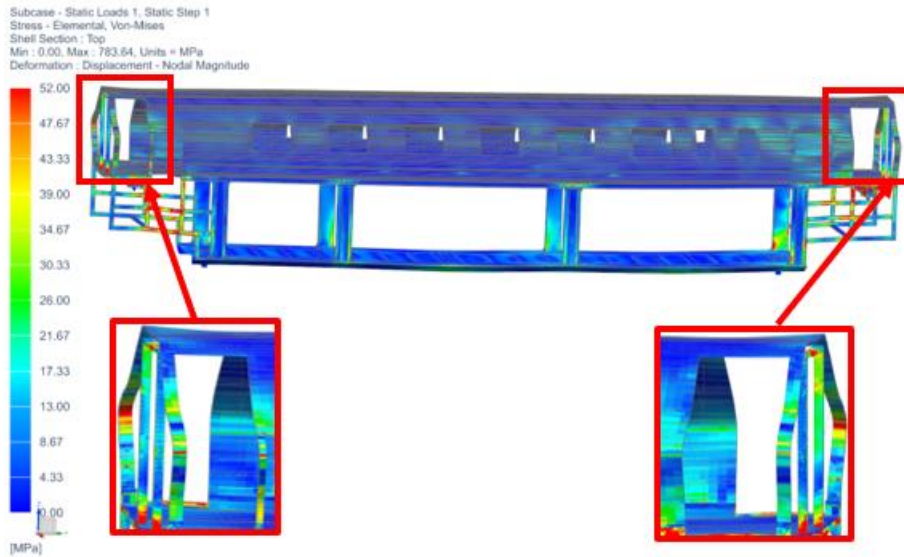


Obrázek 55 - VARIANTA B - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečným zatížením varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

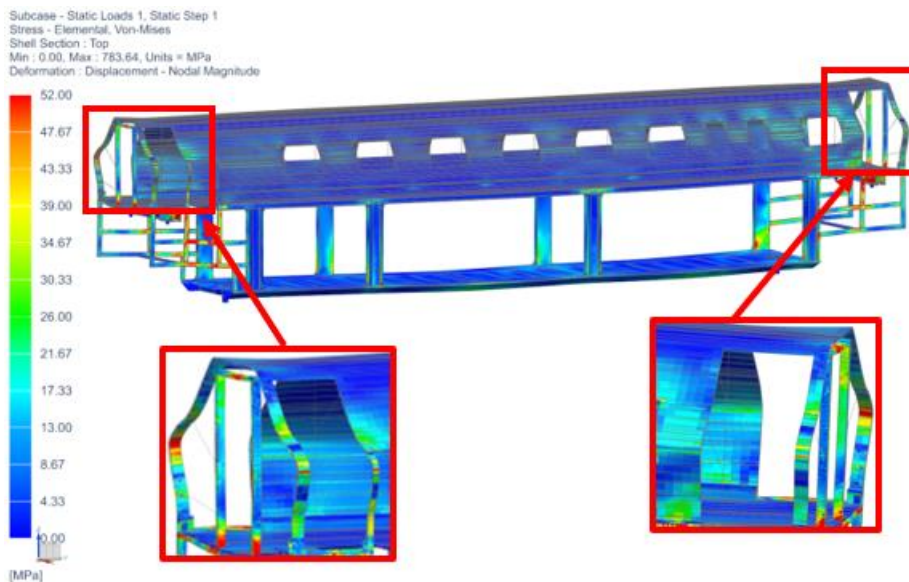


Obrázek 56 - VARIANTA A - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečným zatížením varianta s nosníkem v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

Ve svarech ocelových dílů nejsou překročeny hodnoty dovoleného napětí.



Obrázek 57 - VARIANTA B - Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

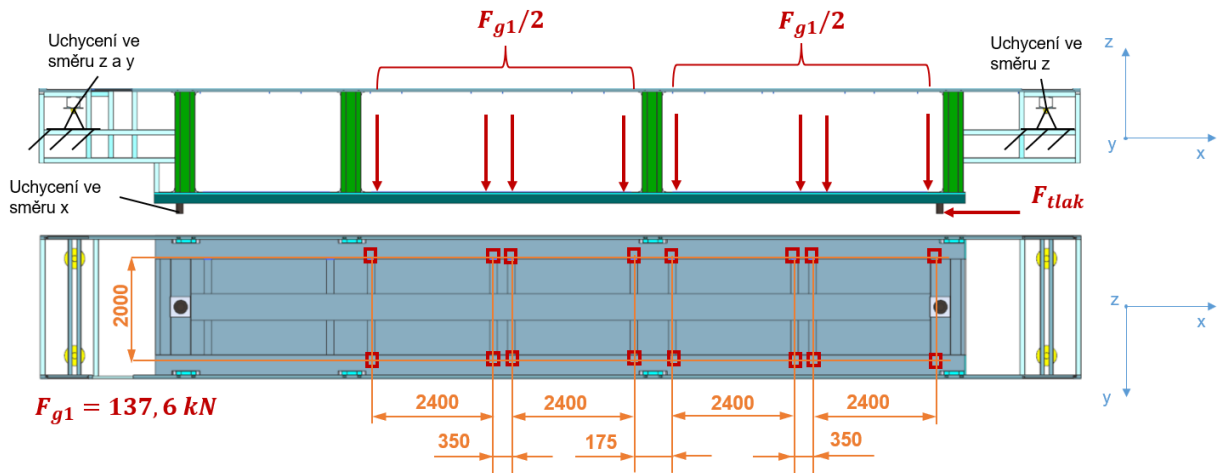


Obrázek 58 - VARIANTA A - Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitečného zatížení varianta s nosníkem v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

Napětí ve svarech hliníkové integrální stavby nepřekračuje dovolené hodnoty.

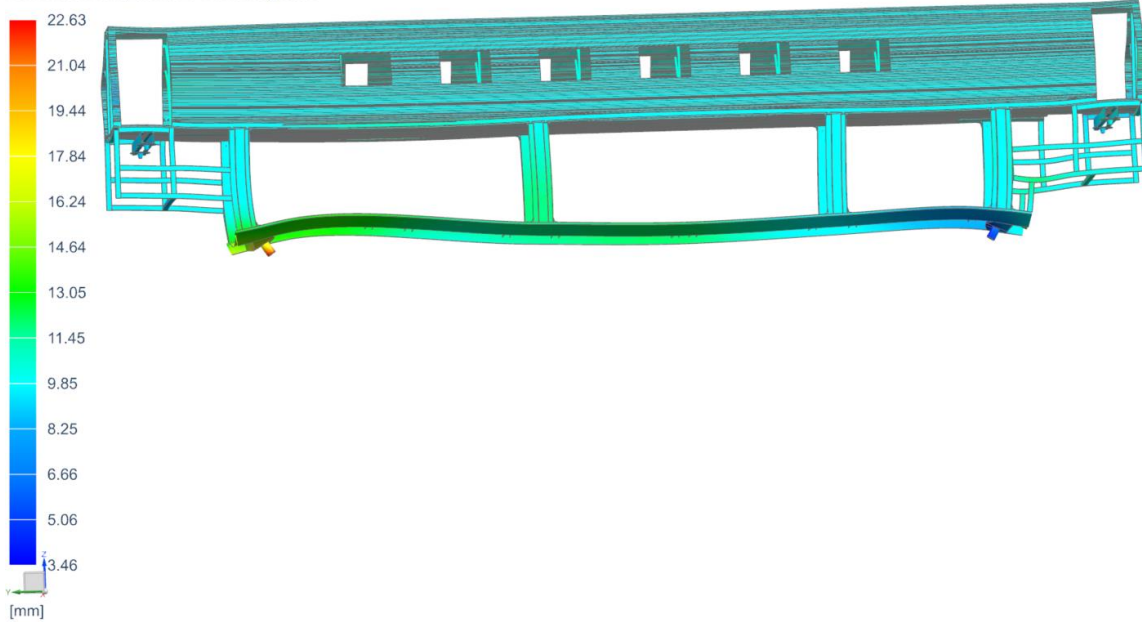
7.1.2 Zatížení od vlastní hmotnosti + užitečné zatížení + tlaková síla 1500 kN

Zatížení horního patra zůstává stejné jako v předchozích výpočtech, schéma zatížení viz. obrázek Obrázek 46 - Schéma zatížení horního patra . U zatížení spodního patra dochází k přidání zatížení od tlakové síly viz. obrázek Obrázek 59 - Schéma zatížení prvního patra včetně tlakové síly 1500 kN. Jedná se tedy o kombinaci zatížení vlivem vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a tlakové síly 1500 kN.



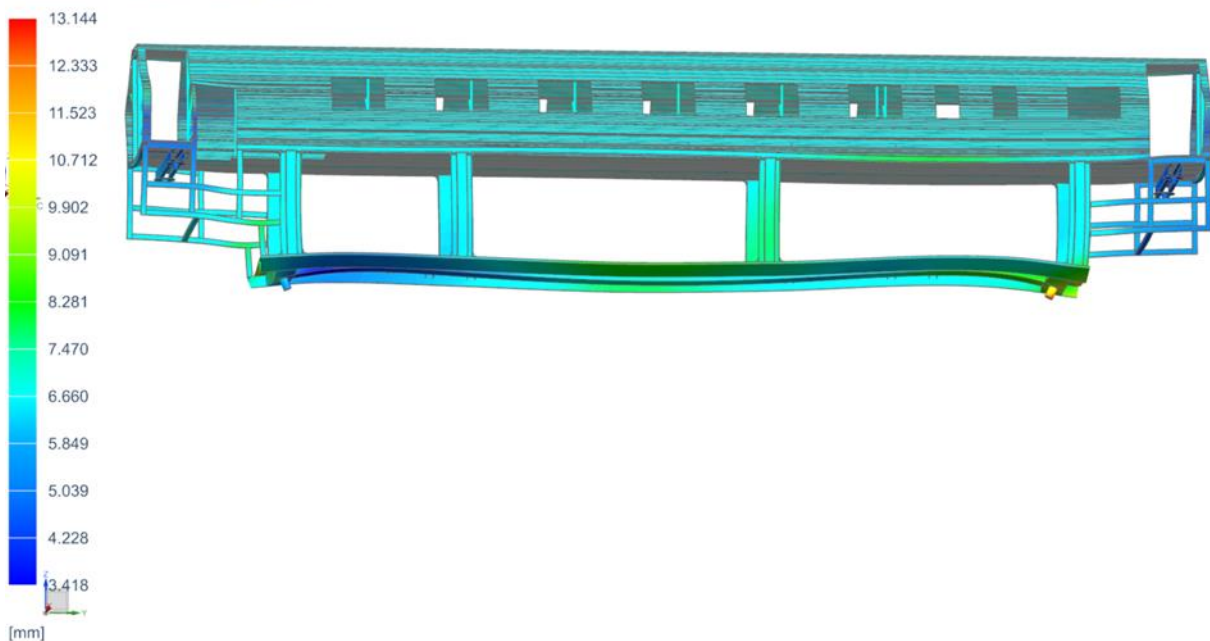
Obrázek 59 - Schéma zatížení prvního patra včetně tlakové síly 1500 kN (Siemens NX 12)

Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Magnitude
Min : 3.46, Max : 22.63, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



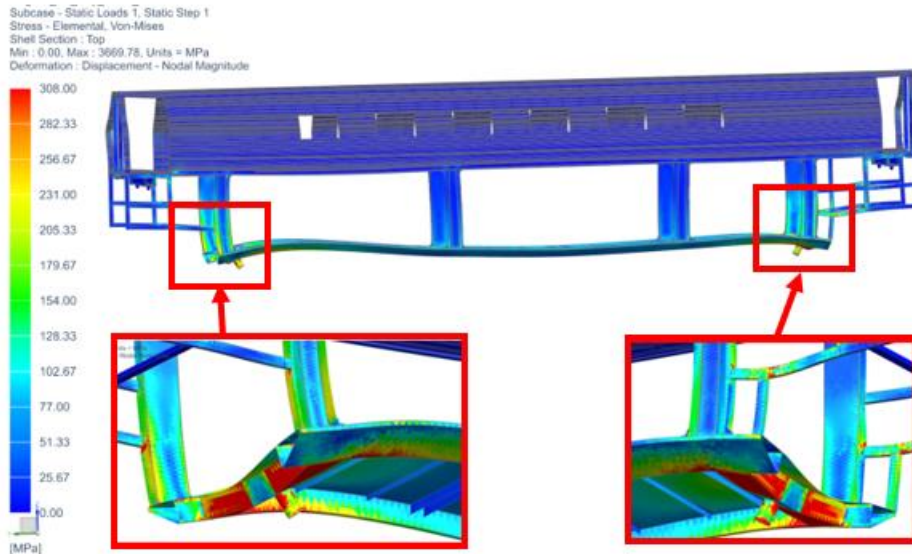
Obrázek 60 - VARIANTA B – Posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (Simcenter Nastran)

Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Magnitude
Min : 3.418, Max : 13.144, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

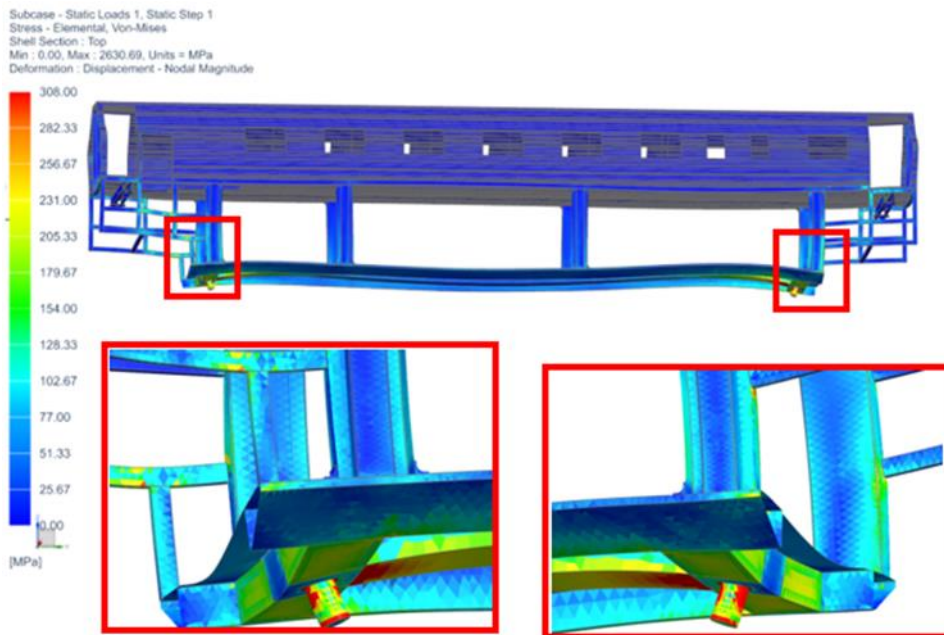


Obrázek 61 - VARIANTA A – Posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (Simcenter Nastran)

Z obrázků Obrázek 60 a Obrázek 61 je patrný značný rozdíl v hodnotách posunutí kde na obrázku Obrázek 61 - VARIANTA A – Posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze je maximální hodnota 13,1 mm, což je téměř o 40 % nižší hodnota, než u varianty A na obrázku Obrázek 60.

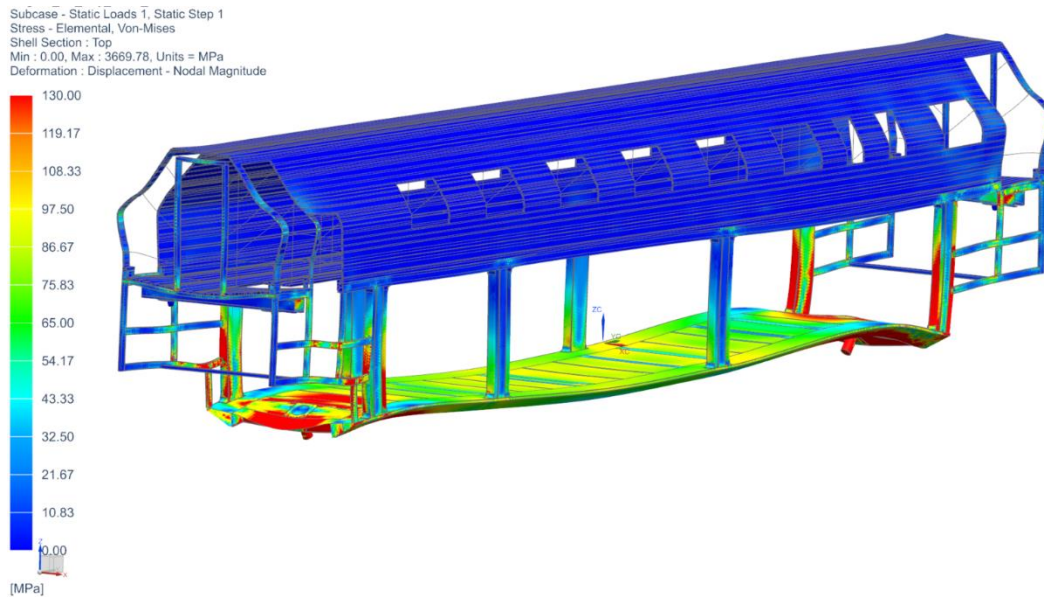


Obrázek 62 – VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran)

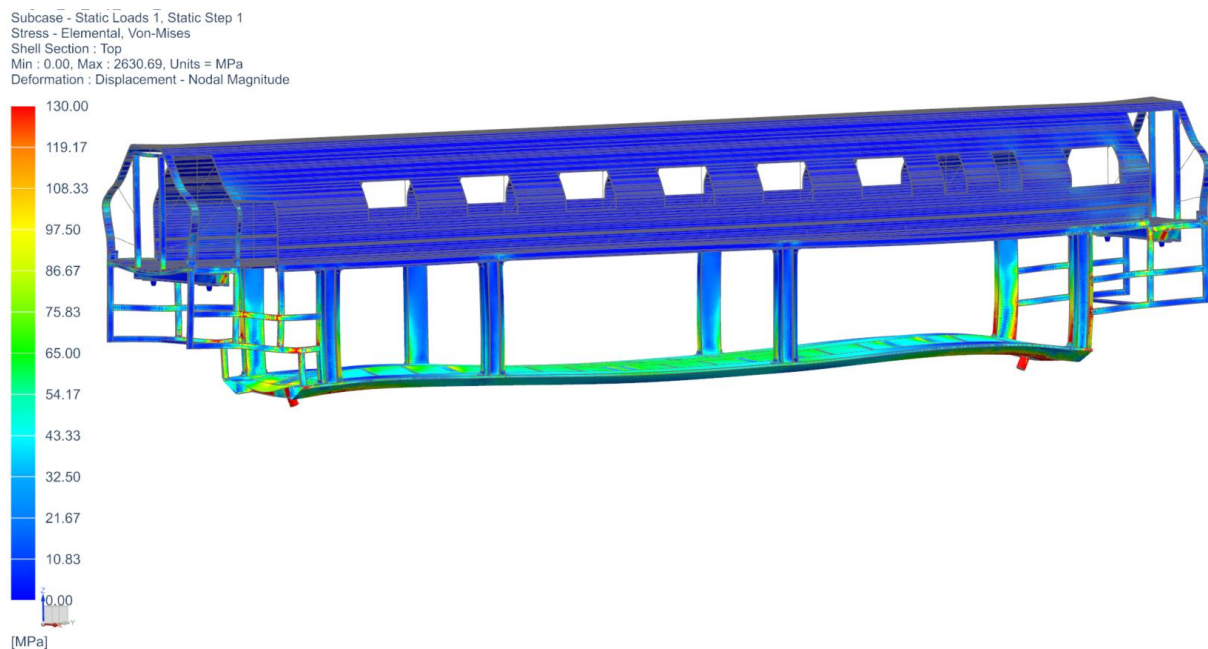


Obrázek 63 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran)

Z obrázků je patrný rozdíl v napětí v místě uložení čepů. Obrázek Obrázek 62 – VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) zvýrazňuje červenou barvou překročení dovolených hodnot napětí. Oproti tomu na obrázku Obrázek 63 je vidět méně kritických míst.

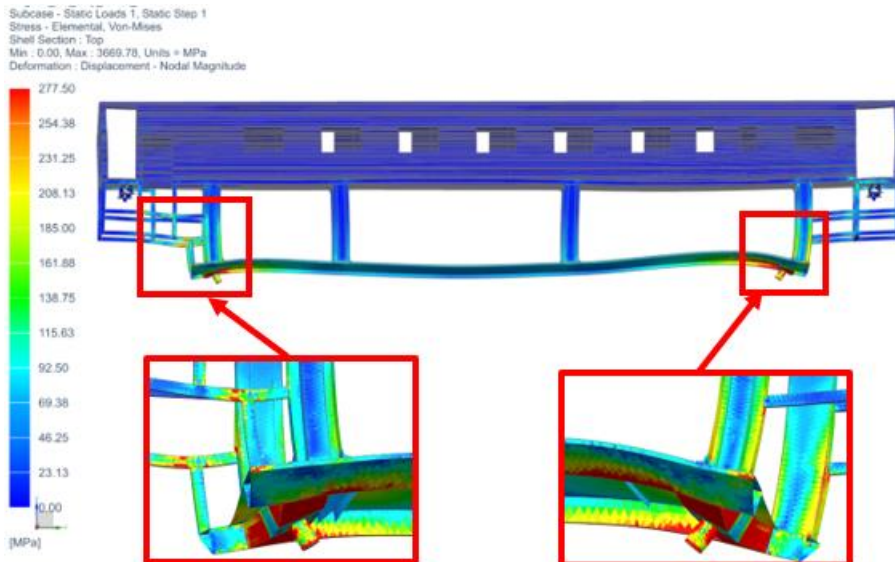


Obrázek 64 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran)

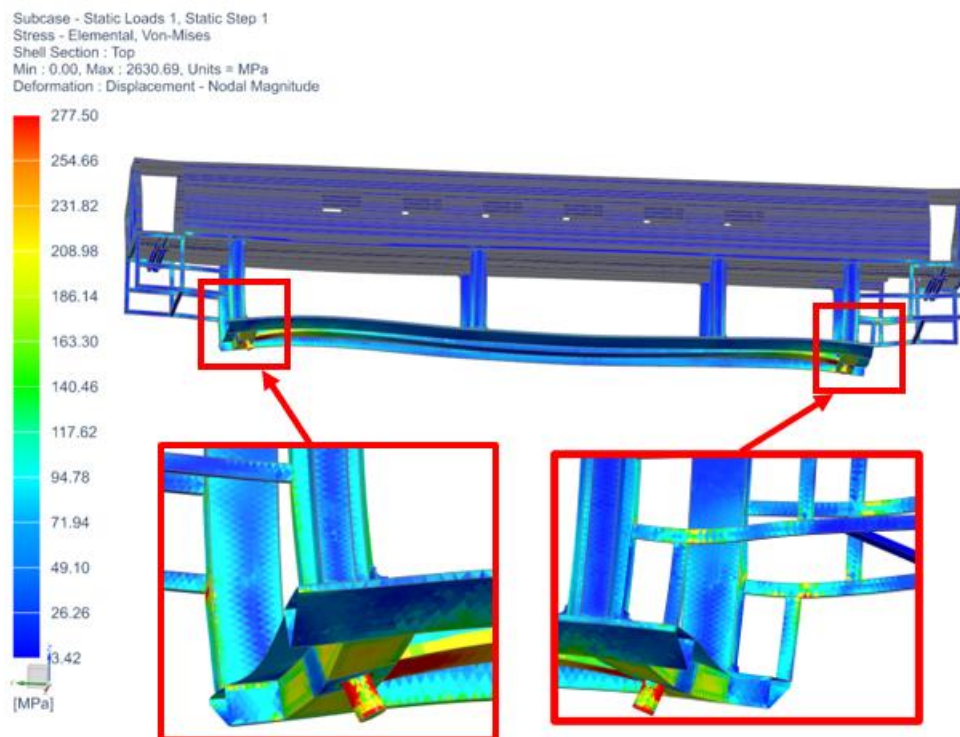


Obrázek 65 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran)

Vliv uzavřeného nosníku v podlaze na horní patro je zanedbatelný jak je patrné z obrázků Obrázek 64 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) a Obrázek 65 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části). Hodnoty dovoleného napětí nejsou překročeny.

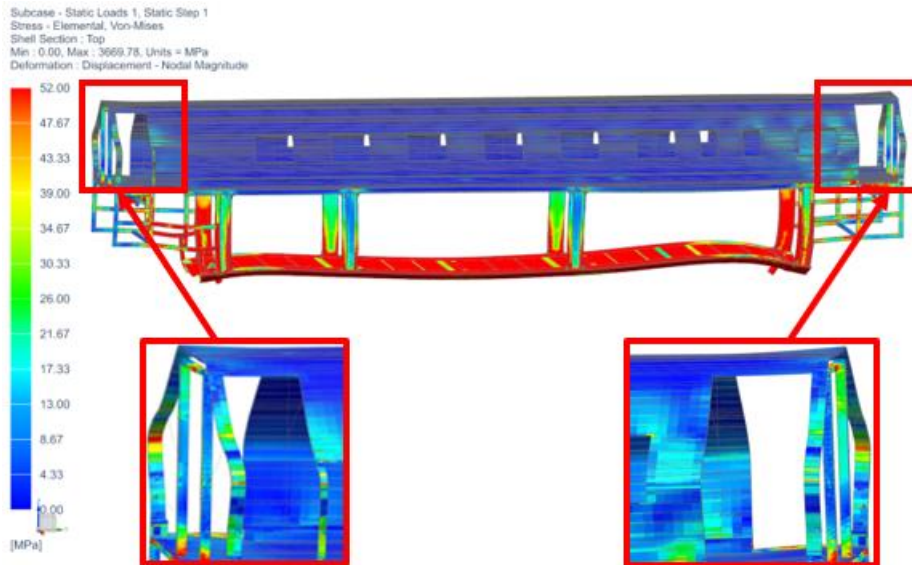


Obrázek 66 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

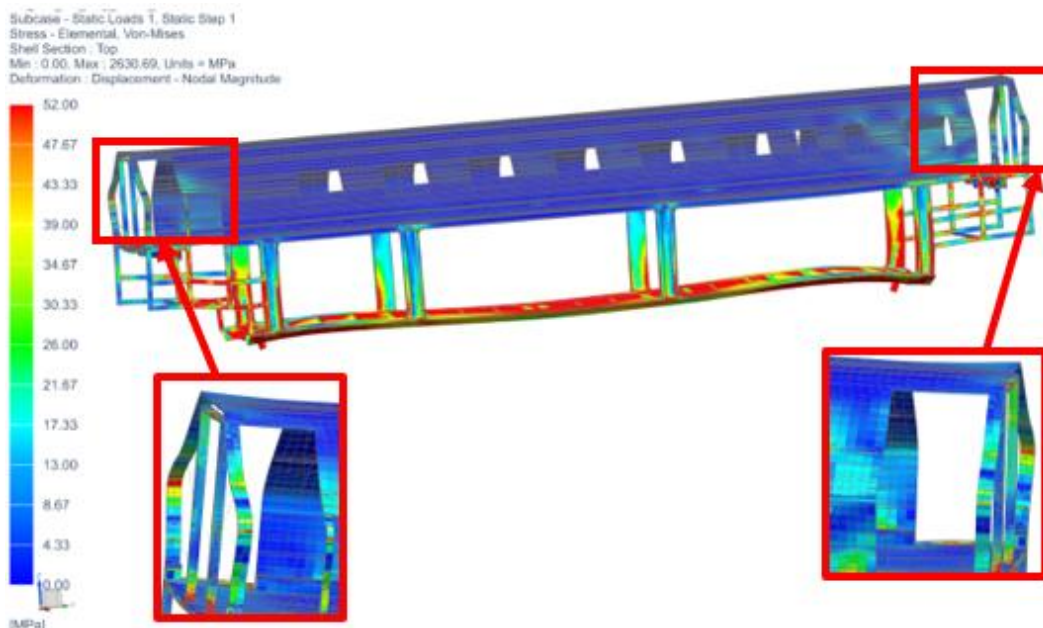


Obrázek 67 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

Na obrázcích Obrázek 66 a Obrázek 67 je patrný značný rozdíl v místech svarů. Opět v případě s nosníkem v podlaze (varianta B) jsou napětí značně nižší. Návrhy úprav designu budou vyobrazeny v kapitole „Vyhodnocení výsledků a návrh úprav konstrukce“.



Obrázek 68 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaže (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

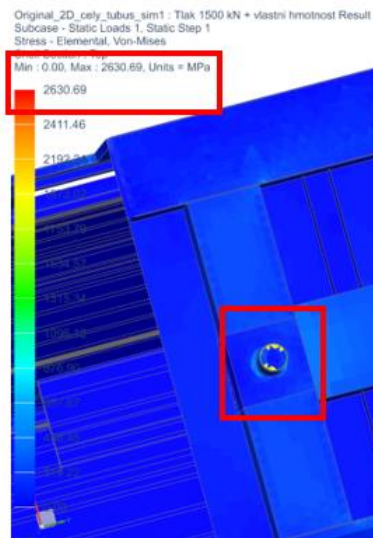


Obrázek 69 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tlakovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaže (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

Na obrázcích Obrázek 68 a Obrázek 69 je překročena hodnota dovoleného napětí. Bližší popis viz Tabulka 33 – Vyhodnocení výsledků FEM analýz, porovnání variant A, B a pouze spodní části. Úprava viz. kapitola „Vyhodnocení výsledků a návrh úprav konstrukce“.

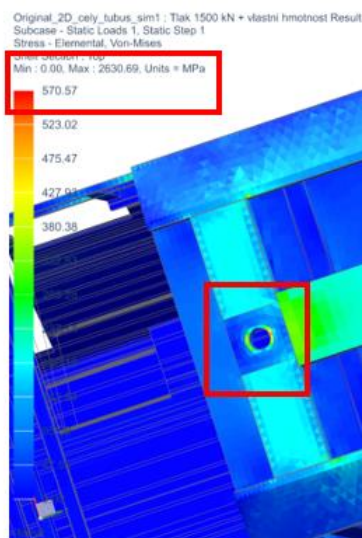
Poznámka

Ve všech výpočtech, kde se objevuje hodnota hodnota přes 2 600 MPa, není relevantní, protože je pouze v místech působení podélné síly 1 500 kN (hrana čepů). Pro větší názornost vše vysvětlují obrázky Obrázek 70 a Obrázek 71 (na obrázcích není zobrazena deformace).



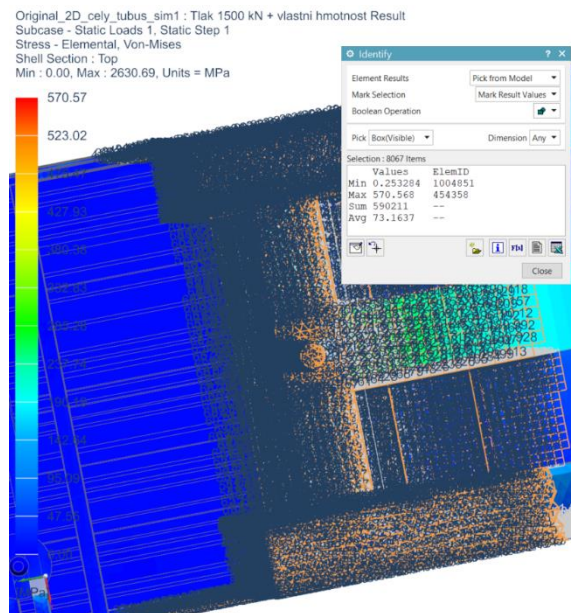
Čep, na jehož hraně je umístěno působí síla $F = 1\,500$ [kN] vykazuje hodnotu napětí

viz Max: 2630 [MPa]



Odstraněním napětí klesne na hodnotu 570 [MPa]

Obrázek 70 - VARIANTA A -Porovnání hodnot při uvažování čepu a bez uvažování čepu při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tlakovou silou 1 500 kN (Simcenter Nastran)

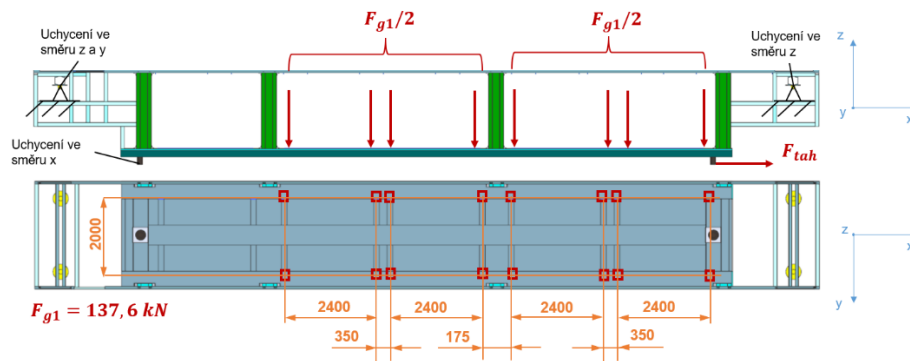


Obrázek 71 - VARIANTA A – Hodnota napětí na druhém čepu při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tlakovou silou 1 500 kN (Simcenter Nastran)

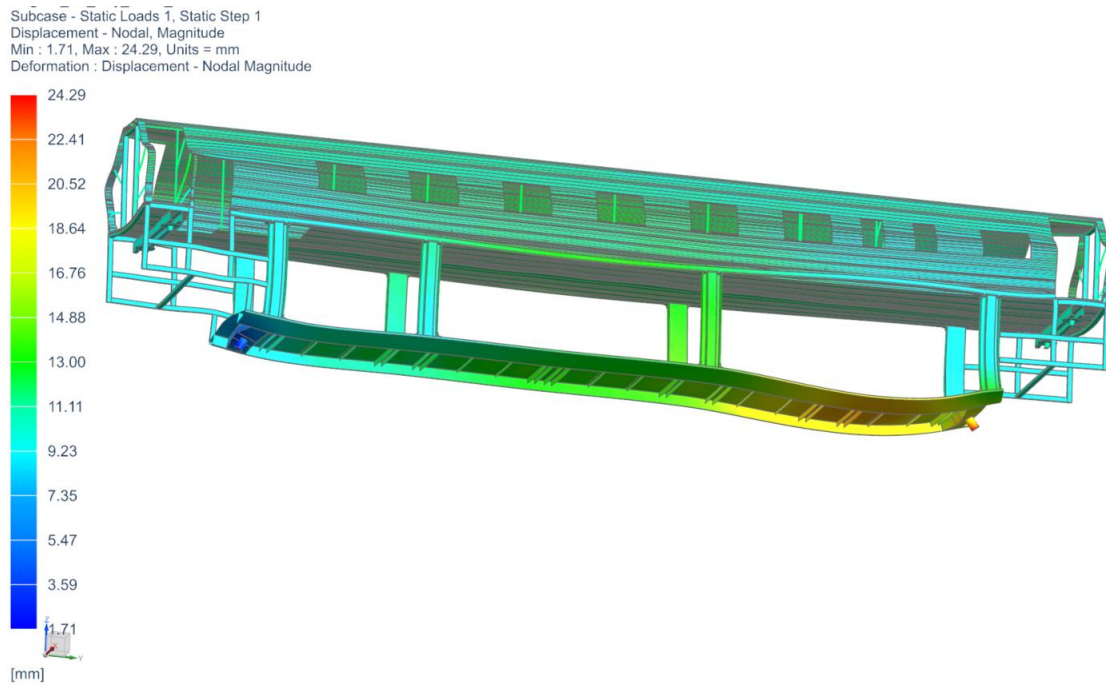
7.1.3 Zatížení od vlastní hmotnosti + užitečná zatížení + tahová síla 1500kN

Zatížení horního patra zůstává stejné jako v případě uvedeném na schématu zatížení viz. obrázek Obrázek 46 - Schéma zatížení horního patra . U zatížení spodního patra dochází k přidání zatížení od tahové síly viz. obrázek Obrázek 59 - Schéma zatížení prvního patra včetně tlakové síly 1500 kN.

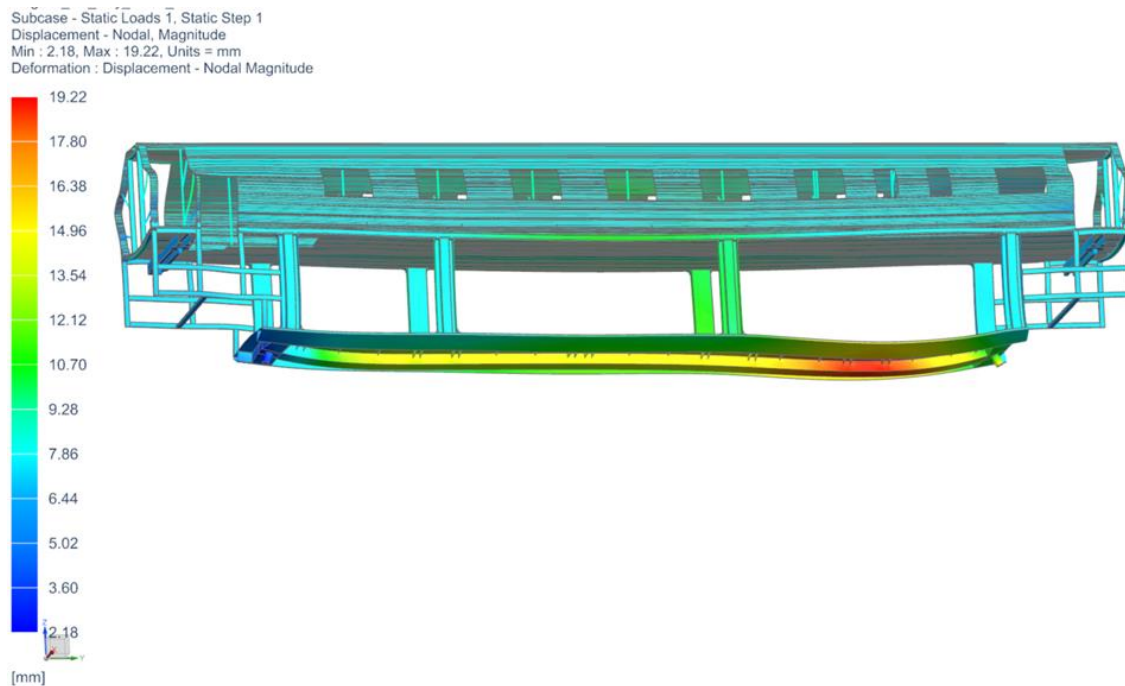
Jedná se tedy o kombinaci zatížení vlivem vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a tahové síly 1500 kN.



Obrázek 72 - Schéma zatížení spodního patra + tahová síla 1500 kN (Siemens NX 12)

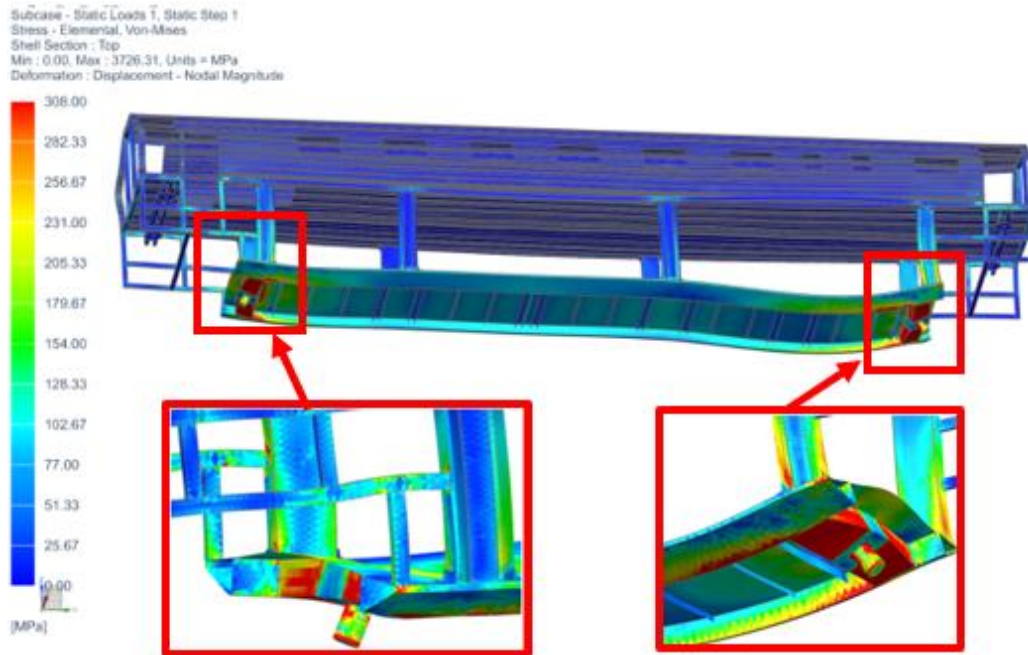


Obrázek 73 - VARIANTA B – Posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (Simcenter Nastran)

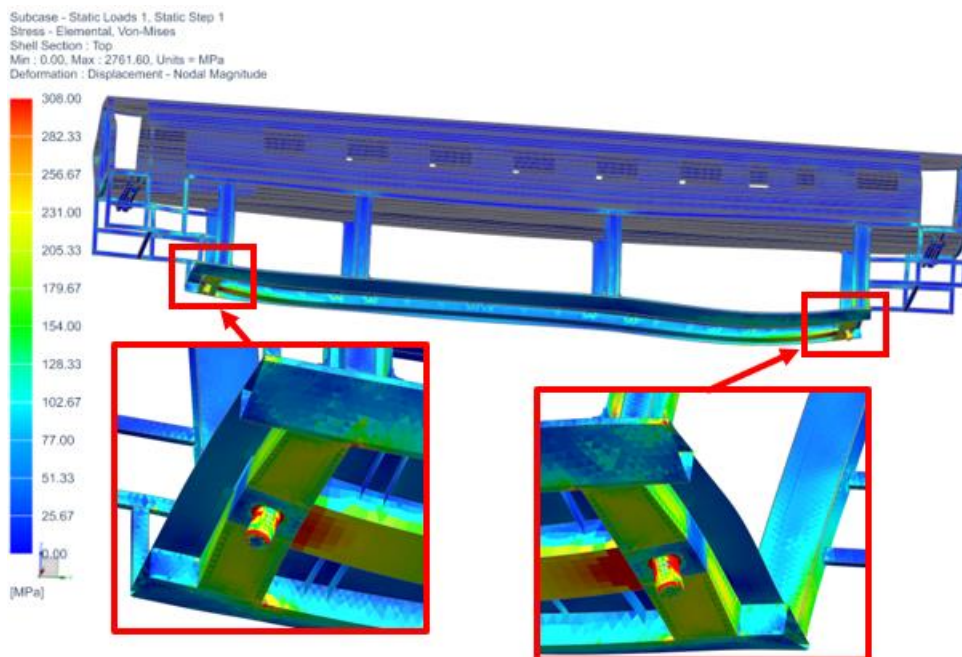


Obrázek 74 - VARIANTA A – Posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (Simcenter Nastran)

Model zatížený tahovou silou 1500kN s nosníkem (varianta B) viz. obrázek Obrázek 74 má zhruba o 20 % nižší posunutí, než stejně zatížený model bez nosníku (varianta A) viz. obrázek Obrázek 73.

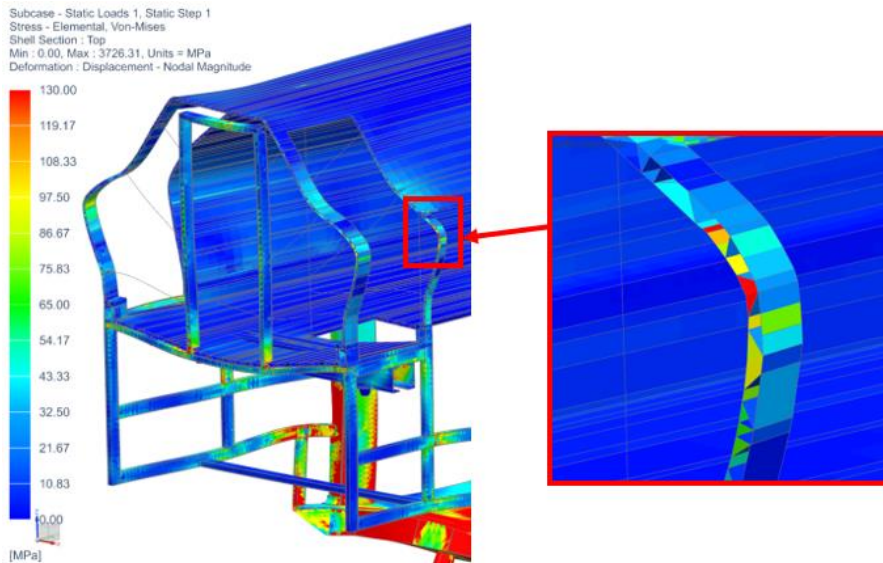


Obrázek 75 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran)

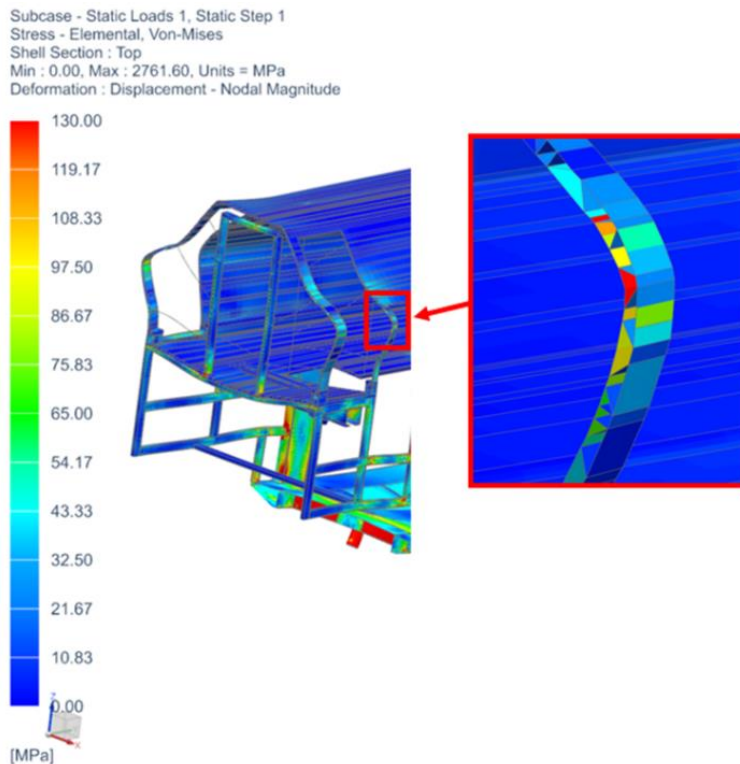


Obrázek 76 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (Simcenter Nastran)

Rozložení napětí v případě zatížení tahovou silou 1500 kN bez nosníku v podlaze (varianta A) viz. obrázek Obrázek 75 je vidět značné překročení dovolených napětí, naopak v případě s nosníkem (varianta B), jak je vidět z obrázku Obrázek 76, jsou napětí významně lépe přenesena do konstrukce.

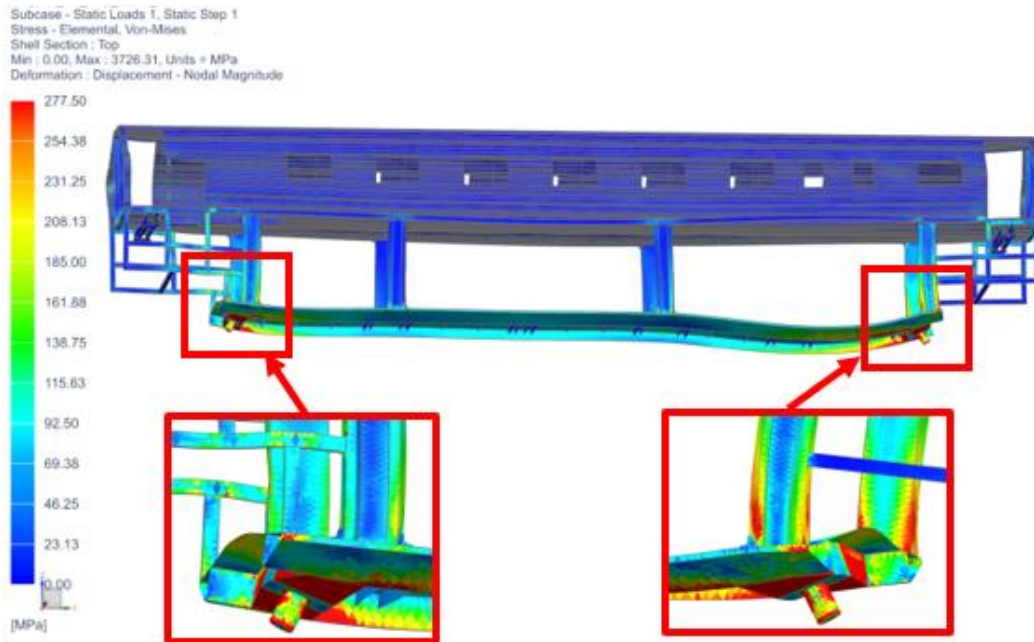


Obrázek 77 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran)

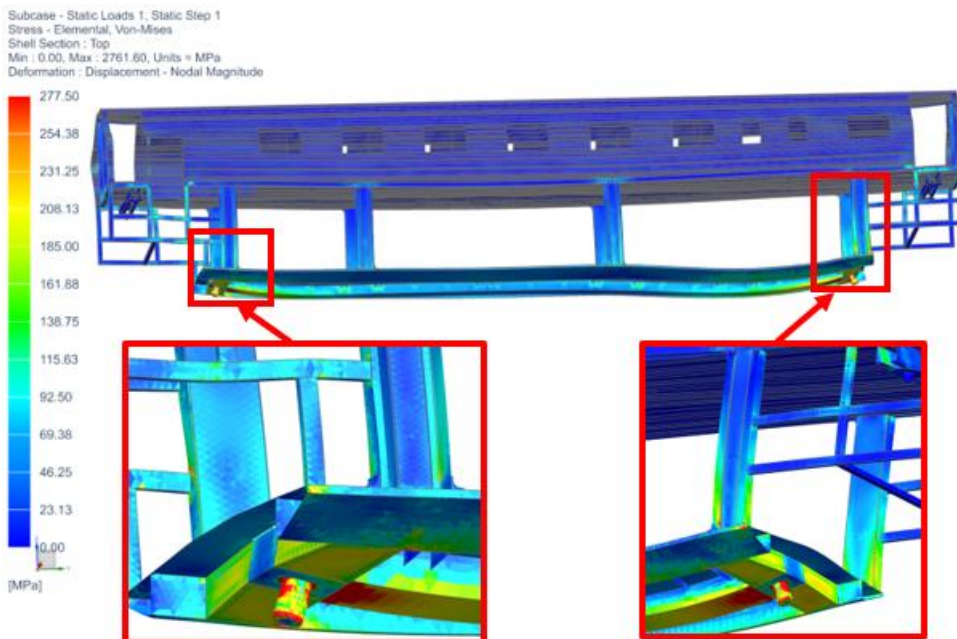


Obrázek 78 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části) (vyhodnocení hliníkové části) (Simcenter Nastran)

Na obrázcích Obrázek 77 a Obrázek 78 nejsou patrné výrazné rozdíly. Vliv norníku v podlaze prvního patra je na horní patro zanedbatelný. Hodnoty dovoleného napětí jsou překročeny v obou variantách, návrh úpravy bude upřesněn v kapitole „Vyhodnocení výsledků a návrh úprav konstrukce“.

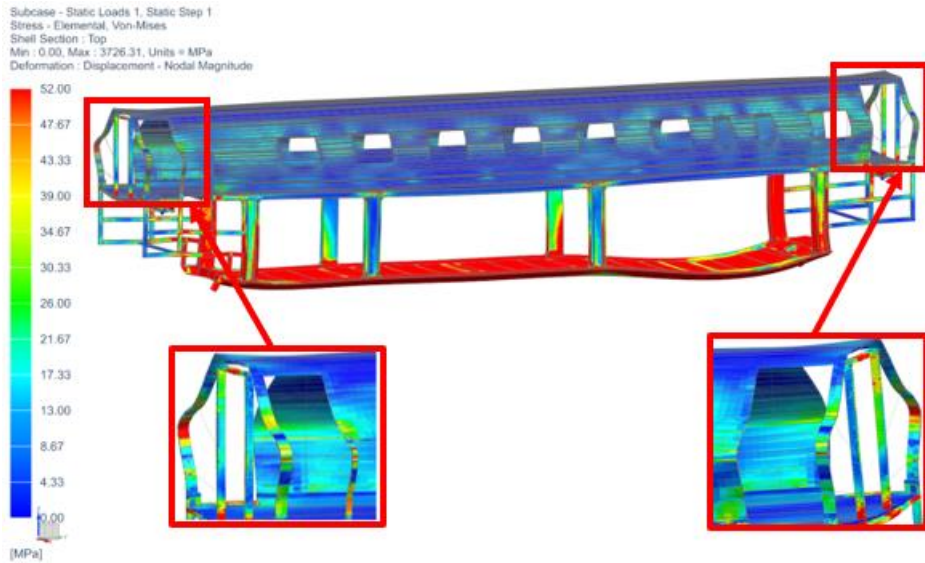


Obrázek 79 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

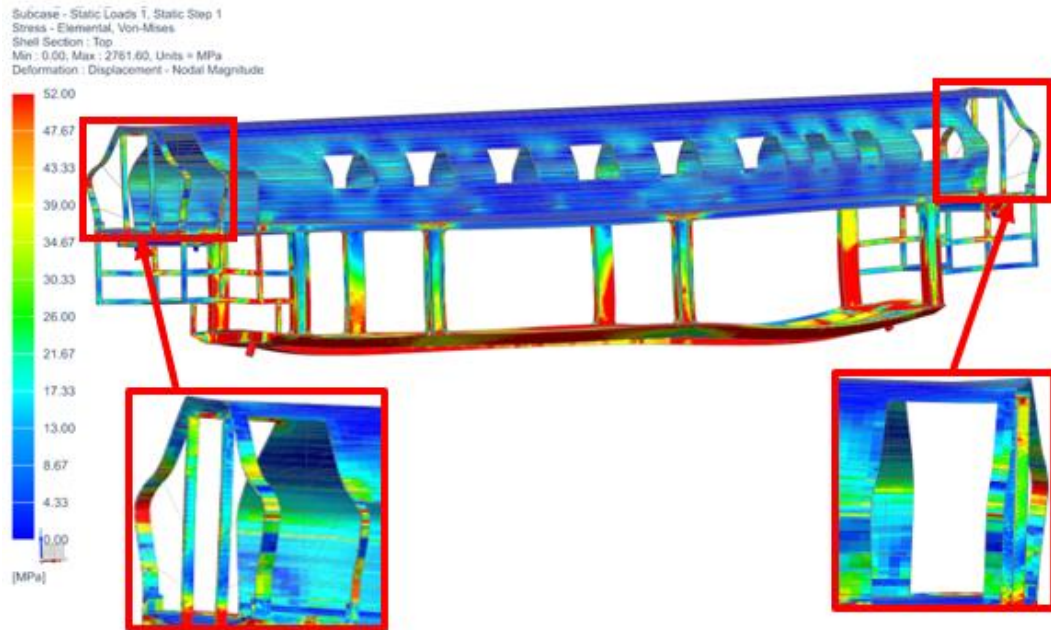


Obrázek 80 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení ocelové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

Vliv podlahového nosníku je značný a je patrný z obrázků Obrázek 79 a Obrázek 80. Významně snižuje hodnoty napětí. Konstrukční úpravy jsou popsány v kapitole „Vyhodnocení výsledků a návrh úprav konstrukce“.



Obrázek 81 - VARIANTA B – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

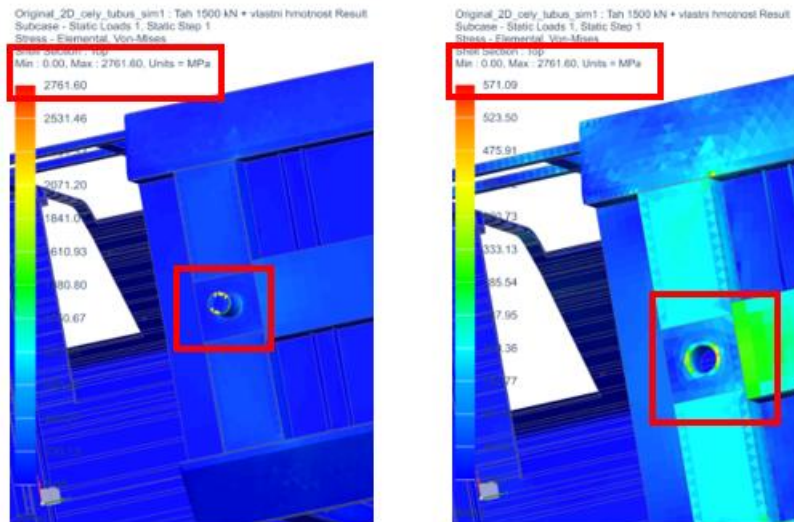


Obrázek 82 - VARIANTA A – Napětí při zatížení od vlastní hmotnosti, užitečného zatížení a zatížení tahovou silou 1500 kN varianta bez nosníku v podlaze (vyhodnocení hliníkové části v místech svarů) (Simcenter Nastran)

Mezi obrázky Obrázek 81 a Obrázek 82 nejsou patrné značné rozdíly v hodnotách napětí. Dovolené napětí je překročeno, proto bude potřeba upravit profily v místě zaoblení. Popis úprav je v kapitole „Vyhodnocení výsledků a návrh úprav konstrukce“.

Poznámka

Ve všech výpočtech, kde se objevuje hodnota přes 2 760 MPa, není relevantní, protože vzniká pouze jako důsledek umístění působivé podélné síly 1 500 kN (hrana čepů). Pro větší názornost vše vysvětlují obrázky Obrázek 83 a Obrázek 84 (na obrázcích není zobrazena deformace).

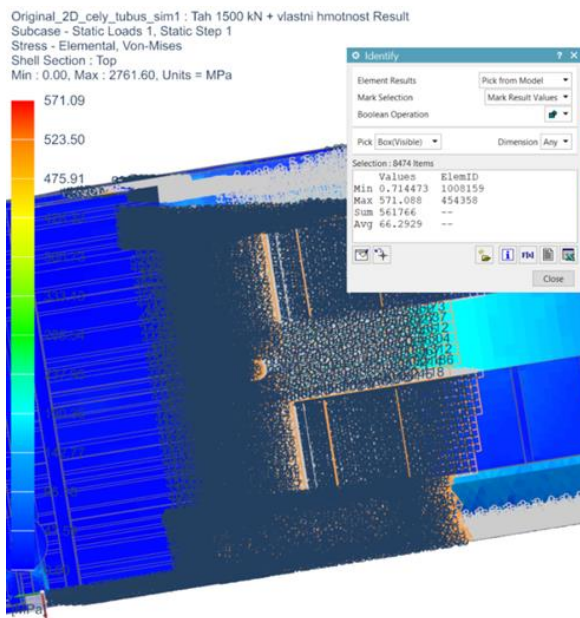


Čep, na jehož hraně je umístěno působivé síly $F = 1\,500$ [kN] vykazuje hodnotu napětí

viz Max: 2760 [MPa]

Odstraněním napětí klesne na hodnotu 571 [MPa]

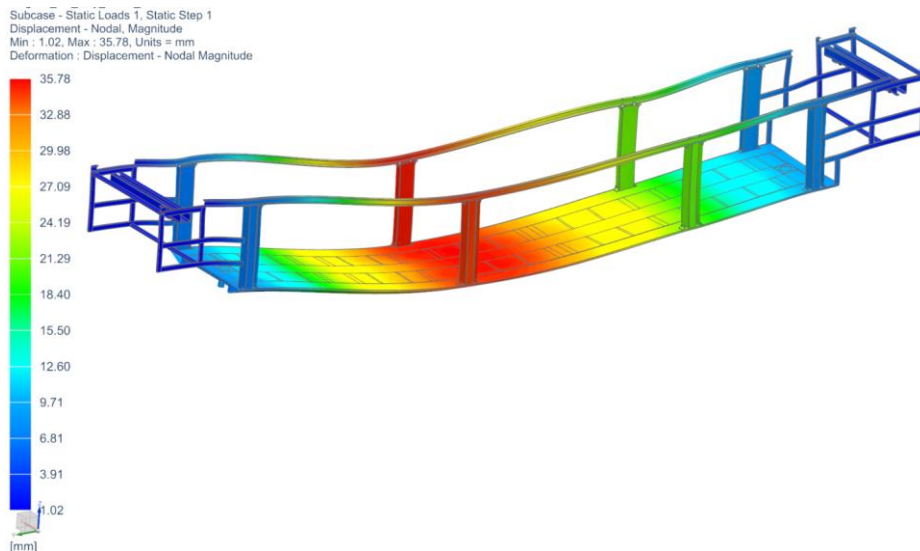
Obrázek 83 - VARIANTA A - Porovnání hodnot při uvažování čepu a bez uvažování čepu při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tahovou silou 1 500 kN (Simcenter Nastran)



Obrázek 84 - VARIANTA A – Hodnota napětí na druhém čepu při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tlakovou silou 1 500 kN (Simcenter Nastran)

7.2 FEM analýza samotného spodního patra (VARIANTA C)

Pro zobrazení vlivu horního patra byl proveden FEM výpočet pouze spodního patra zatížený pouze vlastní hmotností a užitečným zatížením dle obrázku Obrázek 45 - Schéma zatížení ve směru osy z spodního patra. Z obrázků jsou patrné značné deformace, dovolená napětí jsou rovněž překročena v místech spojů.



Obrázek 85 - VARIANTA C - Posunutí při zatížení vlastní hmotností a užitečné zatížení varianta C (pouze spodní patro) (Simcenter Nastran)



Obrázek 86 - VARIANTA C - Napětí při zatížení vlastní hmotností a užitečné zatížení varianta s nosníkem v podlaze(pouze spodní patro) (Simcenter Nastran)

Na obrázku Obrázek 86 je vidět koncentrace napětí v místech svarů. Je patrné, že vliv horního patra na schopnost přenášet napětí v konstrukci je značný. Posunutí pouze při zatížení vlastní hmotností a užitečným zatížením prvního patra (jedná se o příznivé podmínky zatížení) dosahuje nepřijatelných hodnot.

8 Vyhodnocení výsledků a návrh úprav konstrukce

Vyhodnocení napětí a posunutí je provedeno dle následující tabulky Tabulka 30. Součinitel bezpečnosti je v souladu s normou ČSN EN 12 663-1 ($S_e = 1,15$).

Tabulka 30 - Dovolena napětí a přípustné hodnoty posunutí

Materiál	Mez kluzu [MPa]	Součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu [-]	Dovolena napětí $\frac{R_e}{S_e}$ [MPa]	Přípustné posunutí [mm]
EN AW 6060 T6	150 (EN AW-6060 Data Sheet, 2020)	1,15	130	20
S355NC (1.0977)	355 (S355NC (1.0977), 2011-2023)	1,15	308	20

V místech svarů je tato hodnota snížena dle grafu Graf 1 - Vliv svaru na mechanické vlastnosti materiálů, kde jsou hodnoty meze pevnosti, proto je potřeba tyto hodnoty přepočítat ve stejném poměru (pro hliníkovou slitinu je $215/115 \approx 1,87$ pro tupý svar následně a pro ocel $360/323 \approx 1,11$, další hodnoty by se získaly pro zbylé druhy svarů). Vyjádřené hodnoty jsou v tabulce Tabulka 31.

Tabulka 31 - Hodnoty dovolených napětí v místech svarů

Materiál	Dovolena napětí [MPa]			
	Nesvařený materiál	Tupý svar	Oboustranný koutový svar	Koutový svar
EN AW 6060 T6	130	69,5	52	45
S355NC (1.0977)	308	277,5	277,5	277,5

Tabulka 32 - Popisky zkratk použitých v tabulce „ – Vyhodnocení výsledků FEM analýz“

Zkratka	Celý popis
Varianta A	Spodní patro s podélným středovým nosníkem + horní hliníkové patro
Varianta B	Spodní patro bez podélného středového nosníku + horní hliníkové patro
Varianta C	Pouze spodní patro z oceli
H	Vlastní hmotnost
U	Užitečná zatížení
TLAK	Tlaková síla 1500 kN
TAH	Tahová síla 1500 kN

Tabulka 33 – Vyhodnocení výsledků FEM analýz, porovnání variant A, B a pouze spodní části

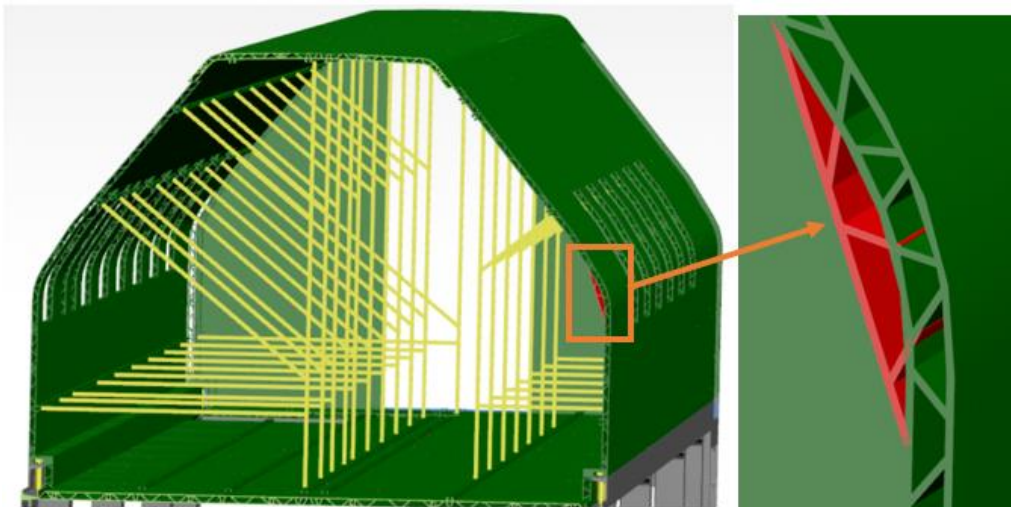
Varianta	Hmotnost [kg]	Způsob zatížení	Vyhodnocení dle materiálu	Vyhodnocení dle oblastí (neovlivněná oblast/svar)	Max. posunutí [mm]	Porovnání posunutí vůči variantě A [%]	Max. napětí [MPa]	Porovnání napětí vůči variantě A [%]	Vyhodnocení (VYHOVUJ E/NEVYHO VUJE)
A	14309	H+U	Ocel	Neovlivněná oblast	8,5	100,0	253,7	100,0	VYHOVUJE
				Svar			176,6	100,0	VYHOVUJE
			Hliník	Neovlivněná oblast			117,6	100,0	VYHOVUJE
				Svar			39,3	100,0	VYHOVUJE
		H+U+ TLAK	Ocel	Neovlivněná oblast	13,1	100,0	497,6	100,0	NEVYHOVUJE
				Svar			437,8	100,0	NEVYHOVUJE
			Hliník	Neovlivněná oblast			94,1	100,0	VYHOVUJE
				Svar			31,4	100,0	VYHOVUJE
		H+U+ TAH	Ocel	Neovlivněná oblast	19,2	100,0	505,9	100,0	NEVYHOVUJE
				Svar			491,2	100,0	NEVYHOVUJE
			Hliník	Neovlivněná oblast			141,1	100,0	NEVYHOVUJE
				Svar			47,2	100,0	VYHOVUJE
B	13082	H+U	Ocel	Neovlivněná oblast	8,9	104,7	247,3	97,5	VYHOVUJE
				Svar			168,4	95,4	VYHOVUJE
			Hliník	Neovlivněná oblast			114,1	97,0	VYHOVUJE
				Svar			38,2	97,2	VYHOVUJE
		H+U+ TLAK	Ocel	Neovlivněná oblast	22,6	172,5	507,4	101,9	NEVYHOVUJE
				Svar			453,2	103,5	NEVYHOVUJE
			Hliník	Neovlivněná oblast			90,9	96,6	NEVYHOVUJE
				Svar			30,3	96,5	NEVYHOVUJE
		H+U+ TAH	Ocel	Neovlivněná oblast	24,3	126,6	515,3	101,9	NEVYHOVUJE
				Svar			506,6	103,1	NEVYHOVUJE
			Hliník	Neovlivněná oblast			137,4	97,4	NEVYHOVUJE
				Svar			46,0	97,5	NEVYHOVUJE
C	7971	H+U	Ocel	Neovlivněná oblast	35,8	421	342,1	134,8	*
<p>Vysvětlivky: * Vyhodnocení v tomto případě by bylo bezpředmětné, důležité jsou pouze hodnoty posunutí a napětí. V hodnotách napětí nejsou zmíněny vysoká napětí z důvodu jejich nevyhovujících hodnotách (vznikla jako důsledek působení síly 1 500 kN na hranu čepu) Červenou barvou jsou zvýrazněny hodnoty napětí a posunutí překračující dovolené hodnoty viz. tabulky Tabulka 30 a Tabulka 31 Modrou barvou jsou zvýrazněny hodnoty napětí a posunutí nepřekračující dovolené hodnoty viz. tabulky Tabulka 30 a Tabulka 31</p>									

Z tabulky Tabulka 33 je patrné, že hodnota maximálního posunutí při zatížení od vlastní hmotnosti a užitého zatížení je v případě VARIANTY C přibližně 4krát vyšší, než u VARIANTY A. Při hmotnosti horního patra přibližně 6,3 tuny a hmotnosti ocelové diferenciální stavby cca. 8 tun (celková hmotnost hrubé stavby je cca 14.3 tuny), je dosaženo přibližně 2,7krát vyšší tuhosti na jednotku hmotnosti (při porovnání s VARIANTOU B je to pouze 2krát).

Přibližná přesnost výsledků výpočtu je $\pm 15\%$, čímž rozdíly v napětí menší, než je tato hodnota nelze porovnat. Větších rozdílů bylo dosaženo při porovnání variant A a B pouze v hodnotách posunutí. Varianta A má v porovnání s variantou B, v případě zatížení od vlastní hmotnosti, užitečných zatížení a tlakové síly 1500 kN o cca. 72 %, při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tahovou silou 1500 kN je tento rozdíl přibližně 26 %.

8.1 Návrh úprav horního patra

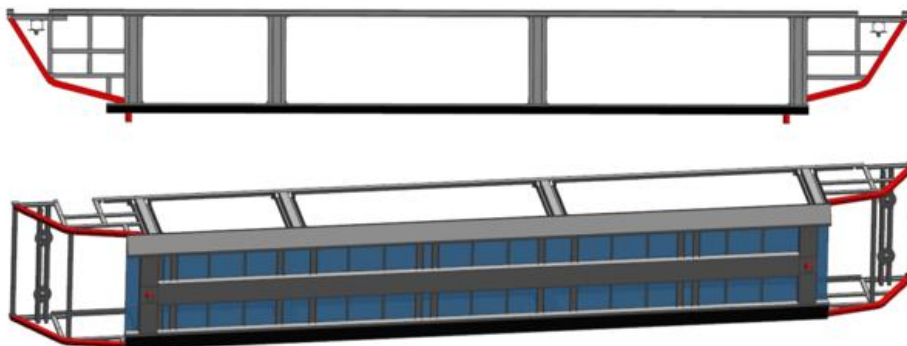
Jak již bylo zmíněno ve výsledcích FEM analýzy, je zapotřebí provést úpravy profilů, pro snížení napětí při zatížení byla navržena změna viz. obrázek Obrázek 87 (červená barva). Na obrázku je schematicky namodelována změna daných profilů. Napětí a deformace v jiných částech stavby budou vyřešeny zaoblením v místech velkých otvorů (okna, dveře) a horní patro bude na koncích uzavřeno.



Obrázek 87 - Návrh úpravy hliníkových profilů (Siemens NX 12)

8.2 Návrh úprav ocelová spodní část

Pro snížení napětí v čepch bude zajištěno zvětšením jejich průměru. Z důvodu vysokých hodnot napětí na koncích vozu bude přidáno zavětrování. Změny viz ilustrační Obrázek 88 (červená barva).



Obrázek 88 – Návrh úprav spodní ocelové části (Siemens NX 12)

Závěr

Prokázal se příznivý vliv horního patra hliníkové stavby na tuhost celé konstrukce (cca. 2krát vyšší tuhost na jednotku hmotnosti). Hliníková stavba dokáže přenášet část zatížení ze spodního patra, především od svislých zatížení a tlakových sil, na druhou stranu spodní patro posiluje celou konstrukci od zatížení tahovou silou, především díky středovému uzavřenému podélnému nosníku, který má významný vliv na snížení hodnot posunutí, díky čemuž je jeho přítomnost nutností.

Rozdíl v hmotnostech mezi VARIANTOU A (14 309,4 [kg]) a VARIANTOU B (13 081,8 [kg]) činí 1 227,6 [kg], což je procentuální nárůst přibližně o 9 [%] při zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tahovou silou 1 500 kN je snížení posunutí přibližně o 26 [%] a o cca 72 [%] v případě zatížení vlastní hmotností, užitečným zatížením a tlakovou silou 1 500 kN, při nepatrném navýšení hodnot napětí. Při porovnání VARIANTY A a VARIANTY C je procentuální podíl horního patra na hmotnosti hrubé stavby 44 [%], dosažení snížení hodnot posunutí přibližně o 320 [%] a snížení hodnot napětí o 35 [%]. Hodnoty napětí přesahující 2 500 [MPa] vznikla pouze z důvodu umístění síly 1 500 [kN] na hranu čepu, nejsou proto vyhodnocovány jsou odůvodněny vysvětleny na obrázcích Obrázek 70, Obrázek 71, Obrázek 83 a Obrázek 84.

Z výsledků FEM analýz vyplývá několik dalších kroků možného směřování vývoje skříně vozu ComplexTrans. Dalšími kroky by mělo být provedení zmiňovaných úprav v místech, kde napětí překračuje dovolenou hodnotu. Pro snížení napětí v horním patře lze zvětšit vnitřní rozměry vybraných hliníkových profilů viz obrázek Obrázek 87. U ocelových dílů v místech svarů, kde je vyšší napětí, než je dovolená hodnota budou přidány rohovníky viz. obrázek Obrázek 88, opakovat výpočet s uzavřenými konci a s přesnější sítí pro dosažení přesnějších výsledků.

Bibliografie

- [1] Avelia horizon: the world's only double-deck very high-speed train, 2023. In: *Www.alstom.com/avelia-horizon-worlds-only-double-deck-very-high-speed-train* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: www.alstom.com/avelia-horizon-worlds-only-double-deck-very-high-speed-train
- [2] Avelia Horizon, 2022. In: *Scribd.com* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/594181236/Avelia-Horizon#>
- [3] *Catia V5: Dassault Systèmes [software]* [-]. In: . [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: www.3ds.com/products-services/catia/products/v5/portfolio/. Požadavky na systém: Win 7, Win 10, Win 11 ; velikost 10 GB.
- [4] CLAUDIO Z TRENOMANIE, Marco, 2020. ETR521.035 „Rock“ v Lavagna. In: *Scalaenne.wordpress.com* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: <https://scalaenne.wordpress.com/2020/10/31/doppio-piano-parte-6-rock-caravaggio-etr-421-521-621/>
- [5] *ComplexTrans: global land transportation system The best way ahead for railways and roads is coherent cooperation, not the competition*, 2020. 2. Miami. ISSN 2675-5459. Západočeská univerzita v Plzni.
- [6] Concours: Imagine TGVM, 2020. In: *Theoontracks.com* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: <https://theoontracks.com/2020/10/02/concours-imagine-tgvm/>
- [7] ČSN EN 12 663-1+A1:2015: *Železniční aplikace - Pevnostní požadavky na konstrukce skříní kolejových vozidel - Část 1: Lokomotivy a vozidla osobní dopravy (a alternativní metoda pro nákladní vozy)*., 2015. 1.6.2015. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [8] ČSN EN 15663+A1:2019: *Železniční aplikace - Referenční hmotnosti vozidel*, 2019. 1.09.2019. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [9] ČSN ISO 965-2 *general purpose metric screw threads*, 1998. 1998. Geneva: International Organization for Standardization.
- [10] Desiro HC, 2015. In: *Mobility.siemens.com* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/desiro/high-capacity.html>
- [11] *DIN 25201-2:2015-12: Design guide for railway vehicles and their components - Bolted joints - Part 2: Design - Mechanical applications*., 2015. 2015. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- [12] EN AW-6060 | Data Sheet, 2020. In: *Alumerogroup.eu* [online]. Alumero [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: https://www.alumerogroup.eu/fileadmin/user_upload/downloads/folder/technologie/ALUMERO_Legierungen_EN-AW-6060_EN.pdf
- [13] GUBLER, David, 2023. RABe 511. In: *Bahnbilder.ch* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: <https://bahnbilder.ch/picture/16447>

- [14] HELLER, Petr, 2017-2021. *Kolejová vozidla*. 2. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. ISBN 978-802-6107-736.
- [15] HIGH SPEED First TGV M unveiled by Alstom and SNCF, 2022. In: *Railwaygazette.com* [online]. Francie: Railway Gazette International [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: www.railwaygazette.com/high-speed/first-tgv-m-unveiled-by-alstom-and-sncf/62542.article
- [16] Hitachi: Inspire the next, 2015. In: *Trainspo.com* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: https://trainspo.com/uploads/pdf/model_6430_1593161533.pdf
- [17] HOFMAN, Jiří, ed., 2020. Kupémobil se zatažitelnou nápravou. In: *Seznamzpravy.cz* [online]. Torino design [cit. 2023-06-17]. Dostupné z: www.seznamzpravy.cz/clanek/ekonomika-byznys-trendy-analyzy-cesi-nakreslili-elektroauto-zitrka-ma-jezdit-vlakem-a-menit-si-baterie-186702
- [18] KISS Double-Decker Electric Multiple Unit EMU. In: *Stadlerrail* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: www.stadlerrail.com/media/pdf/kcal0716us.pdf
- [19] MEYER, G., 2006. *Grundlage der Schienenfahrzeugtechnik*. TU Darmstadt.
- [20] MRÁZ, Petr a Jaroslav TALÁCKO, 2006. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. 2. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-03540-9.
- [21] S355NC (1.0977), 2011-2023. In: *Www.steelnumber.com/* [online]. European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=216
- [22] ŠADUR, L.A., 1973. *Vagony, konstrukcija, teoria i rasčet*. -. Moskva: Izdatělstvo Transport. ISBN -.
- [23] SCALAENNE, 2020. Doppio piano, parte 6:: Rock – Caravaggio (ETR.421, 521, 621). In: *Scalaenne.wordpress.com* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: <https://scalaenne.wordpress.com/2020/10/31/doppio-piano-parte-6-rock-caravaggio-etr-421-521-621/>
- [24] *Siemens NX 12: Siemens Digital Industries Software* [-]. In: . [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/cad-online/>. Požadavky na systém: Win 10, Win 11, velikost 9 GB
- [25] *Simcenter Nastran: Siemens Digital Industries Software* [-]. In: . [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/mechanical-simulation/nastran/>, Požadavky na systém: Win 10, Win 11, velikost 8,5 GB
- [26] ŠINDELÁŘ, Jan, 2017. Výroba vlaků Railjet pro České dráhy v rakouské továrně v Siemensu. In: *E15* [online]. Praha 7: Czech News Center a.s. [cit. 2023-06-11]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/galerie/byznys/doprava-a-logistika/137803/prvni-railjet-ma-za-sebou-milion-kilometru-patri-k-nejspolehlivejsim-vlakum-libuji-si-drahy?foto=3>
- [27] ŠVESTKA, David, 2004-2023. Elektrická jednotka řady 471. In: *Atlaslokomotiv* [online]. Wikimedia Foundation [cit. 2023-06-15]. Dostupné z: <https://www.atlaslokomotiv.net/loko-471.html>

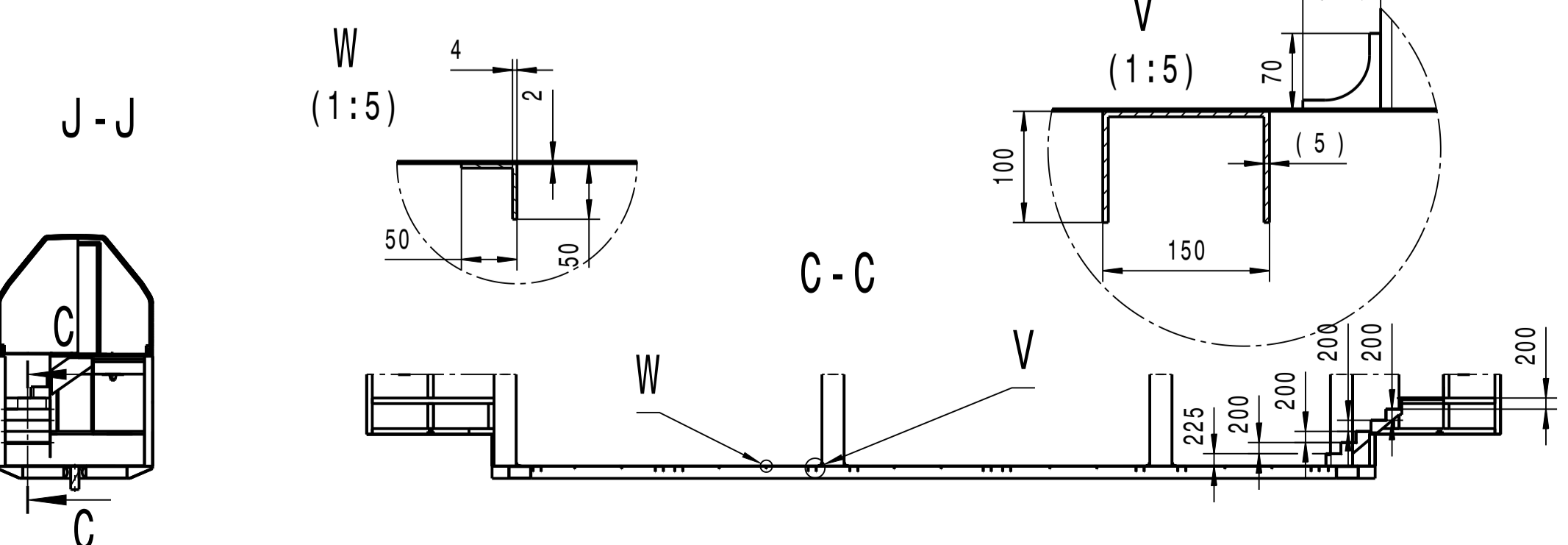
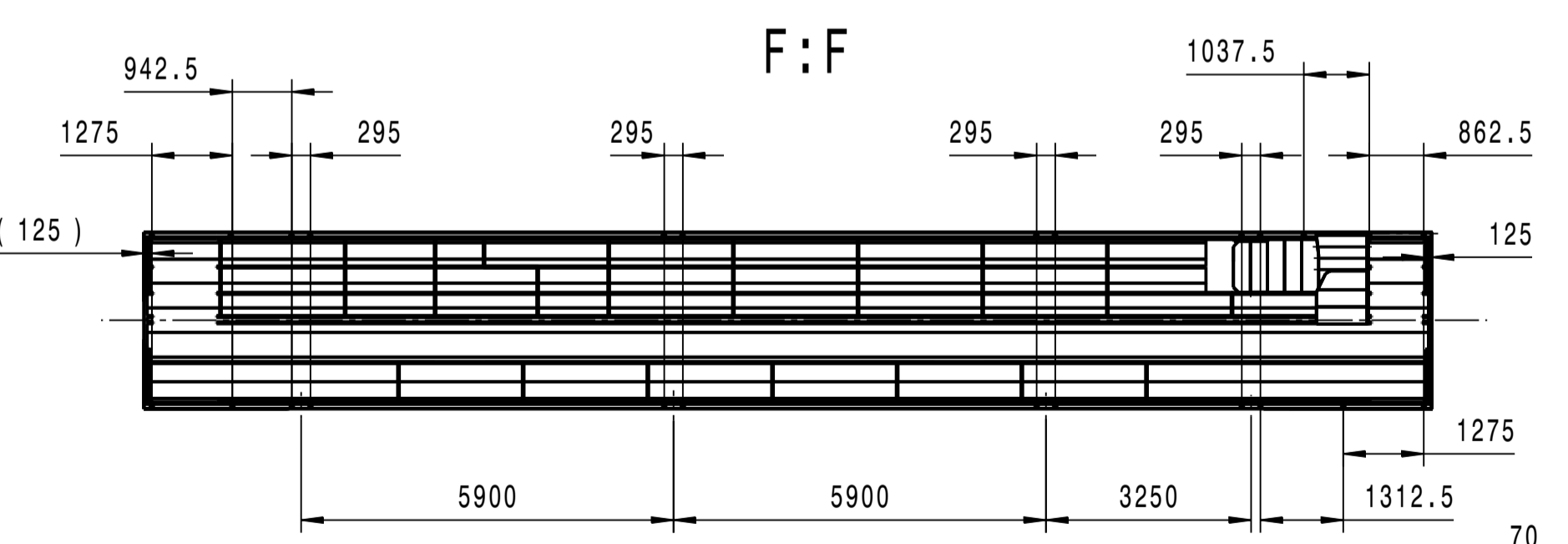
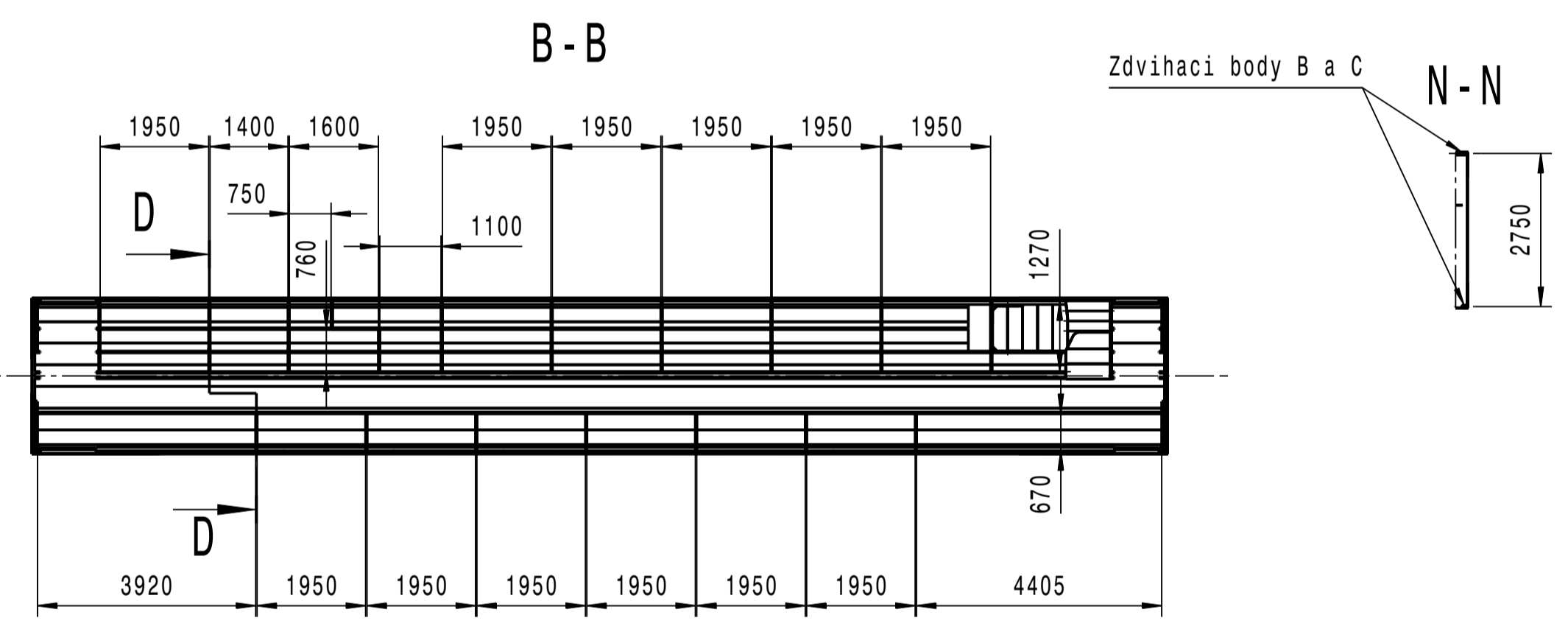
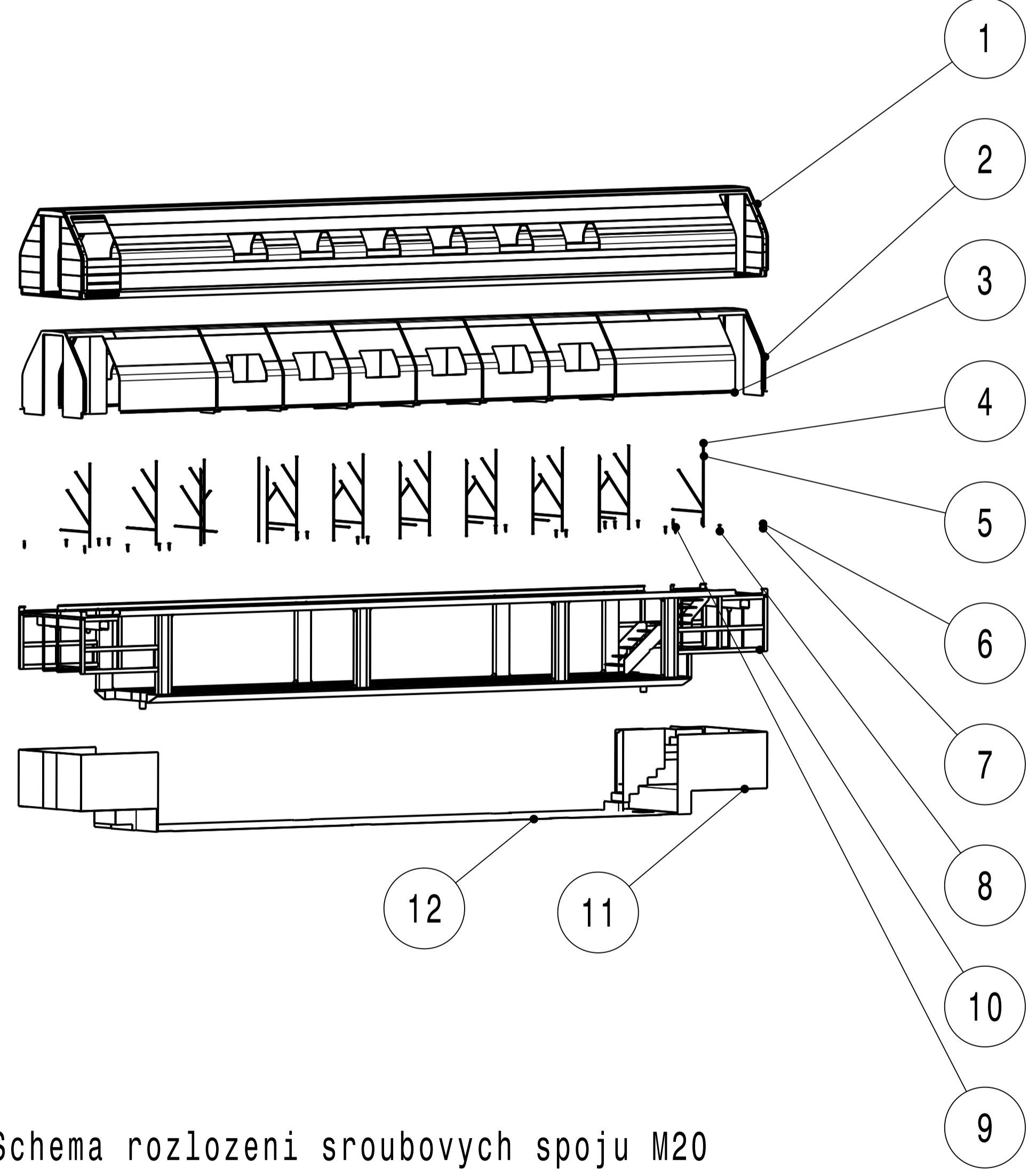
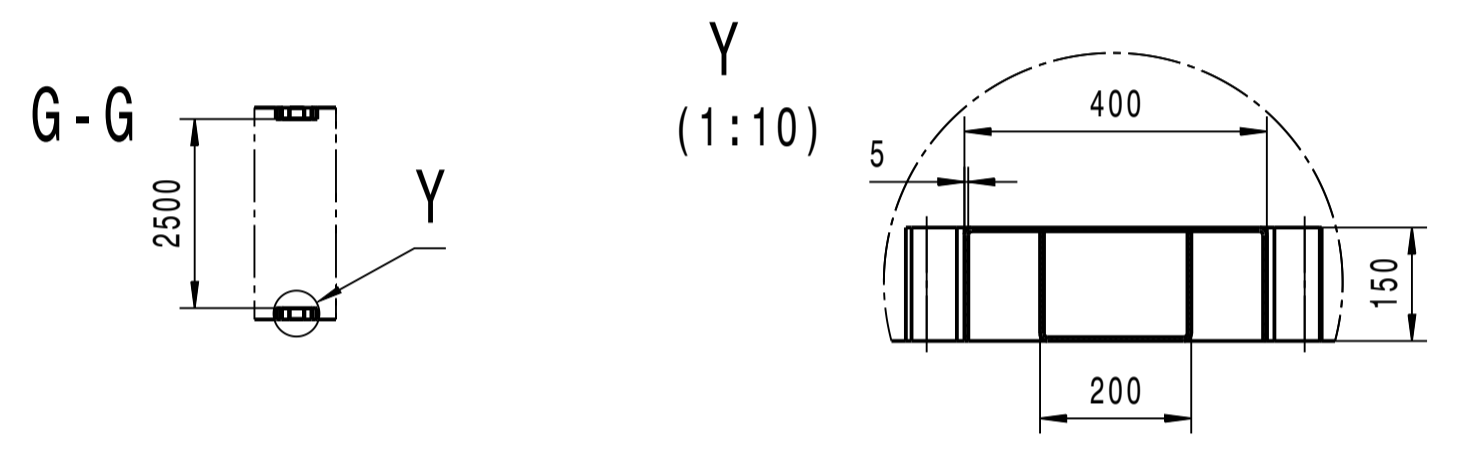
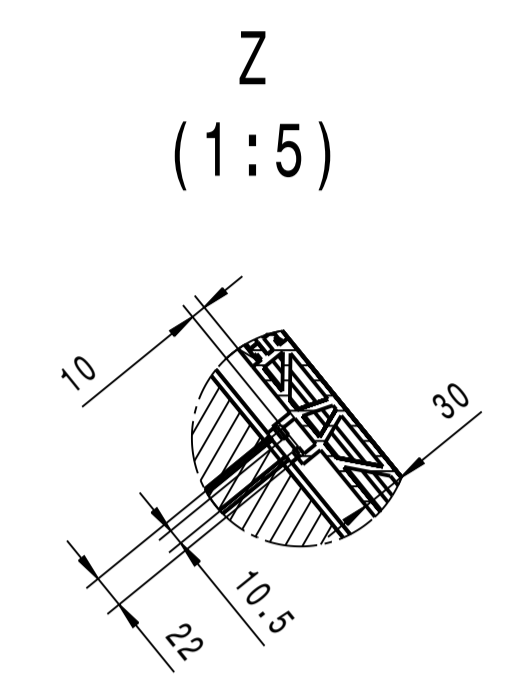
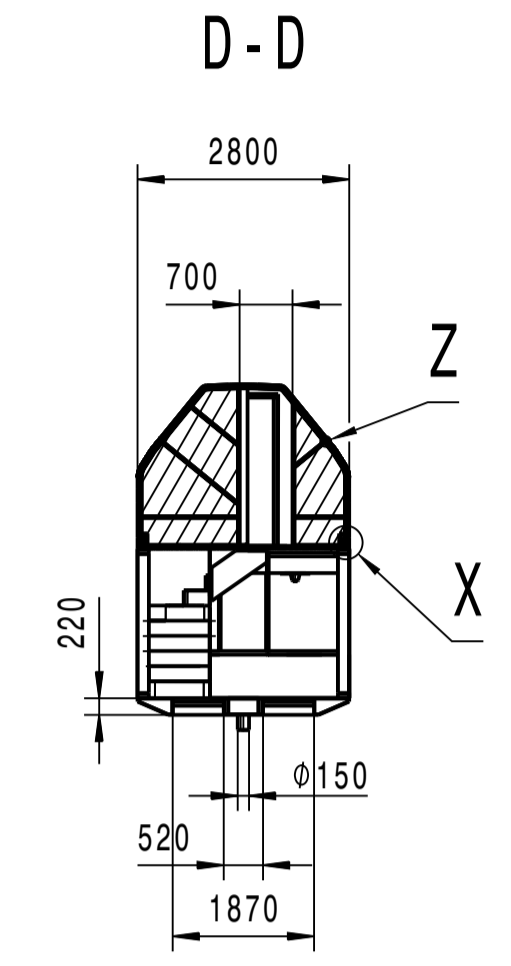
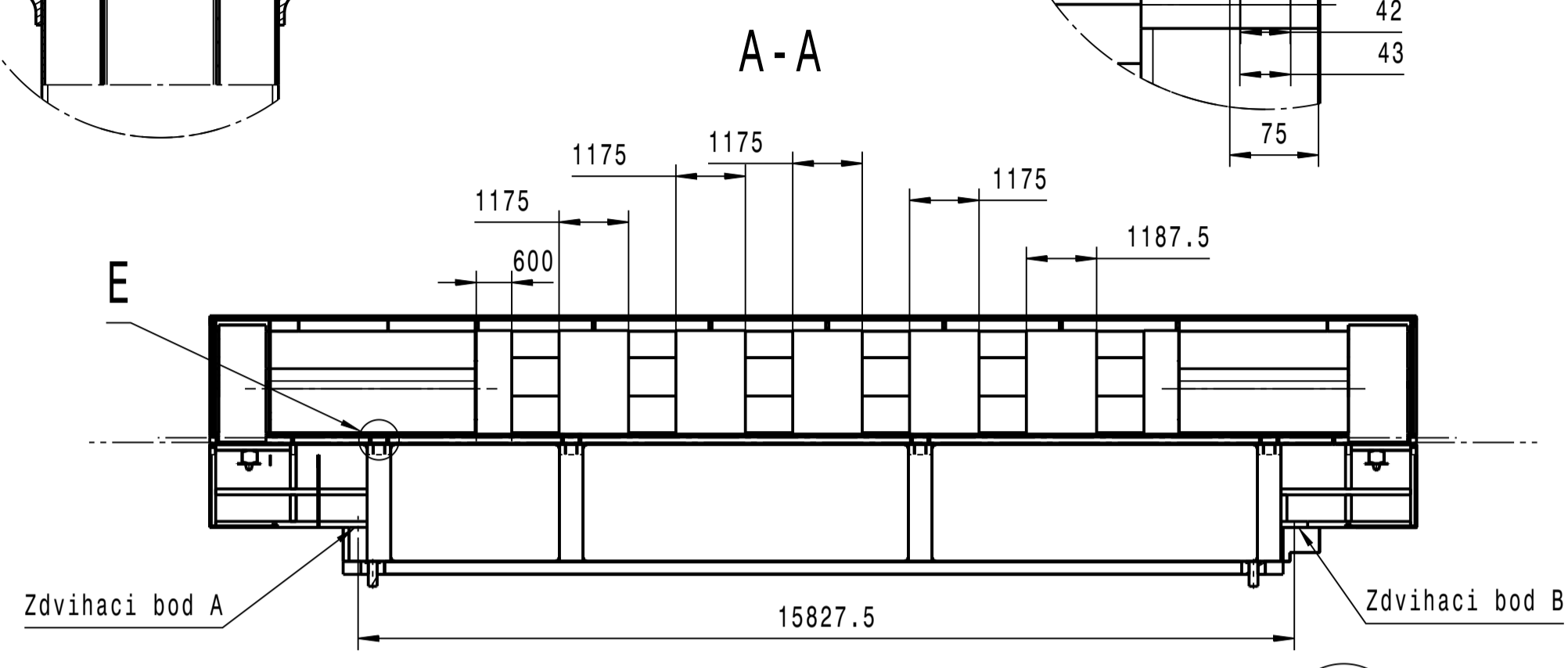
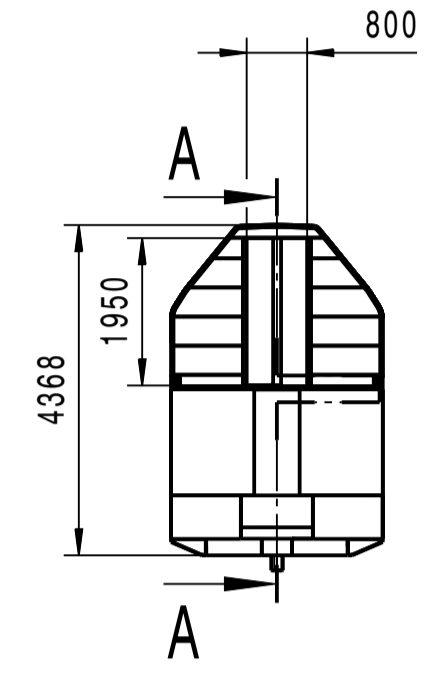
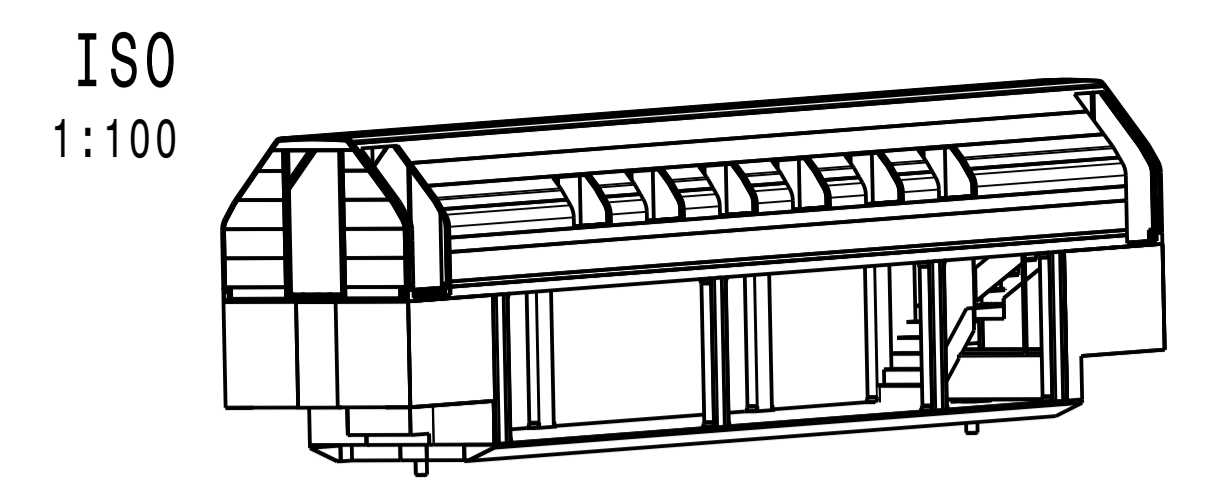
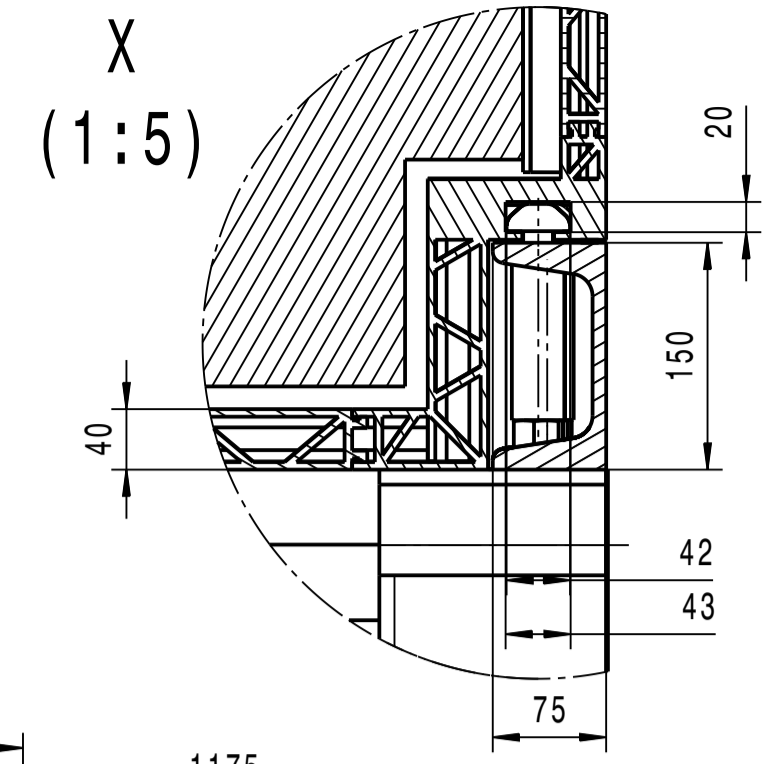
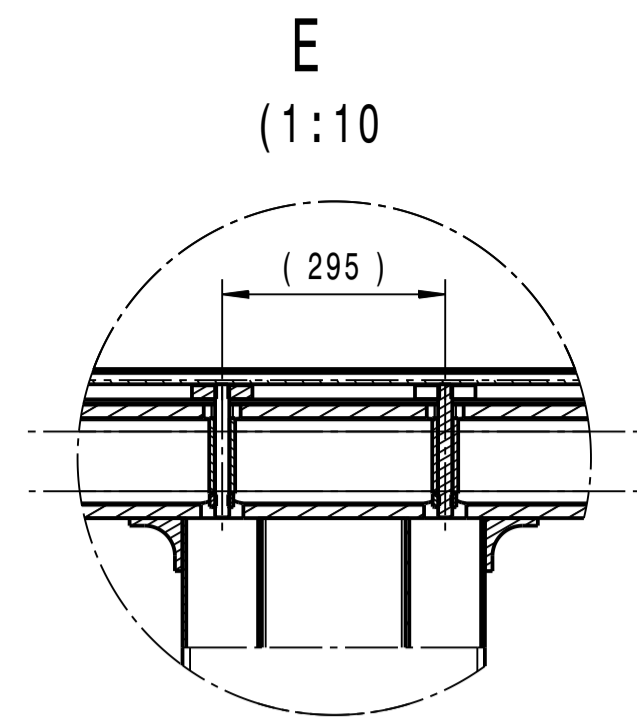
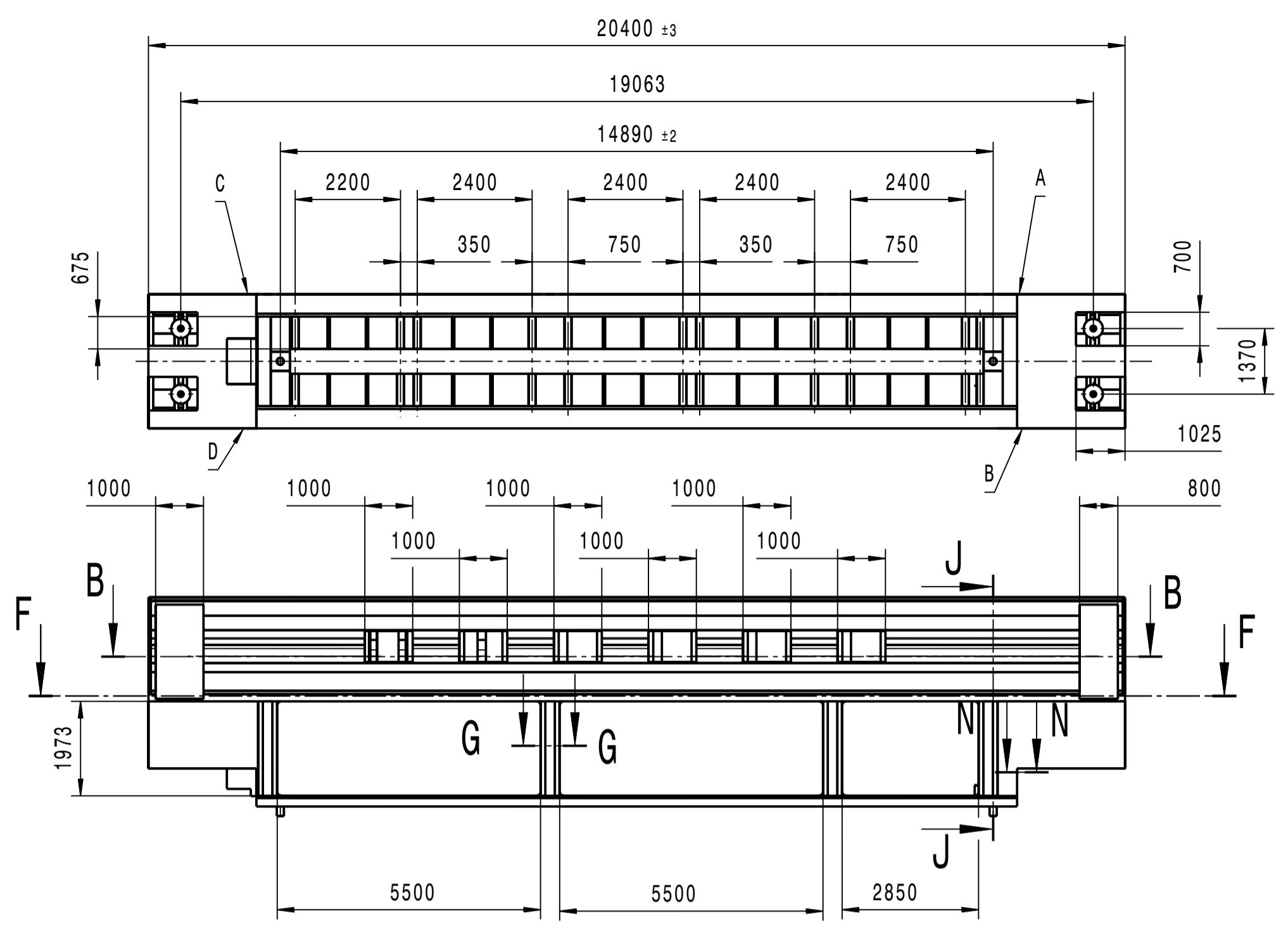
[28] TELLERUP, Markus, 2004. X40 3301. In: *Jarnvag.net* [online]. Eskilstuna [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: www.jarnvag.net/vagnguide/x40

Vestibule/Doorway Area, 1994-2023. In: *Hitachi.com* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: https://www.hitachi.com/rev/archive/2018/r2018_07/07a02/index.html

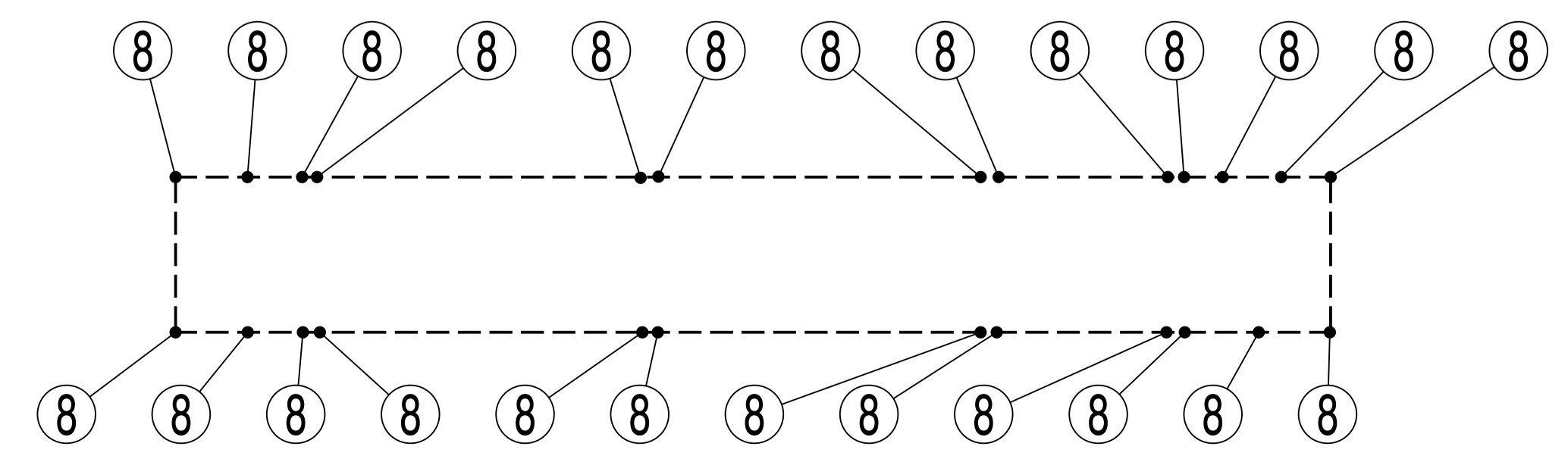
X40, 2015. In: *Järnväg.net* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: www.jarnvag.net/vagnguide/x40

PŘÍLOHA 1

Výkres navržené hrubé skříně ComplexTrans



Schema rozlozeni sroubovych spoju M20



A,B,C,D zdvihaci body, roztec 2750X15827,5 mm

Schematicky kusovník

P.	Název	Norma	kg	ks.
	Materiál			
1	Hliníkové profily EN AW 6060 T6		6338	40
2	Tepelná izolace ENVIZOL TRAIN FR AL TL20	CSN EN 45545-2+A1	50	34
3	Hliníkový plech t=2mm EN AW 6060 T6		2	5
4	Matice do c drážky M10 Pozinkovaná ocel		2,5	25
5	Šroub S235JR		230	32
6	Matice do c drážky M20 Pozinkovaná ocel		10	25
7	Predepinací trubka S235JR		12,5	25
8	Matice M20 Uhlíková ocel 10.9		2,5	25
9	Tyc se zavítem M20 Uhlíková ocel 10.9		10	25
10	Diferencialní stavba S235JR		6632	-
11	Krycí plechy t=1mm CSN 11 503.1		337	-
12	Podlahový plech t=2mm CSN 11 503.1		682	-

Promítání	Přesnost ISO 2768m	Tolerování ISO 8015	Měřítko 1:100
Hmotnost (kg)		14 309	Formát A1
		Kreslil Ondřej Kostka	Název Hrubá stavba vlaku ComplexTrans
		Datum 23.06.23	Číslo dokumentu 1
Druh dokumentu VÝKRES SESTAVY		1	1