



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

RÁM PRO STACIONÁRNÍ HYDRAULICKÉ ZAŘÍZENÍ

FRAME OF STATIONARY HYDRAULIC DEVICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Klezla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Vojtěch Klezla
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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

Rám pro stacionární hydraulické zařízení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte konstrukční návrh a výpočet rámu stacionární stanice pohonu. Návrh rámu by měl být proveden pro více rozměrových řad.

Cíle diplomové práce:

Vypracujte technickou zprávu obsahující zejména:

- krátkou rešerši používaných konstrukčních řešení rámu,
- vlastní konstrukční návrh rámu pohonu,
- pevnostní výpočet pro provozní stavy a proces manipulace s rámem.

Vypracujte výkresovou dokumentaci svařovacích sestav rámu dle vedoucího DP.

Seznam literatury:

Jurášek, O.: Teorie nosných konstrukcí, skriptá VUT v Brně, 1989

Wunderlich, W., Kiener, G.: Statik der Stabtragwerke 1, ed. Teubner B.G. GmbH, 2004, s. 450, ISBN-10: 3-519-05061-7, ISBN-13: 978-3-519-05061-2

Nepraž, F. a kol.: Modelování systémů s hydraulickými mechanismy, Brno, 2002

Lift, H., Hansel, M.: Hydrauliksysteme in der Bau- und Kommunaltechnik, ed. Vogel Verlag Und Druck, 1991, s. 352, ISBN-10: 3-8023-0445-4, ISBN-13: 978-3-8023-0445-3

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je konstrukční návrh a pevnostní výpočet rámu pro stacionární hydraulické zařízení. Pevnostní výpočet je proveden pomocí metody konečných prvků. V práci je popsána konstrukce používaných rámu, profilů a dalších částí, které jsou součástí rámu. Na základě výsledků pevnostní analýzy jsou navrženy úpravy rámu a tyto úpravy zkontrolovány pevnostním výpočtem. Součástí práce je výkresová dokumentace svařence. Tato diplomová práce byla vytvořena ve spolupráci s firmou Bosch Rexroth, spol. s r. o.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rám, stacionární zařízení, hydraulika, metoda konečných prvků, pevnostní analýza

ABSTRACT

The subject of this thesis is design and strength analysis of stationary hydraulic device. Strength analysis is made by the finite element method. The thesis describes design of used frames, profiles and other components, which are parts of the frame. Frame modification is proposed, based on the results of the strength analysis. These modifications are checked with strength analysis. The thesis includes drawing of weldment. The project has been carried out in cooperation with Bosch Rexroth, spol. s r. o.

KEYWORDS

Frame, stationary device, hydraulics, finite element method, strength analysis



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLEZLA, V. *Rám pro stacionární hydraulické zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Přemysla Pokorného, PhD. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Bc. Vojtěch Klezla



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Přemyslu Pokornému, PhD. a konzultantovi z firmy Bosch Rexroth spol. s r. o. panu Ing. Janu Pokornému, PhD a členům oddělení konstrukce za jejich cenné rady a připomínky během tvorby této diplomové práce. Zvláštní poděkování patří hlavně mým rodičům a rodině za podporu při studiu.



OBSAH

Úvod	9
1 Popis stacionárního hydraulického zařízení	10
2 Konstrukce nosného rámu	11
2.1 Používané koncepce rámu	11
2.2 Použité profily	17
2.3 Další konstrukční prvky	18
2.4 Konstrukce vlastního rámu	21
3 Rozbor sil působících na rám	23
3.1 Pracovní poloha	23
3.2 Manipulace s rámem	23
4 Metoda konečných prvků	24
4.1 FEM model rámu	24
4.2 Použité prvky	25
4.3 Materiál použitých profilů	27
4.4 Náhrady konstrukčních prvků	28
4.4.1 Náhrada šroubů	28
4.4.2 Nahrazení svarů	30
4.4.3 Nahrazení lan	30
4.4.4 Náhrada hmotnosti motorových skupin	31
4.4.5 Vysokotlaké potrubí	32
4.5 Okrajové podmínky	33
5 Pevnostní analýza původního rámu	35
5.1 Pracovní poloha	35
5.2 Manipulace s rámem	37
6 Konstrukční řešení náhrady rámu	40
6.1 Návrhová pevnost	40
6.2 Nahrazení vybraných částí nosného rámu	40
6.3 Úspora hmotnosti nosného rámu	43
7 Pevnostní analýza náhrady rámu	44
7.1 Pracovní poloha	44
7.2 Manipulace s rámem	47
Závěr	48
Seznam použitých zkratk a symbolů	50
Seznam příloh	51



ÚVOD

Technika pohonů a následně i hydraulické prvky, které jsou použity k pohonu, regulaci výkonu a rychlostí strojů širokého rozmezí jsou v nynější době velmi rozvinuté a jsou hlavními konstrukčními prvky kvalitativně nových druhů strojů. Hydraulika je součástí velkého množství strojů nejen v průmyslu, ale také ve stavebnictví, zemědělství, v dopravě a v manipulaci s materiálem. Slouží k přenosu energie z místa jejího vzniku na místo její potřeby a zároveň umožňují ovládání toku energie a následnou přeměnu na mechanickou formu. Díky rozvoji řídicí elektroniky má její trend stále vzestupnou tendenci. Hydraulické prvky jsou „srdcem“ stroje a mají značný vliv na jeho spolehlivost, výkonnost a ekonomice provozu.[1] [3]

Hydraulické mechanismy jsou v poslední době rozšířené ve většině strojírenských oborů a v mnoha případech změnila způsob funkce strojů a jejich charakter. Prudký rozvoj hydrauliky v poslední době je spjat s rozvojem elektrických a elektronických prvků. Tato kombinace je výhodná z hlediska řízení, ovládání a ekonomiky provozu strojů. Slouží také jako ochrana strojních částí proti dynamickému přetěžování, umožňuje umístění náhonů v těžko přístupných místech, zjednodušuje konstrukci stroje a snižuje jeho hmotnost. [1]

Statická hydraulická zařízení jsou používána v široké škále uplatnění. Je pro ně typická přeměna mechanické energie na energii hydraulickou v kapalině a následně zpět z hydraulické energie na energii mechanickou. Pohonné jednotky spolu s nádrží na hydraulickou kapalinu a příslušenstvím tvoří hydraulický agregát, který je použit k ovládání lisů, rozměrných dveří, lopatek turbín, uzavíracích klapek jaderných elektráren, servopohonů, ventilů nebo jako pohonná jednotka přepravních vozíků. Dále může sloužit jako centrála pro dodávku tlakového oleje pro více strojů, např. pro upínání obrobků. [1] [3]



1 POPIS STACIONÁRNÍHO HYDRAULICKÉHO ZAŘÍZENÍ

Hydraulický agregát (obr. 1) je systém generující tlakovou kapalinu. Je určen pro pohon hydraulického pracovního stroje. Jedná se tedy o neúplné strojní zařízení dle strojírenské směrnice vydané Evropskou Unií EU 2006/45/ES. [2]

Základními prvky hydraulického agregátu jsou v minimálním výčtu tyto součásti: elektromotor a čerpadlo, zařízení na omezení tlaku čerpadla, nádrž, potrubí a hadicová vedení, armatury apod., ukazatel hladiny kapaliny. [2]

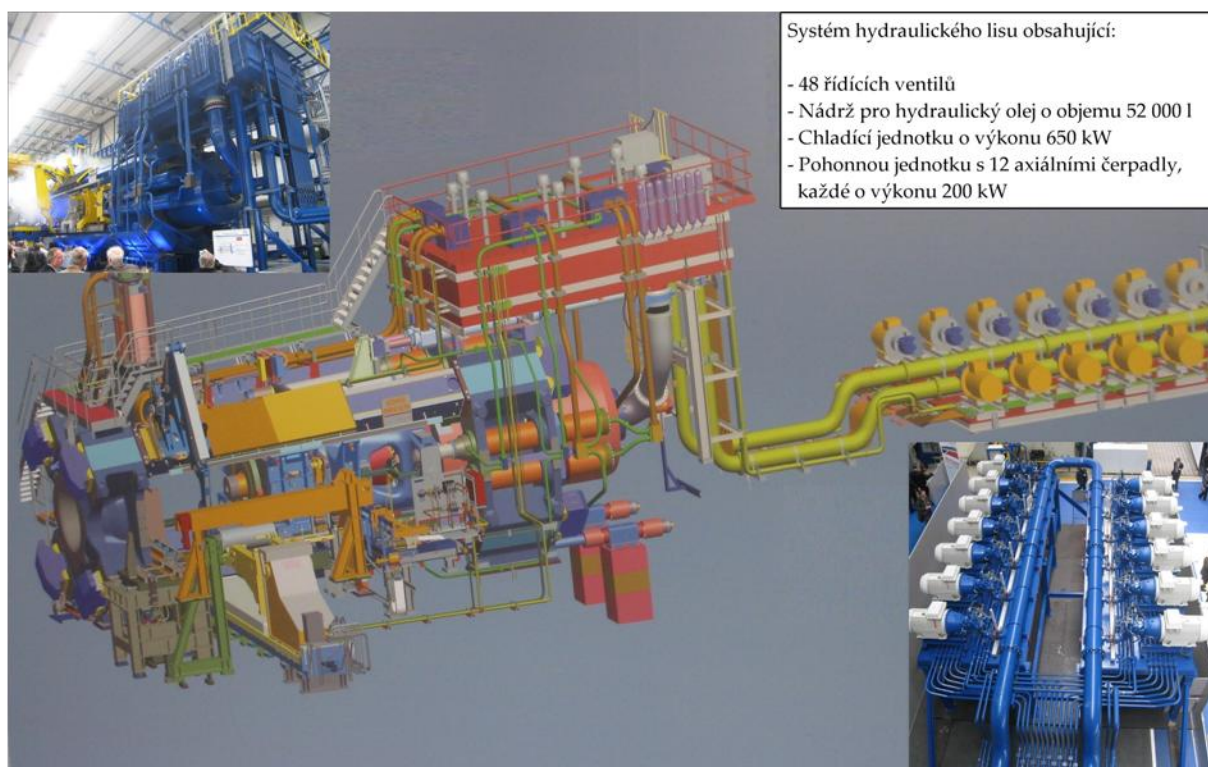
Hydraulický agregát může dále zahrnovat: hydraulické řízení, akumulátory, další ochranné prvky proti nepřipustným tlakům, prvky pro zaznamenávání definovaných provozních stavů (tlak, teplota, hladina náplně, znečištění filtrů). [2]



Obr. 1 Stacionární hydraulické zařízení [16]

2 KONSTRUKCE NOSNÉHO RÁMU

Rám popsaný dále je svařenec určený k uchycení pohonných jednotek sestávajících z hydrogenerátoru a pohonného motoru, které jsou na něm umístěny. Rám pohonné jednotky je k nosnému rámu uchycen pomocí silentbloků. Rám také slouží k uchycení dalších komponentů nutných pro plnění funkce hydraulického pohonu (sací potrubí, vysokotlaké potrubí, elektroinstalace). Celá tato skupina je součástí hydraulického agregátu, kde je pohonná jednotka spojena s nádrží pomocí sacího potrubí. Rám je uchycen na nosnou ocelovou konstrukci nebo na betonové podloží.



Obr. 2 Příklad zabudování pohonné jednotky [16]

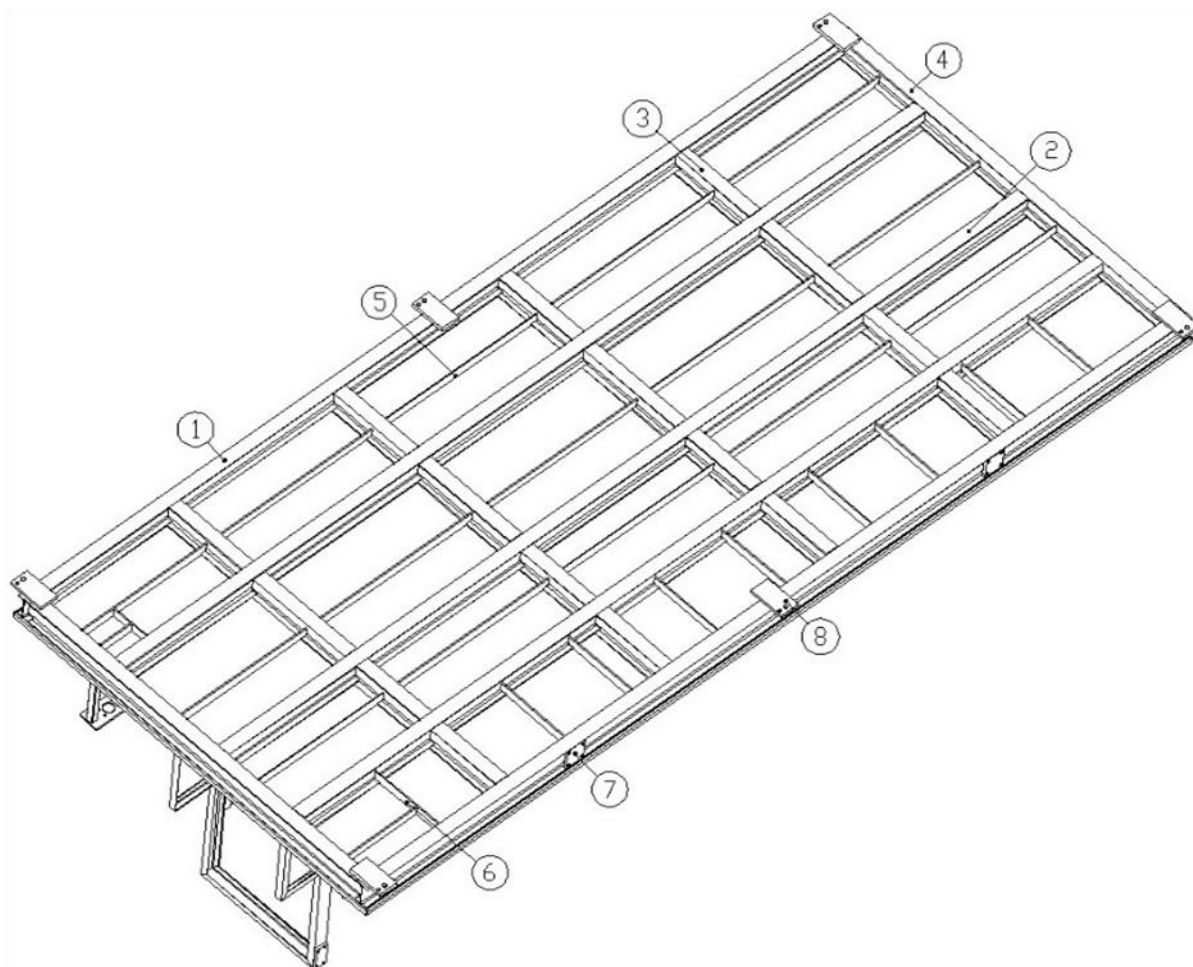
2.1 POUŽÍVANÉ KONCEPCE RÁMU

V této kapitole jsou popsána jednotlivá nejpoužívanější konstrukční řešení rámu. Tato řešení se odlišují hlavně použitými profily pro vnější a vnitřní nosníky. Dále jsou použité profily rozděleny na hlavní nosné a pomocné. Další rozdělení je možné podle druhu okapových van, kdy jsou vany z plechu nebo samotných nosníků.

RÁM S OBVODOVÝMI A VNITŘNÍMI IPE PROFILY

Základní konstrukce rámu je složena pouze z profilů IPE (obr. 3). Ty tvoří jak vnější obvodové strany, tak vnitřní „strukturu“. Toto řešení je zvoleno pro rámy s největšími rozměry z důvodu vysoké únosnosti profilu a jeho nižší ceně. Podélné nosníky jsou v celé délce nepřerušené. Výjimku tvoří vnitřní nosníky, které jsou na každém svém konci zkráceny o šířku příčného nosníku. Vnější příčné nosníky jsou v celé délce nepřerušené, ale vnitřní mají svou délku danou rozteč mezi podélnými nosníky.

Pásnice nosníků jsou na koncích přiléhajících k nosníkům k nim kolmým navíc vhodně zkráceny tak, aby stojiny profilů na sebe vzájemně doléhaly a umožňovaly tak vytvoření svaru v co největší možné délce.



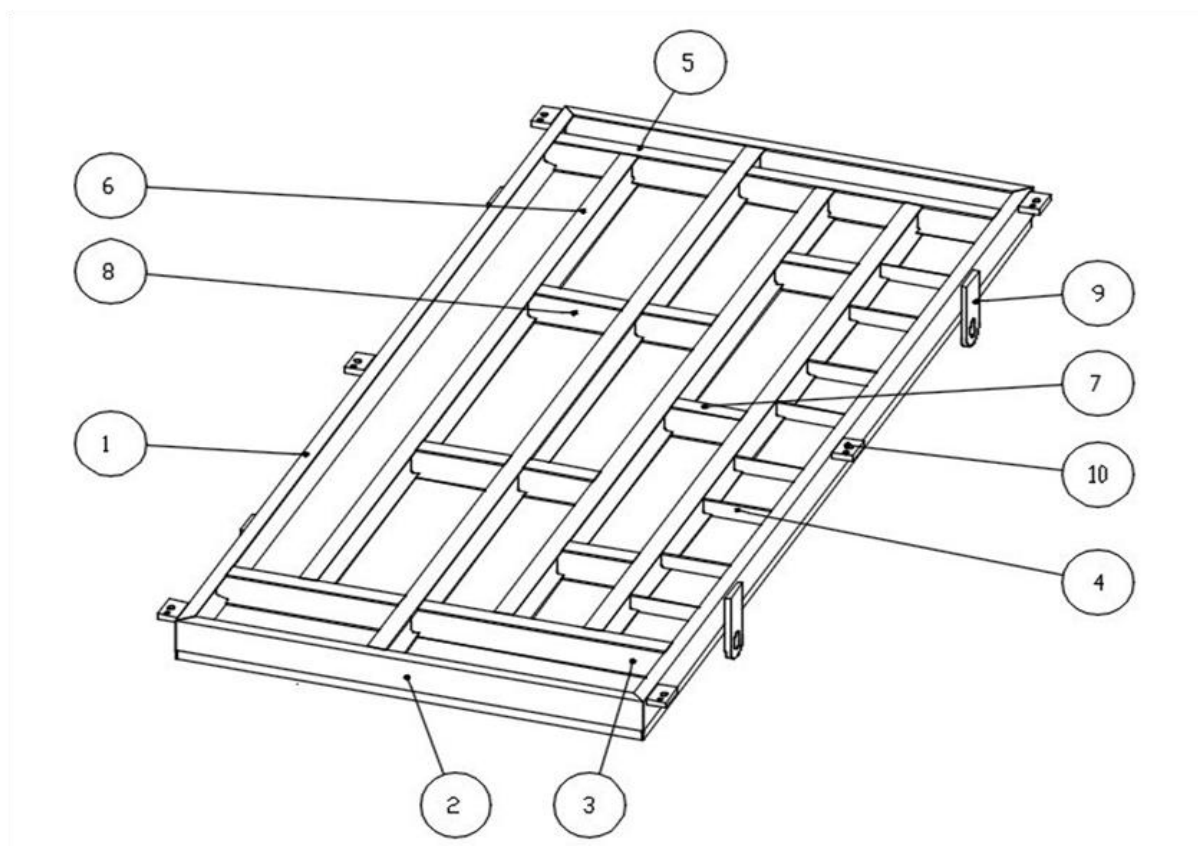
Obr. 3 Rám s nosnými IPE profily [16]: 1 – podélný vnější nosník, 2 – podélný vnitřní nosník, 3 - příčný vnitřní nosník, 4 – příčný vnější nosník, 5 – podélná výztuha, 6 – příčná výztuha, 7 – žebro pro uchycení závěsného oka, 8 – dosedací patka

Jako výztuhy pod prvky agregátu nacházející se na rámu jsou použity ploché tyče, s delší stranou orientovanou vertikálně. Jsou umístěny jak podélně, tak příčně v místech, kde jsou uchyceny prvky na rám a snižují tak namáhání plechové vany a zamezují jejímu ohybu a poškození.

Na spodních pásnicích podélných nosníků jsou přivařeny patky zajišťující uchycení celého celku k podloží. Podle velikosti rámu jsou v počtu 4 – 6. Dále jsou mezi pásnicemi na vnější straně podélných nosníků navařena žebra umožňující uchycení závěsných ok. K této konstrukci je přivařena plechová vana.

RÁM S OBVODOVÝMI PROFILY U A VNITŘNÍMI PROFILY IPE

Obvodové nosníky jsou tvořeny profilem U a jsou orientovány přírubami dovnitř. Na jednotlivých koncích jsou nosníky ve vertikální rovině seříznuty pod úhlem 45° pro zajištění kolmosti. (obr. 4). Vnitřní nosníky jsou tvořeny výhradně IPE profily a mají konstrukční úpravu shodnou s nosníky v předchozí kapitole.



Obr. 4 Rám s U profily a IPE profily [16]: 1 – podélný vnější nosník, 2 – příčný vnější nosník, 3 – příčný vnitřní nosník, 4 – příčná výztuha, 5 - příčný vnitřní nosník, 6 – podélný vnitřní nosník, 7 – příčný vnitřní nosník, 8 - příčný vnitřní nosník, 9 – závěsné oko, 10 – dosedací



Jako výztuhy jsou opět použity ploché tyče s orientací delší strany vertikálně. Nosná oka a patky jsou tentokrát přivařeny přímo ke stojině podélných nosníků.

Na obr. 5 je zobrazena samostatná pohonná jednotka skládající se z jedné motorové skupiny. Konstrukce je pouze z nosných profilů bez okapové vany. Tato jednotka se připojuje přímo k nádrži.



Obr. 5 Samostatná pohonná jednotka [16]

RÁM S OBVODOVÝMI PROFILY U A VNITŘNÍMI PROFILY ČTVERCOVÉHO PRŮŘEZU

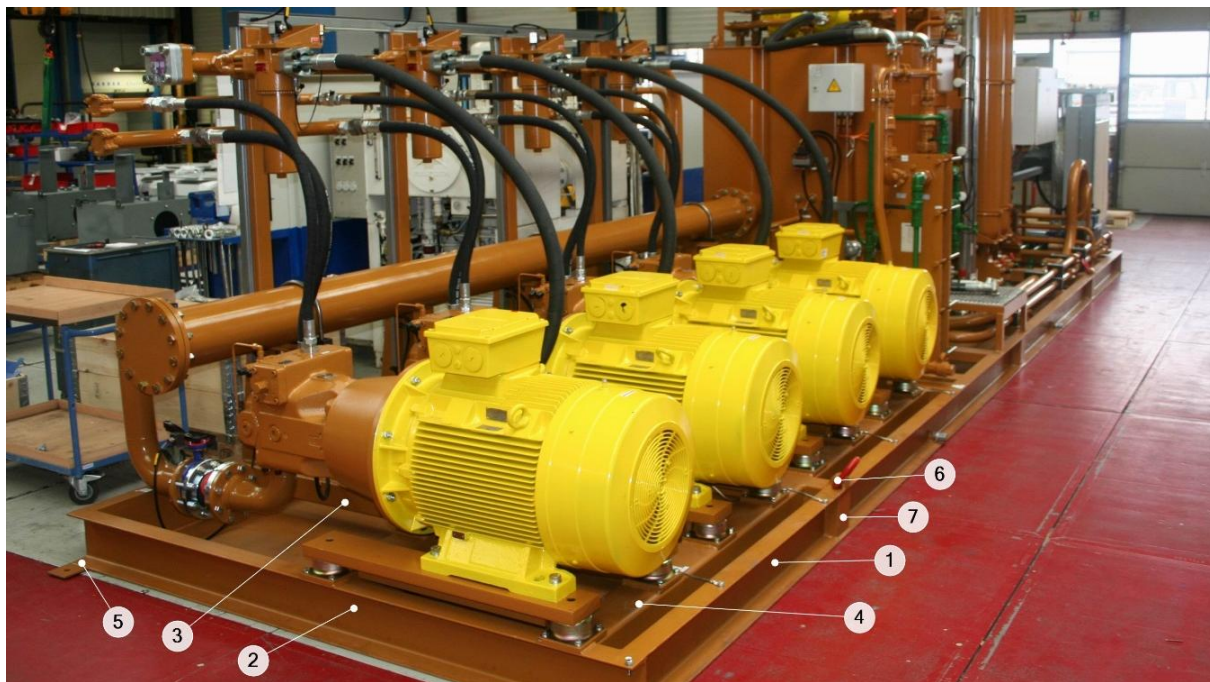
U tohoto typu konstrukce jsou jako obvodové nosníky použity opět profily U, ale jejich příruby jsou orientovány vně. Vnitřní nosníky, tvořené uzavřenými profily čtvercového průřezu tak mohou být přivařeny k vnějším nosníkům bez dodatečných úprav (obr. 6).

Pro pomocné vyztužení je použito profilů L. V tomto případě jsou použity dvě různé délky. Jedny se nachází na spodní straně hlavních nosníků a jsou zároveň přivařeny k plechu. Ten je přivařen ke spodní hraně stojiny a tvoří tak společně s vnějšími nosníky záchytnou vanu. Toto řešení se odlišuje od předchozích typů



van, kdy vana uchycená na horní pásnici slouží pouze jako vana okapová. Kratší výztuhy jsou přivařeny pouze jedním koncem k nosníku.

Patky jsou přivařeny k přírubě nosníku a jejich spodní strany jsou v jedné rovině. Závěsná oka jsou nejčastěji přivařena k horní přírubě nosníku. Tato oka jsou v provedení LBS, viz kap. 2.3. Jako výztuha pod uchycením oka slouží žebro.



Obr. 6 Rám tvořící okapovou vanu [16]: 1 – podélný vnější nosník, 2 – příčný vnější nosník, 3 – příčný vnitřní nosník, 4 – výztuha, 5 – dosedací patka, 6 – závěsné oko, 7 – žebro

RÁM S OHÝBANÝMI TENKOSTĚNNÝMI PROFILY A PROFILY I

Tento typ rámu nezahrnuje podélné nosníky. Je použit u agregátů zahrnující také nádrž. Příčné nosníky jsou přímo navařeny k nádrži a ta tak tvoří součást rámu (obr. 7).

Vnější nosníky jsou vyrobeny z ohýbaného plechu, který je pro zvýšení příčné tuhosti vyztužen žebry tvaru vnitřního profilu v pravidelných roztečích. Konce nosníků jsou prodlouženy za hranu nádrže a otvory pro uchycení k podloží jsou vytvořeny přímo do prodloužených konců nosníků. Odpadá tak použití navařovacích patek. Jako vnitřní příčné nosníky jsou použity profily typu I nebo IPE.



Závěsná oka jsou uchycena k vrchní straně nádrže ve vyztužených místech přivařením nebo našroubováním a jsou v provedení LBS.



Obr. 7 Rám s ohýbanými tenkostěnnými profily [16]: 1 – vnější nosník, 2 – vnitřní nosník, 3 – žebro vnějšího nosníku, 4 – závěsné oko

RÁM S OBVODOVÝMI A VNITŘNÍMI PROFILY Z UZAVŘENÝCH SVAŘOVANÝCH PROFILŮ

Rám je tvořen hlavními podélnými nosníky, které jsou z uzavřených svařovaných profilů obdélníkového průřezu. Vnější příčné nosníky zde nejsou. Vnitřní příčné nosníky jsou tvořeny také uzavřenými svařovanými profily, ale čtvercového profilu (obr. 8).

Vedlejší pomocné výztuhy tvoří ploché tyče s delší stranou orientovanou vertikálně. Výztuhy jsou orientovány jak podélně, tak vertikálně.

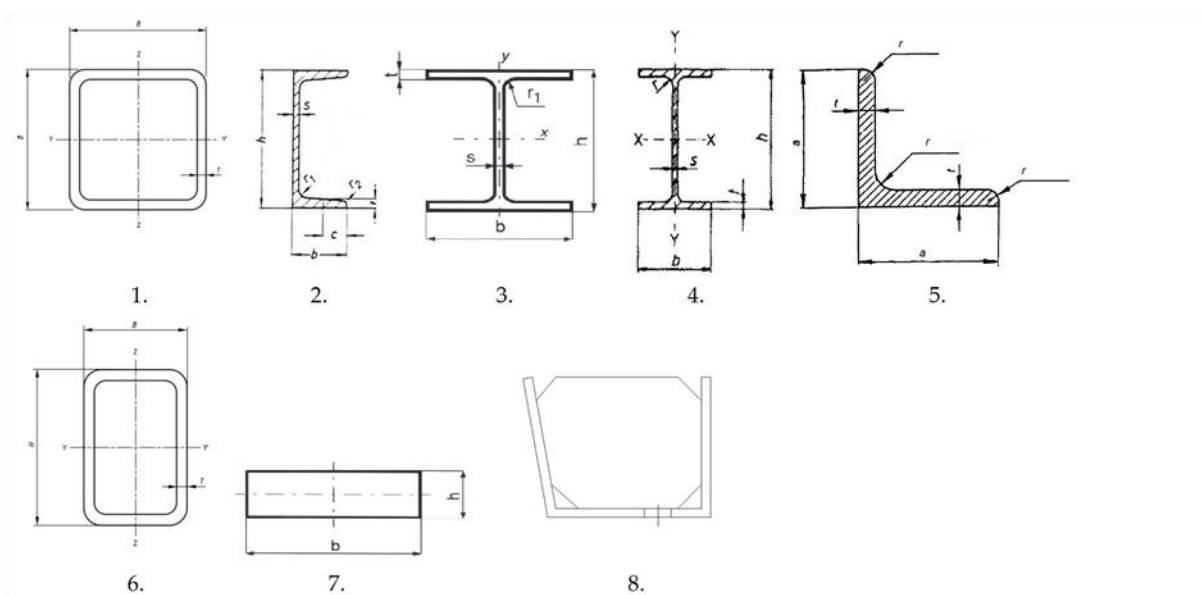
Patky jsou navařeny na boky obdélníkových profilů. Jejich počet záleží opět na délce rámu. Závěsná oka jsou navařena k vnějším profilům a zároveň k záchytné vaně. Tyto oka jsou orientována příčně k podélné ose rámu.



Obr. 8 Rám z uzavřených svařovaných profilů [16]: 1 – podélný vnější nosník, 2 – příčný vnitřní nosník, 3 - výztuha

2.2 POUŽITÉ PROFILY

V tab. 1 a na obr. 9 je přehled profilů používaných pro konstrukci rámu. Mezi profily používané pro hlavní nosníky patří profily IPE, U a uzavřený svařovaný obdélníkový profil. K těmto profilům se dále řadí ohýbaný profil, viz obr. 9.8, který



Obr. 9 Profily používané pro konstrukci rámu [13]: 1 – uzavřený svařovaný profil čtvercového průřezu, 2 – U profil, 3 - HEB profil, 4 – IPE profil, 5 – L profil, 6 – uzavřený svařovaný profil obdélníkového průřezu, 7 – plochá tyč, 8 – ohýbaný profil s žebrem



není v tabulce uveden. Tento profil bývá součástí rámu nádrží a používá se v rozdílných tvarech. Pro zvětšení jeho tuhosti jsou na jeho vnitřní straně navařena žebra. Mezi profily používané pro vedlejší nosníky se řadí profily HEB, L, plochá tyč a uzavřený svařovaný čtvercový profil. Pro porovnání jsou zařazeny profily se stejnými vnějšími rozměry a u uzavřených profilů je tloušťka stěny volena tak, aby se hmotnost pohybovala v hodnotách nejbližších zbylým profilům. Plochá tyč je v tabulce uvedena ve dvou polohách. Používanější je nastojato z důvodu většího průřezového modulu v ohybu.

Nejpoužívanějším profilem pro konstrukci rámu pro hydraulická zařízení je IPE profil. Profil U může být orientován přírubami dovnitř nebo ven. Profil L je použit zejména jako součást rámu pro elektrický rozvaděč. Profily HEB a čtvercového průřezu jsou také používány jako základny pro uchycení motorových skupin.

Tab. 1 Přehled nepoužívanějších profilů [13]

Typ nosníku	Profil (S235JR)	Výška x šířka h x b (mm)	Hmotnost m (kg·m ⁻¹)	Průřezový modul W _x (cm ³)	Cena bez DPH (Kč·m ⁻¹)
Hlavní	IPE 200 DIN 1025-5	200 x 100	22,40	194,00	412,38
	U 200 DIN 1026-1	200 x 75	25,30	191,00	436,17
	□ 200x100x8 EN 10219	200 x 100	32,89	230,60	937,00
Vedlejší	HEB 100 DIN 1029-2	100 x 100	20,40	89,90	375,56
	L 100x100x12 EN 10056	100 x 100	17,80	27,02	321,30
	□ 100x100x8 EN 10219	100 x 100	20,76	83,68	434,51
	100x30 EN 10058	100 x 30	23,60	50	418,90
		30 x 100		15	

2.3 DALŠÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY

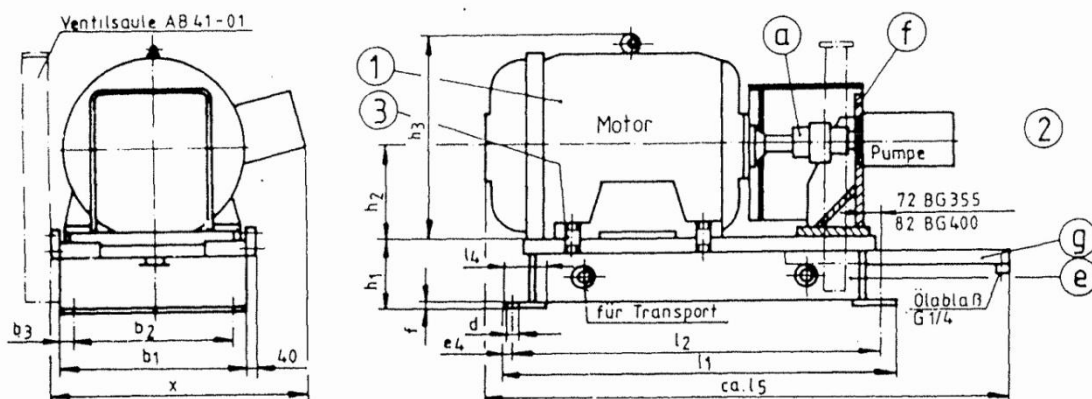
V této kapitole budou popsány další nedílné součásti hydraulického agregátu nacházející se na nosném rámu. Tyto součásti nemají významný podíl na celistvosti a tuhosti rámu. Přesto je s nimi v modelu počítáno pro jejich případné úpravy.

OKAPOVÁ/ZÁCHYTNÁ VANA

Existují dva typy van zachycujících hydraulickou kapalinu. Prvním typem je okapová vana, která bývá jako plech tloušťky 4 – 5 mm s ohnutými okraji přivařena na horní straně rámu. Druhým typem je ohýbaná vana navařená dovnitř rámu s okraji výšky rovné výšce nosníků, které uspořádáním vytvoří potřebný prostor, viz obr. 6. Další možností je vytvoření olejotěsného svaru po obvodu těchto nosníků. Tato metoda se nepoužívá kvůli vysokým nákladům.

UCHYCENÍ MOTOROVÝCH SKUPIN

Jako nosníky jsou použity profily typu HEB. Tyto nosníky jsou přivařeny k olejové vaně nebo k hlavním nosníkům, pokud je použito navařené vany dovnitř rámu. Rámy s motorovými skupinami jsou uchyceny k těmto celkům pomocí silentbloků.



1 – elektromotor, 2 – hydrogenerátor, 3 – horní plech rámu s pojistkami proti bočnímu posunu elektromotoru mimo rám, a – spojka, e – spodní část rámu, f – konzola k uchycení hydrogenerátoru, g – olejová vana pod hydrogenerátorem

Obr. 10 Pohonná jednotka na rámu [4]

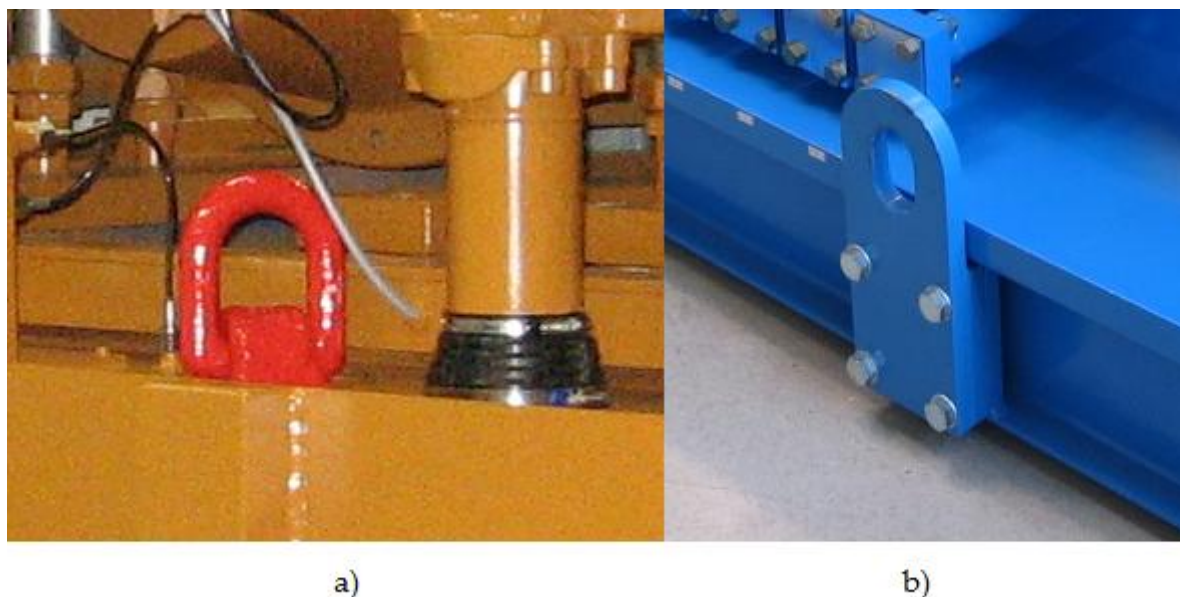
RÁM PRO ELEKTRICKÝ ROZVADĚČ

Rám je tvořen L a U profily ve tvaru uzpůsobeném velikosti rozvaděče. Hlavní nosný prvek je tvořen svařencem U profilů, L profily poté tvoří pouze podporu spodní straně rozvaděče (obr. 13).

ZÁVĚSNÁ OKA

Podle typu vnějších nosníků jsou použity nejčastěji dva typy ok. Mezi tyto dva typy patří jednoduchá oka vypálená z tlustého plechu a výklopná typu LBS. V případě, že jsou vnější strany otevřené, tak jsou jednoduchá oka přišroubována na žebra. U uzavřených stran se tato oka navařují přímo. Oka provedení LBS mohou být navařena přímo na konstrukci nebo našroubována pomocí závitů ve své spodní části.

U posuzovaného rámu jsou použita jednoduchá oka přišroubovaná k žebřům vnějších nosníků. Tato oka se skládají ze dvou kusů tlustého plechu, které jsou k sobě svařeny.



Obr. 11 Závěsná oka [16]: a) závěsné oko typu LBS, b) závěsné oko uchycené pomocí šroubů

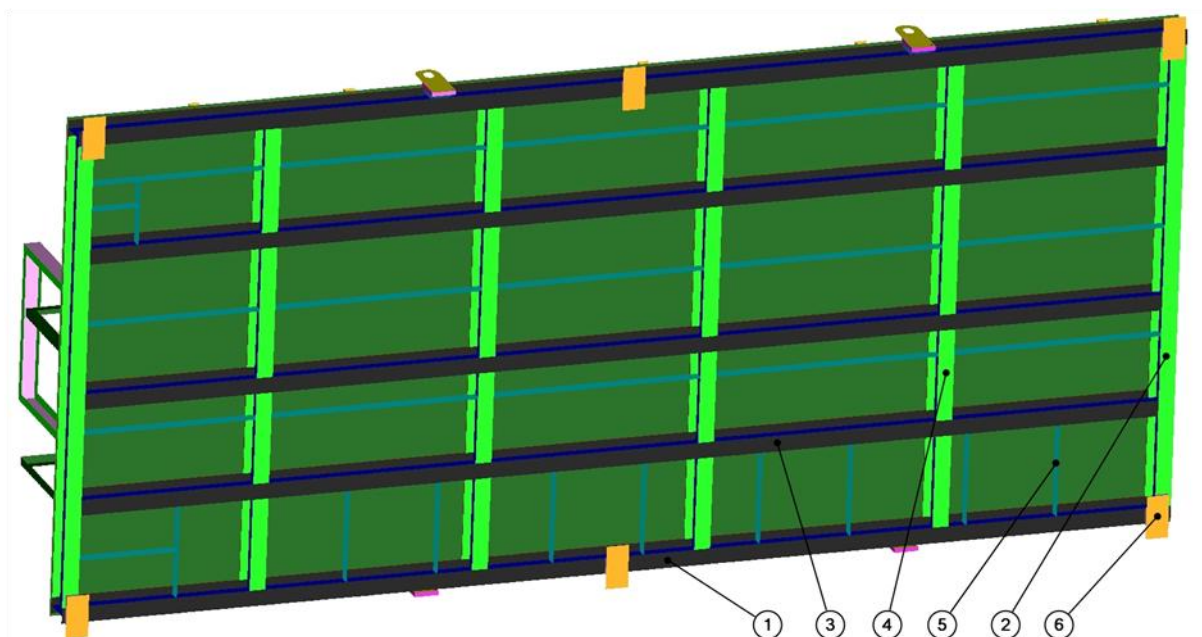
DOSEDACÍ PATKY

Jsou vyrobeny z ploché tyče a přivařeny k nosníkům. Patky jsou navařeny na spodní stranu podélných nosníků nebo jejich dosedací plocha je ve stejné rovině jako spodní plocha nosníku. Další možností je použití prodloužených nosníků s upravenými konci pro jejich uchycení.



2.4 KONSTRUKCE VLASTNÍHO RÁMU

V této kapitole je popsán rám, který je v této práci posuzován. Jedná se o rám hydraulické pohonné jednotky, která je součástí agregátu se samostatnou nádrží. Tento rám je uchycen na vyvýšené ocelové konstrukci. Vlastní rám je zobrazen na obr. 12 a obr. 13. Rám je svařen pomocí metody tavného svařování.



Obr. 12 Vlastní rám, spodní pohled: 1 – vnější podélný nosník, 2 – vnější příčný nosník, 3 – vnitřní podélný nosník, 4 – vnitřní příčný nosník, 5 – vedlejší nosník, 6 – dosedací patka

HLAVNÍ A VEDLEJŠÍ NOSNÍKY

Hlavní nosníky a to jak vnější tak vnitřní jsou tvořeny profily IPE 200. Vnitřní příčné nosníky vyplňují rozteče mezi celistvými podélnými nosníky. Vedlejší nosníky tvoří ploché tyče s rozměry 80 x 10 mm.

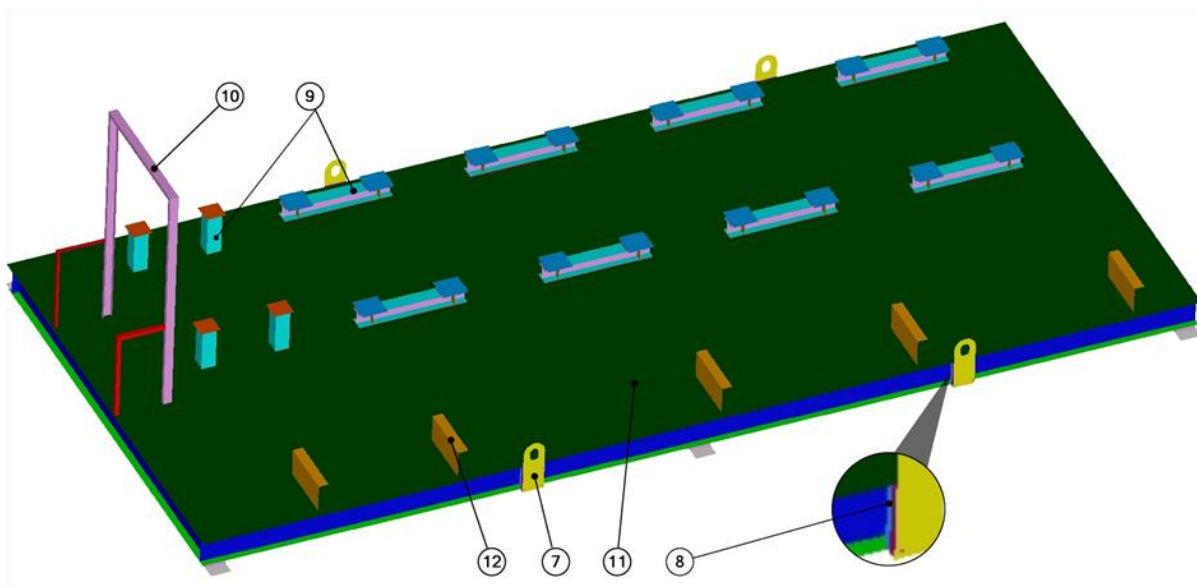
RÁM PRO ELEKTRICKÝ ROZVADĚČ A UCHYCENÍ MOTOROVÝCH SKUPIN

Na obr. 13 je horní pohled na rám s dobře viditelným rámem pro rozvaděč a uchycení pro motorové skupiny. Rám pro rozvaděč je tvořen profily U 100 sestavenými do tvaru U a profily L 50 ve tvaru L. Samotný rozvaděč je uchycen pomocí silentbloků. Uchycení motorových skupin s motory o výkonu 355 kW tvoří profil HEB 100 s dvěma žebry mezi pásnicemi a dvěma přivařenými deskami rozměru 175 x 175 mm tloušťky 20 mm s otvory pro šrouby. Uchycení pro motorovou

skupinu s motorem o velikosti 175 kW je tvořeno čtyřmi tenkostěnnými profily čtvercového průřezu o rozměru 100 x 10. Na těchto profilech jsou přivařeny desky 140 x 140 x 15 mm.

ZÁVĚSNÁ OKA, DOSEDACÍ PATKY A UCHYCENÍ POTRUBÍ

Patky jsou tvořeny plochými tyčemi s rozměry 270 x 140 x 30 mm. Na rámu se nachází celkem 6 těchto patek. Uchycení potrubí tvoří plech tloušťky 8 mm ohnutý do tvaru L s žebrem o stejné tloušťce. Závěsné oko je tvořeno vlastním okem a muzikusem, které jsou svařeny. Mezikus slouží ke zvětšení rozteče mezi okem a žebrem z důvodu přečnávající okapové vany, viz (obr. 11b). Obě části mají tloušťku 25 mm. Žebro pro uchycení tohoto oka má tloušťku 20 mm. Každé ze čtyř ok je uchyceno k žebru čtyřmi šrouby M20-8.8.



Obr. 13 Vlastní rám, horní pohled: 7 – závěsné oko, 8 – žebro závěsného oka, 9 – nosníky motorových skupin, 10 – rám elektrického rozvaděče, 11 – okapová vana, 12 – uchycení nízkotlakého (sacího) potrubí



3 ROZBOR SIL PŮSOBÍCÍCH NA RÁM

Pro správnou pevnostní analýzu a zkoumání chování rámu během zatěžování je potřeba správně identifikovat silové účinky, které na rám během jeho provozu a transportu působí a zapříčiňují tak jeho deformaci a napětí. Podle způsobu zatížení se tyto silové účinky rozdělují do jednotlivých skupin, tzv. zatěžovacích stavů.

3.1 PRACOVNÍ POLOHA

Při tomto stavu je rám postaven na pevném podloží a spočívá na šesti patkách popsanych v kapitole 2.3. Není zatěžován žádnými dalšími silami. Působí na něj pouze tíhové zrychlení $g = 9,807 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Tento stav odpovídá pracovní poloze zařízení.

3.2 MANIPULACE S RÁMEM

Při tomto stavu je rám zavěšen na čtyřech závěsných okách, která jsou popsána v kapitole 2.3. Rám není zatěžován žádnými dalšími silami. Působí na něj pouze tíhové zrychlení $g = 9,807 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Pro velmi nízkou rychlost při manipulaci s rámem není zahrnuto žádné zrychlení od pohybu kočky jeřábu.



Obr. 14 Transport rámu s pohonnou jednotkou [16]



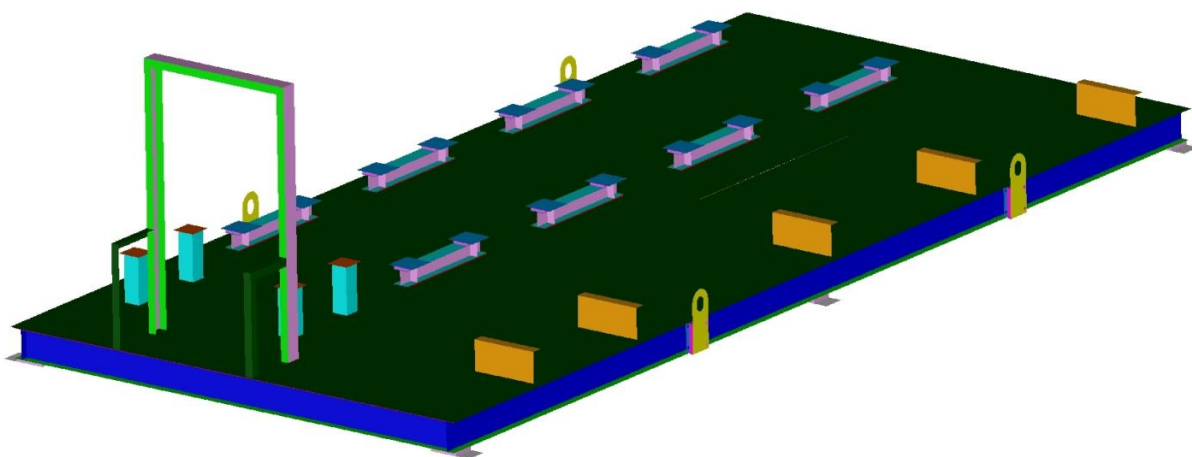
4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (MKP), anglicky Finite element method (FEM), je často používaná numerická metoda pro řešení výpočtů v oblasti strojního inženýrství. Slouží k simulaci deformací, napětí, atd. na virtuálním fyzikálním modelu. MKP vyžaduje rozdělení na konečný počet podoblastí – prvků. Na modelu se tedy vytvoří síť konečných prvků. Prvek je charakterizován dimenzí, tvarem, počtem a polohou uzlů. Počet a typ použitých prvků ovlivňují kvalitu výsledku. [11]

4.1 FEM MODEL RÁMU

Pro analýzu pomocí MKP byl vytvořen skořepinový model. U tohoto typu modelu jsou jednotlivé profily nahrazeny plochami střednic, kterým jsou přiřazeny tloušťky a vlastnosti materiálů. Z důvodu zjednodušení bylo zanedbáno sražení a zaoblení hran. Zaoblení je vytvořeno pouze tam, kde se předpokládá výrazný vliv na stav napjatosti (závěsná oka).

Celý rám má svůj objem, ale pro potřeby výpočtu byly použity pouze plochy, tzv. střednice jednotlivých profilů, vytvořené jeho rozřezáním. Tloušťky jednotlivých střednic jsou zobrazeny na obr. 15 a uvedeny v tab. 2. Celý model je zobrazen v příloze P1.



Obr. 15 Zobrazení tloušťek profilů na FEM modelu



Tab. 2 Tloušťka střednic modelu

Barva	Tloušťka střednice t (mm)
Světle zelená	8,5
Tmavě modrá	5,6
Bílá	30
Žlutá	25
Světle modrá	20
Tyrkysová	10
Tmavě olivová	5
Růžová	6
Zlatá	8
Oranžová	15
Červená	4
Fialová	18
Světle fialová	7

4.2 POUŽITÉ PRVKY

Příprava modelu byla provedena v prostředí NX I-deas. V textu budou uváděny názvy prvků dle názvosloví tohoto programu.

BEAM

Obečný prutový jednorozměrný prvek v prostoru přenáší kombinaci namáhání tah/tlak, ohyb a krut. Prvek je definován dvěma uzly, materiálem a průřezem. V uzlu má 6 deformačních parametrů (3 posuvy a 3 natočení). [12]

V modelu je použit jako náhrada šroubů, které slouží k uchycení závěsných ok k žebrům (obr. 16) nebo jako pomocný prvek při nahrazení rozložení hmotnosti.

THIN SHELL

Je to čtyřuzlový prvek. Definován přiřazenou tloušťkou a vlastnostmi materiálu, který nahrazuje. Definuje se na střednicové rovině daného profilu. Na modelu nahrazuje jednotlivé profily.

**CONSTRAINT (RBE3)**

Jedná se o nehmotný prvek s konečnou tuhostí. Spojuje dva nebo více uzlů. U modelu je použit ke spojení šroubů se závěsnými oky, rozložení hmotností motorových skupin (obr. 19), potrubí a rozvaděče. A dále jako mezistupeň uchycení celého rámu pomocí dosedacích patek k podlaze (obr. 20).

RIGID (RBE2)

Jedná se o nehmotný prvek s nekonečnou tuhostí. Spojuje dva nebo více uzlů. U modelu je použit jako spojení transportních lan se závěsnými oky (obr. 18).

SPRING

Tento prvek slouží jako náhrada pružin. Definován tuhostí a dvěma uzly. V modelu nahrazuje okrajové podmínky a slouží jako nahrazení podloží a u stavu transportu jako stabilizace rámu.

ROD

Varianta prvku BEAM. Může přenášet tah/tlak. Ve FEM modelu slouží jako náhrada transportních lan.

COUPLED DEGREE OF FREEDOM (COUPLED DOF)

Kinematická vazba, slouží definici stupňů volnosti mezi jednotlivými uzly. Použita jako náhrada spojení mezi prvkem CONSTRAINT u dosedacích patek a vazby nahrazující podloží (obr. 20). Při zatěžovacím stavu zavěšení se tato vazba vypne a nebude se tak simulovat uchycení k podloží.

LUMPED MASS

Tento prvek nahrazuje zatížení a umísťuje se do uzlu. Definován hmotností a momenty setrvačnosti. U modelu nahrazuje hmotnosti motorových skupin, potrubí a elektrického rozvaděče.



4.3 MATERIÁL POUŽITÝCH PROFILŮ

Správná definice materiálu pro geometrii modelu je důležitá pro přesnost výpočtu. Proto je nutné správně zadat parametry materiálu použitého na modelu.

Rám je svařen z oceli S235JR/1.0038, případně S235JRH/1.0039, která je použita pro duté profily. Tato ocel má ekvivalent dle ČSN v podobě oceli 11 375. Pro FEM model je tento materiál definován jako homogenní, izotropní a lineární.

Lineární materiál je definován Hookovým zákonem jako lineární vztah mezi deformací a napětím a je charakterizován materiálovými vlastnostmi uvedenými dále v tab. 3.

Tab. 3 Vlastnosti materiálu

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	210 000	(MPa)
Modul pružnosti ve smyku	G	80 769	(MPa)
Poissonovo číslo	μ	0,3	(-)
Hustota oceli	ρ	7 820	(kg·m ⁻³)

OCEL S235JR/1.0038 DLE EN 10025-2

Nelegovaná konstrukční ocel vhodná pro ploché a dlouhé výrobky válcované za tepla v tloušťkách do 250 mm. Ocel není určena k tepelnému zpracování kromě výrobků dodávaných s označením +N, které mohou být dodatečně tvářeny za tepla a/nebo normalizačně žíhány. Také je možné žíhání k odstranění vnitřního napětí. Ocel je vhodná pro použití ve svařovaných, šroubovaných a nýtovaných konstrukcích. Ocel je vhodná ke svařování. [14] [15]

Minimální mez kluzu R_{eS235} [MPa] pro výrobky jmenovité tloušťky v mm: [15]

do 16 mm ... $R_{eS235} = 235$ MPa

od 16 mm do 40 mm ... $R_{eS235} = 225$ MPa

Pevnost v tahu R_{mS235} [MPa] pro výrobky jmenovité tloušťky v mm: [15]

do 100 mm ... $R_{mS235} = 360 - 510$ MPa



4.4 NÁHRADY KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ

V prostředí NX I-deas je vymodelován základní nosný rám podle výkresové dokumentace a potřebné části, které mají vliv na rám, jsou nahrazeny pomocí virtuálních prvků popsaných v kapitole 4.2.

Z CAD modelu dodaného firmou Bosch Rexroth, spol. s.r.o. byly v programu PTC Creo 2.0 zjištěny souřadnice těžiště a hmotnosti motorových skupin, elektrické rozvodnice a sacího potrubí. Tyto hodnoty byly dále použity jako vlastnosti pro prvky nahrazující zatěžující hmotnosti.

4.4.1 NÁHRADA ŠROUBŮ

Šrouby jsou spojovací součásti, které se používají k rozebíratelnému spojení dvou nebo i více strojních dílů. U skutečného rámu tak i u modelu jsou šrouby použity ke spojení závěsných ok s žebry vnějších podélných nosníků.

Jmenovité hodnoty meze kluzu a pevnosti v tahu šroubů dle ČSN EN 1993-1-8. [9]

Jmenovitá mez kluzu f_{yb} [MPa] pro pevnostní třídu šroubů 8.8:

$$f_{yb} = 640 \text{ MPa}$$

Jmenovitá pevnost v tahu f_{ub} [MPa] pro pevnostní třídu šroubů 8.8:

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

První možností nahrazení šrouby je použití prvku (RIGID). Pro tento případ je vhodnější náhrada těchto šroubů pomocí prutového prvku (BEAM), kterému je přiřazen průřez šroubu a materiálová charakteristika. Pomocí vazby (CONSTRAIN) jsou koncové uzly prutového prvku spojeny se skořepinovou sítí. V místě díry pro šroub je tato síť zhuštěna.

PŘEDPĚTÍ ŠROUBŮ

U většiny šroubových spojů dochází při montáži vlivem utahování šroubu, případně matice ke vzniku osově síly předpětí, která působí v šroubu ještě

před působením provozní síly. Tato síla způsobí prodloužení šroubu a stlačení spojovaných součástí. Velikostí je stejná pro tah ve šroubu i tlak ve spojovaných součástech. Její velikost musí zaručit, aby při zatížení provozními silami nedošlo ke ztrátě kontaktu spojených součástí. Tímto mezi šroubem a maticí vznikne silový styk. Poté na šroubový spoj začne působit provozní zatížení. [10]

Největší vliv na velikost předpětí F_{M20} při utahování spoje momentem M_A má součinitel tření na závitě a součinitel tření na dosedací ploše matice. Tyto součinitele jsou kromě drsnosti povrchu, mazivu a nečistotách závislé na povrchové úpravě šroubu a matice, stupni přesnosti a velikosti zatížení. Proto dochází při utahování šroubu momentem k velkému rozmezí dosahovaných hodnot předpětí.

VÝPOČET PŘEDPĚTÍ ŠROUBU [6]

Ke spojení nosných ok se žebry rámu byly použity šrouby M20 z oceli pevnostní třídy 8.8.

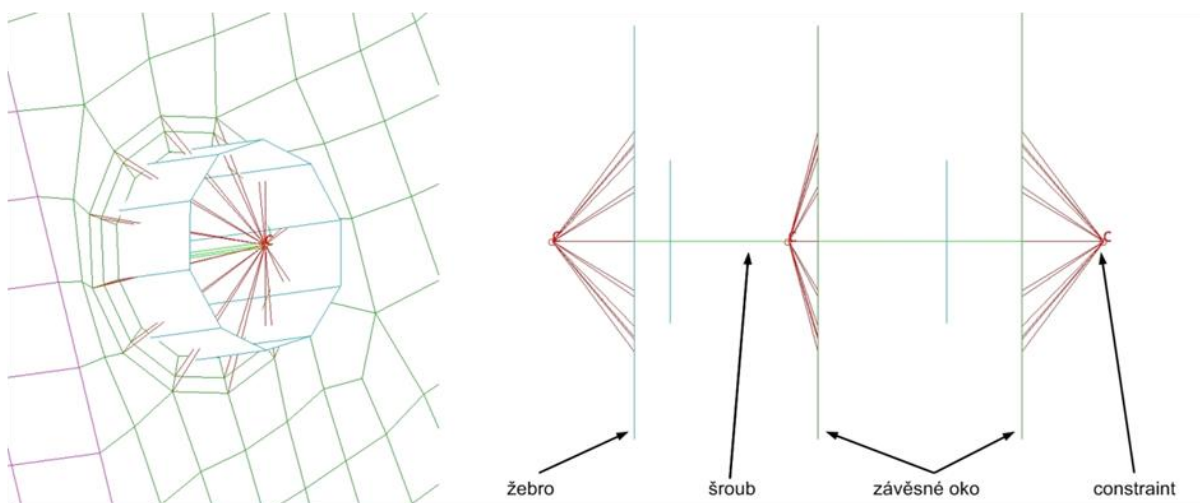
$$F_{M20} = \frac{M_A}{K_1 d_{20}} = \frac{464}{0,18 \cdot 0,020} = 128888,9 \text{ N} \quad (1)$$

Kde:

$M_A = 464 \text{ Nm}$ utahovací moment pro šrouby M20 [7]

$d_{20} = 18 \text{ mm}$ průměr šroubu M20

$K_1 = 0,18$ součinitel pro mazané šrouby [6]

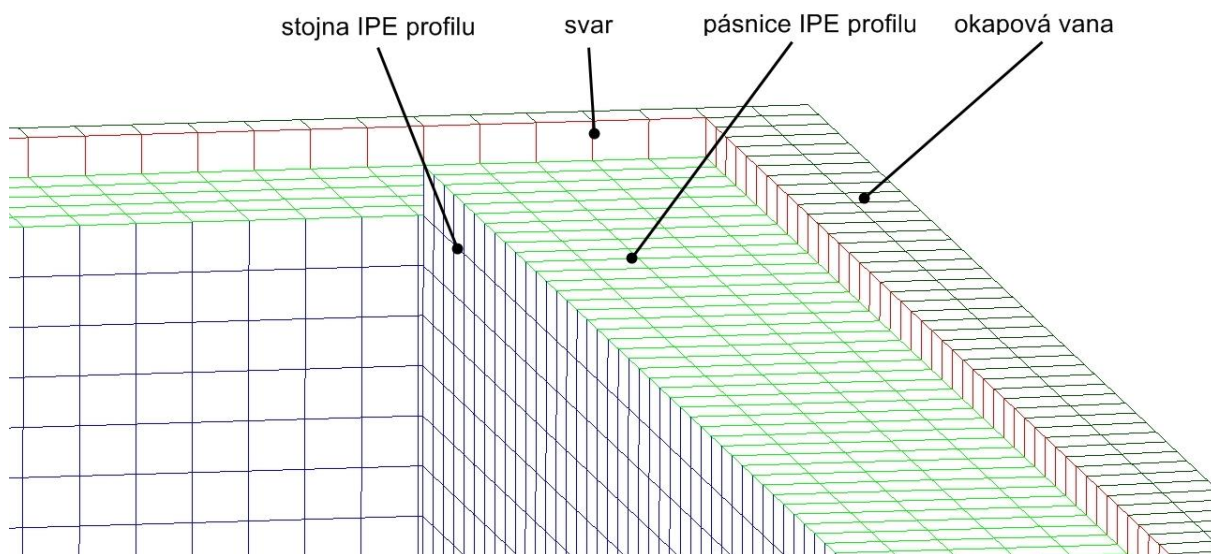


Obr. 16 Náhrada šroubů

Vypočítaná hodnota je v programu NX I-deas zadána prutovému prvku (BEAM), kterým jsou nahrazeny šrouby.

4.4.2 NAHRAZENÍ SVARŮ

Svary, které jsou u tohoto rámu vyrobeny metodou tavného svařování lze nahradit dvěma způsoby. Prvním způsob používaný u skořepinových sítí nerespektuje svar. Jeho provedení spočívá v přiřazení tloušťky o velikosti obou svařovaných plechů prvkům v oblasti svaru. Střednice se poté posouvá podle potřeby (OFFSET). Druhou možností je vymodelování střednicových ploch svařovaných plechů a jejich následné propojení skořepinovou sítí s tloušťkou odpovídající nosné výšce svaru (obr. 17). Tento způsob se více blíží realitě a je tedy použit na modelu.

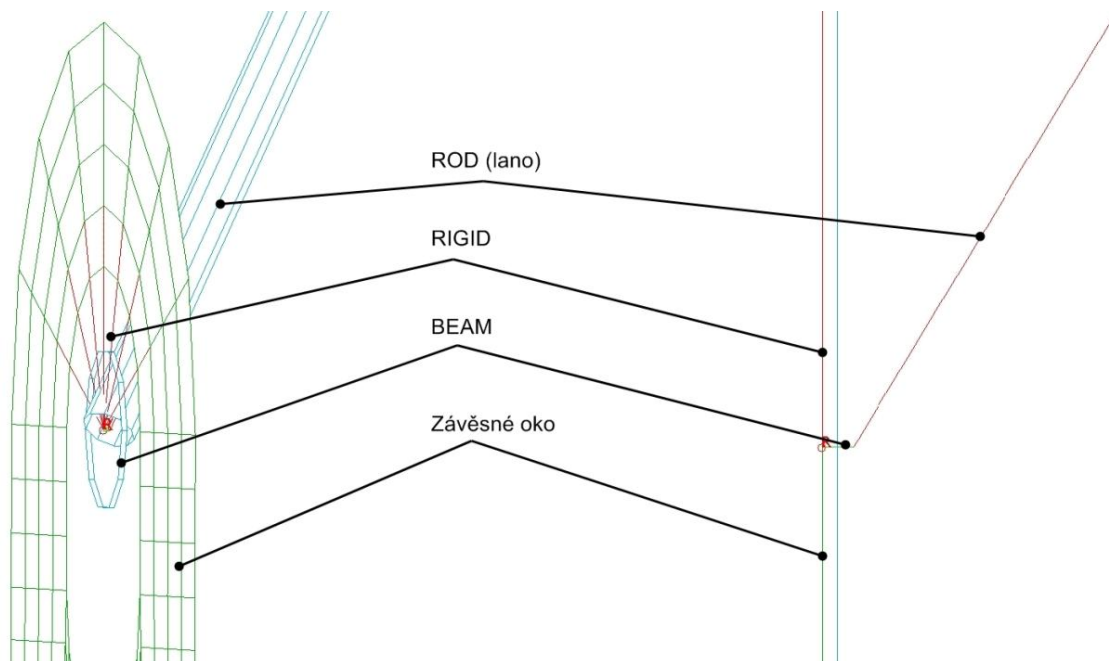


Obr. 17 Náhrada svaru

4.4.3 NAHRAZENÍ LAN

Nahrazení samotných lan bylo provedeno pomocí prvku ROD, který je popsán v kapitole 4.2. Lanům byl přiřazen větší průměr, z důvodu zajištění větší únosnosti, než je ve skutečnosti potřeba. Uchycení lan jejich horním koncem je provedeno do jednoho bodu, jak je tomu v případě transportu. V tomto bodě je vytvořen miniaturní prvek BEAM pro spojení s vazbou, která nahrazuje zavěšení na hák jeřábu (obr. 21a). Spodní konce lan jsou opět přes prvky BEAM spojeny s prvkem

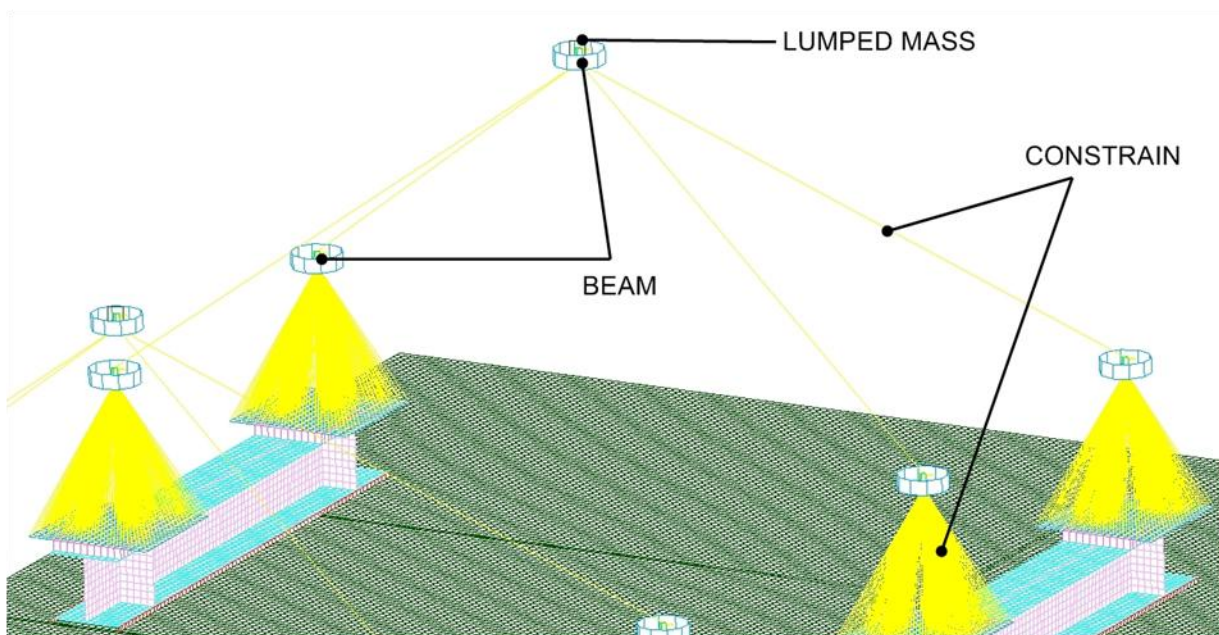
RIGID, který má nezávislé body propojené se sítí závěsných ok. Provedení je zobrazeno na obr. 18. Konec prvku BEAM, na který je napojen prvek RIGID, je v jedné rovině se střednicí oka, aby nevznikaly nežádoucí momenty.



Obr. 18 Náhrada transportních lan

4.4.4 NÁHRADA HMOTNOSTI MOTOROVÝCH SKUPIN

Hmotnost motorových je nahrazena prvkem LUMPED MASS, jak je popsáno v kapitole 4.2. Tato hmotnost je rozložena pomocí prvků CONSTRAINT na jednotlivé plochy k tomu určené. Mezi těmito jednotlivými prvky jsou jako spojovací elementy miniaturní prvky BEAM, viz obr. 19. Takto nahrazené jsou i hmotnosti elektrického rozvaděče a sacího potrubí. Setrvačné síly od elektromotorů nejsou uvažovány.



Obr. 19 Nahrazení hmotnosti motorových skupin

4.4.5 VYSOKOTLAKÉ POTRUBÍ

Hmotnost vysokotlakého potrubí byla spočtena pomocí rovnic (2), (3). Jednotlivé hmotnosti jsou znázorněny v tab. 4. Po dohodě se spolupracující firmou bylo rozhodnuto nezahrnovat tuto hmotnost do modelu. Vymodelování uchycení tohoto potrubí by ztížilo další vytváření sítě na modelu. Dalším důvodem byla samotná hmotnost, která není větší než 2,5% z celkové hmotnosti a je rozložena po celé délce rámu.

Příklad výpočtu hmotnosti vysokotlakého potrubí P1.

$$m_{cP1} = m_{pP1} L_{P1} = 21,68 \cdot 5,11 = 110,7 \text{ kg} \quad (2)$$

Kde: $m_{pP1} = 21,68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ hmotnost jednoho metru potrubí P1 [13]

$L_{P1} = 5,11 \text{ m}$ délka potrubí P1

Celková hmotnost vysokotlakého potrubí

$$\begin{aligned} m_c &= \sum m_{ci} = m_{cP1} + m_{cP2} + m_{cP3} \dots + m_{cU} + m_{cPSTN} = \\ &= 121,18 + 92,14 + 63,96 + \dots + 53,52 = 471,93 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3)$$

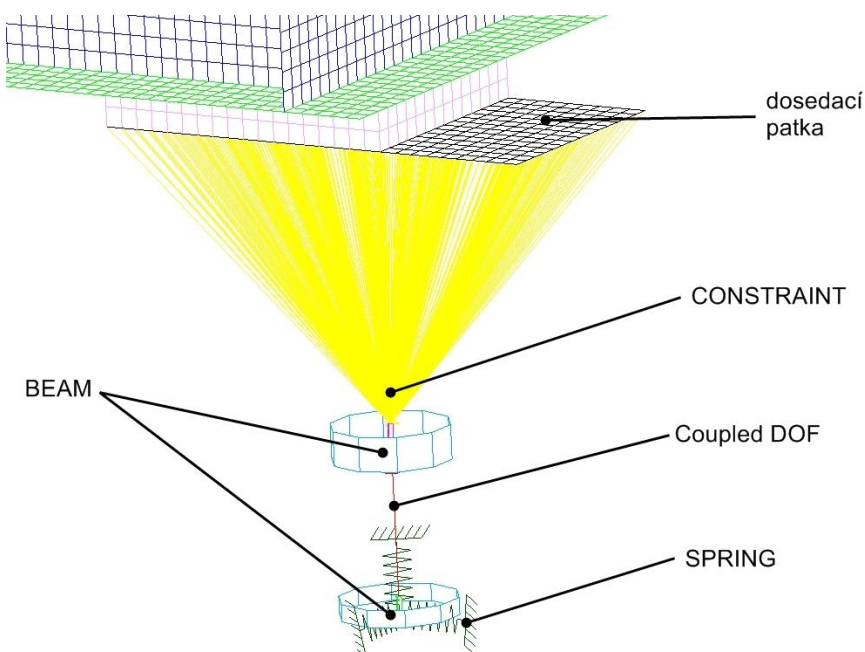
Kde: $m_{ci} = \dots [\text{kg}]$ hmotnosti jednotlivých potrubí

Tab. 4 Hmotnost vysokotlakého potrubí

Potrubí	Hmotnost [13] m_{pi} ($kg \cdot m^{-1}$)	Délka L_i (m)	Hmotnost celková m_{ci} (kg)
P1	21,68	5,61	121,18
P2	21,68	4,25	92,14
P3	21,68	2,95	63,96
P4	21,68	1,65	35,77
PSTH	3,08	6,52	20,10
Y	5,24	6,38	33,43
R	5,24	6,38	33,43
U	2,89	6,38	18,40
PSTN	8,39	6,38	53,52

4.5 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Ve FEM modelu, který nahrazuje geometrii celého rámu, je nutné definovat okrajové podmínky. Definování okrajových podmínek je důležité pro dosažení správných výsledků. Výhodou při výpočtu různých zatěžovacích stavů je použití stejného modelu, do kterého se pouze zadávají různé okrajové podmínky. Je tedy nutno zadat okrajové podmínky pro pracovní polohu a manipulaci s rámem.



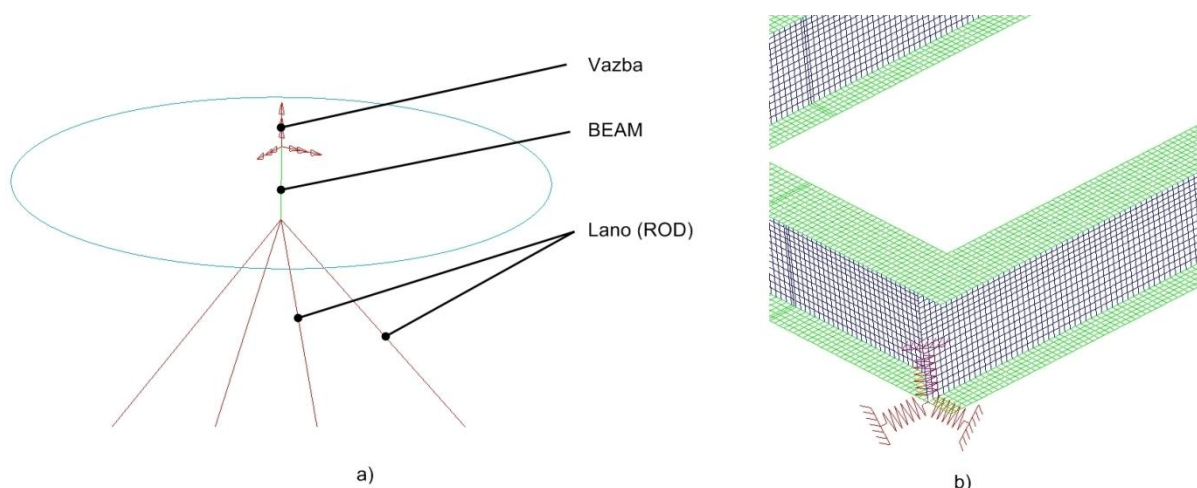
Obr. 20 Okrajové podmínky pracovní polohy

PRACOVNÍ POLOHA

U tohoto zatěžovacího stavu je nastaveno zrychlení o velikosti $9,807 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Uložení na podloží nahrazují pružiny (SPRING), které mají nastavenou vysokou tuhost ve všech třech osách a jsou tak ekvivalentem nerovné podlahy, na kterou rám nedosedne zcela přesně. Rozložení hmotnosti rámu z dosedacích patek je řešeno pomocí prvku CONSTRAINT (obr. 20). Tyto dva prvky jsou spojeny prvkem Coupled DOF. Ten je použit z důvodu uvedeného v kap. 4.2.

MANIPULACE S RÁMEM

U tohoto zatěžovacího stavu je nastaveno zrychlení o velikosti $9,807 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Nahrazení závěsných lan je popsáno v kapitole 4.4.3. Délka těchto lan je 3,4 m. Zavěšený rám je simulován v klidné poloze. Okrajovou podmínku tvoří vazba zamezující jakémukoliv pohybu (obr. 21a). Pro omezení stupňů volnosti rámu a stabilizaci výsledků je použito čtyř pružin s nízkou tuhostí ($10 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$). Tyto pružiny jsou uchyceny v bodech, ve kterých se předvídá minimální ovlivnění z hlediska napětí (obr. 21b). Pro tento zatěžující stav je zahrnut i případ, kdy rám visí pouze na 3 lanech, kdy jsou vždy dvě lana na straně motorových skupin a je vynecháno vždy jedno lano na straně sacího potrubí. Zavěšení pouze na dvou lanech se nepředpokládá z důvodu koncentrace většiny hmotnosti na straně motorových skupin.



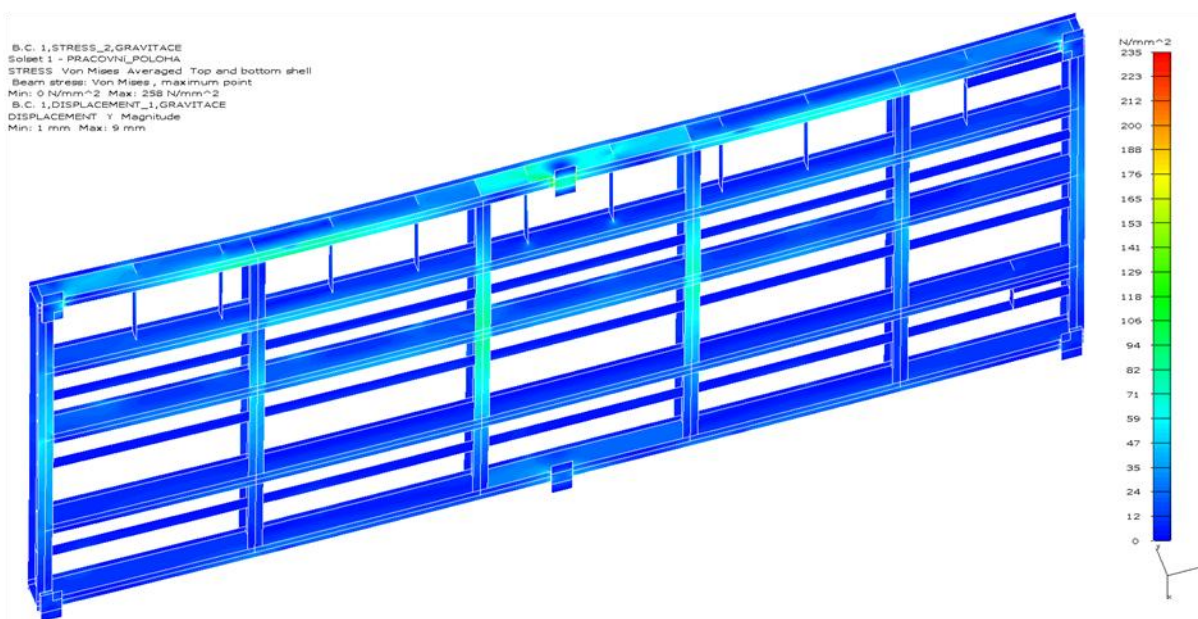
Obr. 21 Okrajové podmínky manipulace s rámem: a) uchycení lan, b) stabilizační pružina

5 PEVNOSTNÍ ANALÝZA PŮVODNÍHO RÁMU

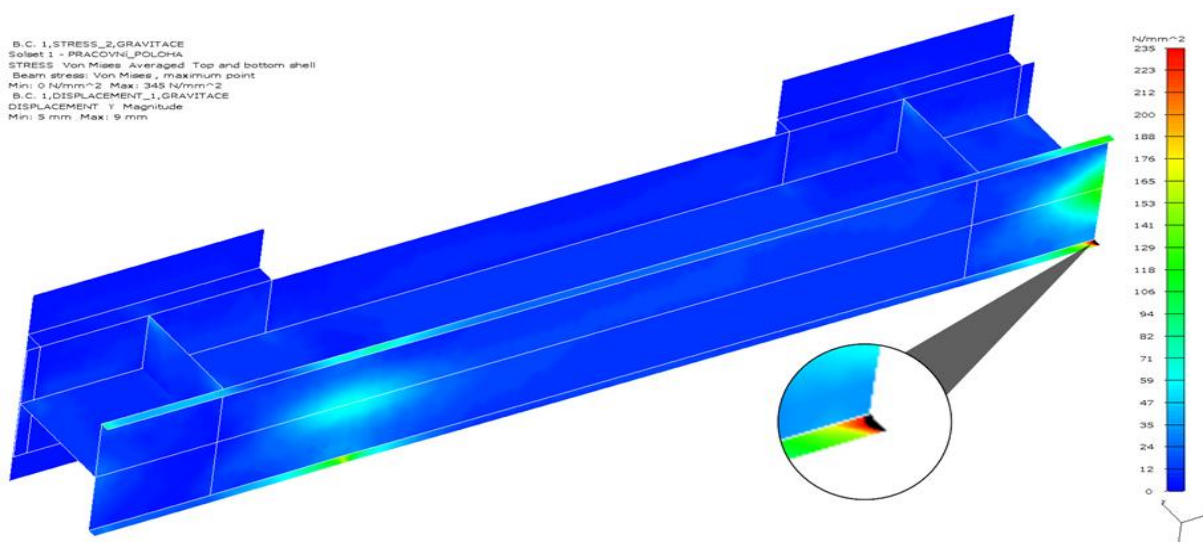
Pevnostní analýza byla provedena pro zjištění chování rámu po umístění zatížení v podobě hydraulických prvků. Důležitý byl obzvláště proces při manipulaci s rámem, kdy rám visí pouze na závěsných okách. Touto analýzou se zjistí výskyt maximálních napětí a deformací potřebných pro další modifikaci rámu. Výpočet byl proveden podle zadání, tj. ve dvou zátěžových stavech. FEM model byl vymodelován podle postupů popsanych v kapitole 4. Stav napjatosti je stanoven podle teorie HMM (Von Mises).

5.1 PRACOVNÍ POLOHA

Na obr. 22 je zobrazen nosný rám bez okapové vany, nosných ok a částí svařence na horní straně okapové vany. V tomto zatěžovacím stavu není nutné řešit napětí na závěsných okách. Napětí na hlavních nosnících nedosahuje hodnot překračující mez kluzu materiálu. Pouze v místě svaru dosedací patky a nosníku. Toto je zobrazeno na obr. 24. V maximální deformaci je obsaženo také stlačení pružin. Horní pohled na celý rám je zobrazen v příloze P3 a pohled na okapovou vanu v příloze P2.

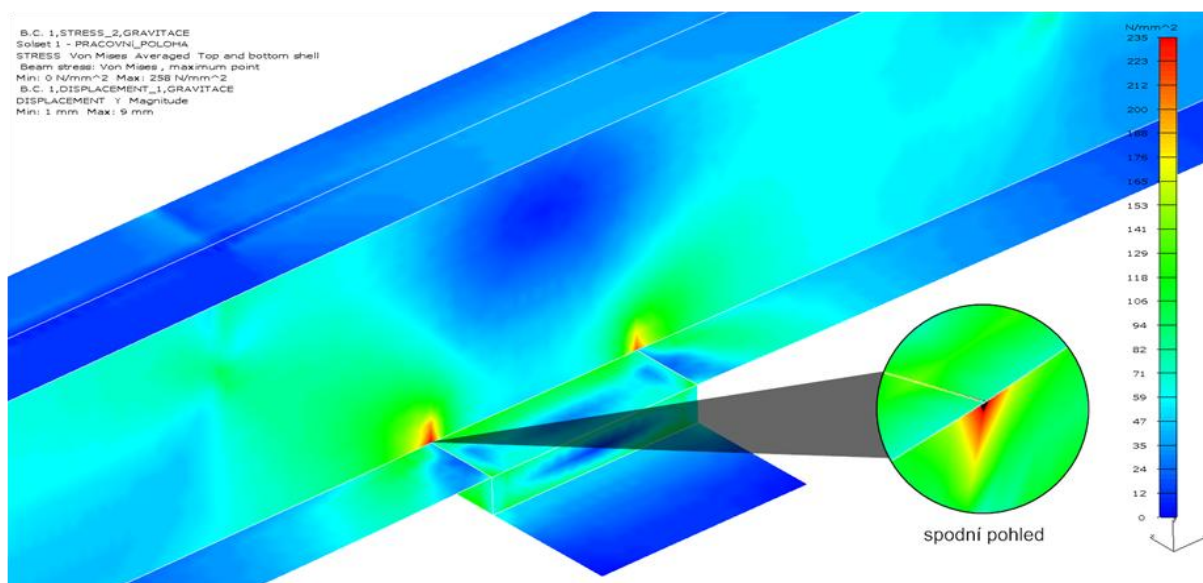


Obr. 22 Hlavní nosná konstrukce rámu, spodní pohled, pracovní poloha, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 258 MPa, deformace v ose Y, maximální deformace 9 mm



Obr. 23 Detail nosníku uchycení motorové skupiny, dolní pohled, pracovní poloha, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 345 MPa, deformace v ose Y, maximální deformace 9 mm

Na obr. 24 je zobrazen detail spojení prostřední dosedací patky pod motorovými v oblasti pod motorovými skupinami a nosníku. Maximální napětí zde dosahuje 258 MPa a tato hodnota překračuje mez kluzu materiálu. Napětí se vykytuje na prvcích v těsném okolí náhrady svaru. Je to dáno nedokonalostí náhrady svaru, kdy plocha nahrazující svar se dotýká plochy pásnice nosníku pouze svou hranou.



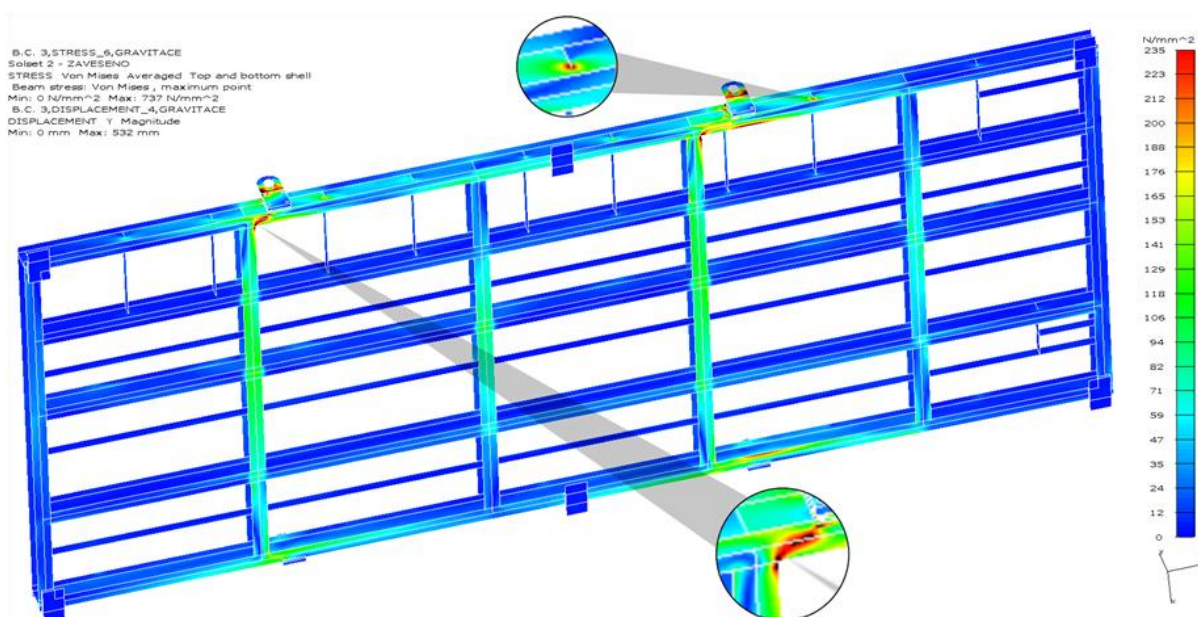
Obr. 24 Detail spoje dosedací patky a nosníku, horní pohled, pracovní poloha, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 258 MPa, deformace v ose Y, maximální deformace 9 mm

Na obr. 23 je detail nosníku motorových skupin. Maximální napětí 345 MPa je dáno nedokonalostí náhrady svaru, jak je popsáno o odstavce výše. Toto napětí se vyskytuje pouze na konci svaru a to u třech nosníků na straně bližší k motoru.

5.2 MANIPULACE S RÁMEM

Na obr. 25 je zobrazen rám ve stavu, kdy je zavěšen na čtyřech nosných lanech. Celkový horní pohled na rám je zobrazen v příloze P4. Maximální napětí je zde 737 MPa. Toto napětí se nachází na žebrech pro závěsná oka na straně motorových skupin (obr. 27) a je popsáno níže společně s napětím na závěsných okách (obr. 26). Další kritické místo s napětím 333 MPa je ve spoji plochých tyčí pod motorovými skupinami, viz obr. 25 v okolí závěsných ok. Nachází se na spodní hraně této tyče. Vysoké napětí je dáno převážně napojením střednice tyče na střednici stojiny vnějšího podélného nosníku, kde se koncentruje napětí. Tento nedostatek se vyskytuje celkem u třech tyčí, které jsou napojeny na vnější nosníky v okolí závěsných ok. Na koncích těchto tyčí je max. napětí 233 MPa. U napojení ostatních tyčí tato napětí nepřekračují mez kluzu.

Ve spoji vnějšího podélného a vnitřního příčného nosníku v blízkosti závěsných ok se je zvýšené napětí z důvodu ostrého přechodu mezi nosníky. Vysokých hodnot

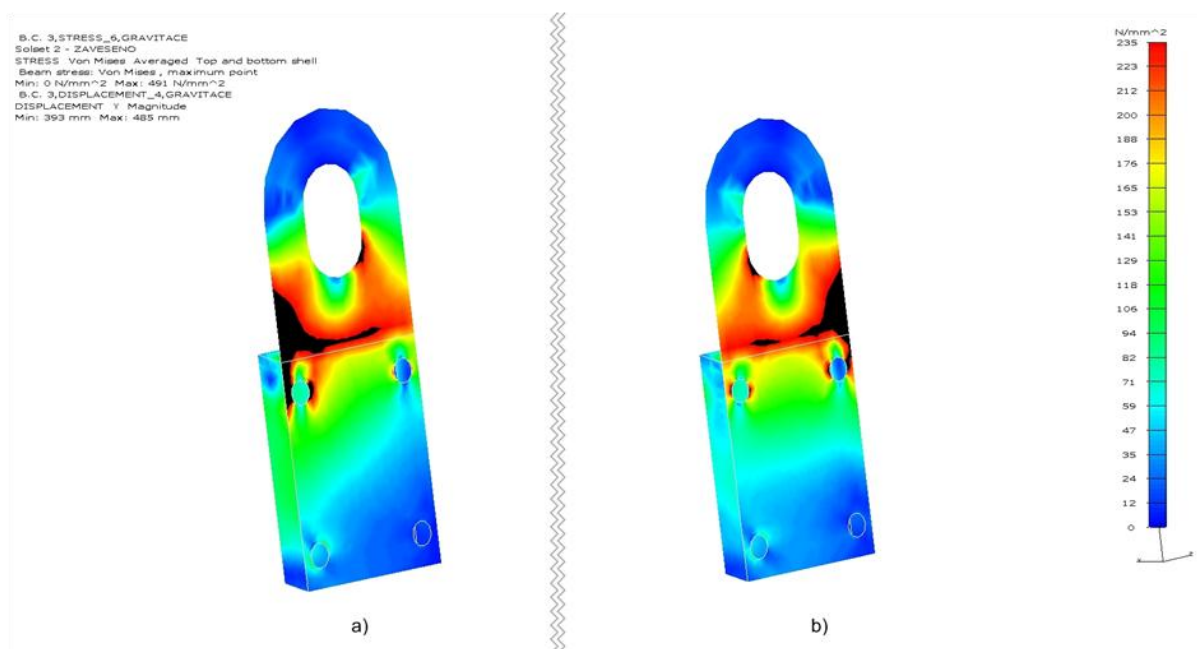


Obr. 25 Hlavní nosná konstrukce rámu, spodní pohled, manipulace, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 1, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 737 MPa, deformace v ose Y

dosahuje napětí také v místě napojení žebra na pásnici vnějšího nosníku z důvodů popsaných v předchozím odstavci. Většina napětí se koncentruje na vnitřních příčných nosnících, které tzv. přímo spojují závěsné body.

Vyšších hodnot napětí dosahuje také v náhradě svaru mezi nosníky motorových skupin a plechem okapové vany. Toto je znázorněno na obr. 23 a v kapitole 5.1.

Na obr. 26 jsou zobrazena závěsná oka na straně motorových skupin. Na okách na straně sacího potrubí napětí nepřekračuje mez kluzu. U zobrazených ok se největší napětí nachází na oku a) v okolí díry pro šroub. Na všech čtyřech okách se největší napětí koncentrují právě do těchto míst. Je to dáno hlavně nedokonalostí náhrady spojení oka a šroubů. Další napětí překračující mez kluzu je na tažné straně

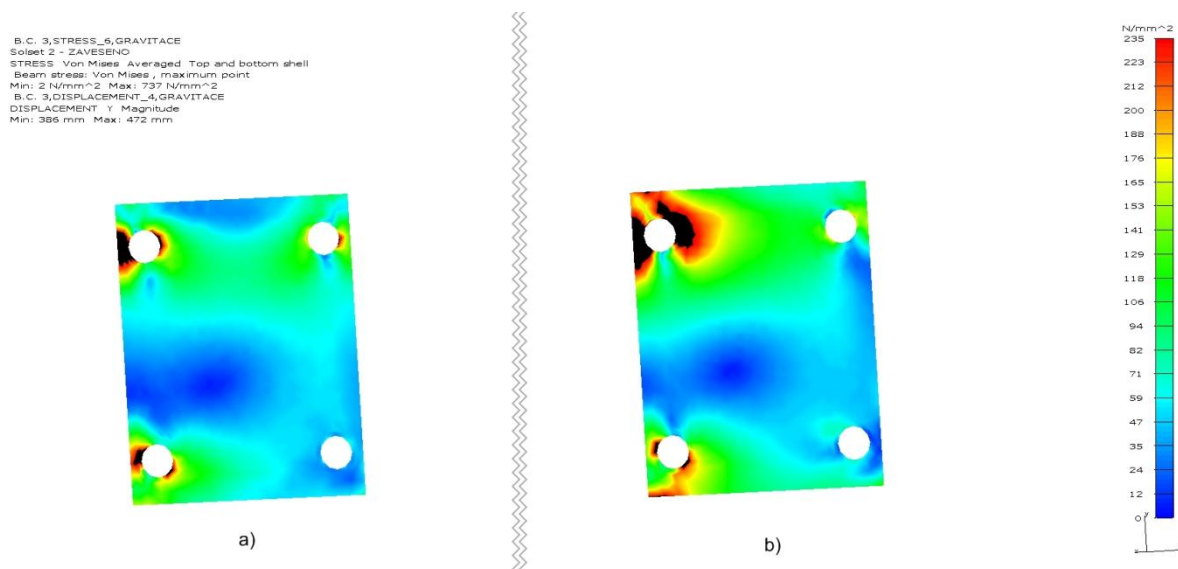


Obr. 26 Nosná oka na straně motorových skupin, manipulace, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 1, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 491 MPa

ok na obr. 26. Napětí se zde pohybuje do 280 MPa, ale i tato hodnota je vysoká. Její snížení by pomohlo zavěšení na vahadla, kdy by se zmenšila vodorovná složka tažné síly od lan. Na tlačné straně oka v okolí otvoru pro uchycení lana se napětí pohybuje v rozmezí hodnot 289 – 297 MPa.

Při zdvihání rámu v reálné situaci nedošlo k plastické deformaci. Výše popsané výsledky mohlo výrazně ovlivnit nahrazení lan a způsob zjednodušení uchycení těchto lan k závěsným okům. V praxi by se lana za tato oka neměla napřímo vůbec vázat. Pro podrobnější výsledky by bylo nutné namodelovat konkrétní kontaktní

úlohy, kdy by se musel simulovat kontakt mezi okem a závěsným třmenem. Prostřední část oka je namáhána tahem a krutem zatímco horní část převážně ohybem.



Obr. 27 Žebra uchycení závěsných ok, manipulace, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 1, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 737 MPa

Na obr. 27 jsou zobrazena žebra pro uchycení závěsných ok na straně motorových skupin. Maximální napětí je koncentrováno do těsného okolí děr pro šrouby. Většina hmotnosti rámu je tady přenášena třemi šrouby na každém žebře. Vysoké napětí je dáno také nahrazením spoje, jak je popsáno v předchozím odstavci.



6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ NÁHRADY RÁMU

Pevnostní analýzou původního rámu byla zjištěna kritická místa a také části rámu, které jsou předimenzované a zvyšují tak zbytečně jeho hmotnost. Napětí v nahrazených částech by nemělo překročit návrhovou pevnost. Další části, např. závěsná oka, jsou nejvíce namáhanými díly při manipulaci s rámem. V následujících kapitolách bude popsáno nahrazení vybraných částí. Při nahrazování bylo dbáno na požadavek, aby nebylo použito mnoho rozdílných profilů.

6.1 NÁVRHOVÁ PEVNOST

Výpočet návrhové pevnosti je proveden podle normy ČSN EN 1993-1-1 pro navrhování ocelových konstrukcí. Hodnoty součinitele spolehlivosti materiálu jsou zvoleny dvě. První je pro průřezy třídy 1, 2 a 3, které odpovídají konstrukci rámu bez závěsných ok a žeber pro závěsná oka. Pro tyto součásti je zvolen součinitel spolehlivosti materiálu pro průřezy oslabené dírami pro šrouby.

Návrhová pevnost pro konstrukci rámu bez závěsných ok [8] [7]

$$f_{yd1} = \frac{R_{eS235}}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1} = 235 \text{ MPa} \quad (4)$$

Kde:

$\gamma_{M1} = 1,1$ dílčí součinitel spolehlivosti materiálu [8]

Návrhová pevnost pro závěsná oka a žebra závěsných ok [8]

$$f_{yd2} = \frac{R_{eS235}}{\gamma_{M2}} = \frac{235}{1,25} = 188 \text{ MPa} \quad (5)$$

Kde:

$\gamma_{M2} = 1,25$ dílčí součinitel spolehlivosti materiálu oslabeného otvory pro šrouby [7]

6.2 NAHRAZENÍ VYBRANÝCH ČÁSTÍ NOSNÉHO RÁMU

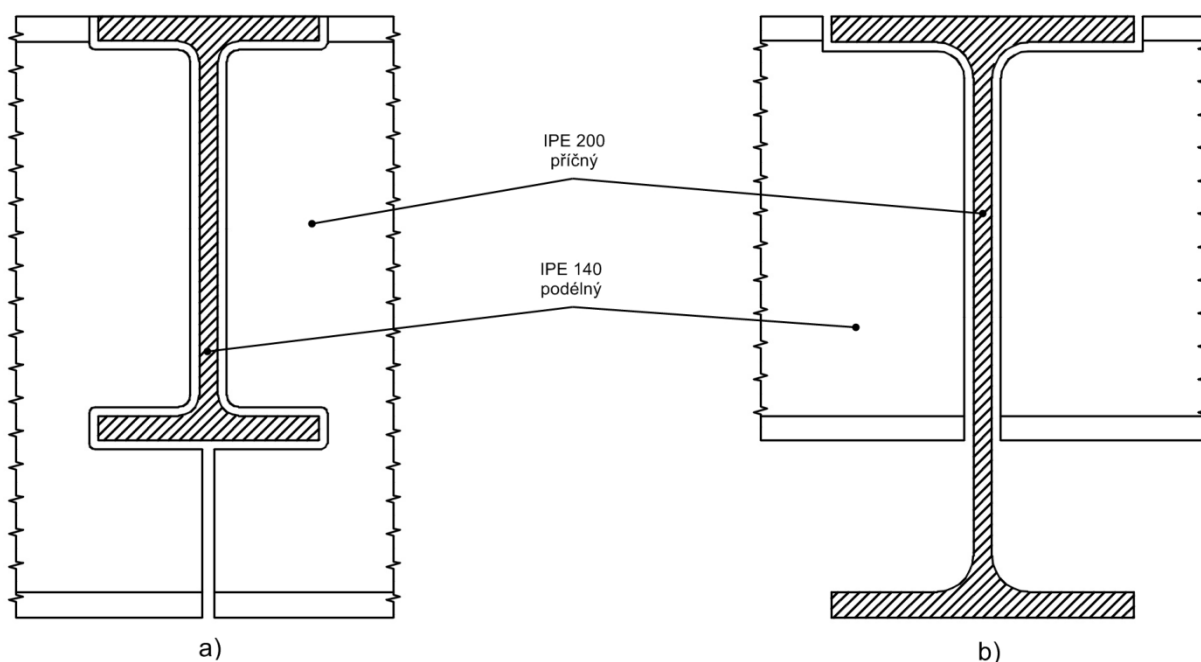
V této kapitole je popsáno nahrazení částí, které byly vhodné pro zmenšení. Některé části, ve kterých bylo zjištěno překročení meze kluzu, nebyly nahrazeny z důvodu uvedených v následujících odstavcích.

VNITŘNÍ PODÉLNÉ NOSNÍKY

Z výsledků pevnostní analýzy vyplynulo, že tyto nosníky jsou předimenzované. Většina zatížení je přenášena příčnými nosníky. Původní nosníky velikosti IPE 200 byly nahrazeny nosníky IPE 160 a IPE 140. Prvně jmenovaný nahradil prostřední nosník. Jeho velikost je větší oproti dvěma zbývajícím z důvodu uchycení jedné strany motorových skupin. Nad dvěma zbývajícím nosníky se nachází pouze vysokotlaké a nízkotlaké potrubí, jejich rozměry nemusejí být tak velké. Vnitřní podélné nosníky už nejsou celistvé, jako tomu bylo u původního rámu, ale vyplňují rozteče mezi příčnými nosníky obr. 28b. Tato úprava je popsána v následující kapitole.

VNITŘNÍ PŘÍČNÉ NOSNÍKY

Těmto nosníkům byly ponechány stejné velikosti profilů. Nosníky jsou nejvíce namáhány zejména při manipulaci a tak by jejich zeštíhlení mohlo zapříčinit deformaci rámu. Úprava spočívá pouze v jejich konstrukci, kdy již nejsou jednotlivými krátkými částmi mezi podélnými nosníky, ale jsou celistvé po celé své délce. Důvodem je hlavně jednodušší výrobitelnost, kdy by se příčné nosníky musely složitě řezat, jak je patrné na obr. 28a.



Obr. 28 Vnitřní nosníky a) varianta s celistvými podélnými nosníky, b) varianta s celistvými příčnými nosníky



VNĚJŠÍ PŘÍČNÉ A PODÉLNÉ NOSNÍKY

Tyto nosníky zůstanou, i přes lokální namáhání v jejich spojích stejného profilu. Důvody jsou dva. Původní nosníky byly schopny přenést zatížení zejména při manipulaci. Druhým důvodem je požadavek zákazníka, pro kterého je rám vyroben, zejména na výšku rámu. Tato výška zůstane díky vnějším nosníkům zachována.

NOSNÍKY MOTOROVÝCH SKUPIN

Tyto nosníky byly ponechány původní. Důvodem je zachování co možná nejméně typů profilů použitých pro rám. Na nosnících se stejným profilem jsou uchyceny už samotné motory. Také zde je potřeba zachovat jistou výšku. Použitý profil je HEB 100, který je nejmenším z této řady. Porovnání vhodných profilů použitelných pro případnou náhradu je uvedeno v tab. 5. Možností pro jisté zjednodušení je odebrání žeber. Tato modifikace významně neovlivní napětí v nosnících, viz obr. 33.

Tab. 5 Porovnání profilů [13]

Profil	Výška x šířka h x b (mm)	Hmotnost m (kg·m ⁻¹)	Průřezový modul W _x (cm ³)	Průřezový modul W _y (cm ³)
HEB 100	100 x 100	20,4	89,9	33,5
HEA 100	96 x 100	16,7	72,8	26,8
HEM 100	120 x 106	41,8	190	75
I 100	100 x 50	8,34	34,2	4,88
I 120	120 x 58	11,1	54,7	7,41
IPE 100	100 x 55	8,1	34,2	5,79
IPE 120	120 x 64	10,4	53,0	8,65
UPE 100	100 x 55	9,82	41,4	10,6
UPE 120	120 x 60	12,1	60,6	13,8
U 100	100 x 55	10,6	41,2	8,49
U 120	120 x 55	13,4	60,7	11,1



ZÁVĚSNÁ OKA A ŽEBRA

Tyto části byly nejvíce namáhány zejména při manipulaci s rámem. Největší koncentrace napětí byly oblasti kolem otvorů pro šrouby. I přes tyto skutečnosti závěsná oka zůstanou původní. Po konzultaci ve firmě Bosch Rexroth bylo dohodnuto je ponechat z důvodu zákaznického standartu a složitého procesu změn těchto ok. Doporučit se může jiný typ zavěšení a to pomocí vahadel, kdy by lana s vodorovnou osou ok nesvírala tak velký úhel. U žeber bylo vysoké napětí pouze v oblasti děr pro šrouby. Toto bylo vysvětleno v kapitole 5.2.

RÁM PRO ELEKTRICKÝ ROZVADĚČ

Tato součást rámu byla velmi málo namáhána, protože samotný rozvaděč má hmotnost přibližně 100 kg a je uchycen na šesti bodech. Proto byly původní profily U100 a L50 nahrazeny profily U60 a L30.

6.3 ÚSPORA HMOTNOSTI NOSNÉHO RÁMU

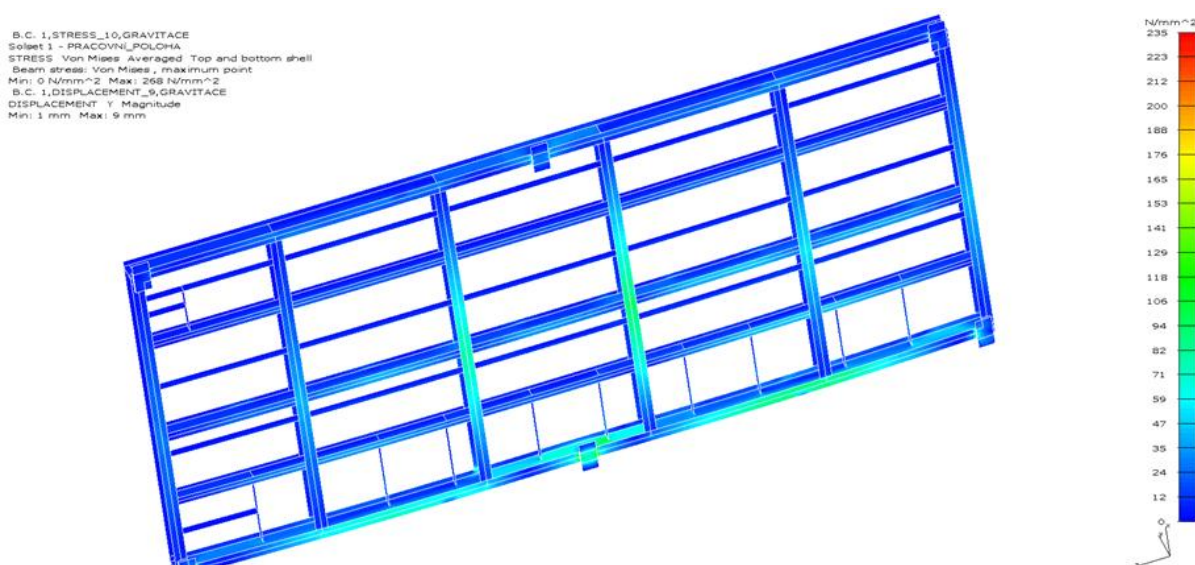
Důležitý je také údaj o ušetřené hmotnosti. Původní hmotnost modelu rámu byla 19 140 kg. Hmotnost upraveného modelu je 18 960 kg. Hmotnost modelu rámu se tedy snížila o 184 kg. Tuto hodnotu nelze brát jako přesnou z důvodu náhrad nosníků, kdy hmotnosti náhrad zcela neodpovídají hmotnostem reálných nosníků.

7 PEVNOSTNÍ ANALÝZA NÁHRADY RÁMU

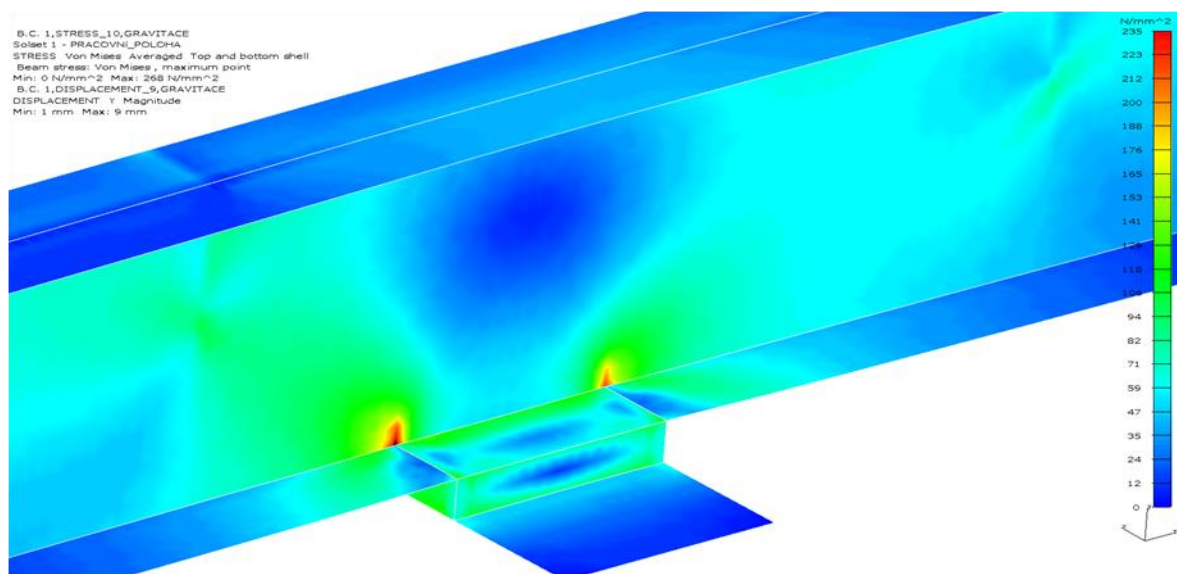
Po zavedení konstrukčních změn do FEM modelu rámu byla provedena pevnostní analýza pro upravený rám. Zátěžové stavy zůstaly nezměněny. Z výsledků je potřeba se zaměřit hlavně na vnitřní příčné nosníky a spojení těchto nosníků s podélnými nosníky, které byly zmenšeny, viz kapitola 6.2.

7.1 PRACOVNÍ POLOHA

Na obr. 29 je zřetelné napětí v modifikovaném rámu. Napětí v původních nosnících mírně vzrostlo, ale nepřekročilo mez kluzu. Maximální napětí se nachází ve stejných místech spoje dosedací patky a nosníku, jako je popsáno v kapitole 5.1. Toto napětí vzrostlo o několik desítek MPa. Detail spoje je znázorněn na obr. 30.

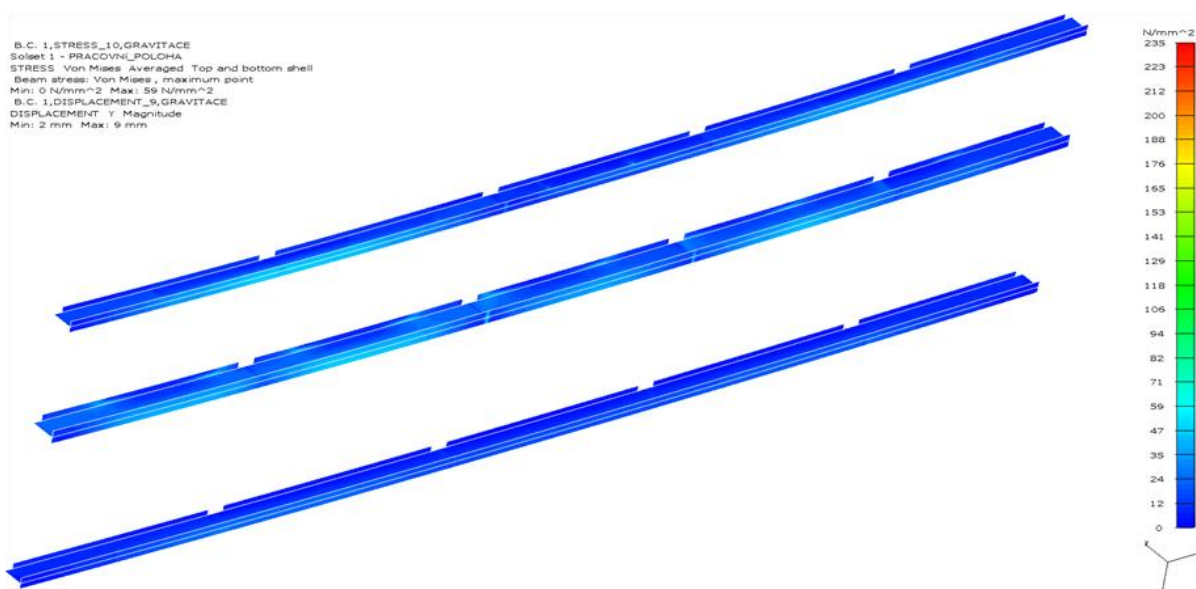


Obr. 29 Hlavní nosná konstrukce rámu, modifikovaný, spodní pohled, pracovní poloha, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 268 MPa, deformace v ose Y, maximální deformace 9 mm

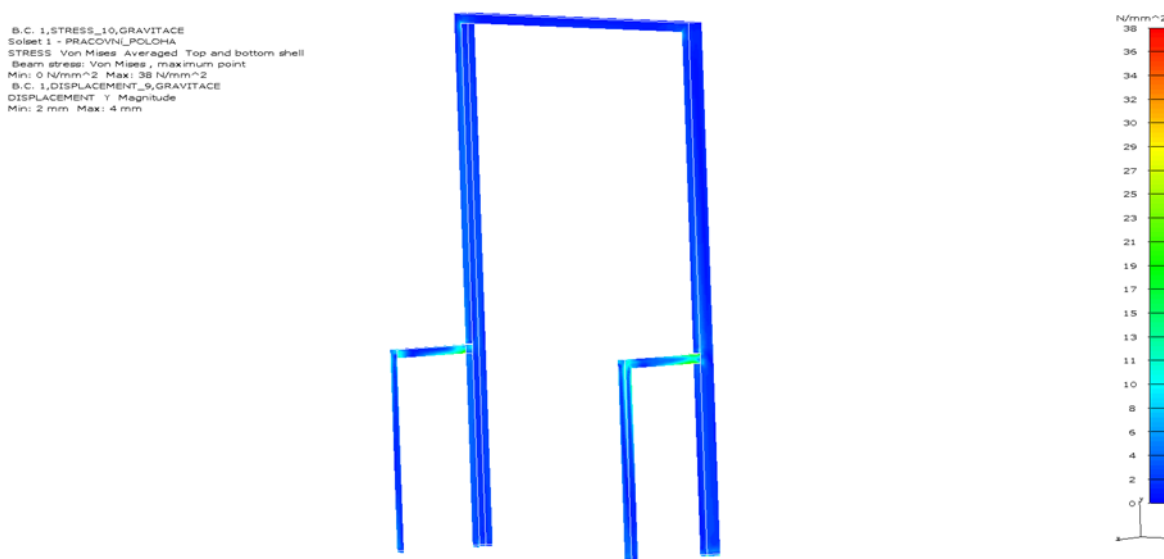


Obr. 30 Detail spoje dosedací patky a nosníku, modifikovaný rám, horní pohled, pracovní poloha, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 268 MPa, deformace v ose Y, maximální deformace 9 mm

Nosníky IPE 140 a IPE 160 jsou zobrazeny na obr. 31. Nejvyšších hodnot napětí je dosaženo ve spojích s příčnými nosníky. Další zmenšování těchto nosníků by zapříčinilo zvyšování napětí ve zbytku konstrukce. Při manipulaci s rámem napětí v těchto nosnících výrazně vzroste.

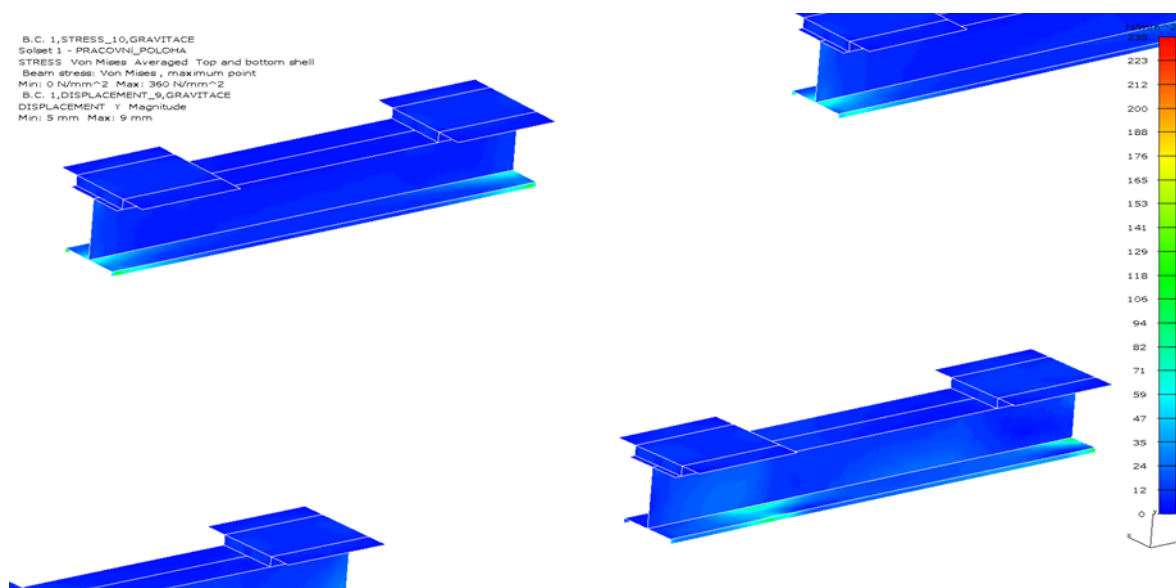


Obr. 31 Vnitřní podélné modifikované nosníky, spodní pohled, pracovní poloha, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 59 MPa, deformace v ose Y, maximální deformace 9 mm



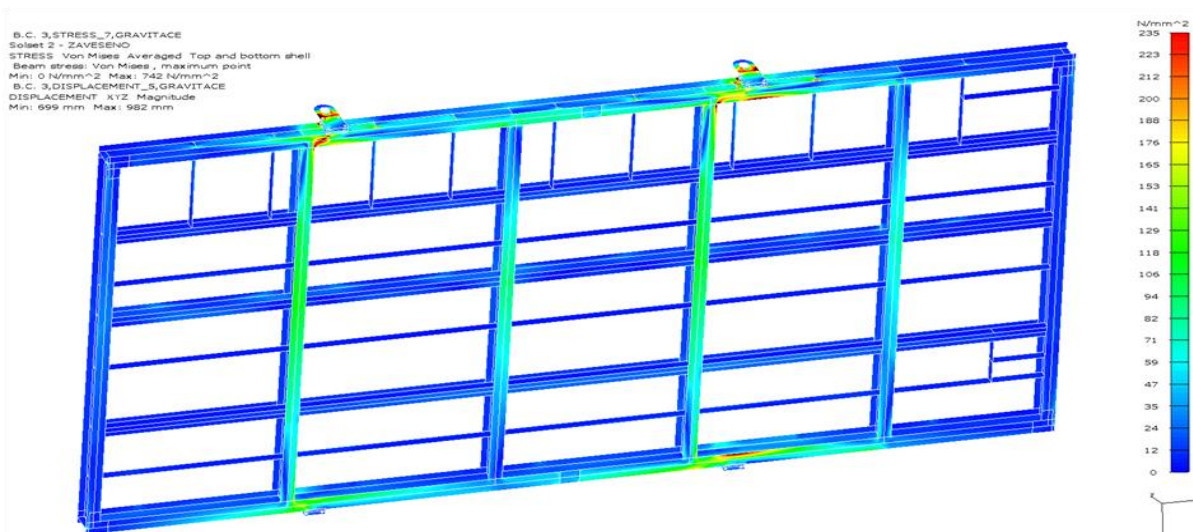
Obr. 32 Rám elektrického rozvaděče, modifikovaný, pracovní poloha, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazeného napětí 0 - 38 MPa, maximální napětí 38 MPa, deformace v ose Y, maximální deformace 4 mm

Pozměněný rám pro elektrický rozvaděč zcela vyhovuje podmínce návrhové pevnosti. Další minimalizace profilů by nemusela být vhodná. Skutečnou hmotnost rozvaděče lze velmi těžko určit a je zde tedy ponechána určitá rezerva. Nejvyššího napětí je dosaženo ve spojích L a U profilů. Na obr. 33 jsou nosníky motorových skupin bez žebířů. Odstranění žebířů významně neovlivnilo napětí v nosnících.



Obr. 33 Nosníky motorových skupin, modifikované, pracovní poloha, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 360 MPa, deformace v ose Y, maximální deformace 9 mm

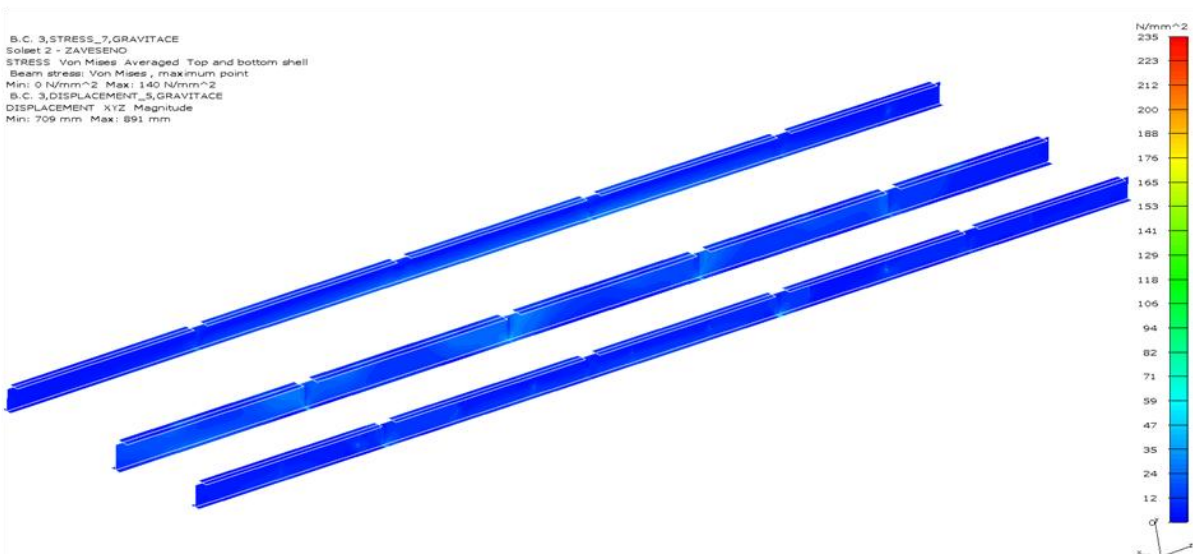
7.2 MANIPULACE S RÁMEM



Obr. 34 Hlavní nosná konstrukce rámu, modifikovaný rám, spodní pohled, manipulace, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 1, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 742 MPa,

Maximální napětí v kritických místech, která jsou popsána v kapitole 5.2, vzrostlo o jednotky MPa. Napětí v příčných nosnících se zvýšilo, ale nepřekročilo návrhovou pevnost. Zvýšení napětí je dané zmenšením nosníků, které jej pomáhaly přenášet. Pevnosti příčných nosníků také přispěla jejich celistvá konstrukce.

Napětí ve vnitřních podélných nosnících dosahuje maximální hodnoty 140 MPa, viz obr. 35. Místa těchto maxim jsou opět ve spojích nosníků.



Obr. 35 Vnitřní podélné modifikované nosníky, spodní pohled, manipulace, redukované napětí podle podmínky HMM, zobrazení top/bottom shell, měřítko deformace modelu 1, rozsah zobrazeného napětí 0 - 235 MPa, maximální napětí 140 MPa, deformace v ose Y,



ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provést pevnostní výpočet rámu pro stacionární hydraulické zařízení, vyráběného firmou Bosch Rexroth spol. s r. o. Rám je určen pro pohonnou jednotku hydraulického obvodu s pěti čerpadlovými skupinami.

V první části diplomové práce je proveden stručný přehled používaných konstrukcí rámu a dále používaných typů nosníků a jednotlivých konstrukčních prvků celé pohonné jednotky.

V druhé části je popis přípravy výpočetního modelu. Geometrie byla vytvořena na základě poskytnutých výrobních výkresů. Při modelování byly odstraněny konstrukční prvky nemající vliv na tuhost rámu. Na modelu byly provedeny zjednodušení, které vedly ke snížení výpočtového času a hardwarových nároků.

Třetí část se zabývá zhodnocením výsledků původního rámu. Výsledky analýzy jsou porovnány s mezí kluzu materiálu a ukazují, že v obou zatěžovacích stavech se hodnoty maximálních napětí vyskytují na spojích některých střednicových ploch a v místě nahrazení jednotlivých prvků. Napětí jsou v těchto místech obtížně vyhodnotitelná, jelikož nahrazení jak skořepinovým modelem, tak zjednodušením některých konstrukčních prvků neodpovídá zcela skutečnému stavu. Tyto hodnoty se vyskytují především ve spojích příčných a podélných nosníků a v náhradách šroubových spojů. Výsledky analýzy ukazují, že funkce rámu jako taková není ohrožena. Výsledky ze stavu, kdy je rám zavěšen pouze na třech lanech, který byl uvažován z důvodu statické určitosti, nejsou zohledněny. Důvodem je nereálnost tohoto zavěšení v praxi a hodnoty napětí, které se pohybovaly v řádech GPa.

V poslední části byly navrženy konstrukční úpravy rámu na základě předchozích výsledků a tyto úpravy byly zkontrolovány pevnostní analýzou. Upraveny byly především vnitřní podélné nosníky. Ty se ukázaly jako předimenzované a proto byly zvoleny odlišné profily. Další modifikace profilů byla provedena na rámu elektrického rozvaděče. Všechny změny vyhověly návrhové pevnosti. Závěsná oka, která byla nejvíce namáhána při manipulaci s rámem, zůstala zachována dle zákaznické specifikace. Pomocí úprav byla hmotnost rámu snížena předběžně o 184 kg.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ŠKOPÁN, Miroslav. 2009. *Hydraulické pohony strojů*. Elektronické skriptum VUT FSI Brno, 166 s.
- [2] *Všeobecný návod k obsluze pro hydraulické agregáty a hydraulické konstrukční skupiny*. 2009. Německo: Bosch Rexroth, R-CZ 07009-B/09.09.
- [3] NEPRAŽ, František. 2002. *Modelování systémů s hydraulickými mechanismy*. Brno: Bosch Rexroth. ISBN 80-214-2187-8.
- [4] PAVLOK, Bohuslav. 2008. *Základní konstrukční celky: učební opora předmětu "Hydraulická zařízení strojů"* [online]. Ostrava [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/zakladni-konstrukcni-celky.pdf>
- [5] JURÁŠEK, Oldřich. *Nosné konstrukce stavebních strojů I*. Brno: Vysoké učení technické, 1986.
- [6] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). 2010. *Konstruování strojních součástí*. Překlad Martin Hartl. V Brně: VUTIUM. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [7] ZN 95001: Assembly preloads and tightening torques. 2011. Bosch Rexroth.
- [8] Česká technická norma - Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí ČSN EN 1993-1-1: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 2006. Praha: Český normalizační institut.
- [9] Česká technická norma - Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí ČSN EN 1993-1-8: Část 1-8: Navrhování styčníků. 2006. Praha: Český normalizační institut.
- [10] *Šrouby a šroubové spoje: Předepjaté šroubové spoje dynamicky zatížené* [online]. Brno [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/cv7/Va07.pdf>
- [11] *Metoda konečných prvků* [online]. Brno [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [12] PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RV/MKP2011.pdf>
- [13] *Ferona: Sortiment Ferony* [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/sortiment/sortiment.php>
- [14] *Ferona: Materiálové normy* [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/sortiment/sortiment.php>
- [15] *Technická příručka: Nelegované konstrukční oceli podle EN 10025* [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane>
- [16] Interní dokumentace firmy Bosch Rexroth



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

b	[mm]	šířka profilu
d_{20}	[mm]	Průměr šroubu M20
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
F_{M20}	[N]	Síla předpětí pro šroub M20
f_{ub}	[MPa]	Jmenovitá pevnost v tahu
f_{yb}	[MPa]	úhlová rychlost otáčení klikového hřídele
f_{yd1}	[MPa]	Návrhová pevnost rámu bez závěsných ok
f_{yd2}	[MPa]	Návrhová pevnost pro závěsná oka a žebra
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
h	[mm]	výška profilu
K_1	[-]	Součinitel pro mazané šrouby
L_i	[m]	Délka jednotlivých potrubí
L_{P1}	[m]	Délka potrubí P1
m	[kg·m ⁻¹]	Hmotnost profilu
M_A	[N·m]	Utahovací moment
m_c	[kg]	Celková hmotnost potrubí
m_{ci}	[kg]	Hmotnost jednotlivých potrubí
m_{cP1}	[kg]	Celková hmotnost potrubí P1
m_{pi}	[kg·m ⁻¹]	Hmotnost jednotlivých potrubí
m_{pP1}	[kg·m ⁻¹]	Hmotnost jednoho metru potrubí P1
R_{eS235}	[MPa]	Mez kluzu ocele S235JR
R_{eS235}	[MPa]	Pevnost v tahu ocele S235JR
t	[mm]	Tloušťka střednice
W_x	[cm ³]	Průřezový modul k ose ohybu x
y_{M1}	[-]	Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu
y_{M2}	[-]	Dílčí součinitel spolehlivosti materiálu oslabeného otvory pro šrouby
μ	[-]	Poissonovo číslo
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota oceli

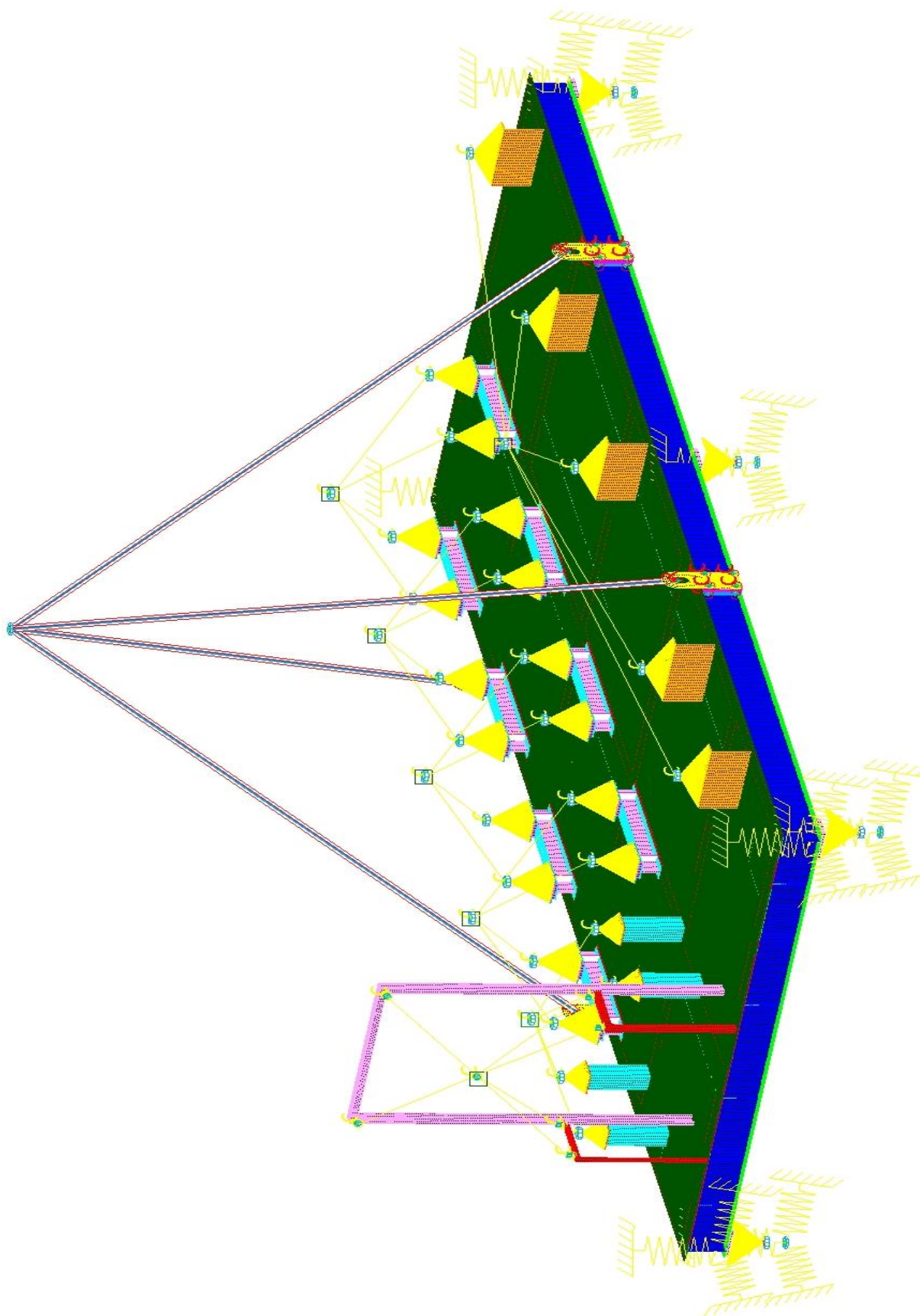


SEZNAM PŘÍLOH

P1	<i>Kompletní model rámu</i>
P2	<i>Okapová vana, horní pohled</i>
P3	<i>Pracovní poloha rámu, horní pohled</i>
P4	<i>Manipulace s rámem, horní pohled</i>

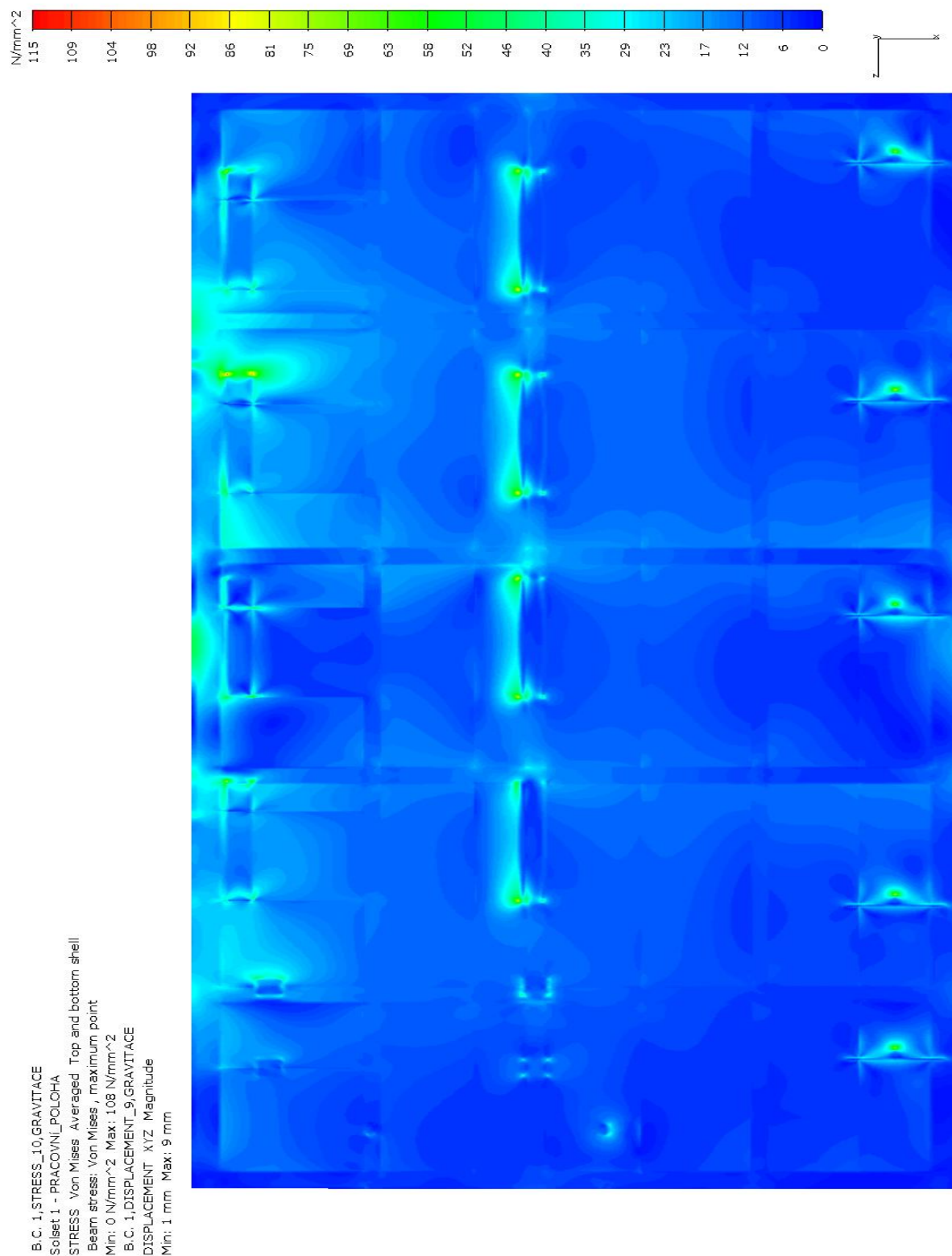
SEZNAM VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE

R987433084, List 1	<i>Svařenec rámu</i>
R987433084, List 2	<i>Svařenec rámu</i>
R987433084, List 3	<i>Svařenec rámu</i>
R987433084, List 4	<i>Svařenec rámu</i>

**P1***Kompletní model rámu*

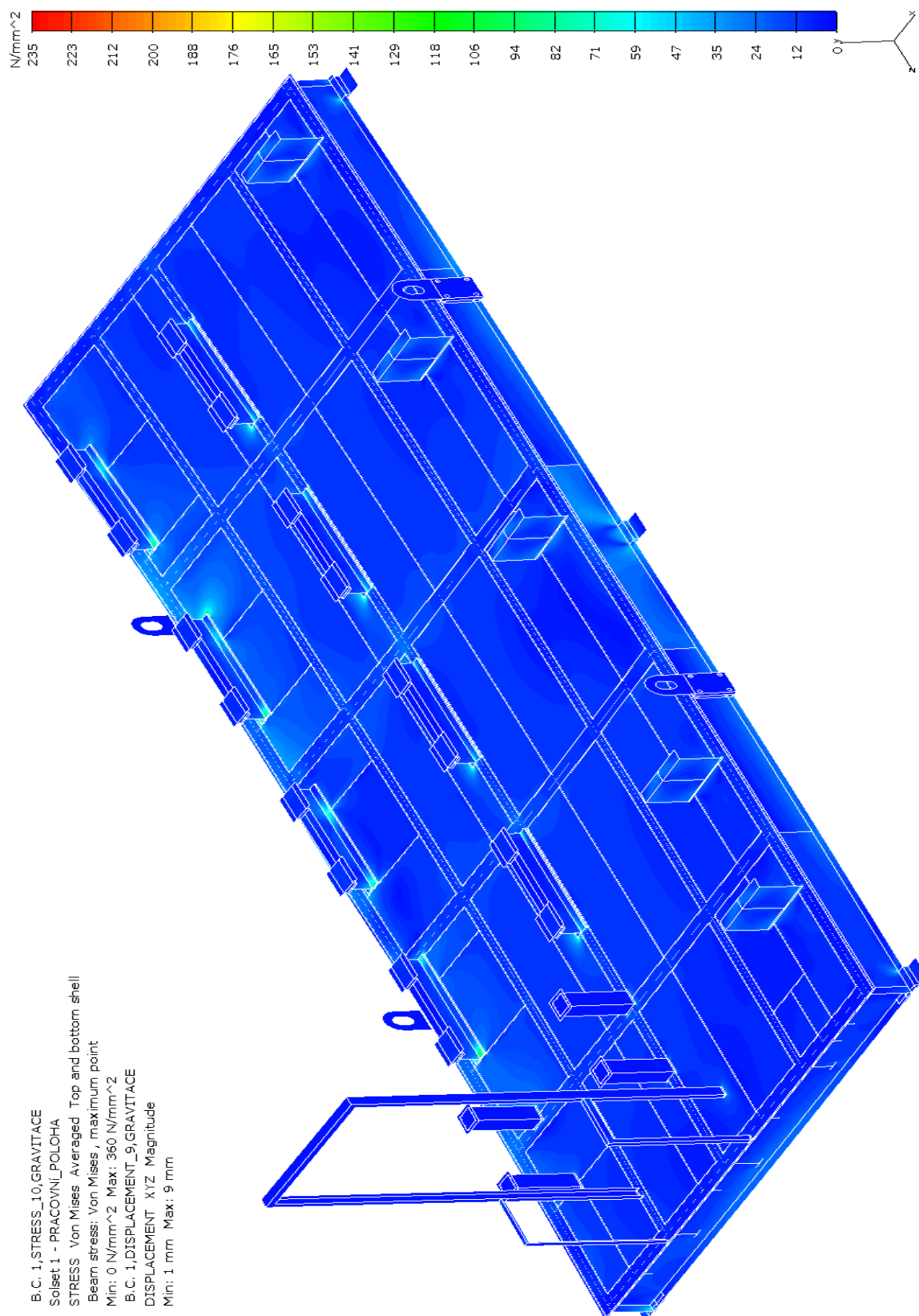
**P2**

Okapová vana, horní pohled, pracovní poloha, měřítko deformace 10, rozsah zobrazeného napětí 0 – 115 MPa



**P3**

Pracovní poloha rámu, horní pohled, měřítko deformace 10, rozsah zobrazeného napětí 0 – 235 MPa



**P4**

Manipulace s rámem, horní pohled, měřítko deformace 1, rozsah zobrazeného napětí 0 – 235 MPa

