

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh konstrukce sušárenského vozu pro výrobu pecních
keramických válečků**

Autor: Bc. Martin Štěpánek

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.

Akademický rok 2018/2019

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto způsobem bych rád poděkoval panu doc. Ing. Ladislavu Němci, CSc. za cenné rady, dohled a ochotu při tvorbě mé diplomové práce.

Rád bych také poděkoval panu Ing. Janu Roubalovi za jeho věcné připomínky a rady při konzultacích mé diplomové práce a společnosti hob certec s.r.o. za poskytnutí tohoto tématu, rad a aktivní spolupráce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Štěpánek	Jméno Martin		
STUDIJNÍ OBOR	2301T001 „Dopravní a manipulační technika“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Němec, CSc.	Jméno Ladislav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh konstrukce sušárenského vozu pro výrobu pecních keramických válečků			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	50	TEXTOVÁ ČÁST	50	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce obsahuje designérský návrh sušárenského vozu pro výrobu pecních válečků. Návrh čtyř koncepčních variant. Vliv okrajových podmínek na výsledky simulací. Konečné konstrukční řešení.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">sušárenský vůz, keramické pecní válečky, koncepční varianty, podvozek, analýza, CAD, počítačová simulace</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Štěpánek	Name Martin	
FIELD OF STUDY	2301T001 “ Transport Vehicles and Handling Machinery“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Němec,CSc.	Name Ladislav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of a kiln car for production of ceramic rollers		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	50	TEXT PART	50	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis dissert on the design of a kiln car for production of ceramic rollers. The thesis includes four conception variants. Effect of boundary conditions definition on results of the simulation. Final construction design.
KEY WORDS	a kiln car, ceramic rollers, conception variants, analyze, CAD, computer simulation

Obsah

1. Úvod do problematiky zadání	12
1.1. SEZNÁMENÍ SE ZADAVATELEM DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	12
1.1.1. Vlastnosti keramických válečků.....	13
1.1.2. Použití keramických válečků.....	13
1.2. STRUČNÝ POPIS VÝROBNÍHO PROCESU PECNÍCH KERAMICKÝCH VÁLEČKŮ.....	14
1.3. SUŠÁRENSKÝ VŮZ JAKO SUBJEKT VÝROBNÍHO PROCESU	15
1.4. PROVOZNÍ PODMÍNKY PRO SUŠÁRENSKÝ VŮZ	17
1.5. ZÁKLADNÍ POŽADAVKY A ÚDAJE	17
2. Analýza řešení problému	18
2.1. POPIS STÁVAJÍCÍHO VOZÍKU. NEDOSTATKY, JEJICH PŘÍČINY.....	18
2.2. ÚPRAVY STÁVAJÍCÍHO VOZU.....	19
2.3. SPECIFIKACE POŽADAVKŮ	20
2.4. KONCEPČNÍ VARIANTY NOSNÉ ČÁSTI.....	22
2.4.1. Koncepční varianta 1.A.....	22
2.4.2. Koncepční varianta 1.B	22
2.4.3. Koncepční varianta 1.C	23
2.4.4. Koncepční varianta 1.D.....	23
2.5. HODNOCENÍ KONCEPČNÍCH VARIANT	24
2.6. SWOT ANALÝZA.....	25
3. Konstrukční řešení	27
3.1. KONSTRUKČNÍ NÁVRH PŘÍČEK A SLOUPŮ	27
3.1.1. Příčky	27
3.1.2. Sloupy.....	27
3.1.3. Nosná část příčky	30
3.2. VOLBA MATERIÁLU	30
3.3. VLIV OKRAJOVÝCH PODMÍNEK NA ZATÍŽENÍ PŘÍČKY	30
3.3.1. Úloha s oboustranným vetknutím	31
3.3.2. Úloha s jednostranným vetknutím a podporou ve směru osy z	32
3.3.3. Úloha s jednostranným vetknutím, podporou ve směru osy z a definovaným kontaktem	34
3.4. OPTIMALIZACE PŘÍČKY	35
3.5. PODVOZEK.....	39
3.5.1. Definice experimentu:	41
3.5.2. Návrh podvozku s nastavitelným rozvorem.....	42

3.5.3. Výpočetní řešení rámu	43
4. Zhodnocení práce, závěr	48
Seznam použité literatury	50

Seznam obrázků

Obrázek 1 Areál zadavatelské firmy	12
Obrázek 2 Výrobní prostory společnosti.....	12
Obrázek 3 Kontinuální pec (1)	13
Obrázek 4 Válečkový dopravník v kontinuální peci (1)	14
Obrázek 5 Topná tělesa pece (1)	14
Obrázek 6 Fasáda z keramických válečků v Madridu (1)	14
Obrázek 7 Diagram výrobního procesu (1)	14
Obrázek 8 Původní sušárenský vůz.....	15
Obrázek 9 Lisovací pracoviště	15
Obrázek 10 Sušárna.....	16
Obrázek 11 Zavážení válečků do sušárny	16
Obrázek 12 Kladka umístěná na čelníku vozu	16
Obrázek 13 Pohled na naváděcí kolejnici	16
Obrázek 14 Deformace sloupu	18
Obrázek 15 Limitní rozměry sušárny [mm]	19
Obrázek 16 Technologický princip provozního tech. trans. procesu navrhovaného TS (3)....	22
Obrázek 17 Systém uložení keramických nádob na víno pro přepravu lodní dopravou (3)....	22
Obrázek 18 Koncepce bez použití příček.....	23
Obrázek 19 Koncepce se skládanými patry	23
Obrázek 20 Základní provedení skládaného sloupu.....	27
Obrázek 21 Pokročilé provedení skládaného sloupu	27
Obrázek 22 Srovnání skládaných sloupů na obou stranách a kombinace s pevným sloupem.	28
Obrázek 23 Podpora s U-profilem.....	28
Obrázek 24 Podpora s čepem v příčce	29
Obrázek 25 Podpora využívající zubu vystupujícího z příčky.....	29
Obrázek 26 Oboustranné vetknutí.....	31
Obrázek 27 Rozložení napětí oboustranně vetknuté příčky	31
Obrázek 28 Jednostranné vetknutí a podpora ve směru osy z.....	32
Obrázek 29 Rozložení napětí jednostranně vetknuté příčky s podporou ve směru osy z	33
Obrázek 30 Úloha s definovaným kontaktem	34
Obrázek 31 Rozložení napětí jednostranně vetknuté příčky s definovaným kontaktem	34
Obrázek 32 Definování výpočtové úlohy.....	36
Obrázek 33 Rozložení napětí příčky bez odlehčení	37
Obrázek 34 Rozložení napětí příčky s odlehčeními	37
Obrázek 35 Rozložení napětí v konečné geometrii příčky.....	38
Obrázek 36 Globální maximum ve styku čepu s příčkou	38
Obrázek 37 Kritická místa příčky	39
Obrázek 38 Koncepce tvaru rámu	40
Obrázek 39 Schéma experimentu.....	41
Obrázek 40 Podvozek s kluzným vedením	42
Obrázek 41 Půdorys rámu s plynule nastavitelným rozvorem.....	42
Obrázek 42 Bokorys rámu s plynule nastavitelným rozvorem	43
Obrázek 43 Nosný vozík (7)	43
Obrázek 44 Definování výpočtového modelu rámu	43
Obrázek 45 Místo s nejvyšším namáháním.....	44
Obrázek 46 Vyztužení kritického místa rámu	44
Obrázek 47 Kritické místo vyztuženého dílu	45
Obrázek 48 Pohled na konečné provedení vozu	45

Obrázek 49 Ukázka výrobních výkresů a výkresu podsestavy svařence	46
Obrázek 50 Detail pružin tlumících rázy	47
Obrázek 51 Umístění vyložených příček	47
Obrázek 52 Částečně naložený prototypový vůz	48
Obrázek 53 Třísloupový vůz pro extrémně dlouhé válečky	49

Seznam použitých zkratk a symbolů

1. Teplo

t	[°C]	Celsiova teplota
α	[°C ⁻¹]	tepelná roztažnost

2. Prostor a čas

x, y, z		směry kartézského souřadnicového systému
h	[mm]	výška
$y_{1,2}$	[mm]	vzdálenost profilu od země
l	[mm]	vzdálenost podpor profilu

3. Mechanika

m	[kg]	hmotnost
ρ	[kg·m ⁻³]	měrná hmotnost
E	[Gpa]	modul pružnosti v tahu
E_{oh}	[Gpa]	modul pružnosti v ohybu
σ_0	[MPa]	pevnost v ohybu
R_{eH}	[MPa]	mez kluzu horní
R_e, σ_k	[MPa]	mez kluzu v tahu
σ_{red}	[MPa]	redukované napětí
A_5	[%]	tažnost krátké zkušební tyče
KCU 3	[J·cm ⁻²]	vrubová houževnatost
k	[-]	koeficient bezpečnosti

4. Ostatní zkratky

ČSN	české technické normy
TS	technický systém
TS0	výchozí technický stav
TS _{LC}	porovnatelný technický systém

1. Úvod do problematiky zadání



Obrázek 1 Areál zadavatelské firmy

Zadání pro diplomovou práci poskytla firma diamorph hob certec s.r.o., která sídlí v Horní Bříze, městě s bohatou historií keramické výroby. Firma vyrábí keramické válečky do kontinuálních vypalovacích pecí na keramiku. Tyto válečky musí být schopny dlouhodobě odolávat vysokému žáru vypalovacích pecí a zároveň splňovat nároky na přesnost pro spolehlivou činnost pohybového mechanismu. Výrobní plocha v budovách firmy je 5000 m² na celkové ploše pozemku firmy 25 000 m².



Obrázek 2 Výrobní prostory společnosti

1.1. Seznámení se zadavatelem diplomové práce

Diamorph hob certec s.r.o. je 100 % česká výrobní společnost a historie jejího vzniku je zajímavá. Firma byla založena jako HOB CerTec v roce 1995 v Horní Bříze v České republice německým keramickým manažerem Heinzem Pöhlmannem jako česko-německý joint venture společně s fy. Keramika Horní Bříza - výrobcem dlažby a obkladů.

Heinz Pöhlmann poskytl keramické know-how, firma z Horní Břízy prostory a lidské zdroje. Společnost se profiluje jako malá moderní firma používající nástroje „lean manufacturing“ snažící se o neustálé zlepšování. Společnost se řadí mezi světové výrobce válečků s až 10%

podílem na světovém trhu a 95 % vývozem do více než 30 zemí světa. Koncem roku 2011 byla firma prodána švédské investiční skupině Diamorph a od roku 2012 je oficiálně registrována pod názvem diamorph hob certec s.r.o. V roce 2017 investovala společnost 3 mil. € na výstavbu nové pece, sušárny a inovaci sušárenských vozů. V nové peci je možno vyrábět pravděpodobně nejdelší válečky na světě dlouhé až 6,5 m. V současné době probíhá výrobní proces ve 3 směnách, 24 hodin denně a 7 dní v týdnu, přičemž 30 lidí se přímo podílí na výrobním procesu s roční kapacitou až 500 000 válečků. Firma nabízí kompletní portfolio produktů zákazníkům z keramického průmyslu. Použitím nástrojů „lean manufacturing“ docilují včasného dodání výrobků zákazníkům a rychlé změny vyráběného typu sortimentu, laserová kontrola každého z válečků zaručuje dodání pouze bezvadných válečků. Vnější průměry vyráběných válečků se pohybují v rozmezí 15-150 mm a délkou až 6,5 m. (1)

1.1.1. Vlastnosti keramických válečků

Materiál	Al ₂ O ₃
Hustota [g·cm⁻³]	2,35-2,8
Pevnost v ohybu [MPa]	45-65
Modul pružnosti [GPa]	70-100
Tepelná roztažnost [10⁻¹·1°C⁻¹]	5,5-5,9
Maximální teplota použití [°C]	1240-1350
Tolerance průměru [mm]	± 0,5
Tolerance délky [mm]	± 2

Tabulka 1 mechanická vlastnosti keramických válečků

1.1.2. Použití keramických válečků

Přes 95% vyrobených válečků je dodáváno výrobcům keramických dlažeb a obkladů do kontinuálních pecí.



Obrázek 3 Kontinuální pec (1)

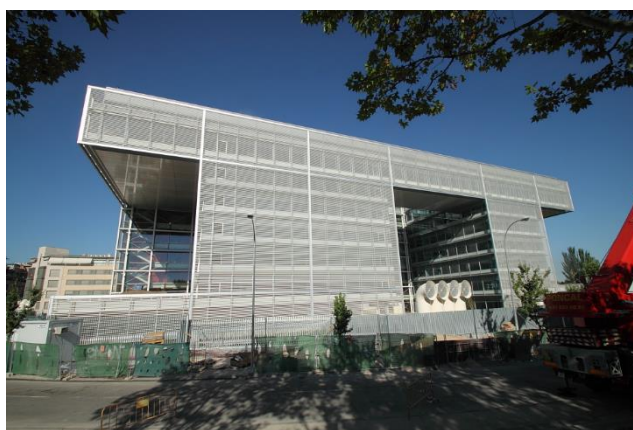


Obrázek 4 Válečkový dopravník v kontinuální peci (1)

Méně časté, ale velmi zajímavé aplikace použití válečků jako topných těles v pecích a jako prvků architektury.



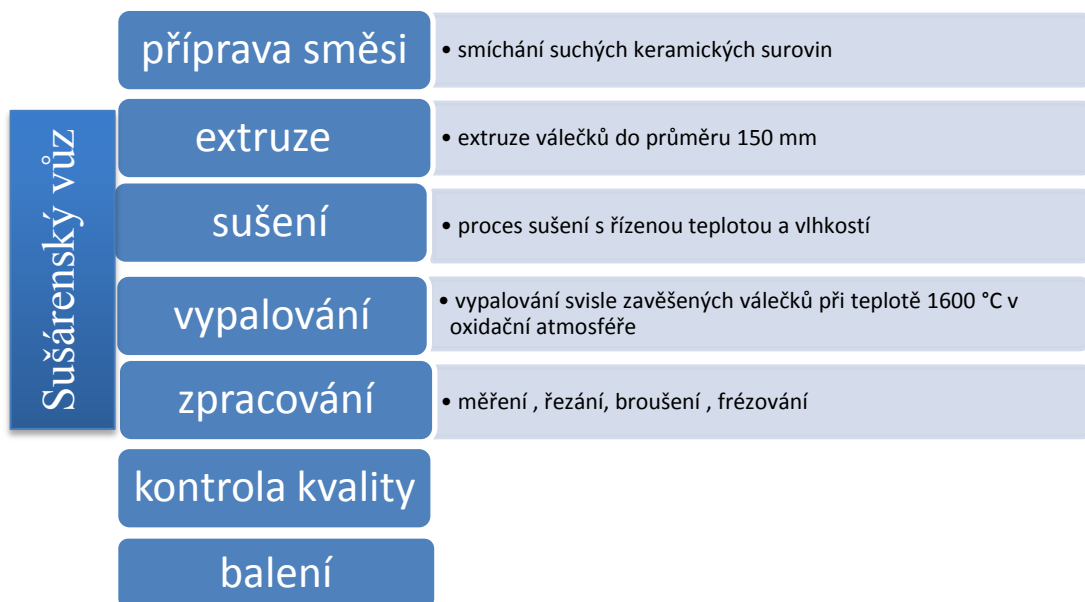
Obrázek 5 Topná tělesa pece (1)



Obrázek 6 Fasáda z keramických válečků v Madridu (1)

1.2. Stručný popis výrobního procesu pecních keramických válečků

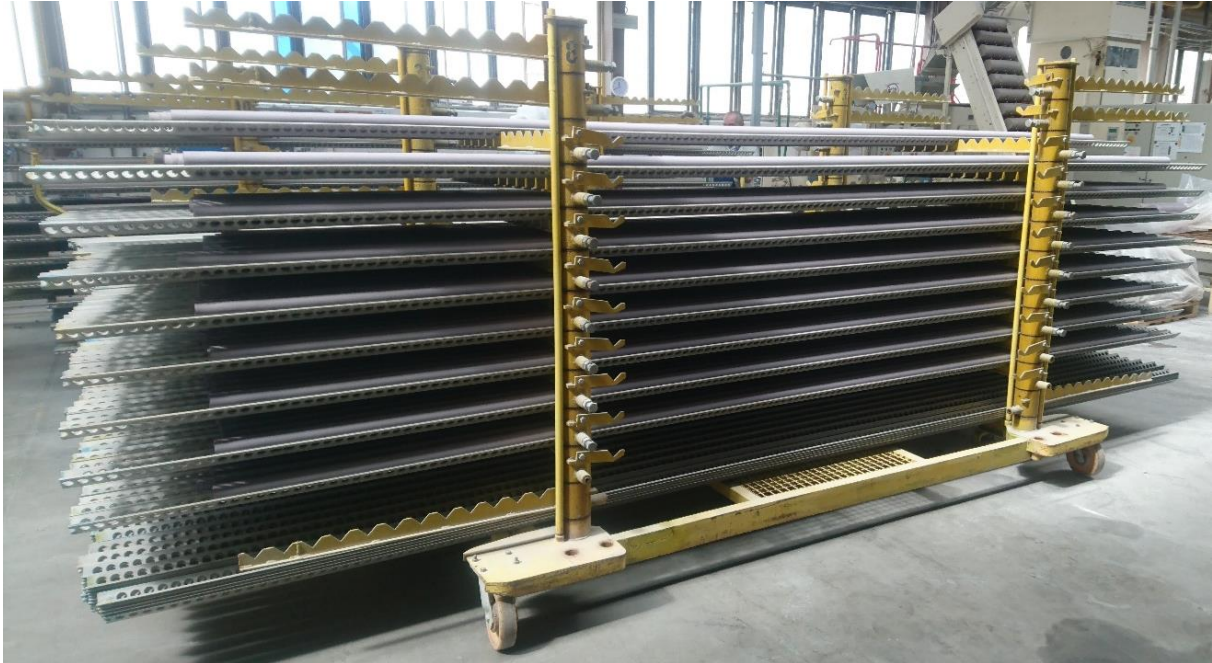
Výroba pecního válečku se skládá v podstatě z následujících kroků:



Obrázek 7 Diagram výrobního procesu (1)

1.3. Sušárenský vůz jako subjekt výrobního procesu

Úkolem sušárenského vozu je nesení a transport mezi dílčími objekty technologického procesu výroby. Je to v podstatě manipulační prostředek, který zajišťuje přemístění polotovarů finálního výrobku od lisu do sušárny a odtud pak k vypalovací peci. Od vypalovací pece se vrací zpět k lisu a čeká na další cyklus.



Obrázek 8 Původní sušárenský vůz

Prvním pracovištěm, ve kterém se sušárenský vůz uplatňuje ve výrobním procesu, je pracoviště lisu. Z ústí lisovacího stroje označeného pozicí 1 je z keramické hmoty vylisován základní polotovar válečku. Ten z lisovacího stroje vychází plynule v požadovaném rozměru do vedení s měkkými válečky (pozice 2). Obsluha uchopí prázdný nosný profil ze zásobníku (pozice 3), přemístí jej vedle vedení (2), které je sklopné do strany a váleček se tak do něho skutálí najednou po celé své délce. Následně je profil již s válečkem umístěn na přistavený sušárenský vůz a operace se opakuje.



Obrázek 9 Lisovací pracoviště

Po naplnění kapacity je vůz zavezen do sušárny. Pro manipulaci je zapotřebí nejméně dvou osob, které vůz tlačí za odnímatelná madla.



Obrázek 10 Sušárna



Obrázek 11 Zavážení válečků do sušárny

Před sušárnu je položena naváděcí kolejnice. Kladka umístěná ve středu čelníku vozu je vedena kolejnicí a ulehčuje tak zavezení vozu do sušárny tak, aby nedošlo ke kolizi válečků se stěnami sušárny.



Obrázek 12 Kladka umístěná na čelníku vozu



Obrázek 13 Pohled na naváděcí kolejnici

1.4. Provozní podmínky pro sušárenský vůz

Přestože celá část výrobního procesu, jejíž se sušárenský vůz účastní, probíhá v zastřešené výrobní hale, je vůz vystaven velmi nepříznivým podmínkám jak z hlediska mechanického namáhání, tak i z hlediska tepelně-chemického působení okolního prostředí. Vůz musí z hlediska pevnosti odolávat poměrně velkému statickému zatížení způsobeného tíhou nesených válečků. Dále se k tomuto zatížení však vysokou měrou přidává zatížení dynamické, které je ve svislém směru způsobeno především nerovnostmi podlahy, které musí vůz při pohybu překonávat. Tyto vlivy působí velmi negativně na používaná silikonová kolečka vozu, která jsou na hranici své únosnosti. Druhým směrem, ve kterém působí dynamické síly, je směr vodorovný. Síly působící v tomto směru mohou být v určitých krajních situacích hůře predikovatelné a velmi nebezpečné. Jsou to okamžiky, kdy dochází k náhlé změně hybnosti (rychlosti) vozu. Jedním z nejrizikovějších okamžiků, který může nastat, je náraz spodní části vozu do překážky. Vlivem setrvačných sil působí naložené válečky velmi nepříznivě na konstrukci, která je v tomto horizontálním směru mnohem méně odolná nežli ve směru svislém.

Vzhledem ke skutečnosti, že v bezprostřední blízkosti naloženého vozu se pohybují lidé, je nutné toto zvýšené riziko promítnout do výpočtové části konstrukčního procesu v podobě zvýšeného zatížení a zvýšeného koeficientu bezpečnosti.

Během procesu vysoušení válečků, je naložený vůz uvnitř sušárny vystaven teplotám až 95°C, osmdesátiprocentní vlhkosti vzduchu a kyselému prostředí, které je dáno keramickou hmotou.

1.5. Základní požadavky a údaje

Zadání zákazníka:

Aktuálně jsou používány dva typy vozů.

Nahrazovat se bude vůz pro standardní rozměry válečků.

1) Zvětšení kapacity

- aktuální stav => přetížení, nedostatečná kapacita
- požadované max. zatížení 2130 kg
- ideální by bylo zvýšení nosnosti na 2700 kg, tj. 90 válečků á 24 kg váleček + á 6 kg profil, tato podmínka je podmíněna nezvýšenou hmotností vozu jako takového, v ideálním případě odlehčení (hmotnost stávajícího vozu přes 1000 kg)
- kolečka použitá => nosnost 1300 Kg/kolečko, pro výpočet se uvažuje 3x 1300 = nosnost (aktuálně na hranici přetížení), možnost použít jiná, pouze však, pokud bude materiál vhodný pro pohyb po betonové podlaze

2) Větší typ vozu => aktuálně není předmětem zkoumání

Návrh zadání:

inovativní konstrukce sušárenského vozu pro výrobu keramických pecních válečků

- cíl zvýšení nosnosti na 2700 kg
- zachování nebo snížení hmotnosti vozu
- dodržení dalších technologických a ergonomických požadavků výroby
- inovace v oblasti koleček možná

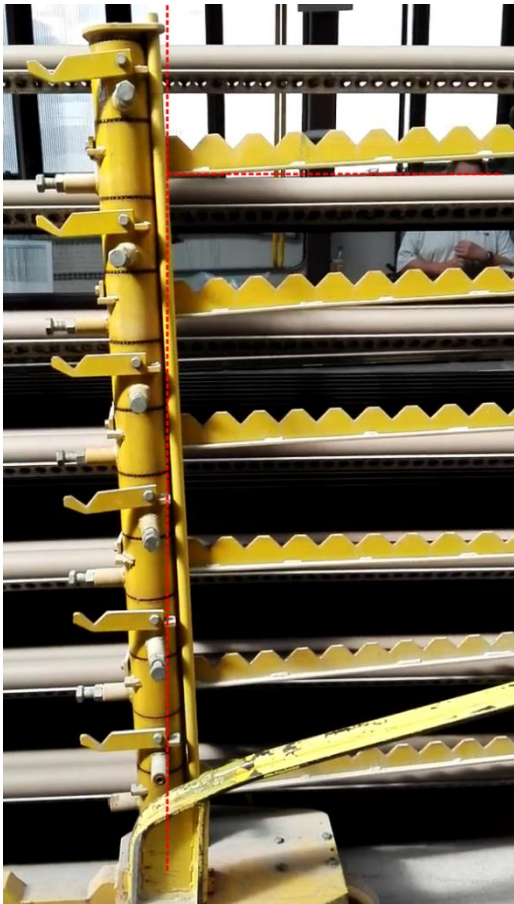
2. Analýza řešení problému

2.1. Popis stávajícího vozíku. Nedostatky, jejich příčiny.

Vůz, který je v provozu v současné době již 25 let, byl navržen pro sušení válečků menších rozměrů, tedy i hmotnosti. Již mnohaletým trendem je zvětšování válečků, jakožto nutnosti pro dosažení požadované pevnosti a tuhosti. Zákazníci, výrobci dlažby a obkladů stále zvětšují rozměry svých výrobků nebo vypalují velké pláty v jednom kuse, které následně řežou na více kusů menších rozměrů. To vše má za následek zvětšování šířky kontinuálních pecí a tedy požadavku na delší keramické válečky.

V dnešní době se však současný vůz dostal za své maximum a jeho setrvání jako článku výrobního procesu se stává neefektivním.

Deformace vozu, od určitého rozměru válečků, je natolik velká, že podmiňuje vynechávání vždy jednoho patra, což snižuje využitelnou kapacitu vozu takřka na polovinu.



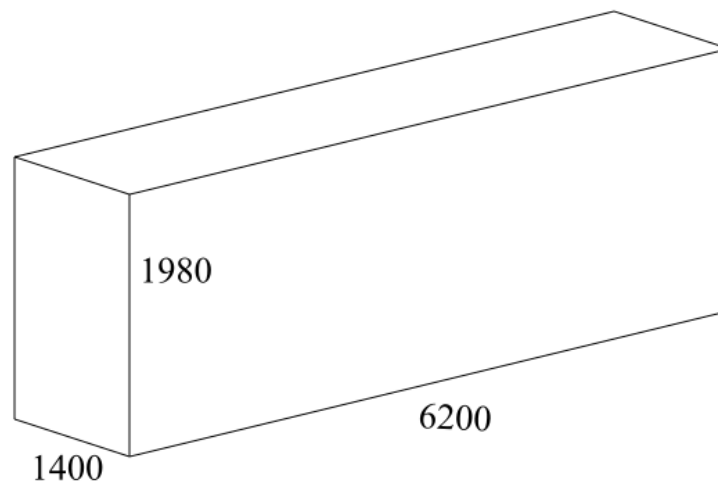
Obrázek 14 Deformace sloupu

Vzhledem ke skutečnosti, že na světě je jen několik málo výrobců keramických válečků a tedy konkurenčních řešení sušárenského vozu, byl jako výchozí technický produkt zvolen současně používaný sušárenský vůz.

TS_{LC} = TS₀ : Současně používaný sušárenský vůz

Současně používaný vůz TS0, je dvousloupové třinácti patrová konstrukce s pevným rámem. Na každém ze dvou sloupů je nainstalováno 12 otočných ramen pro umístění V-profilů s válečky, které tak tvoří soustavu vetknutých nosníků. Hlavními benefity tohoto provedení jsou snadná a rychlá manipulace s rameny při nakládání resp. vykládání vozů, stejně jako fakt, že při vykládání vozu zůstávají ramena stále součástí vozu a není tedy nutno je skladovat odděleně.

Na druhé straně musí být samotné sloupy, z důvodu jednostranného vetknutí ramen, velmi robustní a v současné době nedokáží zajistit dostatečnou tuhost konstrukce, což způsobuje již výše zmíněné snížení kapacity vozu. Pevné provedení rámu vozu také nedovoluje změnu rozteče mezi sloupy resp. rameny vozu a pro různé délky vyráběných válečků tak není možné nastavit optimální rozteč pro minimalizaci průhybu válečku ve V-profilu.



Obrázek 15 Limitní rozměry sušárny [mm]

2.2. Úpravy stávajícího vozu

Úpravy vozu zvyšující jeho pevnost a tuhost jsou podmíněny otočným systémem ramen, který by měl být i po úpravách zachován.

První možností je rozeprání (spojení) horních částí obou sloupů dohromady. Odklon, resp. příklon jednoho sloupu, by interferoval s nakloněním druhého a celková deformace by se snížila.

Druhá úprava by byla možná provést na volném konci příček. Z konce příčky by směrem vzhůru vedl prvek, který by následně podpíral další přidané patro. Byl by tak změněn charakter okrajových podmínek a z vetknutého nosníku by byl nosník na dvou podporách.

Otočný mechanismus je ale v sušárně velmi zatěžován a vyžaduje častou a složitou údržbu. Také hmotnost vozu, který je navržen s vetknutými rameny, je vysoká a úpravou ještě vzroste.

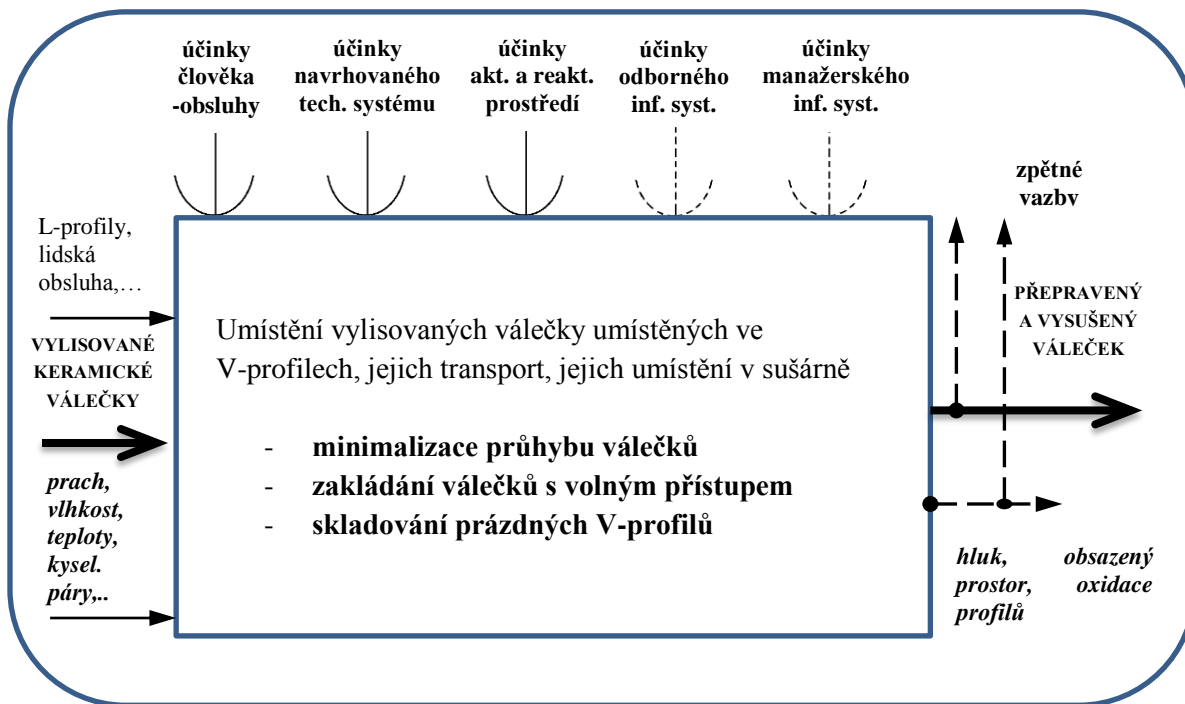
Po zvážení všech přínosů přestavby prezentovaných zadavateli jím bylo rozhodnuto o návrhu zcela nového vozu a to i z důvodu nízké efektivity přestavby vozu stávajícího.

2.3.Specifikace požadavků

Ia. Specifikace požadavků na reflektované vlastnosti TS - jen k PROVOZNÍ ETAPĚ ŽIVOTNÍHO CYKLU TS!			
Třída/podtřída vlastností/● Vlastnost / - indikátor vlastnosti	Hodnota indikátoru	Váha v TS	
1 Pož. k transformačním funkcím/účinkům - k Operátoru TS, Operandu i procesu		{0 - 4}	
Technický systém: Sušárenský vůz pro výrobu keramických pecních válečků			
● Umožnit skladování válečků		4	
- <i>minimální požadovaná nosnost</i>	2 700 Kg		
- <i>maximální délka nesených válečků</i>	5 500 mm		
- <i>maximální průměr nesených válečků</i>	65 mm		
- <i>minimální kapacita</i>	90 ks válečků		
- <i>umožnit co nejvyšší možnost proudění vzduchu okolo válečků</i>	požadováno		
- <i>maximální rozměry</i>	4200 x 1 980 x 110 mm		
● Maximální zatížení při provozu			
- <i>statickou silou vertikální směru</i>	27 000 N		
- <i>dynamickou silou vertikální směru</i>			
- <i>dynamickou silou horizontálního směru</i>			
● Odolnost vlivům prostředí výroby			
- <i>minimální odolnost zvýšeným teplotám</i>	110 °C		
- <i>odolnost vůči korozi v kyselém a vlhkém prostředí</i>	požadováno		
● Zajistit volný přístup k aktuálně nakládanému/vykládanému patru	požadováno		
● Zajistit zachování ramen součástí vozu i po jeho vyložení	požadováno		
● Zajistit uložení prázdných V-profilů	požadováno, počet roven kapacitě vozu		
Proces nakládání/vykládání a transportu:			
● Zamezit možnosti vzájemného kontaktu mezi jednotlivými válečky			
● Zajistit minimalizaci průhybu L-profilu s válečkem			
● Zajistit snadnou manipulovatelnost lidskou silou	požadováno		
- <i>maximální hmotnost</i>	≥ 1000 kg		
2 Pož. k provozuschopnosti - k místu provozování časovému rozmezí a servisu		{0 - 4}	
● Prostedí:		3	
- <i>souhrnná charakteristika</i>	zastřešená hala s betonovou podlahou, sušárna		
● Spolehlivost:			
- <i>souhrnná charakteristika</i>	vysoká		
● Životnost:			
- <i>souhrnná charakteristika</i>	min. 10 let		
● Údržba:			
- <i>souhrnná charakteristika</i>	co nejjednodušší		
● Náklady na práci/provoz:			
- <i>souhrnná charakteristika</i>	minimální		

4 Pož. k ostatním TS a Tg v životním cyklu TS - k dostupným i vyvolaným		
4.1 Bezpečnost ve všech životních etapách, ergonomie		{0 - 4}
• Vhodnost pro konstruování, Tg. a Org. Přípravy. výroby:		3
- <i>souhrnná charakteristika</i>	vysoká	
• Náročnost na vyrobení		
- <i>charakteristika</i>	zámečnická dílna	
• Druh výroby:		
- <i>souhrnná charakteristika</i>	kusová	
- <i>využití dostupných technologií ve firmě</i>	není nutné	
- <i>plánovaný počet vyrobených kusů</i>	25 ks	
4.2 Požadavky k likvidaci:		{0 - 4}
• Demontovatelnost		2
- <i>souhrnná charakteristika</i>	snadná	
• Recyklovatelnost		
- <i>souhrnná charakteristika</i>	snadná a vysoká	
5 Pož. k aktiv. a reaktiv. prostředí - k mater. a energ. působícím a vstup. a výstupním		{0 - 4}
• Ekologičnost materiálů:		3
- <i>souhrnná charakteristika</i>	preference ekologické materiály	
• Ochrana podlahy před poškozením kolečky vozu		
- <i>souhrnná charakteristika</i>	požadováno	
• Chemická interakce mezi materiálem vozu a mat. V-profilu		
- <i>souhrnná charakteristika</i>	nutno zamezit	
6 Pož. k odborným informacím - dostupným i vyvolaným		{0 - 4}
• Technická dokumentace pro výrobu:		3
- <i>souhrnná charakteristika</i>	požadováno	
• Další předpisy a normy:		
- <i>bezpečnost výrobku</i>	dodržení	
- <i>bezpečnost práce</i>	dodržení	

Tabulka 2 Specifikace požadavků (2)



Obrázek 16 Technologický princip provozního tech. trans. procesu navrhovaného TS (3)

2.4. Konceptní varianty nosné části

2.4.1. Konceptní varianta 1.A

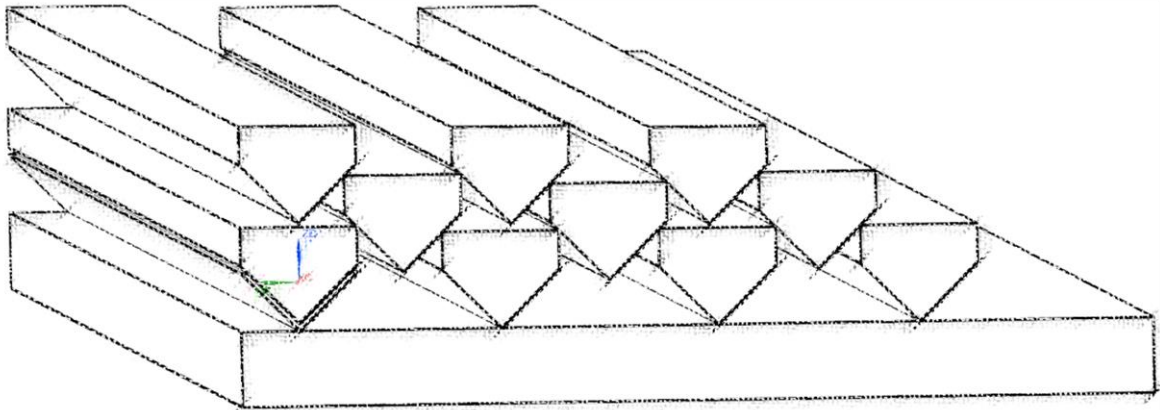
Stávající provedení vozu s otočnými sloupy.

2.4.2. Konceptní varianta 1.B

Koncepce zobrazená na obrázku 18 nepoužívá žádných příček. Váleček je umístěn, stejně jako v ostatních případech, v perforovaném V-profilu. Přes něj je dán ještě jeden U-profil, který tvoří uzavřenou jednotku pro váleček. Celé jednotky jsou skládány na vůz a šetří tak prostor, který jinak zabírá výška příček. Jedná se o obdobu starověkého způsobu přepravy vína pro moři.



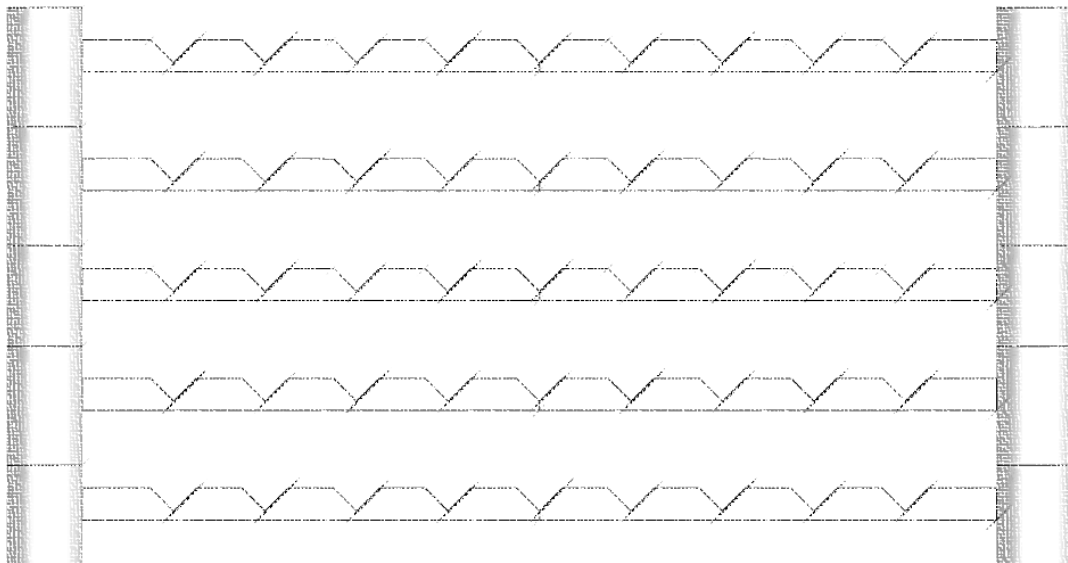
Obrázek 17 Systém uložení keramických nádob na víno pro přepravu lodní dopravou (3)



Obrázek 18 Konceptce bez použití příček

2.4.3. Konceptční varianta 1.C

Tato koncepce řeší přidání dalšího patra nasazením na osazení předešlého. Oproti původním vozům jsou příčky podepřeny na obou svých koncích.



Obrázek 19 Konceptce se skládanými patry

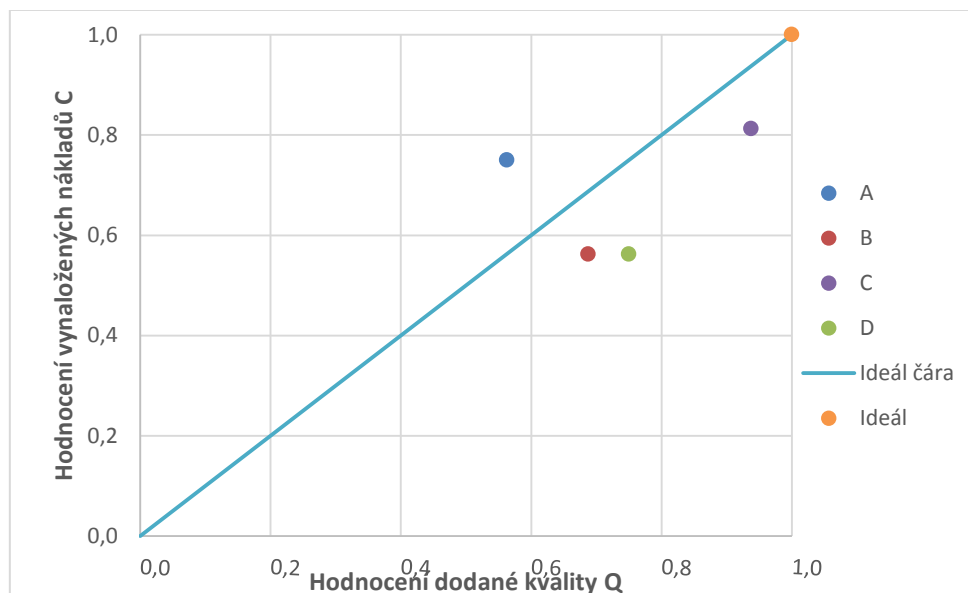
2.4.4. Konceptční varianta 1.D

Poslední posuzovaná konceptční varianta pohlíží na každé patro jako na samostatnou jednotku. Na podvozek (hlavní rám) jsou pokládány subtilnější rámy; z půdorysu obdélníkového tvaru vzniklého podélným spojením příček téhož patra.

2.5. Hodnocení koncepčních variant

Alternativa:			A	B	C	D	Ideál
Symbol	Kritéria hodnocení		Hodnocení vhodnosti { 0 až 4}				
Q	<i>pro kvalitu</i>	<i>dodanou</i> naložení válečků	4	2	3	2	4
		převoz válečků	3	2	3	3	4
		kapacita	1	4	4	3	4
		skladování prázdného vozu, V-profilů, pater, apod.	4	1	3	1	4
		součet hodnocení:	$\{ 0 \div \text{součet}_{\text{ideál}} \} = \{ 0 \div 4 \}$	12	9	13	9
	normované hodnocení:	$\{ 0 / \text{součet}_{\text{ideál}} \} \Rightarrow \{ 0 \div 1 \}$	0,75	0,56	0,81	0,56	1
C	<i>pro kvalitu</i>	<i>dodanou</i> na vývoj	2	3	3	3	4
		na výrobu	1	3	3	2	4
		na provoz	2	1	3	1	4
		na údržbu	2	2	3	3	4
		na likvidaci	2	2	3	3	4
	součet hodnocení:	$\{ 0 \div \text{součet}_{\text{ideál}} \} = \{ 0 \div 4 \}$	9	11	15	12	20
	normované hodnocení:	$\{ 0 / \text{součet}_{\text{ideál}} \} \Rightarrow \{ 0 \div 1 \}$	0,56	0,69	0,94	0,75	1

Tabulka 3 hodnocení vhodnosti jednotlivých variant (4)



Graf 1 diagram s hodnocením navržených alternativ (4)

Z diagramu je patrné, že (sub)optimálním návrhem je varianta C, neboť má nejpříznivější hodnoty dodané kvality a vynaložených nákladů.

2.6. SWOT analýza

Ia. Specifikace požadavků na reflektované vlastnosti TS - jen k PROVOZNÍ ETAPĚ ŽIVOTNÍHO CYKLU TS!			SWOT pro výchozí stav						
Třída/podtřída vlastností/• Vlastnost / - indikátor vlastností	Hodnota indikátoru	Váha v TS	Hodnota splnění	Hodnocení	Váž. hodnocení				
1 Pož. k transformačním funkcím/účinkům - k Operátoru TS, Operandu i procesu		{0 - 4}	{0 - ****}	{0 - 4}	{0 - 1}				
Technický systém: Sušárenský vůz pro výrobu keramických pecních válečků									
• Umožnit skladování válečků		4	****	4	Max.váž. hodn: 1 Váž. Hodn.: 1 Váž.h./Max.v.h. 1				
- minimální požadovaná nosnost	2 700 Kg								
- maximální délka nesených válečků	5 500 mm								
- maximální průměr nesených válečků	65 mm								
- minimální kapacita	90 ks válečků								
- umožnit co nejvyšší možnost proudění vzduchu okolo válečků	požadováno								
- maximální rozměry	4200 x 1 980 x 110 mm								
• Maximální zatížení při provozu									
- statickou silou vertikální směru	27 000 N								
- dynamickou silou vertikální směru									
- dynamickou silou horizontálního směru									
• Odolnost vlivům prostředí výroby									
- minimální odolnost zvýšeným teplotám	110 °C								
- odolnost vůči korozi v kyselém a vlhkém prostředí	požadováno								
• Zajistit volný přístup k aktuálně nakládanému/vykládanému patru	požadováno								
• Zajistit zachování ramen součástí vozu i po jeho vyložení	požadováno								
• Zajistit uložení prázdných L-profilu	požadováno, počet roven kapacitě vozu								
Proces nakládání/vykládání a transportu:									
• Zamezit možnosti vzájemného kontaktu mezi jednotlivými válečky									
• Zajistit minimalizaci průhybu L-profilu s válečkem									
• Zajistit snadnou manipulovatelnost lidskou silou	požadováno								
- maximální hmotnost									
2 Pož. k provozuschopnosti - k místu provozování časovému rozmezí a servisu			{0 - ****}	{0 - 4}	{0 - 1}				
• Prostředí:		3	***	3	Max.váž.hodn: 0,75 Váž. Hodn.: 0,5625 Váž.h./Max.v.h. 0,75				
- souhrnná charakteristika	zastřešená hala s betonovou podlahou, sušárna								
• Spolehlivost:									
- souhrnná charakteristika	vysoká								
• Životnost:									
- souhrnná charakteristika	min. 10 let								
• Údržba:									
- souhrnná charakteristika	co nejjednodušší								
• Náklady na práci/provoz:									
- souhrnná charakteristika	minimální								

Ib. Specifikace požadavků na reflektované vlastnosti TS - ke VŠEM ETAPÁM ŽIVOTNÍHO CYKLU TS !			SWOT pro výchozí stav		
Třída/podtřída vlastností/• Vlastnost / - indikátor vlastností	Hodnota indikátoru	Váha v TS	Hodnota splnění	Hodnocení	Váž. hodnocení
3 Pož. k člověku a ost. Živým bytostem - k bezpečnosti, zdraví a příjemnosti			{0 - ****}	{0 - 4}	{0 - 1}
3.1 Bezpečnost ve všech životních etapách, ergonomie					
- <i>stabilita proti převržení a samovolnému pohybu ramen</i>	vysoká	4	***	3	Max.váž.hodn: 1
- <i>bezpečnosti proti poranění</i>	vysoká				Váž. Hodn.: 0,75
- <i>odnímatelná manipulační madla</i>	požadováno				Váž.h./Max.v.h. 0,75
3.2 Příjemnost pro člověka (ergonomie, apod.):			{0 - ****}	{0 - 4}	{0 - 1}
- <i>snadné zakládání válečků v L-profilech</i>	požadováno	3	****	4	Max.váž.hodn: 0,75
- <i>snadná manipulace s rameny</i>	požadováno				Váž. Hodn.: 0,75
- <i>minimalizovat odpor vozu při jeho pohybu</i>	typ a rozměry koleček				Váž.h./Max.v.h. 1
4 Pož. k ostatním TS a Tg v životním cyklu TS - k dostupným i vyvolaným					
4.1 Bezpečnost ve všech životních etapách, ergonomie			{0 - ****}	{0 - 4}	{0 - 1}
• Vhodnost pro konstruování, Tg. a Org. Přípravy. výroby:		3	****	4	Max.váž.hodn: 0,75
- <i>souhrnná charakteristika</i>	vysoká				Váž. Hodn.: 0,75
• Náročnost na vyrobení					Váž.h./Max.v.h. 1
- <i>souhrnná charakteristika</i>	zámečnická dílna				
• Druh výroby:					
- <i>souhrnná charakteristika</i>	kusová				
- <i>využití dostupných technologií ve firmě</i>	není nutné				
- <i>plánovaný počet vyrobených kusů</i>	25 ks				
4.2 Požadavky k likvidaci:			{0 - ****}	{0 - 4}	{0 - 1}
• Demontovatelnost		2	***	3	Max.váž. hodn: 0,5
- <i>souhrnná charakteristika</i>	snadná				Váž. Hodn.: 0,375
• Recyklovatelnost	snadná a vysoká				Váž.h./Max.v.h. 0,75
- <i>souhrnná charakteristika</i>					
5 Pož. k aktiv. a reaktiv. prostředí - k mater. a energ. působícím a vstup. a výstupním			{0 - ****}	{0 - 4}	{0 - 1}
• Ekologičnost materiálů:		3	****	4	Max.váž. hodn: 0,75
- <i>souhrnná charakteristika</i>	preference ekologické materiály				Váž. Hodn.: 0,75
• Ochrana podlahy před poškozením kolečky vozu					Váž.h./Max.v.h. 1
- <i>souhrnná charakteristika</i>	požadováno				
• Chemická interakce mezi mater. vozu a mat. L-profilu					
- <i>souhrnná charakteristika</i>	nutno zamezit				
6 Pož. k odborným informacím - dostupným i vyvolaným			{0 - ****}	{0 - 4}	{0 - 1}
• Technická dokumentace pro výrobu:		3	***	3	Max.váž.hodn: 0,75
- <i>souhrnná charakteristika</i>	požadováno				Váž. Hodn.: 0,5625
• Další předpisy a normy:					Váž.h./Max.v.h. 0,75
- <i>bezpečnost výrobku</i>	dodržení				
- <i>bezpečnost práce</i>	dodržení				

Tabulka 4 SWOT analýza (5)

3. Konstrukční řešení

Pro finální návrh, výpočty a optimalizace byl sušárenský vůz rozdělen do dvou hlavních konstrukčních celků, a to na rám (podvozek) a příčky s nosnými sloupy.

3.1. Konstrukční návrh příček a sloupů

3.1.1. Příčky

Jako první byl řešen návrh příček a sloupů sušárenského vozu. Je nutné znát především hmotnost konečného provedení horní části vozu, která je posléze jednou z hlavních zátěžních sil působících na navrhovaný rám.

Příčkami se rozumí část vozu, která je umístěna na základním rámu. Jejím úkolem je uložení válečků v požadovaných roztečích ve směrech kolmých na podélnou osu vozu.

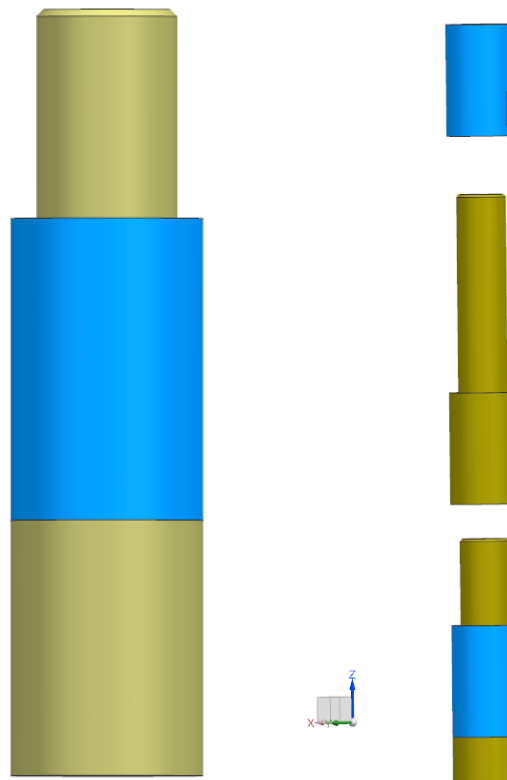
3.1.2. Sloupy

U varianty vozu se skládaným sloupem vzniká problém vyklánějícího se sloupu vlivem vůlí. Tento fenomén byl postupně eliminován změnou samotné konstrukce příček.

Skládaný sloup je tvořenou trubkou s osazením. Základní varianta zobrazená na obrázku 20 využívá vždy stejné segmenty, to znamená, že osazení na každém patře vozu je stejné.



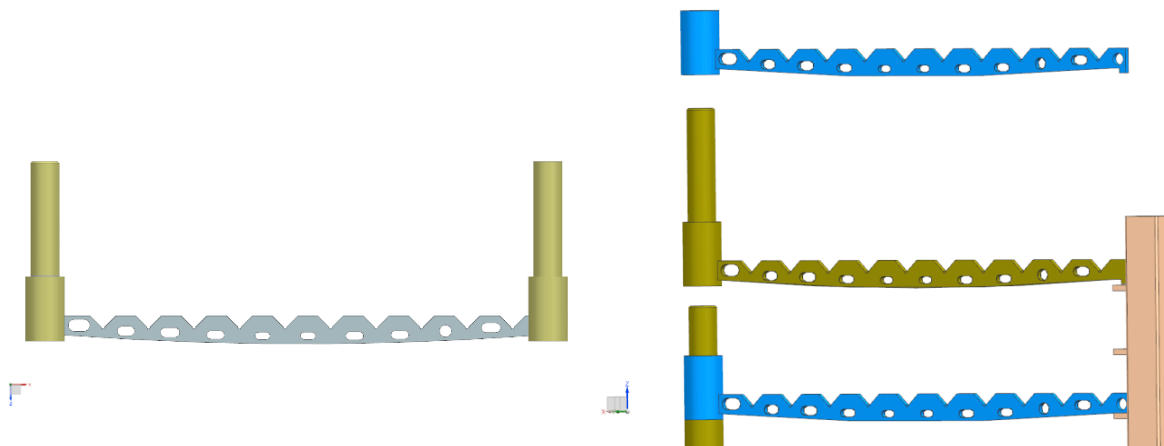
Obrázek 20 Základní provedení skládaného sloupu



Obrázek 21 Pokročilé provedení skládaného sloupu

Jako vhodnější uspořádání z hlediska vůle se však ukázala koncepce s pravidelně se střídajícími segmenty s dlouhým osazením procházejícím dvěma patry a jedním patrem volně průchozím, jak je patrné z obrázku 21.

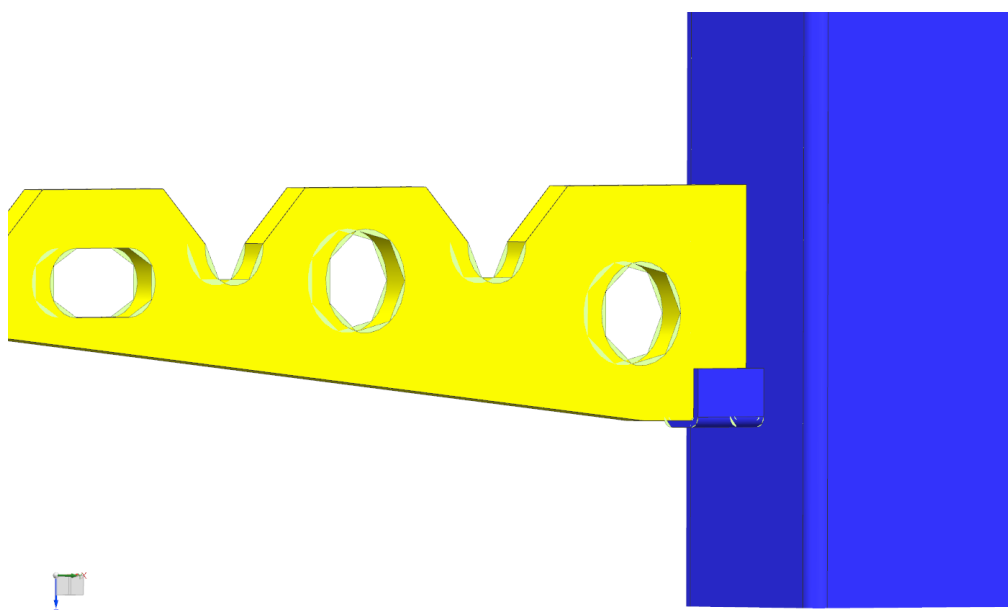
Dalším krokem k omezení naklánění příček bylo nahrazení jednoho skládaného sloupu pevným opěrným sloupem.



Obrázek 22 Srovnání skládaných sloupů na obou stranách a kombinace s pevným sloupem

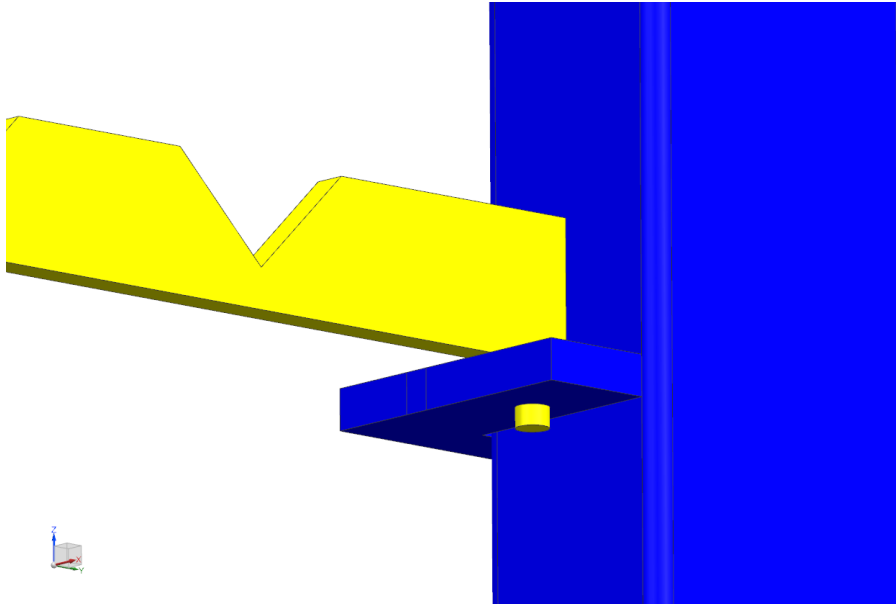
Posledním konstrukčním prvkem ovlivňující naklánění příček vlivem vůlí je způsob podepření příčky na straně pevného sloupu. Od počátku byla snaha navrhnout spoj s maximálním ohledem na snadnost založení patra a na samotnou výrobu spoje.

První varianta spoje je zobrazena na obrázku 23. Jedná se o U-profil, do kterého příčka zapadá. Toto řešení splňuje požadavky na snadné použití a výrobu. Zajišťuje přenos sil ve směru osy z , osy y a rotaci okolo osy z .



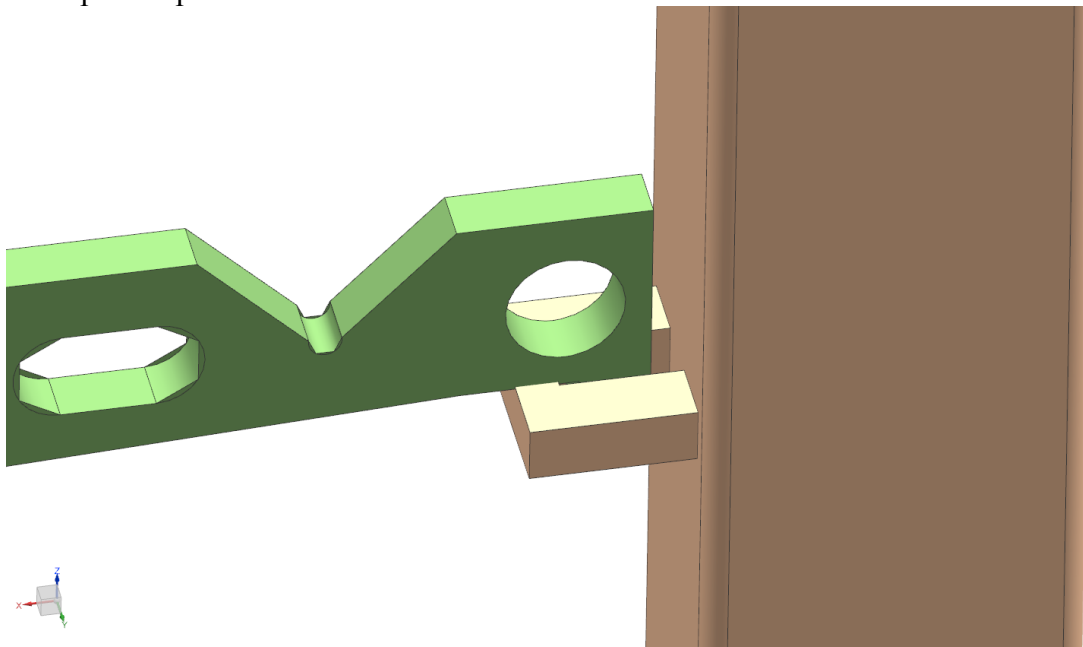
Obrázek 23 Podpora s U-profilem

Zde bylo omezeno naklání pater prostřednictvím změny způsobu podepření příčky na straně pevného sloupu tak, aby přenášelo síly i ve směru osy x . Toto bylo dosaženo pomocí podpory s otvorem a do ní zapadajícím čepem na konci příčky.



Obrázek 24 Podpora s čepem v příčce

Toto řešení bylo upraveno s ohledem na technologičnost konstrukce, kde na konci příčky namísto čepu, byl ponechán zub, který po nasazení patra zapadl do odpovídajícího otvoru. Detailní pohled provedení na obrázku 25.



Obrázek 25 Podpora využívající zubu vystupujícího z příčky

3.1.3. Nosná část příčky

Tato část příčky je v přímém kontaktu s nosným V-profilem a jejím úkolem je bezpečné uložení válečku tak, aby nemohlo dojít k jejich nechtěnému kontaktu s jinou částí vozu nebo jiným válečkem. Kromě požadavků na pevnost vyplývajících ze zatížení příčky je zde kladen požadavek na umožnění co nejplynulejšího proudění vzduchu v sušárně a nízké hmotnosti s ohledem na snadnou manipulaci.

Tato část příčky byla nejvíce podrobena výpočtovým optimalizacím. Při definování úlohy tak, aby její chování co nejvíce odpovídalo reálnému stavu s omezením náročnosti výpočtu, bylo z počátku provedeno více variant definování okrajových podmínek úlohy. Vzhledem k jejich nezanedbatelné influenci na výsledek výpočtu budou jednotlivé podmínky diskutovány v následující části.

3.2. Volba materiálu

Hlavními kritérii při volbě materiálu byly v tomto pořadí mez pevnosti v tahu, svařitelnost, cena a další přidané hodnoty jako je korozivzdornost.

Jako první byla zvolena konstrukční ocel třídy 11 konkrétně ocel s označením ČSN 11 523 z mezí kluzu $R_{eH} = 355$ MPa. (6)

Provedením výpočtových simulací popsaných v následném textu bylo rozhodnuto o použití materiálu ČSN 13 220 pro výrobu příček. Sušárenský vůz je přímo manipulován lidskou obsluhou, proto také výpočtový model musel být z důvodu výpočtové náročnosti značně zjednodušen. Toto vše vedlo k požadavku bezpečnostního koeficientu $k = 2,5$ a tedy potřebě použití materiálu s vyšší pevností.

Základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 5.

Re [MPa] min	Rm [MPa]	A ₅ [%]	KCU 3 [J.cm ⁻²]	E [GPa]
430	590-740	17	Napříč 49/podél 59	206

Tabulka 5 Mechanické vlastnosti oceli 13 220 (6)

Svařitelnost podmíněná 150 °C. (6)

3.3. Vliv okrajových podmínek na zatížení příčky

Pro základní určení vlivu okrajových podmínek byly provedeny výpočtové simulace, ve kterých byly tyto podmínky definovány různým způsobem.

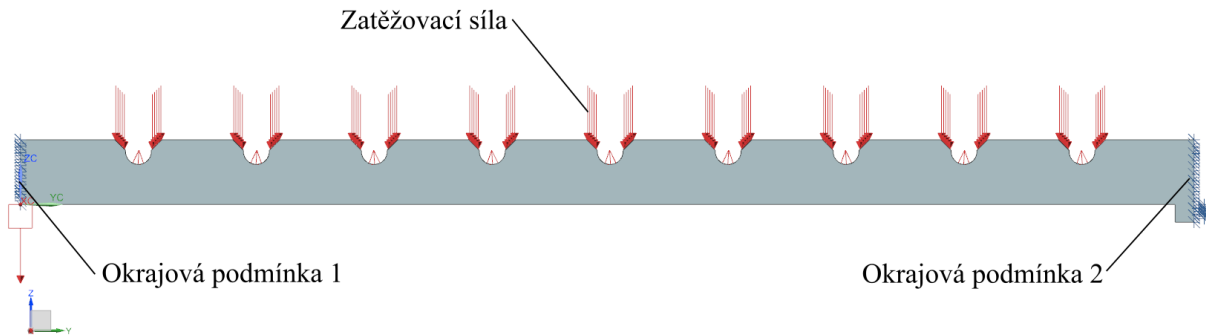
Jako výchozí byla pro výpočet navržena příčka obdélníkového průřezu o rozměrech 995x55x12 mm s výřezy pro uložení devíti nosných profilů s válečky.

Příčka byla zasíťována prostřednictvím tetraedrových elementů CTETRA(10) s velikostí 12 mm a zmenšenou velikostí elementů ve dnech vybrání pro uložení profilů. Z materiálové knihovny byly diskrétní síti přiřazeny vlastnosti oceli.

Zatížení příčky bylo definováno gravitačním zrychlením ve směru opačném ke kladnému směru osy z a zatěžovací silou 150 N distribuovanou na vybranou geometrii. V tomto případě na dosedací plochy V-profilů a definovanou pro každé vybrání individuálně.

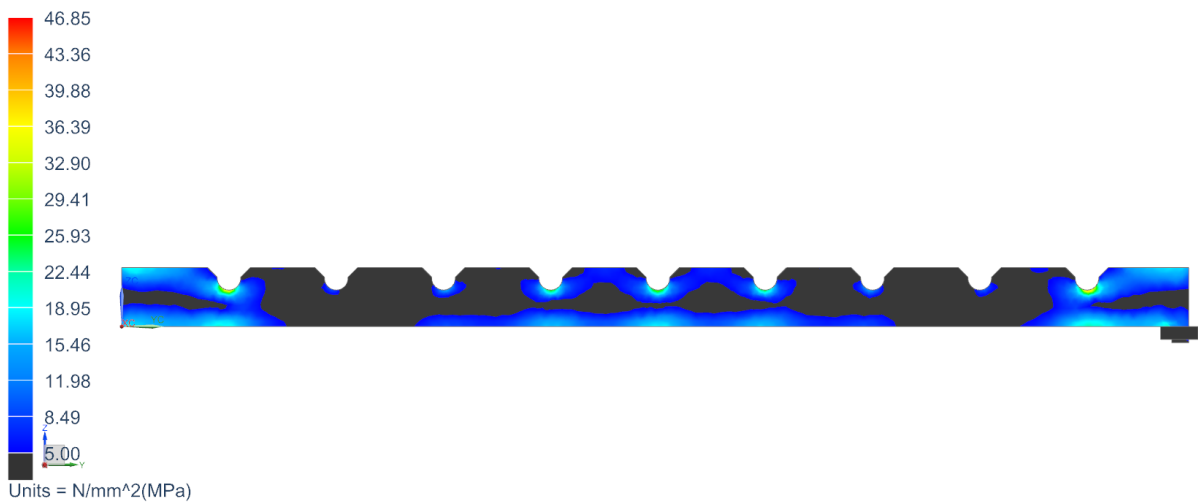
3.3.1. Úloha s oboustranným vetknutím

Okrajové podmínky 1 a 2 odebírají příslušným uzlům všech 6 stupňů volnosti a odpovídají vetknutím po stranách nosné příčky.



Obrázek 26 Oboustranné vetknutí

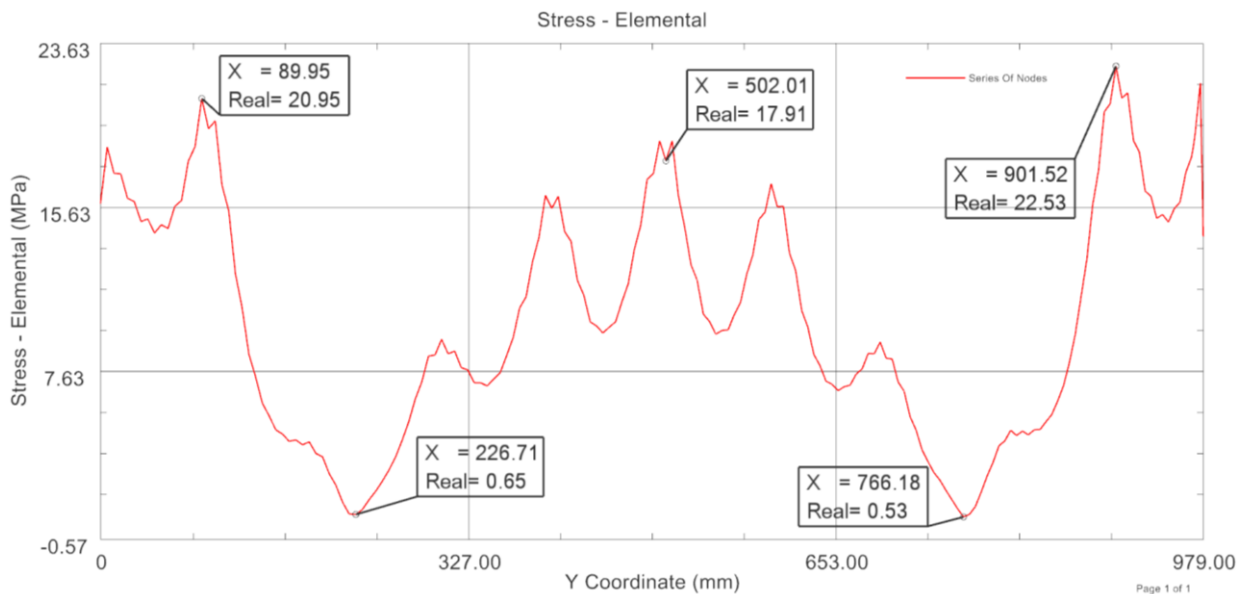
pricka_obdelnik_sim1 : Solution-stat.neurc.nosnik Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Elemental, Averaged, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 46.85, Units = N/mm²(MPa)



Obrázek 27 Rozložení napětí oboustranně vetknuté příčky

Na obrázku 27 je možno vidět rozložení napětí ve zkoumané součásti. Zobrazovaná napětí jsou průměrována mezi sousedními elementy. Maximální napětí takto s definovanými okrajovými podmínkami dosahuje 46,85 MPa. Pro názornost byly elementy, kde napětí nedosahovala hodnoty 5 MPa ponechány šedivé.

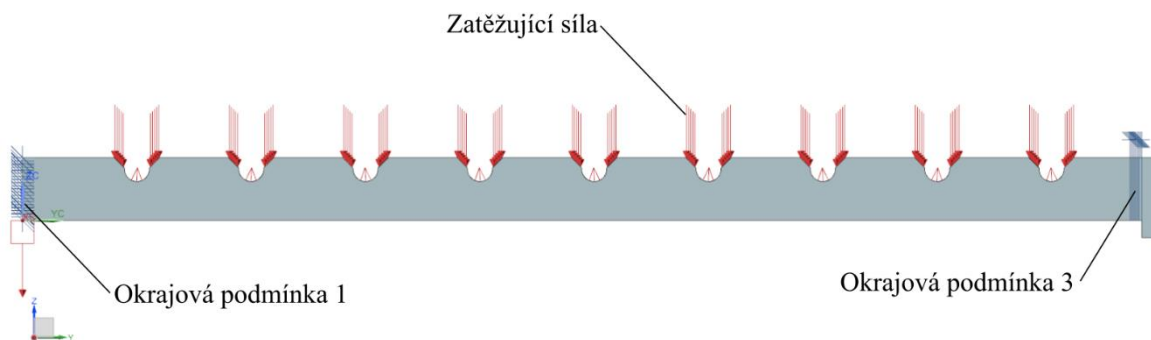
Na grafu 2 je znázorněn průběh napětí na spodní hraně příčky. Oboustranné vetknutí dle očekávání způsobilo symetrický průběh napětí podél středu příčky. Odebrání všech stupňů volnosti také způsobilo zmenšení deformací (vyztužení součásti) a tedy i snížení maximálních hodnot napětí.



Graf 2 Průběh napětí po spodní hraně oboustranně vetknuté příčky

3.3.2. Úloha s jednostranným vetknutím a podporou ve směru osy z

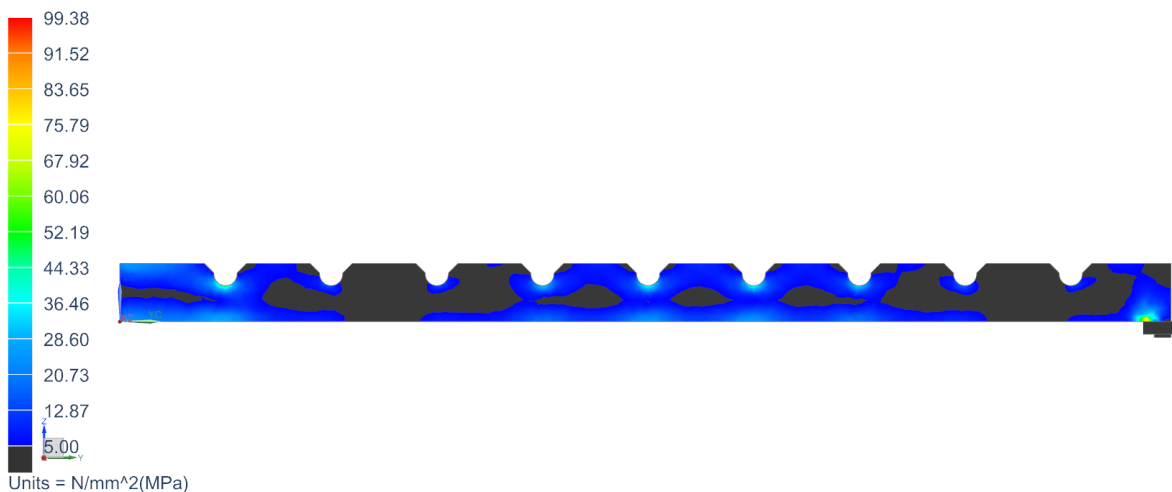
Na levé straně příčky byla použita stejná okrajová podmínka 1 jako v předchozí úloze. Okrajová podmínka 3 zamezuje pouze posuvu ve směru osy z.



Obrázek 28 Jednostranné vetknutí a podpora ve směru osy z

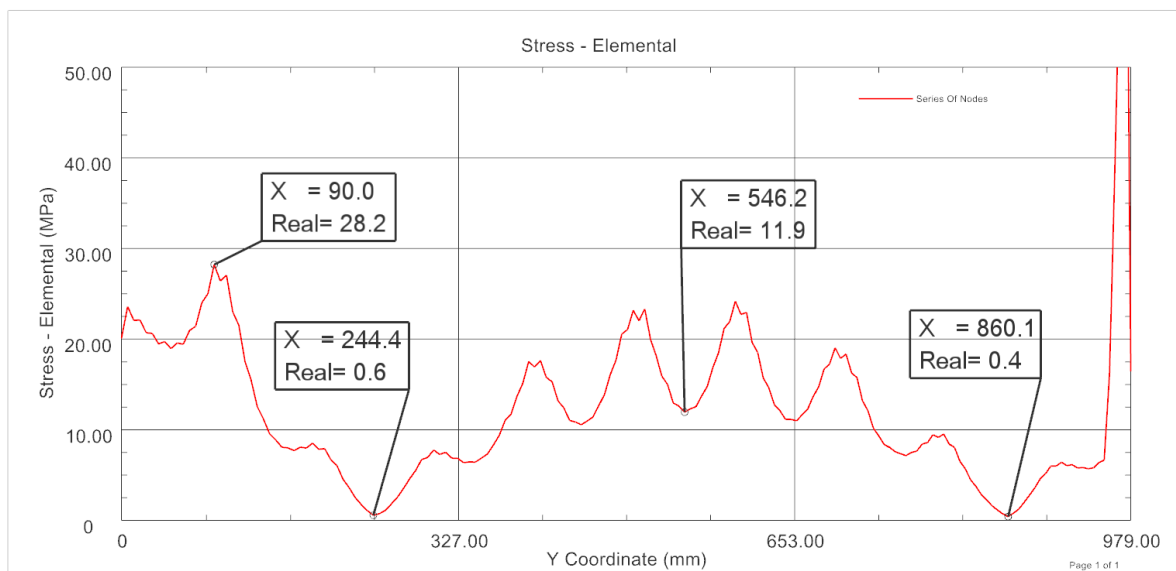
Z obrázku 29 je na prvním pohled patrné rozdílné rozložení napětí oproti předchozí úloze. Maximální napětí 99,38 MPa není relevantní hodnota, neboť vznikla na základě definování okrajové podmínky na malou plochu resp. jí odpovídající uzly, které způsobí toto lokální zvýšení napětí.

Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Elemental, Averaged, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 99.38, Units = N/mm²(MPa)
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 29 Rozložení napětí jednostranně vetknuté příčky s podporou ve směru osy z

Více důležitých informací získáme studiem průběhu napětí po spodní hraně příčky, jež je vidět v následujícím grafu 3.

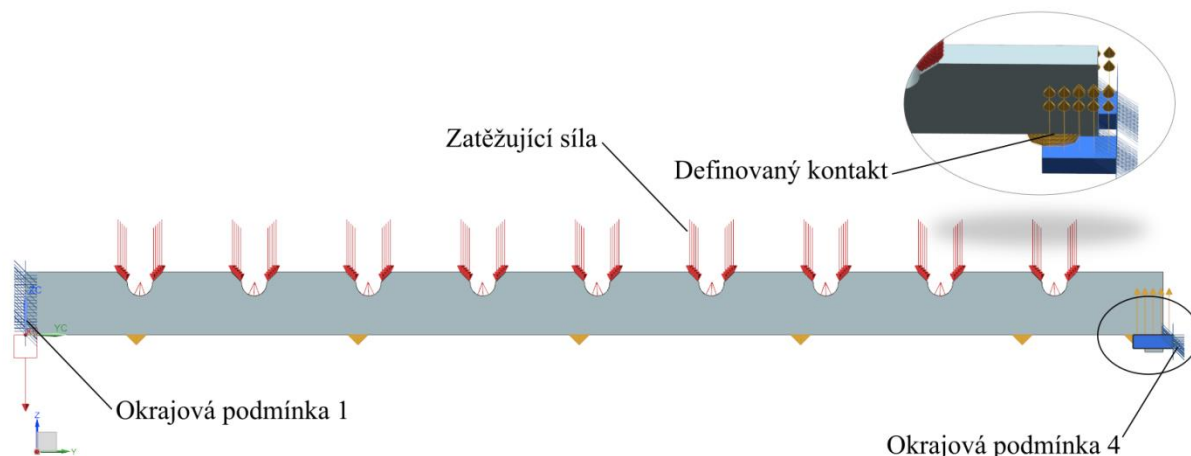


Graf 3 Průběh napětí po spodní hraně jednostranně vetknuté příčky s podporou ve směru osy z

Vidíme zde obecně nárůst napětí. Zleva ve vzdálenosti 90 mm od vetknutí (okr. podmínka 1) je obdobné lokální maximum jako v první úloze, počátek druhé oblasti nárůstu napětí se zde posunul do vzdálenosti 244,4 mm a klesá do globálního minima v místě 860,1 mm od levého kraje příčky.

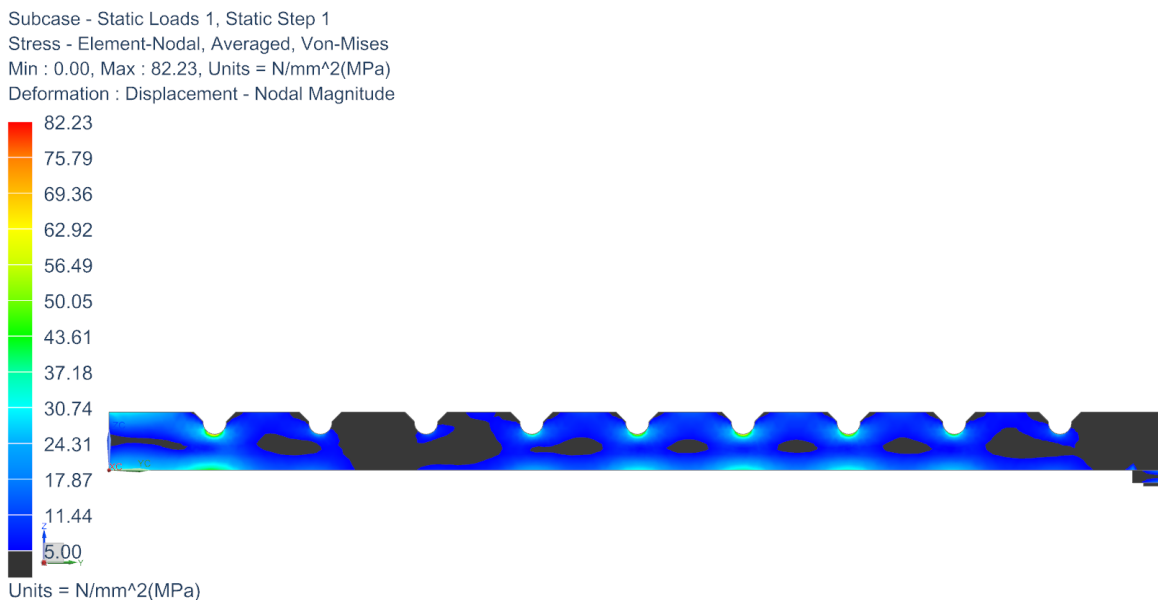
3.3.3. Úloha s jednostranným vetknutím, podporou ve směru osy z a definovaným kontaktem

Ve třetí simulaci byla okrajová podmínka 4 definována jako vetknutí podpory příčky a mezi podporou a samotnou nosnou příčkou je definován kontakt, díky němuž simulace více odpovídá reálným podmínkám. Negativní vlastností tohoto řešení je množství iterací, které mnohonásobně prodlužují dobu výpočtu oproti předchozím.



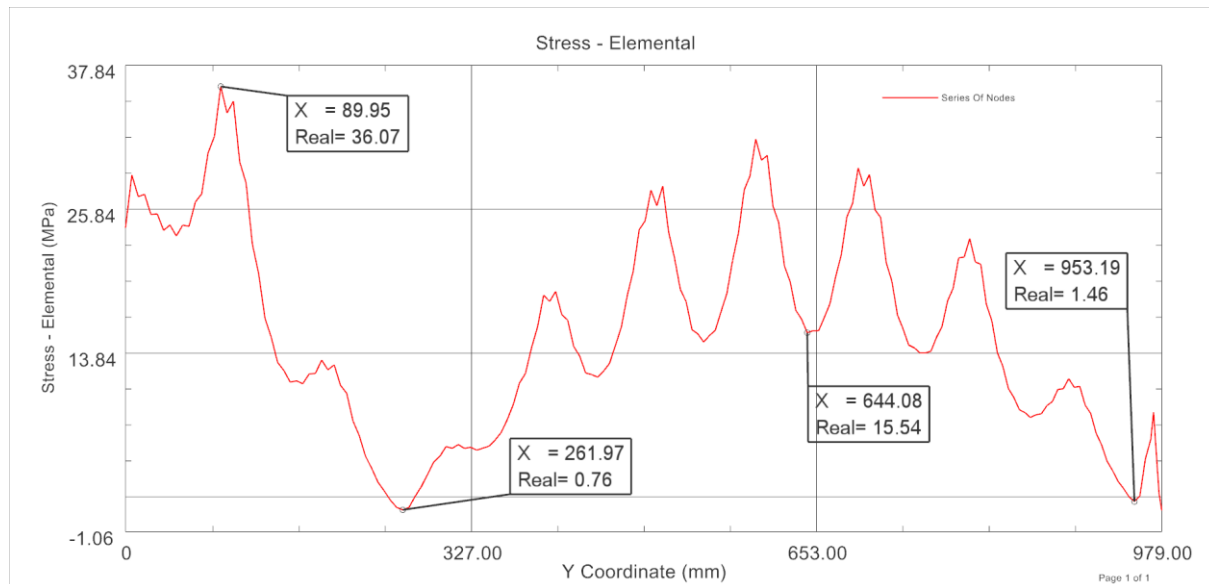
Obrázek 30 Úloha s definovaným kontaktem

Na obrázku 31 zobrazující rozložení napětí je vidět globální maximum 82,23 MPa na dně prvního vybrání zleva, kde byla definována okrajová podmínka 1. Nevzniklo zde lokální maximum v oblasti definovaného kontaktu, jako tomu bylo v přechodím případě okrajové podmínky 3.



Obrázek 31 Rozložení napětí jednostranně vetknuté příčky s definovaným kontaktem

Průběh napětí má stejný trend, jako v případě oboustranného vetknutí. Došlo přibližně k trojnásobnému nárůstu napětí v extrému ve vzdálenosti 36,07 mm. K nárůstu napětí také došlo v druhé oblasti, která se zde posunula ještě více od vetknutého kraje příčky. Oblast nárůstu nyní začíná ve vzdálenosti 261,97 mm a končí 953,19 mm od vetknutí.

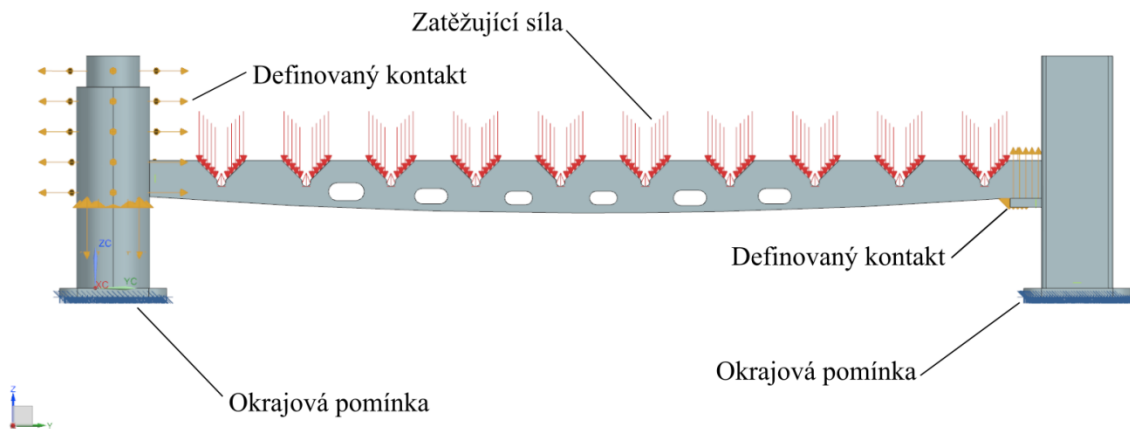


Graf 4 Průběh napětí po spodní hraně příčky s definovaným kontaktem

Z těchto tří simulací je vidět patrný vliv okrajových podmínek na výsledek výpočtu, jež neumožňuje zjednodušení simulace na lineární úlohu, ale vyžaduje definování kontaktu. Vzhledem k této skutečnosti bude při další optimalizaci příčky nahrazena okrajová podmínka 1 a kontakt bude definován na obou jejich koncích, což více odpovídá skutečným podmínkám.

3.4. Optimalizace příčky

Během procesu nakládání vozu se po zaplnění jednoho patra musí manuálně přidat další příčka, aby vznikl nový prostor pro naložení dalších vylisovaných válečků. Z toho důvodu bylo cílem co největší odlehčení příčky při zachování spolehlivosti provozu. Byla provedena řada výpočtů a úprav, z nichž zde bude několik kroků zobrazeno a popsáno.



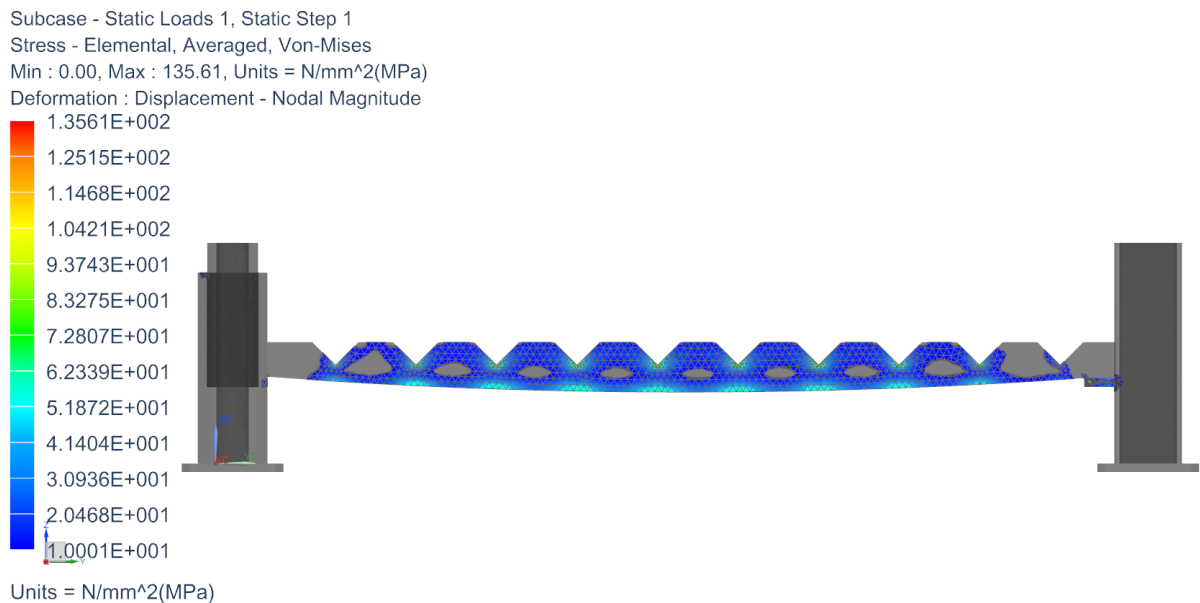
Obrázek 32 Definování výpočtové úlohy

Výpočtový model se skládá z čepu, který je částí skládaného sloupu, nosné části příčky a pevného sloupu. Okrajové podmínky odebírající všech 6° volnosti jsou aplikovány na plochu pod patkami sloupů. Mezi příčkou a čepem na levé straně a také mezi příčkou a její podporou na straně pevného sloupu, je definován kontakt umožňující relativní posun příslušných ploch, resp. uzlů vůči sobě. Toto způsobuje nelinearitu výpočtové úlohy a značně ji z důvodu několikanásobné iterace prodlužuje, ale pro uspokojivou reprezentaci reálného stavu je nezbytnou podmínkou, jak bylo zjištěno v části zkoumající vliv okrajových podmínek. Na plochy vybrání pro V-profil je jednotlivě aplikována zátěžná síla 150 N odpovídající polovině tíhy profilu nesoucího vylisovaný váleček.

Jako první byl proveden výpočet, kdy se výška příčky po své délce nemění a neobsahuje žádné odlehčující otvory.

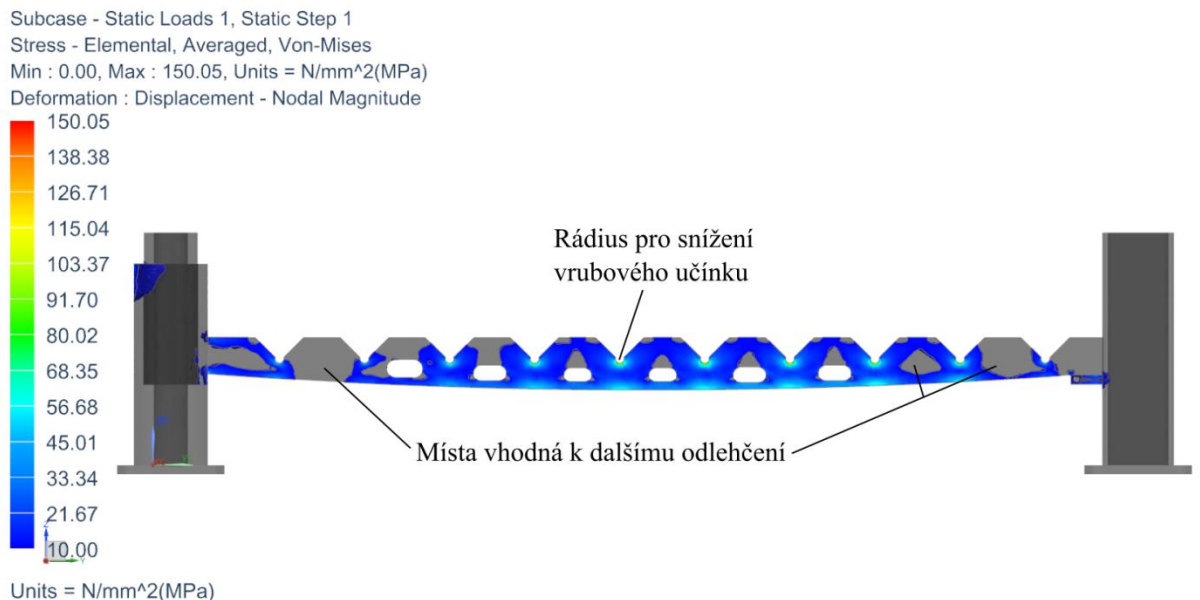
Na základě výsledků simulace zobrazující rozložení napětí byla upravena geometrie příčky tak, že je její výška proměnlivá a napětí je lépe rozprostřeno po celé její délce.

Na obrázku 33 je zobrazeno výsledné rozložení napětí Von-Mises. Hodnoty jsou průměrované a pro elementy, kde napětí nedosahuje 10 MPa je nastavena průhlednost sítě. To poskytuje snazší analýzu míst, odkud je možné následně odebrat materiál.



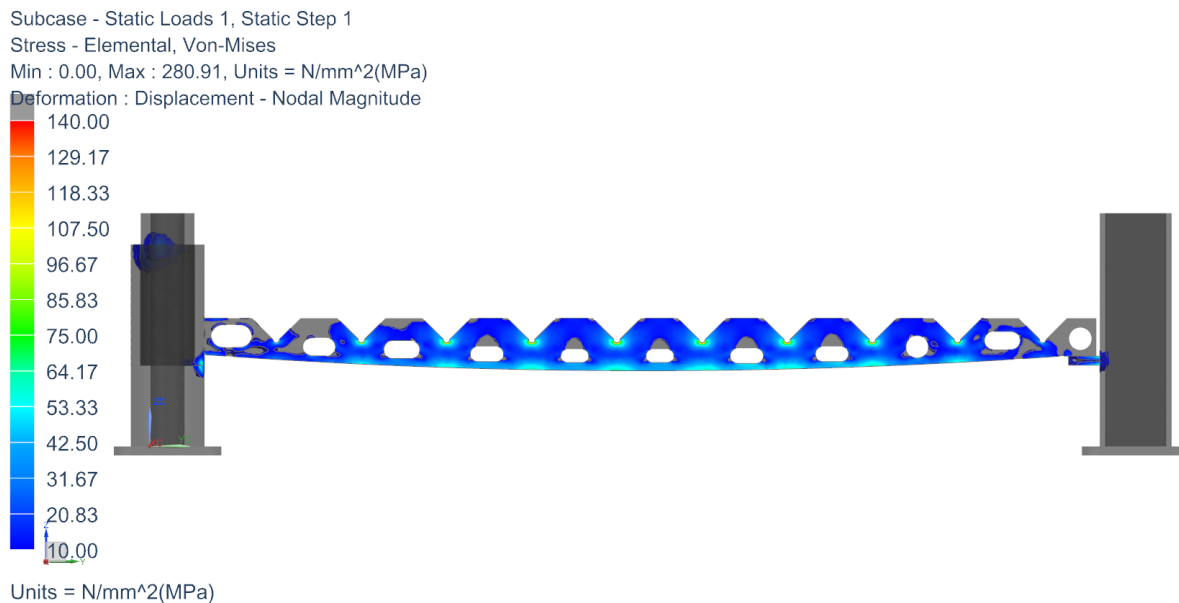
Obrázek 33 Rozložení napětí příčky bez odlehčení

V následných úpravách byl na základě předchozích výsledků odebrán materiál v prostředních dvou třetinách příčky a dna vybrání pro uložení profilu s válečky byla doplněna o rádius pro snížení vrubového účinku. Výsledek zobrazení rozložení napětí je definován shodně s předchozím výpočtem a je z něho patrná možnost dalšího odlehčení.



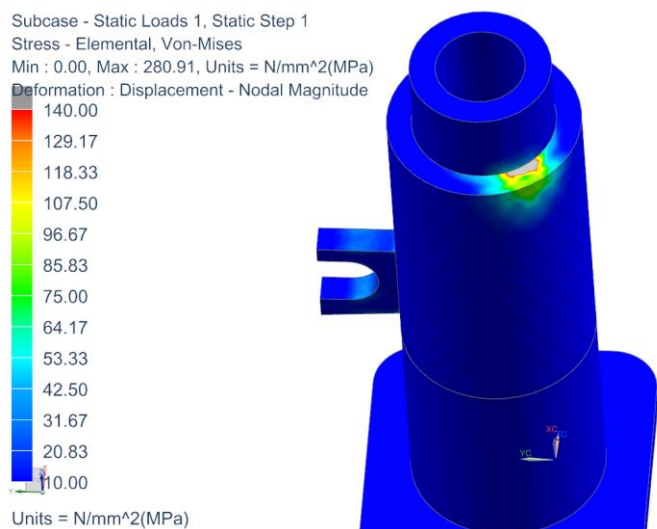
Obrázek 34 Rozložení napětí příčky s odlehčeními

Na obrázku 35 je vidět konečná geometrie příčky. Zobrazení výsledků byla přidána limita maxima napětí 140 MPa a místa s vyšším napětím jsou interpretována šedivou barvou.



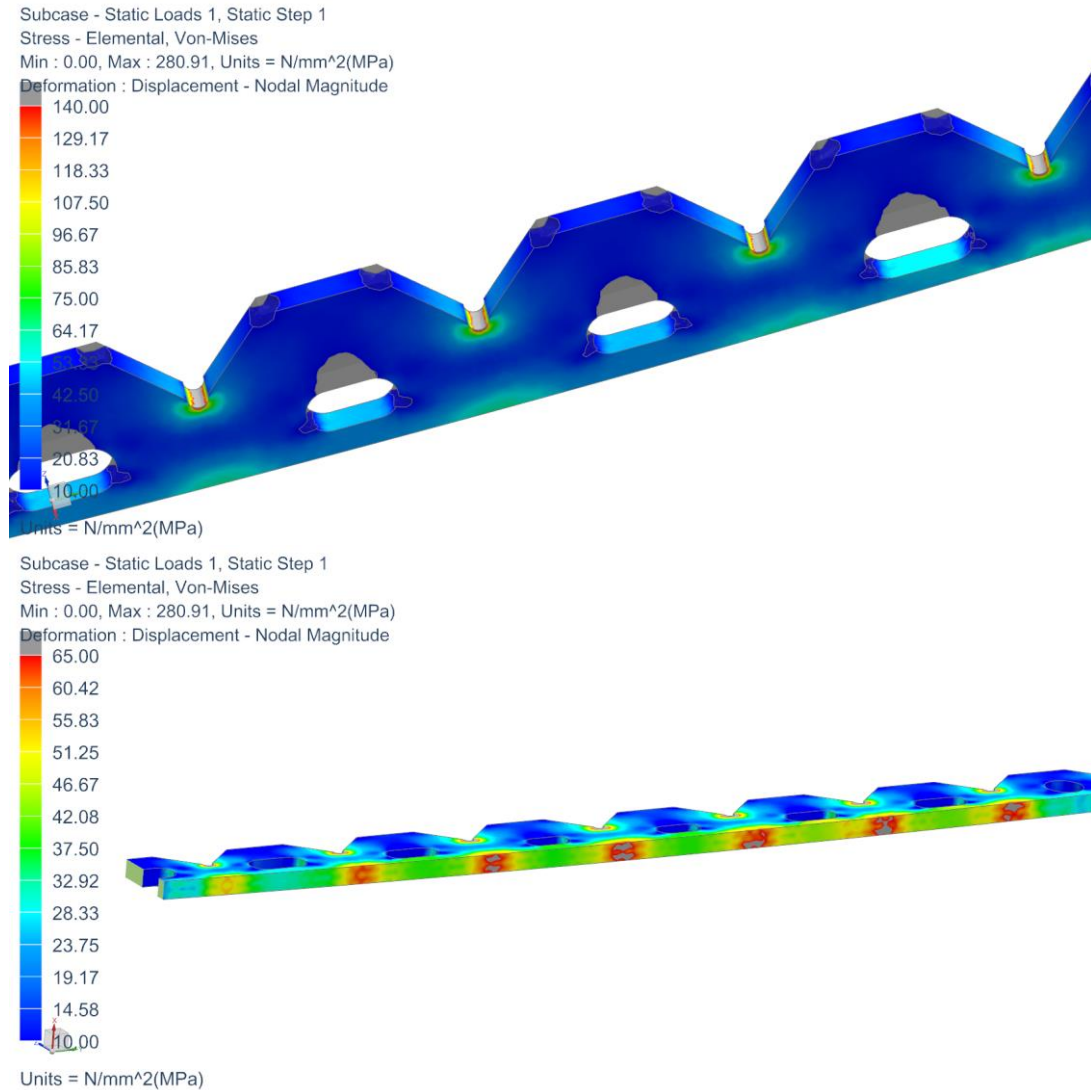
Obrázek 35 Rozložení napětí v konečné geometrii příčky

Globální maximum napětí 281 MPa vzniklo v kontaktní oblasti příčky a čepu skládaného sloupu, ale nepředstavuje pevnostně hrozbu selhání konstrukce a je způsobeno charakterem matematického pozadí výpočtové simulace v této části geometrie.



Obrázek 36 Globální maximum ve styku čepu s příčkou

V kritických místech příčky, kterými jsou dna vybrání a spodní hrana příčky napětí výrazně nepřesáhlo 140 MPa resp. 65 MPa. Dle vzorce $k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{red}}$ je možné ověřit bezpečnost ve vláknech příčky namáhaných tahem. Ta v tomto případě dosahuje hodnoty $k = 9$.

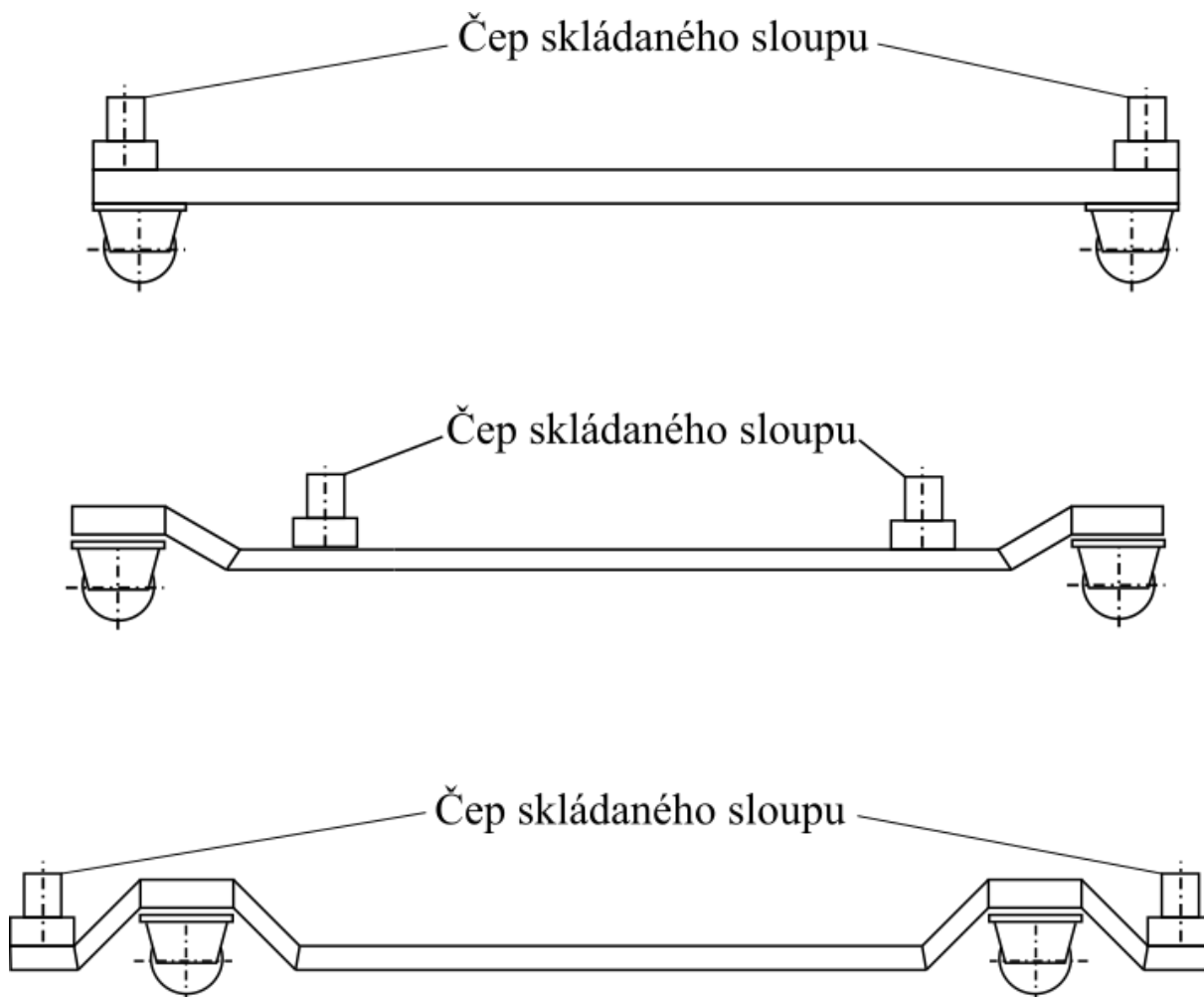


Obrázek 37 Kritická místa příčky

3.5.Podvozek

Podvozkem se rozumí část sušárenského vozu nacházejícího se pod sloupy a nosnými příčkami. Na jeho konstrukci jsou kladeny požadavky jak pevnostního, tak funkčního charakteru přidružené k procesu používání vozu. Rozměry jsou limitovány především velikostí sušárny. Šířka podvozku má vliv na konečnou kapacitu uložených válečků. Jeho rozvor, resp. vzdálenost sousedních sloupů na jedné straně vozu ovlivňuje prohnutí nesených profilů s válečky a tedy i jejich kvalitu. Důležitým parametrem je i světlost podvozku. Sušárenský vůz je při zavážení do sušárny veden vodící kolejnící, která stanovuje jeho minimální světlost.

Vzniklo několik tvarových studií podvozku, které řešily především umístění koleček tak, aby rám mohl být co nejnižší a umožňoval nesení většího počtu pater příček.



Obrázek 38 Koncepce tvaru rámu

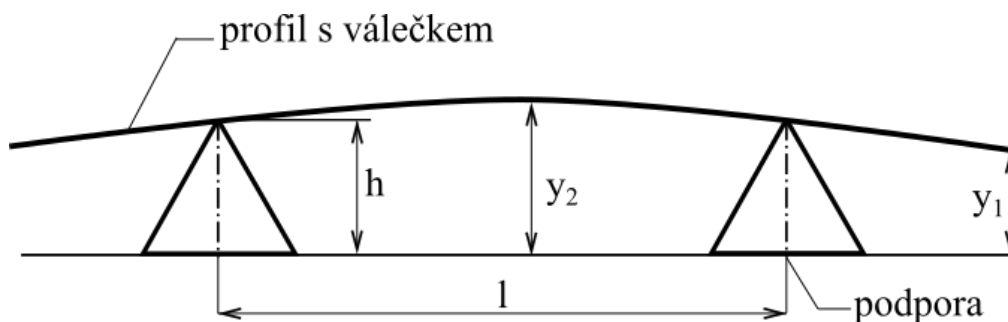
Jednoduchý rovný rám, zobrazený jako první v pořadí na obrázku 38 vyniká svou jednoduchostí konstrukce s minimem spojů. Jeho zásadním nedostatkem je však přílišná světlost, která o jedno až dvě snižuje počet nesených pater.

V pořadí druhý tvar podvozku se sníženou středovou částí, na které jsou umístěny sloupky, řeší tento problém. Podvozek je však neefektivní z hlediska hmotnosti. Části rámu od sloupků směrem ke koncům vozu (kolům) nepřináší žádnou užitečnou hodnotu a pouze zvyšují celkovou délku potažmo hmotnost podvozku.

Jako nejvhodnější se jeví umístění koleček uvnitř podvozku vzhledem k na kraj umístěným sloupkům.

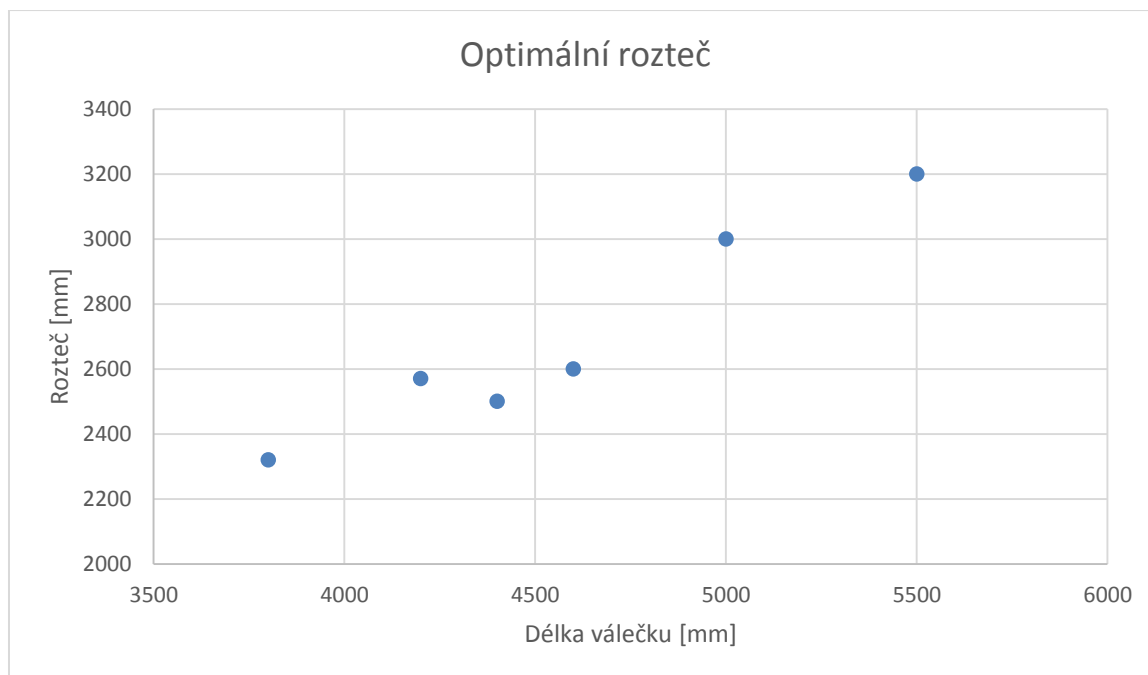
Na voze je požadováno převážet různé délky vyráběných válečků. Z tohoto důvodu byl proveden experiment pro zjištění optimální rozteče sloupků (rozvoru vozu). Ze spektra vyráběných délek válečků byl vždy vybrán zástupce, který byl po vylisování umístěn do nosného V-profilu a podepřen dvěma podporami. Poté se hledala vzdálenost podpor, pro kterou váleček dané délky vykazoval minimální průhyb.

3.5.1. Definice experimentu:



Obrázek 39 Schéma experimentu

- 1) Určit rozteč l , kdy $|h - y_1|$ v $|h - y_2|$ jsou minimální.
- 2) Po určení rozteče změřit průhyb
 - a) $y_2 > h \Rightarrow y_2 - h$ průhyb mezi podporami
 $y_2 < h \Rightarrow h - y_2$ průhyb mezi podporami
 - b) $y_1 > h \Rightarrow y_1 - h$ průhyb na konci profilu
 $y_1 < h \Rightarrow h - y_1$ průhyb na konci profilu



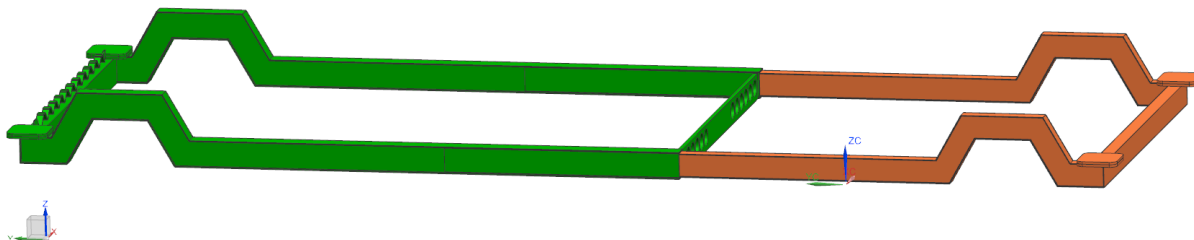
Graf 5 Optimální rozteč podpor pro váleček dané délky

Konstrukce stávajícího sušárenského vozu neumožňovala změnu rozteče mezi příčkami. Na základě experimentu byl zjištěn signifikantní rozdíl mezi krajními polohami optimální rozteče. Na základě zjištění byla navržena koncepce rámu nově konstruovaného vozu tak, aby umožňovala plynulé nastavení rozteče mezi příčkami, což bude mít pozitivní vliv na výslednou jakost vyráběných pecních válečků.

Po konzultaci byl zadavatelem domluven systém plynulého nastavení rozvoru vozu.

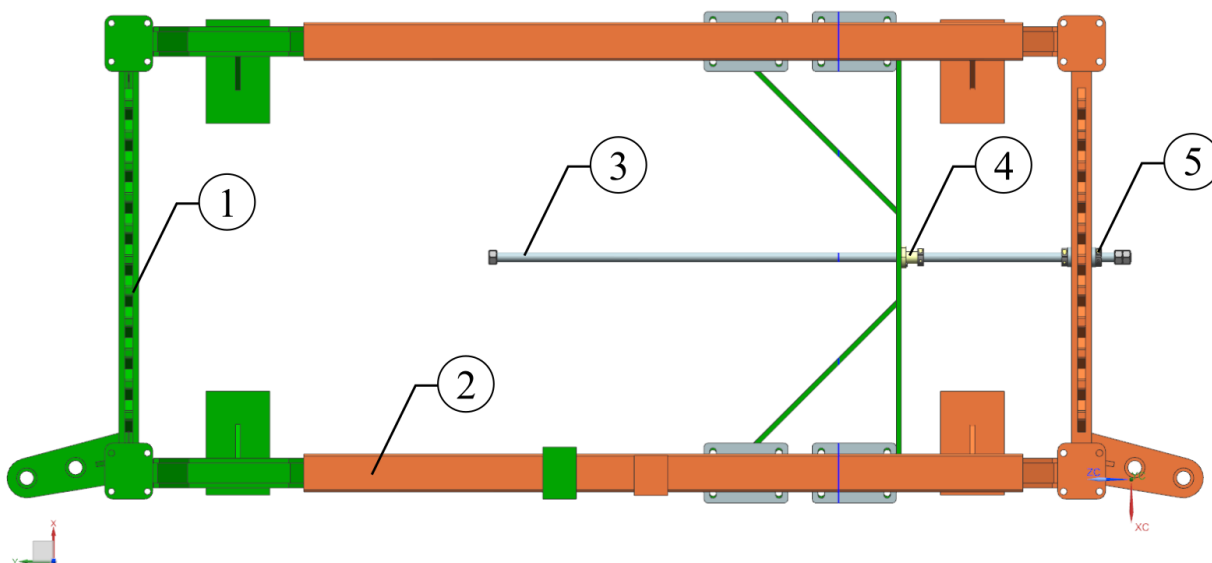
3.5.2. Návrh podvozku s nastavitelným rozvorem

V první fázi konstruování byl navržen posuvný rám s kluzným vedením, kdy byly do sebe zasouvány dva profily s rozdílným průřezem. Toto řešení bylo nahrazeno z důvodu spolehlivosti systémem využívajícím nosné vozíky. Výpočtová simulace, která bude dále prezentována, odhalila kritické místo, které je pro obě řešení rámu shodné, a proto byla provedena pouze pro rám s kluzným vedením.

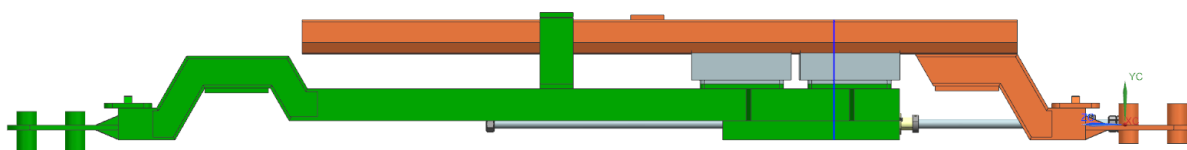


Obrázek 40 Podvozek s kluzným vedením

Rám využívající nosných vozíků je realizován pomocí závitové tyče (obrázek 41 pozice 3) spojující část vozu označenou na obrázku 41 pozicí 1 s druhou částí označenou pozicí 2. Tvar vozu, nejlépe viditelný z bokorysu, vychází z předchozích studií možného tvaru podvozku, kdy jsou sloupky umístěny vně rámu vůči kolům. Závitová tyč je vedena skrz čelník části podvozku 2 a jsou na ní fixně umístěny svěrné kroužky (pozice 5) z každé strany čelníku rámu, které brání jejímu posuvu. V druhé části podvozku 1 je závitová tyč vedena skrz matici s přírubou. Při otáčení závitové tyče tak dojde k pohybu obou částí podvozku vůči sobě.



Obrázek 41 Půdorys rámu s plynule nastavitelným rozvorem



Obrázek 42 Bokorys rámu s plynule nastavitelným rozvorem

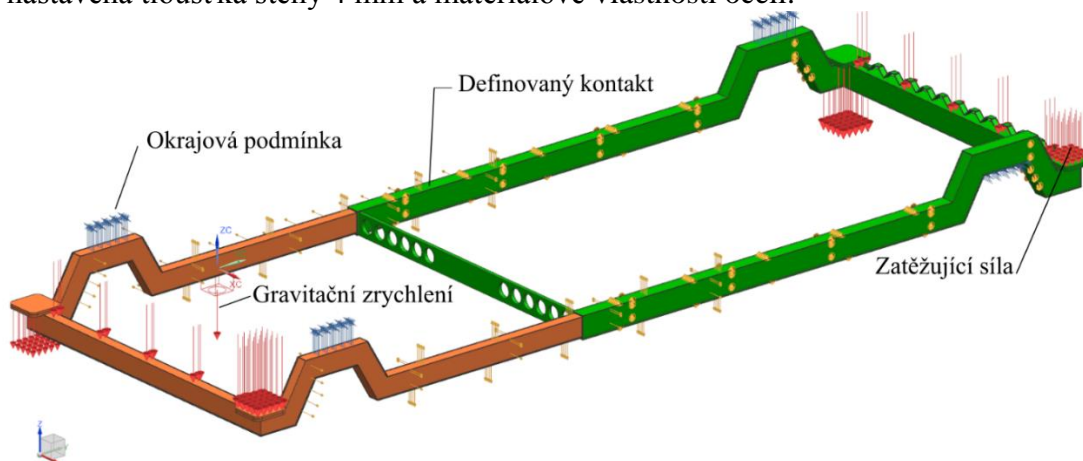
Pro vedení a přenos sil mezi oběma polovinami vozu bylo použito čtveřice nosných vozíků používaných především pro posuvné brány.



Obrázek 43 Nosný vozík (7)

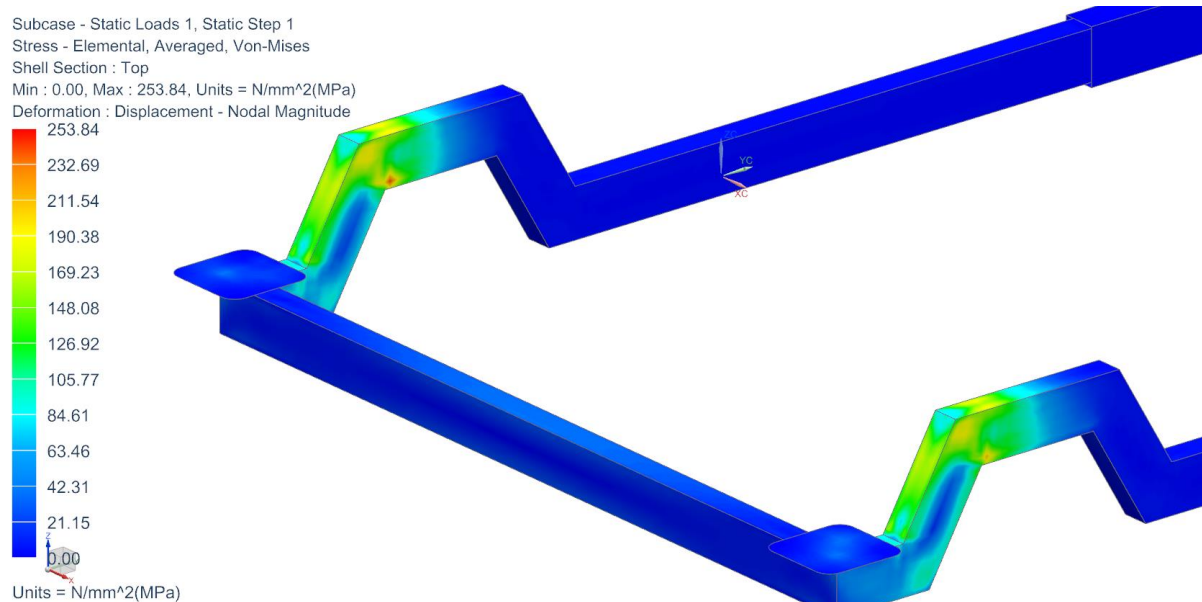
3.5.3. Výpočetní řešení rámu

Ve fázi přípravy modelu pro výpočet byla objemová geometrie zjednodušena na soustavu ploch. Pro tuto činnost byla použita funkce preprocesoru SW Siemens NX nazvaná Midsurface by Face Pair, která vytvoří mezi dvojicí zvolených ploch plochu novou. V tomto případě mezi vnitřními a vnějšími plochami profilu. Nově vzniklá plocha se tak nachází uprostřed tloušťky příslušné stěny. Takto připravená geometrie byla následně diskretizována sítí čtvercových elementů s mezi uzly, zde označených CQUAD8, o velikosti 15 mm. Pro síť byla nastavena tloušťka stěny 4 mm a materiálové vlastnosti oceli.



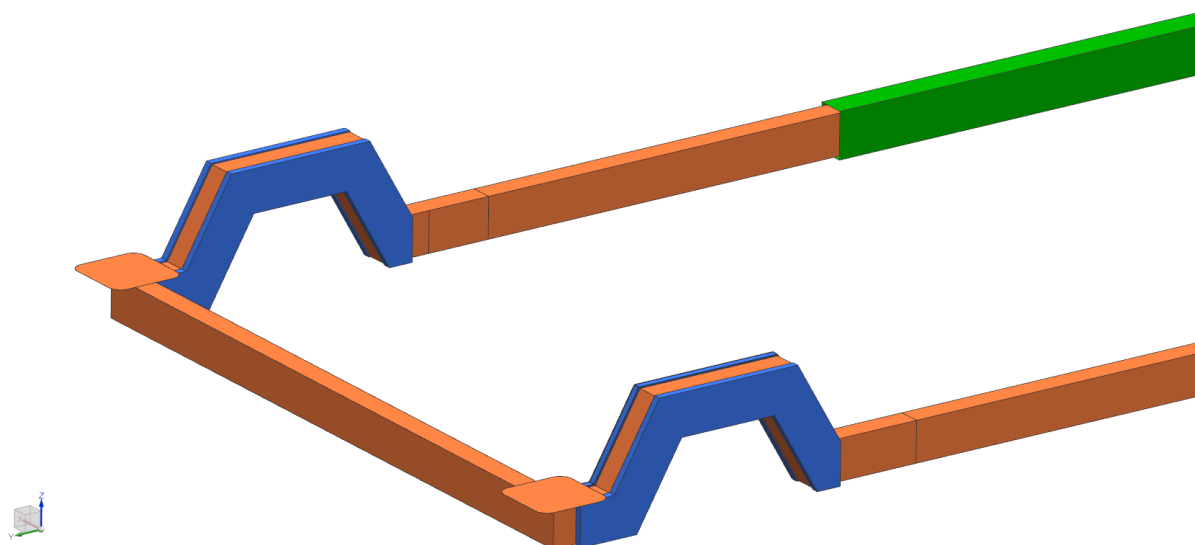
Obrázek 44 Definování výpočtového modelu rámu

Okrajové podmínky byly definovány na plochy pro montáž koleček. Tři z nich brání posuvu ve směru osy z a uzlům čtvrté z ploch je zabráněno posuvům ve všech třech směrech, aby byl model definován v prostoru. V místech kluzného spojení mezi oběma částmi vozu je definován kontakt umožňující vzájemný posuv sousedních ploch. Zatěžující síla působí na plochy pro montáž pevných resp. skládaných sloupů. Jejich velikost odpovídá tíze sloupů a příček plně naložených nejrozměrnějšími válečky.



Obrázek 45 Místo s nejvyšším namáháním

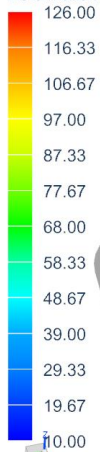
Nejvyšší koncentrace napětí se projevila v místě rámu určeném pro umístění koleček. V tomto místě není možné umístit výztuhu kolmo ani vodorovně s podélnou osou vozu. Zvětšení celkových rozměrů profilu podvozku by výrazně zvýšilo hmotnost vozu, a proto tato kritická místa byla vyztužena po stranách navařenými plechy zobrazených modrou barvou na obrázku 46.



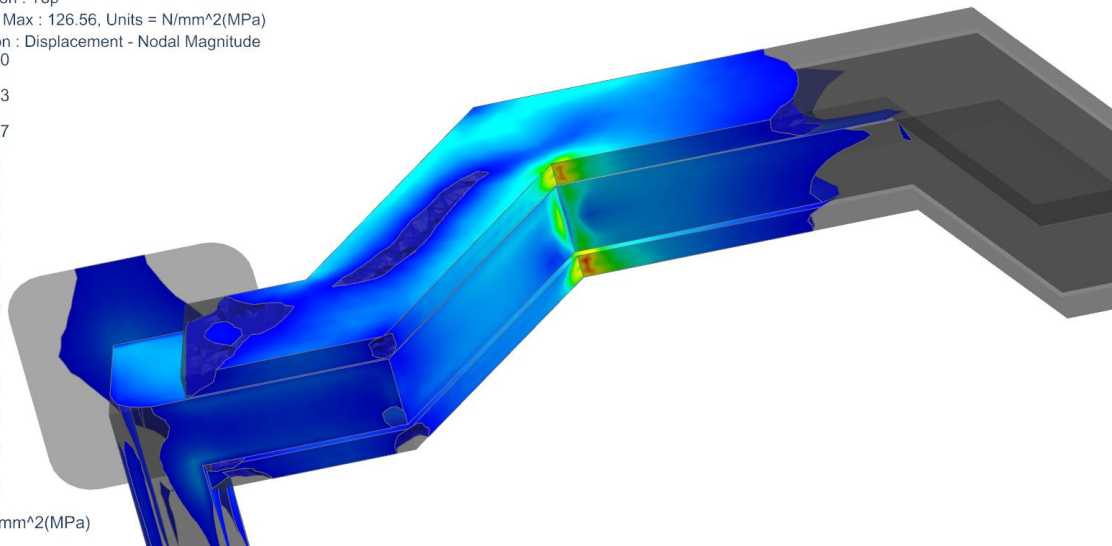
Obrázek 46 Vyztužení kritického místa rámu

Pro následnou simulaci byla definice okrajových podmínek a zatížení ponechána shodně s předchozím výpočtem.

Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Stress - Elemental, Averaged, Von-Mises
Shell Section : Top
Min : 0.00, Max : 126.56, Units = N/mm²(MPa)
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

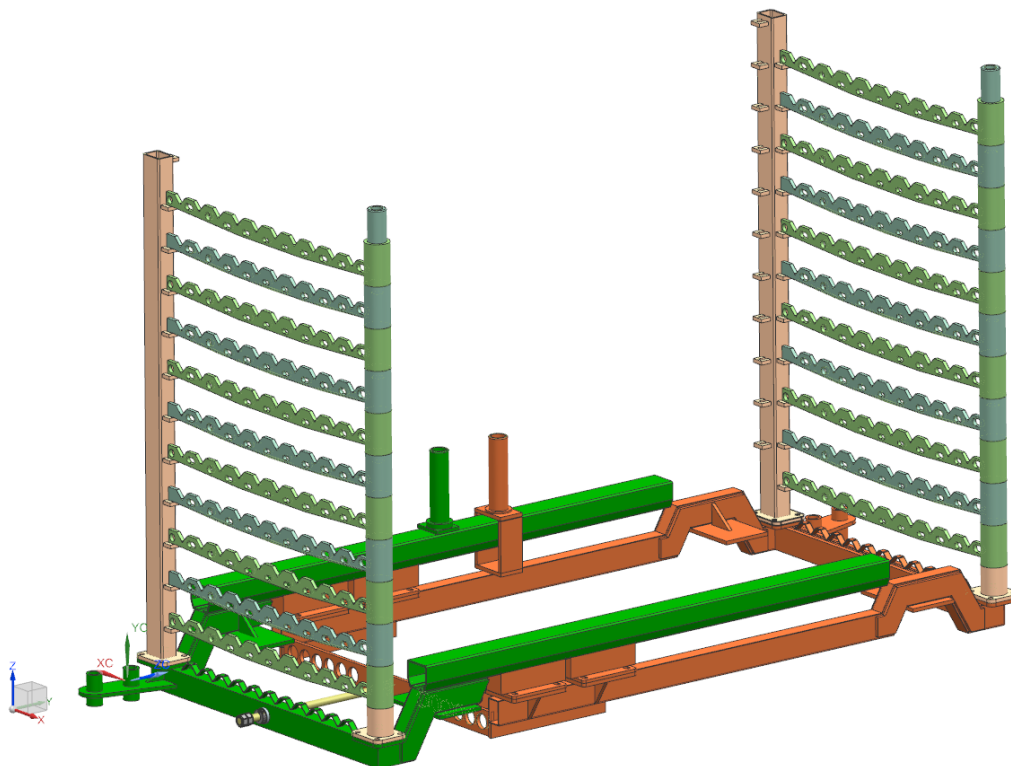


Units = N/mm²(MPa)



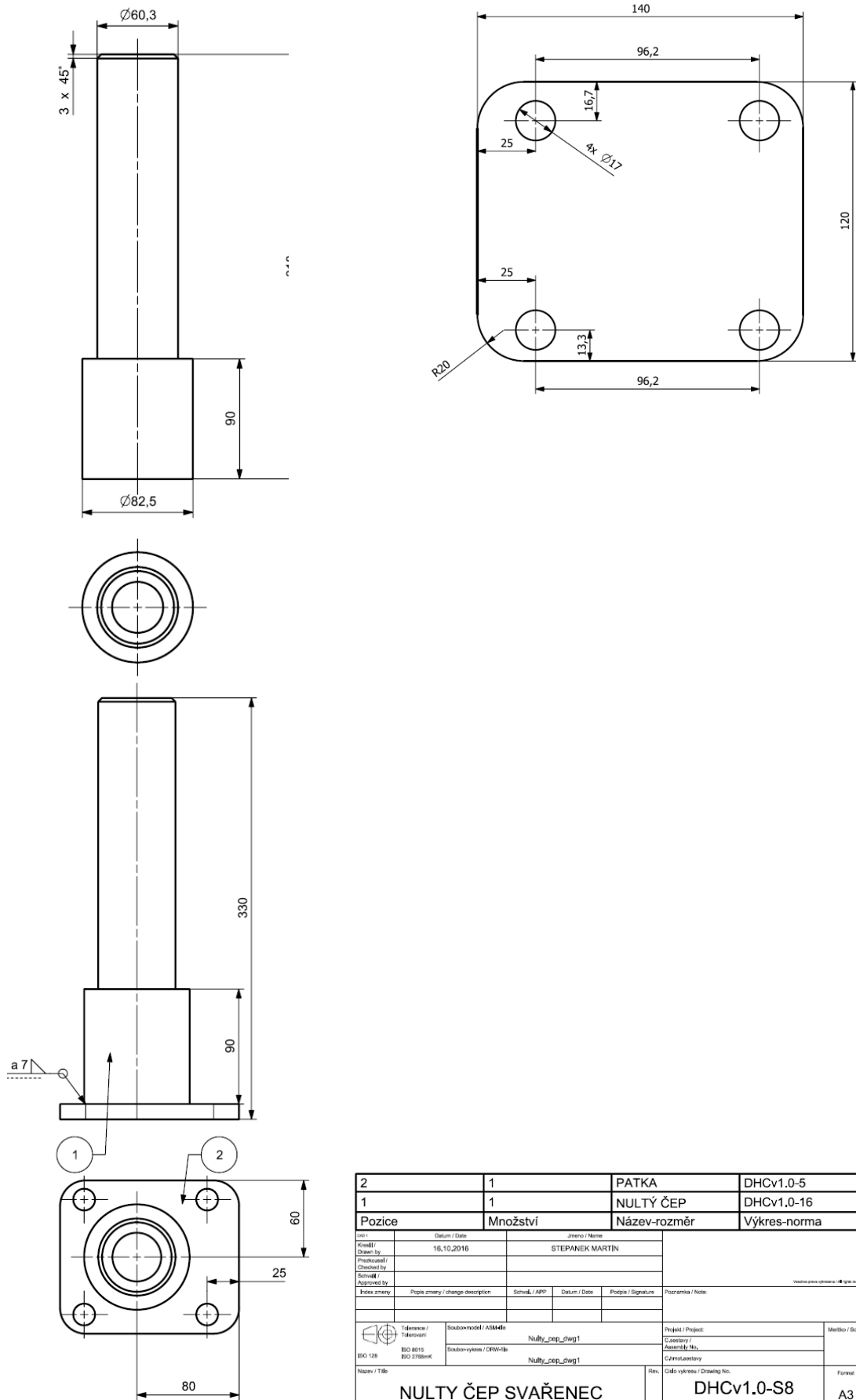
Obrázek 47 Kritické místo vyztuženého dílu

Touto úpravou bylo maximální redukované napětí sníženo o 50% na hodnotu 126 MPa.



Obrázek 48 Pohled na konečné provedení vozu

Kapacita vozu [ks]	Hmotnost [kg]	Rozvor podpor [mm]
120	528	2375-3375



Obrázek 49 Ukázka výrobních výkresů a výkresu podsestavy svařence

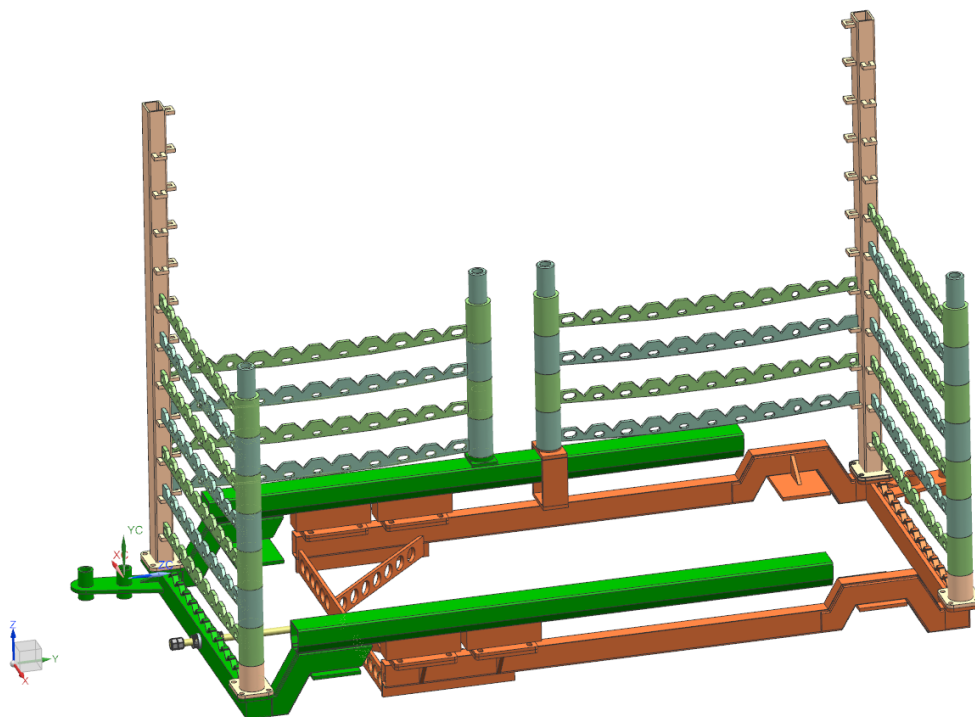
Pro ochranu před působením agresivního prostředí sušárny je celá konstrukce ošetřena zinkovým nástřikem.

Prototyp vozu prošel drobnými úpravami, které bylo nutné provést na základě testovacího provozu. Jednou z úprav bylo přidání pružin na závitovou tyč, které snižovaly dynamické síly působící na pohybovou matici při nárazu vozu.

Konstrukce umožňuje převážení a uskladnění uvolněných příček na samotném voze. Bylo nutné se vypořádat s měnícím se rozvozem vozu. Aby byla zachována konstantní vzdálenost mezi čepem pro uložení volných příček a pevným sloupem, bylo navrženo přemostění vzájemně se pohybujících částí vozu tak, že každý z čepů je pevně spojen s jednou částí vozu.





Obrázek 50 Detail pružin tlumících rázy



Obrázek 51 Umístění vyložených příček

4. Zhodnocení práce, závěr

Cílem práce, byl návrh konstrukce sušárenského vozu, který bude splňovat současné požadavky na vyráběný sortiment keramických pecních válečků. Doposud používaný vůz nespĺňuje pevnostní, potažmo kapacitní požadavky výroby společnosti hob certec s.r.o. Kapacita a hmotnost nově navrženého vozu byla splněna nad rámec požadovaných hodnot.

Požadavek	Hodnota požadavku	Splnění	Hodnota splnění	Poměrné splnění požadavku
minimální zvýšení nosnosti vozu	2130 kg		3600 kg	160 %
zachování nebo snížení hmotnosti	1000 kg		528 kg	189 %

Tabulka 6 Shrnutí dosažených požadavků

Vyrobený prototypový vůz prošel testovacím provozem. Byl ověřen přínos inovativní konstrukce s nastavitelným rozvorem na kvalitu válečků.

Maximální hmotnost plně naloženého vozu 4128 kg si vyžádala použití koleček s vyšší nosností.

Vzhledem k výstavbě nové pece pro válečky délky až 6,5 m dlouhých vznikl požadavek na konstrukci dalšího vozu pro tyto nejdelší vyráběné válečky. Vznikl tak třísloupový vůz kombinující vlastnosti původního a zde popisovaného sušárenského vozu.



Obrázek 52 Částečně naložený prototypový vůz



Obrázek 53 Třísloupový vůz pro extrémně dlouhé válečky

Prototypový vůz s nastavitelným rozvorem i prototyp vozu s třísloupovou koncepcí prošly s úpravami testovacím provozem. Nyní se s úspěchem podílí ve výrobě keramických pecních válečků ve společnosti z Horní břízy.

Seznam použité literatury

1. **s.r.o., diamorph hob certec.** certec. [Online] 2018. <https://www.certec.cz/>.
2. **Eder, W. Ernest a Hosnedl, Stanislav.** *Design Engineering: A Manual for Enhanced Creativity.* Florida : CRC Press, 2008.
3. **Ancient History Encyclopedia.** *Amphorae Packed for Transportation.* [Online] 25. srpen 2016. <https://www.ancient.eu/image/5525/amphorae-packed-for-transportation/>.
4. **Eder, W. Ernest a Hosnedl, Stanislav.** *Introduction to Design Engineering: Systematic Creativity and Management.* Florida : CRC Press, 2010.
5. **Hosnedl, Stanislav.** <https://www.home.zcu.cz/>. [Online] Říjen 2018. C/~hosnedl/.
6. měření, Ústav pro normalizaci a. ČSN 41 3220. *Československá státní norma.* 1981.
7. **iVrata.** *iVrata.cz.* [Online] <https://www.ivrata.cz/128,vozik-pro-samonosnou-branu-speed-me-cais.html>.
8. **Hosnedl, Stanislav a Krátký, Jaroslav.** *Příručka strojního inženýra 1.* Brno : Computer Press, 1999.