

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MOSTOVÝ JEŘÁB 125t

OVERHEAD TRAVELLING CRANE 125t

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL PEPRNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavel Peprník

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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:

Mostový jeřáb 125t

v anglickém jazyce:

Overhead travelling crane 125t

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S použitím MKP proveďte posouzení pevnosti konstrukčního návrhu mostového jeřábu s nosností 125t.

Základní parametry:

Nosnost: 125 000 kg

Rychlost zdvihu: 0,3 - 3 m/min, pomocný zdvih 0,6 - 6 m/min

Rychlost pojezdu jeřábové kočky: 2 - 20 m/min

Cíle diplomové práce:

Vypracujte technickou zprávu obsahující zejména:

- pevnostní výpočet mostu pomocí MKP
- návrh možných úprav
- další výpočty dle pokynů vedoucího DP

Vypracujte výkresovou dokumentaci:

- navrhovaných úprav
- další výkresy dle pokynů vedoucího DP

Seznam odborné literatury:

REMTA, F., KUPKA, L., DRAŽAN, F.: Jeřáby, 2., přeprac. a dopln. vyd., SNTL Praha, 1975

Feyrer K.: Drahtseile, ed. Springer, Berlin, 2000, s. 468, ISBN-10: 3-540-67829-8, ISBN-13: 978-3-540-67829-8

Hoffmann, K., Krenn, E., Tanker, G.: Fördertechnik 2, ed. Oldenbourg Industrieverla, 2006, s. 320, ISBN-10: 3-8356-3060-1, ISBN-13: 978-3-8356-3060-4

Osterrieder P.; Richter S.: Kranbahnträger aus Walzprofilen, ed. Vieweg, 2002, s. 299, ISBN-10: 3-528-12559-4, ISBN-13: 978-3-528-12559-2

Vedoucí diplomové práce: Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 23.11.2011

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá posouzením návrhu ocelové konstrukce mostového jeřábu pomocí metody konečných prvků. Jedná se o mostový jeřáb s nosností 125t/32t, který bude umístěn v hale firmy Slovácké strojírny, a.s. v Uherském Brodě. Tento jeřáb má rozpětí 25,8 metrů, rozvor 6,7 metrů a výšku hlavního zdvihu 17 metrů. Práce obsahuje pevnostní analýzu a posouzení nosné konstrukce jeřábu při zatížení na únavu dle ČSN 27 0103.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the assessment of drafted steel construction of overhead travelling crane by using finite element method. The crane's lifting capacity is 125t/32t. It is going to be placed in hall of Slovácké strojírny, a. s. in Uherský Brod. Span of the crane is 25.8 meters, wheelbase is 6.7 meters and lifting height is 17 meters. My work contains analysis and assessment of crane construction with a load of fatigue according to ČSN 27 0103.

KLÍČOVÁ SLOVA

Jeřáb, mostový jeřáb, kočka, metoda konečných prvků, skořepinová konstrukce, zatížení, pevnostní analýza, únavu

KEY WORDS

Crane, overhead travelling crane, crane trolley, finite elements method, shell structure, load, stress analysis, fatigue

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PEPRNÍK, P. *Mostový jeřáb 125t*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Mostový jeřáb 125t vypracoval samostatně pod vedením Ing. Přemysla Pokorného, Ph.D. Pro vypracování práce jsem použil zdroje a publikace, které jsem uvedl v seznamu použité literatury.

V Brně dne 25. května 2012

.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Přemyslu Pokornému, Ph.D za jeho ochotu, cenné rady a odborné vedení při zpracování této závěrečné práce. Dále děkuji Ing. Lubomíru Zimolovi z firmy Slovácké strojírna, a.s. za odborné konzultace a cenné rady, které mi pomohly při tvorbě této diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat mé rodině a mým blízkým za jejich podporu v průběhu celého mého studia.

OBSAH

1	Úvod	8
2	Mostové jeřáby	9
3	Parametry jeřábu	10
4	Tvorba modelu	12
4.1	Náhrada některých částí jeřábu v modelu	13
4.2	Určení těžiště kočky	16
4.3	Zatížení od jmenovitého břemena	19
4.4	Výpočet zatížení poháněných kol kočky	19
5	Pevnostní výpočet mostu	21
5.1	Zatížení a jejich součinitele	21
5.1.1	Zatížení stálé	21
5.1.2	Zatížení nahodilé	22
5.1.2.1	Stálé břemena	22
5.1.2.2	Jmenovitá břemena	23
5.1.2.3	Zatížení od setrvačných sil	24
5.1.2.4	Výpočet zrychlení vyvolaného setrvačnými silami	25
5.1.2.5	Vodorovné boční síly od přičení jeřábu na jeřábové dráze	26
5.1.3	Zatížení mimořádná	27
5.1.3.1	Zatížení při zkouškách jeřábu	27
5.1.3.2	Zatížení při poruše zdvihacího zařízení	27
5.1.3.3	Zatížení od nárazu na nárazníky	27
5.2	Zatížení a jejich kombinace	29
5.2.1	Zadání zatížení do programu I-DEAS	29
5.2.2	Definované vazby	30
5.2.3	Základní kombinace zatížení	30
5.2.4	Mimořádné zatížení	34
5.2.5	Mimořádné kombinace zatížení	35
5.2.6	Kombinace zatížení pro posouzení únavy	37
6	Únosnost konstrukce při únavě	38
6.1	Průřez 1	39
6.2	Průřez 2	42
6.3	Průřez 3	44
6.4	Průřez 4	46
7	Závěr	48
8	Seznam použité literatury	49
9	Seznam použitých symbolů a zkratk	50
10	Seznam obrázků	52
11	Seznam tabulek	52
12	Seznam příloh	53

1 ÚVOD

Jeřáby jsou nezastupitelní pomocníci na stavbách, které směle stoupají do výšky, při montážích a vlastně všude, kde je třeba pracovat s těžkými břemeny a ve velké výšce. Ač by se nezdálo, jeřáby mají poměrně dlouhou historii a s jejich principem byli seznámeni již staří Egypťané.

Již ve starověkém Egyptě je totiž zdokumentováno, že se zde používaly primitivní jeřáby na vytahování vody z řeky, i když na stavby se používala pouze nakloněná rovina. Další rozvoj jeřábů můžeme zaznamenat ve starověku u Řeků a Římanů. Ti dokázali zvedat těžké kamenné bloky pomocí velmi důmyslných mechanismů, které připomínaly jeřáby. Tyto primitivní jeřáby dokázaly uzvednout břemena o váze několika tun až do výšky několika metrů. Dalším podstatným vynálezem, který jeřáby obohatil, byl vynález složené kladky – kladkostroje.

Tyto stroje byly poháněny pouze lidskou nebo zvířecí silou, která byla limitovaná. Velký přínos do mnoha oborů včetně jeřábů, přinesl vynález parního stroje roku 1765 Jamesem Watem. Díky tomuto vynálezu se lidstvo mohlo směle pustit i do velmi náročných a vysokých staveb. Posledním krokem ke skutečným jeřábům, jak je známe dnes, byl elektrický pohon. Jeřáby od té doby udělaly obrovský pokrok a jejich dnešní parametry, které se udávají v hmotnosti toho, co dokáží uzvednout, a maximální výšce, kam je lze vysunout, jsou skutečně fantastické. [10]

Při navrhování jeřábů by se mělo přihlížet k celkové hmotnosti jeřábu a na co největší plochu a prostor, kterou může jeřáb ovládat. Ale také na to, aby byly rozměry jeho součástí pokud možno co nejmenší. Proto se často volí lepší, i když o něco dražší materiály. Menší hmotnost a velikost jeřábu vede totiž k úspoře poháněcích sil a tím zlevňuje provoz během celé životnosti jeřábu. Pro optimalizaci těchto parametrů se v dnešní době využívá řada softwarů pro pevnostní analýzy např. program NX I-deas, ve kterém jsem zpracoval pevnostní analýzu ocelové konstrukce mostového jeřábu s nosností 125t pro Slovácké strojírny, a.s.

2 MOSTOVÉ JEŘÁBY

Jeřáby jsou zdvihadla sloužící ke zdvihání a spouštění břemen do výšek obyčejně proměnlivých, nejčastěji omezených na několik metrů. Současně i k dopravě těchto břemen z míst na místa nepříliš od sebe vzdálená (jen zřídka přes 100m). Jeřáby toho dosahují někdy pouhým svým otáčením, někdy jen nakláněním, nejčastěji však pojížděním po jeřábových dráhách. [11]

Protože se jeřáb pohybuje a k jeho pohybu je třeba tím větší práce, čím je sám těžší, jsou základní konstrukční požadavky:

- aby jeřáb byl co nejlehčí
- aby rozměry součástí jeřábu byly co nejmenší
- aby bylo účelně využito materiálu na jeřábu

Mostovými jeřáby nazýváme ty druhy jeřábů, u nichž nosnou ocelovou konstrukci tvoří jeřábový most, pojíždějící po vyvýšené jeřábové dráze. Nahoře na mostě, uvnitř nebo i dole, pojíždí jeřábová kočka, výjimečně podvozek s otočným výložníkem. Základní určující parametry pro mostové jeřáby jsou: [5]

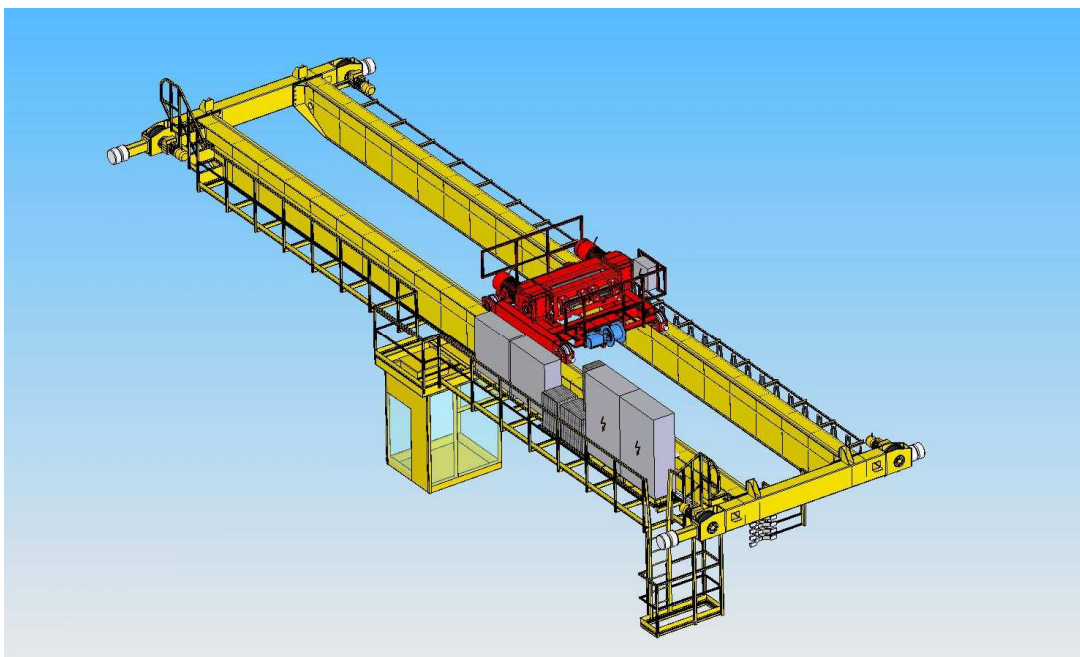
- a) Nosnost
- b) Modulové rozpětí lodi (haly), eventuálně rozpětí jeřábu
- c) Pracovní rychlosti - zdvihu
 - pojezdu kočky (kladkostroje)
 - pojezdu mostu
- d) Výška zdvihu

Podle tvaru nebo účelu rozeznáváme mostové jeřáby:

- běžné (normální)
- drapákové a magnetové
- zvláštní konstrukce
- hutní

U běžných mostových jeřábů se břemeno zdvihá vždy hákem, ať již pomocí vázacích prostředků, nebo břemenového magnetu či drapáku zavěšeného na háku. Také nerozhoduje, má-li kočka jen jeden nebo více háků (hlavní a pomocný zdvih). Podle druhu pohonu bývají tyto jeřáby nejčastěji elektrické s mechanickými nebo hydraulickými převody. Podle pracovního místa mohou být dílenské, montážní, nádvorní, hutní apod. [5]

Běžné mostové jeřáby pojíždí po horních plochách kolejnic jeřábové dráhy a mohou být jedonosníkové nebo vícenosníkové. Na obr. 1 je uveden dvounosníkový mostový jeřáb. [5]



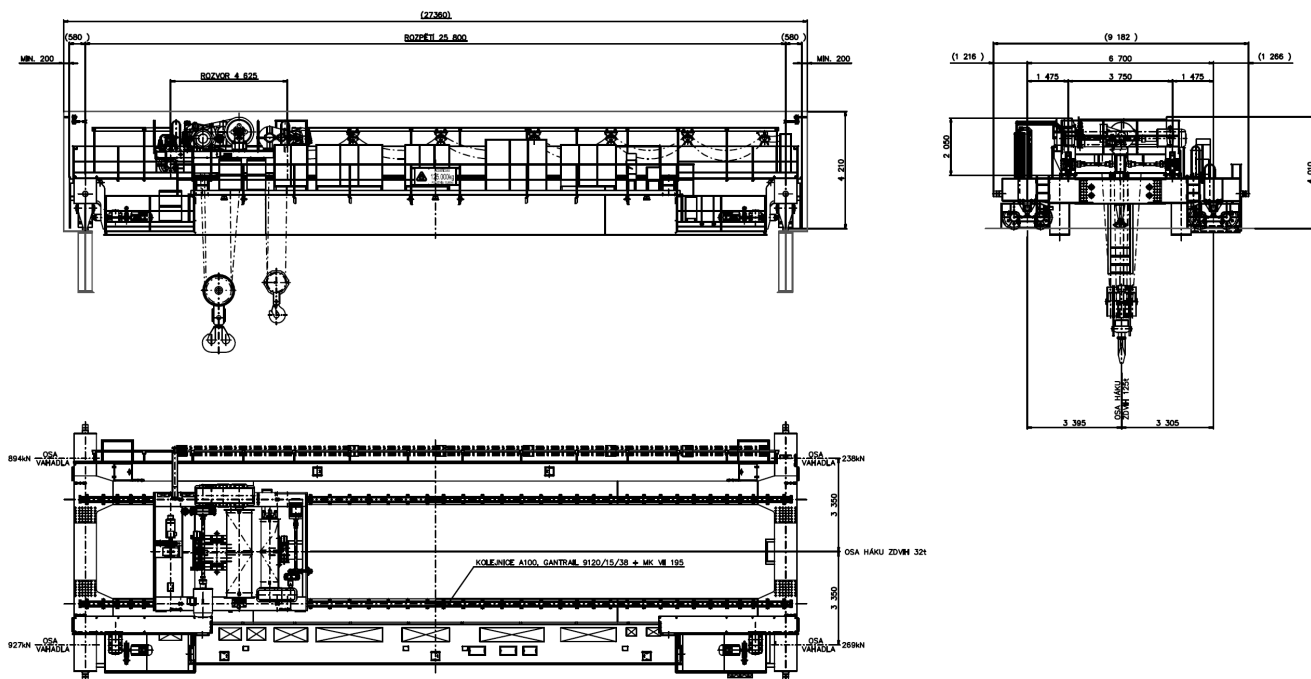
Obr. 1: Dvounosníkový mostový jeřáb [12]

3 PARAMETRY JEŘÁBU

V této práci se budu zabývat pevnostní analýzou ocelové konstrukce klasického dvounosníkového mostového jeřábu o nosnosti 125 tun (obr. 2). Tento jeřáb je určen pro manipulační práci v hale firmy Slovácké strojírna, a.s se sídlem v Uherském Brodě. Jeřáb má hlavní zdvih o nosnosti 125t a pomocný zdvih o nosnosti 32t, oba zdvihy jsou vybaveny kladnicí a hákem. Rozpětí jeřábu je 25,8m. Jeřáb bude pracovat v hale v rozmezí teplot okolo +10°C až +40°C. Všechny další parametry jeřábu a kočky jsou uvedeny níže.

Nosná ocelová konstrukce jeřábu je tvořena dvěma hlavními nosníky a dvěma příčnicí, které jsou navzájem svařeny. Hlavní nosník je skříňový a jeho obvodové pásnice jsou svařeny z plechů různých tloušťek. Nosník je dále vyztužen přivařenými žebry jak podélnými tak příčnými. Na horní pásnici je pomocí příchytěk s přivařeným spodním dílem upevněna kolejnice A100, po které pojíždí kočka. Na bočních pásnicích pod kolejnicí jsou navíc z vnější strany přivařeny žebra. Příčnick jeřábu je také skříňový a je vyztužen žebry. Příčnicky jsou sešroubovány ze třech částí, které jsou svařeny z plechů různých tloušťek. Na každém z příčnick jsou dvě vahadla se dvěma koly. Každý příčnick má na jednom z vahadel jedno kolo hnací, ostatní jsou hnané. Kola pojíždí po jeřábové dráze, která je u stropu haly.

Příčnický jeřáb je k hlavním nosníkům přivařený a místo spoje je dále vyztuženo přivařenými žebry. Jeřáb bude ovládán pomocí rádiového ovladače.



Obr. 2: Mostový jeřáb 125t firmy Slováké strojírny, a.s

Jeřáb

Nosnost hlavního zdvihu:	125 000 kg
Nosnost pomocného zdvihu:	32 000 kg
Rozpětí:	25,8 m
Rozvor:	6,7 m
Počet hnacích/všech kol:	2/8 ks
Rychlost pojezdu:	4 - 40 m.min ⁻¹
Kolejnice:	A100
Ovládání:	radiové

Kočka

Rozchod:	3,75 m
Rozvor:	4,625 m
Počet hnacích/všech kol:	2/4 ks
Rychlost pojezdu:	2 - 20 m.min ⁻¹
Rychlost hlavního zdvihu:	0,3 - 3,0 m.min ⁻¹
Rychlost pomocného zdvihu:	0,6 - 6,0 m.min ⁻¹
Výška hlavního zdvihu:	17 m
Výška pomocného zdvihu:	18 m
Kolejnice:	A100

Provozní zařazení jeřábu dle ČSN 27 0103

Zdvihová třída:	H2
Druh provozu:	D2
Provozní skupina:	J4
Spektrum napětí:	S1

4 TVORBA MODELU

Pro pevnostní výpočet jsem použil program NX I-DEAS. Konstrukce jeřábu je svařena a sešroubována z jednotlivých plechů, které lze považovat za tenkostěnné. Proto byl tvořen model jako skořepinová konstrukce.

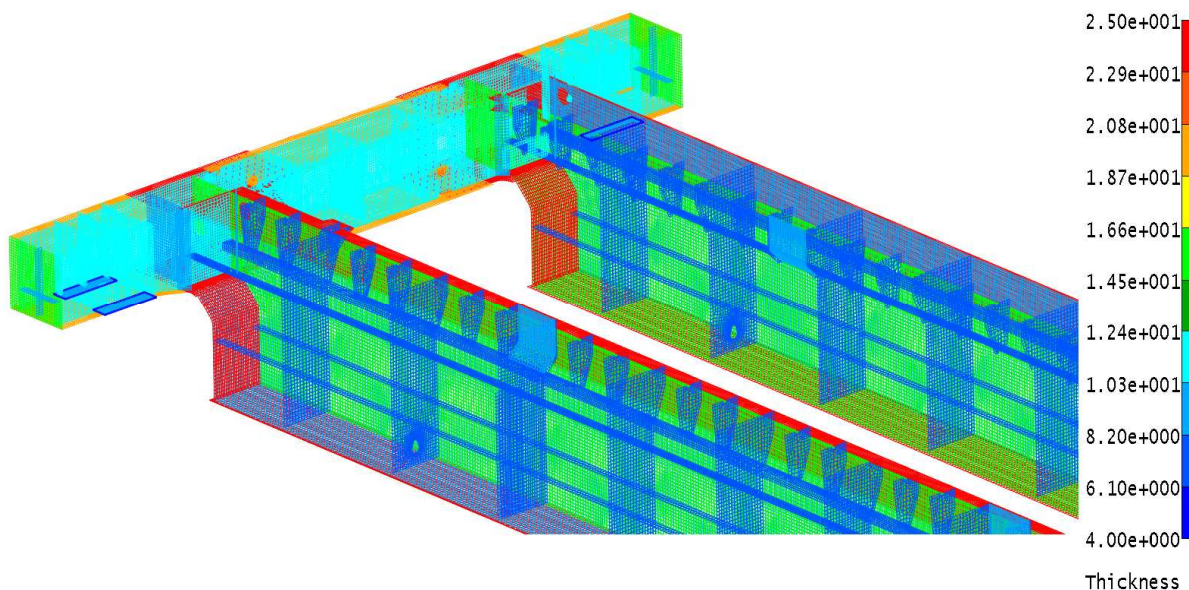
Prvkům modelu byly přiřazeny tloušťky podle daných tloušťek jednotlivých plechů dle výkresové dokumentace výrobce (tab. 1).

Tab. 1: Přehled vytvořených skupin v modelu a tloušťky plechů ve skupině

č. skupiny	Název	Tloušťka [mm]
1	Příčnick – horní plech	20 / 25
2	Příčnick – dolní plech	20 / 25
3	Příčnick – boční plech1	12
4	Příčnick – boční plech2	12
5	Příčnick – boky	16
6	Příčnick – boční žebra	10
7	Příčnick – žebra	10 / 12 / 15
8	Příčnick – plechy pro vahadla	10
9	Příčnick – svary u vahadel	4
10	Nosník – horní plech	25
11	Nosník – dolní plech	25
12	Nosník – boční plech1	10
13	Nosník – boční plech2	15
14	Nosník – boky	25
15	Nosník – příčné žebra	8
16	Nosník – velké žebra	8
17	Nosník – podélné žebra	8
18	Nosník – spojovací žebra	10
19	Nosník – žebra u nárazníků	8

Při síťování ploch jsem použil hlavně metodu volného síťování s občasným užitím mapované sítě (pokud byla vhodnější). Velikost prvků jsem volil s ohledem na vlastnosti prvků.

Pokud byly vlastnosti prvků přijatelné, byly použity u příčnicku prvky velikosti 30 mm a u nosníku prvky velikosti 40 mm.



Obr. 3: Pohled na část modelu s barevně odlišenými prvky různých tloušťek

Některé části jeřábu jsou v modelu zanedbány nebo zjednodušeny, jedná se zejména o vahadla, kola, kolejnice, jednotlivé lávky jeřábu, pojízděcí rámy atd. Řešení náhrady jednotlivých částí v modelu je uvedeno níže v této kapitole. Všechny tupé a dále pak koutové svary při spojení kolmých plechů jsou v modelu zanedbány a plechy jsou propojeny sítí. U koutových svarů při spojení rovnoběžných plechů je svar nahrazen vysíťovanou plochou po obvodu přivařeného plechu. Tato obvodová plocha má prvky tloušťky odpovídající tloušťce svaru. Takto nahrazený svar je použit pouze u plechů pro přišroubování vahadel k příčnicku.

4.1 Náhrada některých částí jeřábu v modelu

Hmotnosti zanedbaných částí jeřábu jako jsou vahadla s koly, lávka pro elektrickou výzbroj, lávka příčné troleje, pojízděcí rámy a kolejnice byly do modelu zadány jako nestrukturální hmotnost. Tyto hmotnosti byly přiřazeny elementům, kde se tyto části přibližně nacházejí. V případě vahadel a kol byly hmotnosti umístěny na elementy plechů u příčnicku, ke kterým jsou vahadla přišroubovány. Hmotnost lávky pro elektrickou výzbroj s příslušenstvím byla zadána na elementy horní pásnice nosníku a na druhý nosník byla zadána hmotnost od lávky a drážky příčné troleje. U nosníku s elektrickou lávkou je po obou krajích na délce 3 metry přidána elementům hmotnost od pojezdových ráků s motorem a převodovkou.

Obecný vzorec, který byl použit pro výpočet nestrukturálních hmotností pro zadání do materiálových vlastností prvků v programu I-DEAS je následující:

$$NM = \frac{m}{S} \quad (4.1)$$

kde:

m ... hmotnost jednotlivých dílů a zařízení

S ... plocha prvků kterým je hmotnost přiřazena

Hmotnost od lávky pro elektrickou výzbroj a samotné elektrické výbroje.

Celková hmotnost je 3840 kg plus přídavek 200 kg.

$$NM1 = \frac{4040}{16155280} = 2,501 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Hmotnost od lávky a drážky příčné troleje.

Celková hmotnost je 2500 kg plus přídavek 300 kg.

$$NM2 = \frac{2800}{21191520} = 1,321 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Hmotnost od pojezdového rámu s motorem a převodovkou.

Celková hmotnost je 1650 kg plus přídavek 100 kg.

$$NM3 = \frac{1750}{2522068} = 6,939 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Hmotnost od hnacího vahadla a kol jeřábu. Celková hmotnost je 2000 kg.

$$NM4 = \frac{2000}{253470} = 7,890 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$$

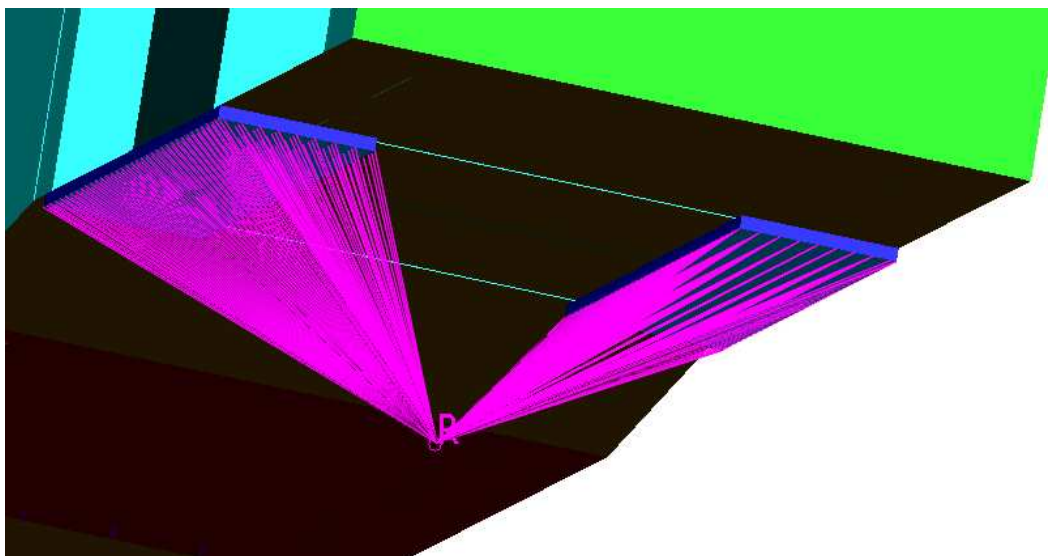
Hmotnost od hnaného vahadla a kol jeřábu. Celková hmotnost je 1900 kg.

$$NM5 = \frac{1900}{253470} = 7,496 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Hmotnost od kolejnice A100. Celková hmotnost je 3880 kg.

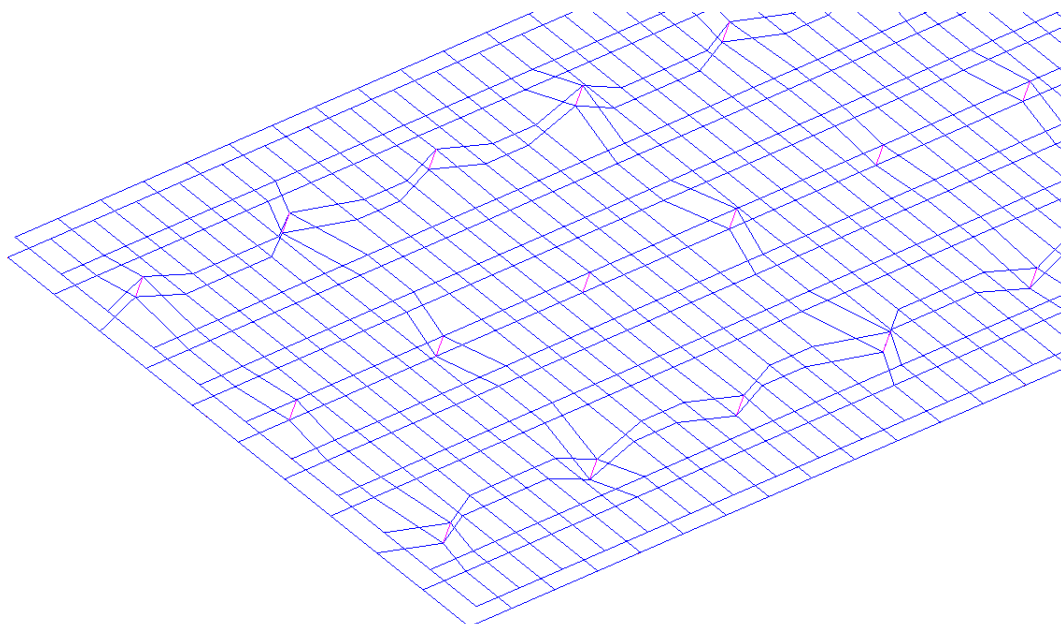
$$NM6 = \frac{3880}{11584000} = 3,349 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Vahadla s pojezdovými koly jeřábu, které pojíždí po jeřábové dráze byly v modelu nahrazeny pomocí uzlu, který je umístěn v ose čepu vahadla. Tento uzel byl dále spojen s uzly sítě plechů pro přišroubování vahadla pomocí prvku Rigid (obr. 4). Podobně byly nahrazeny nárazníky. Uzly vytvořené pro zachycení sil v náraznicích byly spojeny s uzly sítě příčnicku opět prvky Rigid.



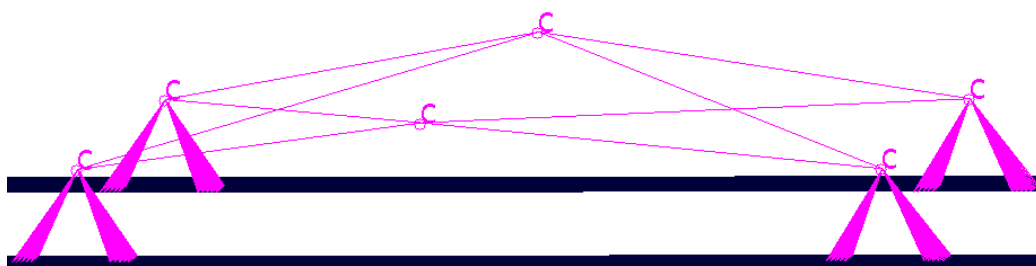
Obr. 4: Nahrazení vahadla pomocí prvku Rigid

Dalšími prvky, které bylo potřeba nějak nahrazovat byly šrouby, které spojují jak boční plechy tak horní i dolní plech u příčnicku. Šrouby byly nahrazeny pomocí prvků Rigid, které byly umístěny do os šroubů (obr. 5). Uzly sítě v místě šroubového spojení bylo nutné posunout přesně do os šroubů, toto bylo provedeno pomocí příkazu Drag.



Obr. 5: Nahrazení šroubů u příčnicku pomocí prvků Rigid

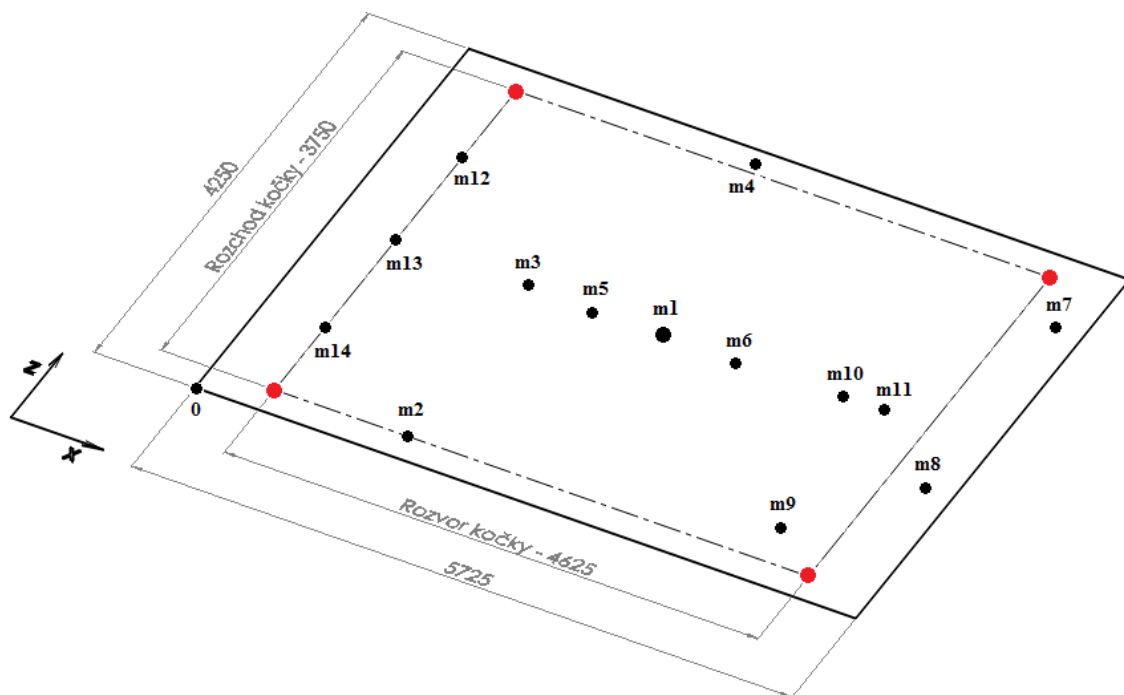
Nahrazení kočky bylo provedeno tak, že s ohledem na rozvor kočky jsem vybral uzly sítě dvou nejbližších přichytek kolejnice (uzly sítě horní pásnice nosníku) a tyto uzly byly použity k provázání s uzly v osách kol kočky. Provázání bylo realizováno pomocí prvků Constraint (obr. 6).



Obr. 6: Nahrazení kočky a kolejnice pomocí prvků Constraint

4.2 Určení těžiště kočky

K zadání zatížení od kočky bylo nutné určit těžiště kočky. Poté byl vytvořen uzel na souřadnicích těžiště a ten následně spojen s uzly v osách kol kočky pomocí prvku Constraint, jak ukazuje obr. 6. Do tohoto uzlu bylo poté zadáváno zatížení od kočky.



Obr. 7: Rozložení hmotností na kočce pro určení těžiště

Tab. 2: Přehled jednotlivých hmotností na kočce

Označení hmotnosti	Zahrnutá hmotnost
m1 = 12915 kg	rám, zábradlí, pojezdová kola, ostatní
m2 = 715 kg	motor hl. zdvihu, spojka
m3 = 680 kg	hřídel, spojka, brzda, omezovač nosnosti
m4 = 3300 kg	převodovka hl. zdvihu
m5 = 4060 kg	horní skupina kladek a kladnice
m6 = 3770 kg	lanový buben, lano
m7 = 390 kg	motor pomocného zdvihu, spojka
m8 = 207 kg	hřídel, spojka, brzda, elhy
m9 = 1075 kg	převodovka pomocného zdvihu
m10 = 1633 kg	lanový buben, lano
m11 = 1193 kg	kladky, kladnice, omezovač nosnosti
m12 = 198 kg	motor pojezdu, spojka, elhy
m13 = 404 kg	převodovka pojezdu
m14 = 230 kg	spojka, hřídel

Souřadnice těžiště rámu kočky:

x = 2862,5 mm

y = 572 mm

z = 2125 mm

Souřadnice těžiště kočky - x:

$$T_x = \frac{\sum m \cdot x}{\sum m} \quad (4.2)$$

kde:

x... souřadnice hmotnosti v ose x

$$T_x = \frac{m1 \cdot 2862,5 + m2 \cdot 1700 + m3 \cdot 2425 + m4 \cdot 2550 + m5 \cdot 2280 + m6 \cdot 2862,5 + (m7 + m8) \cdot 5485 + m9 \cdot 5175 + m10 \cdot 4425 + m11 \cdot 4780 + (m12 + m13 + m14) \cdot 550}{m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6 + m7 + m8 + m9 + m10 + m11 + m12 + m13 + m14}$$

$$T_x = \frac{12915 \cdot 2862,5 + 715 \cdot 1700 + 680 \cdot 2425 + 3300 \cdot 2550 + 4060 \cdot 2280 + 3770 \cdot 2862,5 + (390 + 207) \cdot 5485 + 1075 \cdot 5175 + 1633 \cdot 4425 + 1193 \cdot 4780 + (198 + 404 + 230) \cdot 550}{12915 + 715 + 680 + 3300 + 4060 + 3770 + 390 + 207 + 1075 + 1633 + 1193 + 198 + 404 + 230}$$

$$T_x = \frac{90520947,5}{30770} = 2941,86 \text{ mm}$$

$$T_x \approx \underline{\underline{2942 \text{ mm}}}$$

Souřadnice těžiště kočky - z:

$$T_z = \frac{\sum m \cdot z}{\sum m} \quad (4.3)$$

kde:

z... souřadnice hmotnosti v ose z

$$T_z = \frac{m1 \cdot 2125 + m2 \cdot 250 + m3 \cdot 2125 + m4 \cdot 4100 + (m5 + m6) \cdot 2080 + m7 \cdot 3520 + m8 \cdot 1500 + m9 \cdot 620 + (m10 + m11) \cdot 2125 + m12 \cdot 3150 + m13 \cdot 2125 + m14 \cdot 1035}{m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6 + m7 + m8 + m9 + m10 + m11 + m12 + m13 + m14}$$

$$T_z = \frac{12915 \cdot 2125 + 715 \cdot 250 + 680 \cdot 2125 + 3300 \cdot 4100 + (4060 + 3770) \cdot 2080 + 390 \cdot 3520 + 207 \cdot 1500 + 1075 \cdot 620 + (1633 + 1193) \cdot 2125 + 198 \cdot 3150 + 404 \cdot 2125 + 230 \cdot 1035}{12915 + 715 + 680 + 3300 + 4060 + 3770 + 390 + 207 + 1075 + 1633 + 1193 + 198 + 404 + 230}$$

$$T_z = \frac{68959825}{30770} = 2241,14 \text{ mm}$$

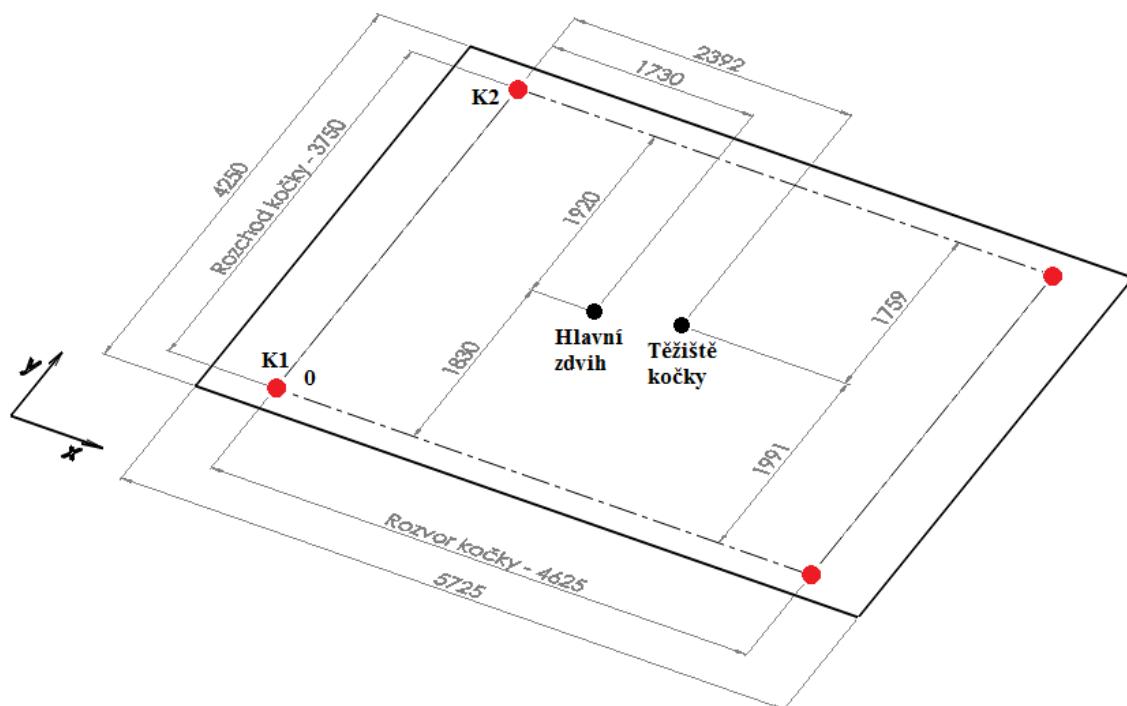
$$T_z \approx \underline{\underline{2241 \text{ mm}}}$$

Obdobně jako byly určeny souřadnice těžiště x a z byla odhadnuta i souřadnice těžiště y:

$$T_y \approx \underline{\underline{1075 \text{ mm}}}$$

4.3 Zatížení od jmenovitého břemena

K zadání zatížení od jmenovitého břemena do modelu bylo nutné připravit uzel, do kterého se toto zatížení umístí. Tento uzel byl vytvořen v ose horní skupiny kladek, poté byl opět spojen s uzly v osách kol kočky pomocí prvku Constraint, jak je znázorněno na obr. 6.



Obr. 8: Umístění hlavního zdvihu na kočce

4.4 Výpočet zatížení poháněných kol kočky

Nejprve byly vypočteny souřadnice těžiště plně zatížené kočky (se zavěšeným břemenem 125t). Souřadnice těžiště plně zatížené kočky jsou dle obr. 8:

$$C_x = \frac{\sum m \cdot x}{\sum m} \quad (4.4)$$

$$C_x = \frac{m_K \cdot 2392 + m_h \cdot 1730}{m_K + m_h}$$

$$C_x = \frac{30770 \cdot 2392 + 125000 \cdot 1730}{30770 + 125000} = \frac{289851840}{155770} = \underline{\underline{1860,77 \text{ mm}}}$$

$$C_y = \frac{\sum m \cdot y}{\sum m} \quad (4.5)$$

$$C_y = \frac{m_K \cdot 1991 + m_h \cdot 1830}{m_K + m_h}$$

$$C_y = \frac{30770 \cdot 1991 + 125000 \cdot 1830}{30770 + 125000} = \frac{290013070}{155770} = \underline{\underline{1861,8 \text{ mm}}}$$

kde:

m_K ... hmotnost kočky

m_h ... hmotnost břemena hlavního zdvihu

m_c ... celková hmotnost $m_c = m_K + m_h = 30770 + 125000 = 155770 \text{ kg}$

Hmotnost na straně poháněných kol kočky:

$$m_{poh} = \frac{m_c \cdot (R_r - C_x)}{R_r} \quad (4.6)$$

$$m_{poh} = \frac{155770 \cdot (4625 - 1860,77)}{4625} = \frac{430584107,1}{4625} = \underline{\underline{93099,3 \text{ kg}}}$$

kde:

R_r ... rozvor kočky

Výpočet zatížení poháněných kol kočky:

$$K1 = \frac{m_{poh} \cdot (R_{ch} - C_y)}{R_{ch}} \cdot g \quad (4.7)$$

$$K1 = \frac{93099,1 \cdot (3750 - 1861,8)}{3750} \cdot 9,81 = \frac{175789720,6}{3750} \cdot 9,81 = \underline{\underline{459,9 \cdot 10^3 \text{ N}}}$$

kde:

R_{ch} ... rozchod kočky

g ... gravitační zrychlení, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

$$K2 = \frac{m_{poh} \cdot C_y}{R_{ch}} \cdot g \quad (4.8)$$

$$K2 = \frac{93099,1 \cdot 1861,8}{3750} \cdot 9,81 = \frac{173331904,4}{3750} \cdot 9,81 = \underline{\underline{453,4 \cdot 10^3 \text{ N}}}$$

5 PEVNOSTNÍ VÝPOČET MOSTU

Materiál pro celou konstrukci mostu je jednotný. Je použita ocel S355 J2+N (ČSN 11523). Tento materiál má podle normy ČSN EN 1993-1-1 do tloušťky stěny 40 mm mez kluzu $R_e = 355$ MPa a mez pevnosti $R_m = 490$ MPa. Při posuzování konstrukce na tah, tlak a ohyb budu brát návrhovou hodnotu pevnosti materiálu přímo mez kluzu, neboť [6], str. 46 doporučuje součinitele spolehlivosti rovné 1.

Při posuzování konstrukce na mezní stav deformace byl použit vzorec z [7], příloha VIII, tab. VIII/1 pro maximální doporučený průhyb nosníků od stálého a jmenovitého břemena 125t. V mé práci označený jako y_D .

$$y_D = \frac{1}{700} \cdot L = \frac{1}{700} \cdot 25800 = \underline{\underline{36,86 \text{ mm}}} \quad (5.1)$$

kde:

L ... rozpětí jeřábu

5.1 Zatížení a jejich součinitelé

Podle normy ČSN 27 0103 při výpočtu ocelových konstrukcí jeřábů podle doby trvání a změn velikosti, polohy nebo smyslu a směru působení rozeznáváme zatížení a účinky zatížení:

- Stálé
- Nahodilé
- Mimořádné

5.1.1 Zatížení stálé

Mezi tento druh zatížení řadíme zatížení od vlastní hmotnosti nosné konstrukce a dalších částí, které nemění svoje působení na konstrukci a dále pak zatížení od trvalého předpětí. Jedná se tedy o hmotnosti jednotlivých částí konstrukce jeřábu. Jednotlivé údaje jsou uvedeny níže. Pro zatížení vyvozená vlastní hmotností uvažuji dle [7], str. 8 součinitel zatížení $\gamma_g = 1,1$. [7]

Hmotnosti konstrukce mostu

Hlavní nosník	20 240 kg (2ks)
Příčnick	5 000 kg (2ks)
Kolejnice	1 940 kg (2ks)
Lávka s elektrickou výzbrojí	2 500 kg
Elektrická výzbroj	1 340 kg

Lávka příčné troleje	2 000 kg
Drážka příčné troleje	500 kg
Pojzdový rám	750 kg (2ks)
Ostatní	500 kg
<hr/>	
Celkem:	62 700 kg

Hmotnosti pojezdu jeřábu

Motory + převodovka	900 kg (2ks)
Kola hnací	600 kg (2ks)
Kola hnané	500 kg (6ks)
Vahadla	900 kg (4ks)
Ostatní	200 kg
<hr/>	
Celkem:	9 800 kg

Zatížení od vlastní hmotnosti konstrukce jeřábu $m_g = 72\,500$ kg je v mé práci označeno jako Z1. Jedná se o součet všech hmotností jednotlivých částí konstrukce jeřábu.

5.1.2 Zatížení nahodilé

Tyto zatížení zahrnují zatížení od jmenovitého břemena, stálého břemena, vlastních hmotností pohyblivých částí a zatížení od setrvačných sil vznikajících při pohybu jeřábu nebo jeho částí. Dále pak vodorovné boční síly od přičení jeřábu, zatížení větrem, sněhem, námrazou, ledem, teplotními změnami a zatížení lávek, plošin, schodů atd. V případě řešeného jeřábu zatížení větrem, sněhem, námrazou, ledem a teplotními změnami neuvažují, neboť jeřáb bude provozován uvnitř haly. [7]

5.1.2.1 Stálé břemena

Hmotnosti konstrukce kočky

Rám	10 000 kg
Zábradlí	200 kg
Motor	120 kg
Převodovka	400 kg
Kola hnací	650 kg (2ks)
Kola hnané	550 kg (2ks)
Ostatní	500 kg
<hr/>	
Celkem:	13 620 kg

Hmotnosti zařízení od zdvihu 125t

Motor	685 kg
Brzda	110 kg
Převodovka	3 300 kg
Lanový buben	2 500 kg
Bubnové ložisko	105 kg
Lano ČSN 024345, d= 31,5 mm, l=275m	1 165 kg
Horní kladnice	760 kg
Kladnice	3 300 kg
Omezovač nosnosti	340 kg
Ostatní	400 kg
<hr/>	
Celkem:	12 665 kg

Hmotnosti zařízení od zdvihu 32t

Motor	370 kg
Převodovka	1 055 kg
Lanový buben	1 200 kg
Lano ČSN 024344, d= 22,4 mm, l=175m	320 kg
Horní kladnice	220 kg
Kladnice	770 kg
Omezovač nosnosti	200 kg
Ostatní	350 kg
<hr/>	
Celkem:	4 485 kg

Zatížení od hmotnosti stálého břemena $m_s = 30\,770$ kg je v mé práci označeno jako Z2. Jedná se o součet všech hmotností jednotlivých částí kočky.

5.1.2.2 Jmenovitá břemena

U hlavního zdvihu:

Břemeno $Q = 125t$ 125 000 kg

U pomocného zdvihu:

Břemeno $Q = 32t$ 32 000 kg

Součinitel zatížení od břemena γ_{10} zvolím podle zařazení jeřábu, druh provozu D2. Jelikož má jeřáb zařízení proti přetížení z [7], tab. 1, str. 9 volím $\gamma_{10} = 1,2$. Všechny výpočty byly provedeny pro hlavní zdvih jeřábu, zatížení od hmotnosti jmenovitého břemena hlavního zdvihu $m_h = 125\,000$ kg je v mé práci označeno jako Z3.

5.1.2.3 Zatížení od setrvačných sil

Zatížení od svislých setrvačných sil vznikajících při zvedání nebo spouštění břemena

Tyto síly vznikají účinkem dynamických sil při zvedání nebo spouštění břemena. Hodnota dynamického součinitele zdvihového δ_h byla určena podle zdvihové třídy jeřábu a rychlosti zdvihu dle vzorce z [7], str. 9. Součinitel Hi byl určen dle [7], tab. 2, str. 10.

$$\delta_h = 1 + Hi \cdot (0,1 + 0,13 \cdot v_h) \quad (5.2)$$

kde:

Hi ... součinitel zdvihové třídy jeřábu

v_h ... rychlost hlavního zdvihu

Maximální rychlost zdvihu je $3,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} = 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Hodnota dynamického součinitele δ_h pro hlavní zdvih o nosnosti 125t:

$$\delta_h = 1 + Hi \cdot (0,1 + 0,13 \cdot v_h)$$

$$\delta_h = 1 + 2 \cdot (0,1 + 0,13 \cdot 0,05)$$

$$\delta_h = \underline{\underline{1,213}}$$

Zatížení od svislých setrvačných sil vznikajících při pojíždění

Tyto síly vznikají účinkem pojíždění jeřábu nebo kočky. Při více pohybech se uvažuje vyšší hodnota δ_t . Hodnota dynamického součinitele pojezdového δ_t byla určena podle [7], tab. 4, str. 11.

Rychlost pojezdu jeřábu je $4 - 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

$$v_j = \frac{40}{60} = 0,66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.3)$$

Rychlost pojezdu kočky je $2 - 20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

$$v_k = \frac{20}{60} = 0,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.4)$$

Pro určení hodnoty dynamického součinitele pojezdového δ_t byla použita rychlost pojezdu jeřábu.

$$v_t \leq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \rightarrow \delta_t = \underline{\underline{1,1}}$$

kde:

$v_t = v_j \dots$ pojezdová rychlost jeřábu

Zatížení od setrvačných sil vznikajících při rozjíždění a brzdění

Při zrychlování nebo zpomalování pojezdu jeřábu a kočky je třeba zjistit největší možné setrvačné síly působící na nosnou konstrukci jeřábu. Tyto síly jsou omezeny třecí silou pojíždějících kol po kolejnici, proto zde byl uvažován součinitel tření $\mu = 0,14$. Ve výpočtu setrvačných sil uvažuji dle [7], str. 12 součinitel zatížení od setrvačných sil $\gamma_i = 1,1$. [7]

5.1.2.4 Výpočet zrychlení vyvolaného setrvačnými silami

Setrvačné síly jsou schopné přenášet pouze hnací kola, proto je potřeba pro výpočet zatížení od zrychlení určit korekční součinitele. Tyto součinitele jsou označeny pro jeřáb i_j a pro kočku i_k . U jeřábu je součinitel vypočten jako poměr hnacích kol ku celkovému počtu kol na poháněných vahadlech. U kočky jsou poháněna obě kola, které byly použity pro výpočet zatížení od rozjezdu kočky, proto je poměr $i_k = 1$. Pro součinitele tedy platí následující vztahy:

$$i_j = \frac{2}{4} = 0,5 \quad (5.5)$$

$$i_k = \frac{2}{2} = 1 \quad (5.6)$$

Výpočet zatížení od rozjezdu mostu, ve směru osy z

$$F_z = \mu \cdot i_j \cdot (K1 + K4) \quad (5.7)$$

$$F_z = 0,14 \cdot 0,5 \cdot (927 \cdot 10^3 + 269 \cdot 10^3)$$

$$F_z = \underline{\underline{83,72 \cdot 10^3 \text{ N}}}$$

kde:

$K1, K4 \dots$ zatížení poháněných vahadel jeřábu (hodnoty od výrobce)

$\mu \dots$ součinitel tření pojíždějících kol po kolejnici

Zrychlení od rozjezdu mostu:

$$a_z = \frac{F_z}{m_g + m_s + m_h} \quad (5.8)$$

$$a_z = \frac{83,72 \cdot 10^3}{72500 + 30770 + 125000}$$

$$a_z = \underline{\underline{0,3668 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}}$$

Zpomalení od brzdění mostu má stejnou velikost, ale je opačně orientované.

$$a_z = -0,3668 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Výpočet zatížení od rozjezdu kočky, ve směru osy x

$$F_x = \mu \cdot i_k \cdot (K1 + K2) \quad (5.9)$$

$$F_x = 0,14 \cdot 1 \cdot (453,4 \cdot 10^3 + 459,9 \cdot 10^3)$$

$$F_x = \underline{\underline{127,9 \cdot 10^3 \text{ N}}}$$

kde:

$K1, K2 \dots$ zatížení poháněných kol kočky

$\mu \dots$ součinitel tření pojíždějících kol po kolejnici

Výpočet zrychlení od rozjezdu kočky:

$$a_x = \frac{F_x}{m_h + m_s} \quad (5.10)$$

$$a_x = \frac{127,9 \cdot 10^3}{125000 + 30770}$$

$$a_x = \underline{\underline{0,821 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}}$$

Zpomalení od brzdění kočky má stejnou velikost, ale je opačně orientované.

$$a_x = -0,821 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

5.1.2.5 Vodorovné boční síly od příčeni jeřábu na jeřábové dráze

Pojíždí-li po kolejnici dvě skupiny kol ve vahadlech, vzniká příčeni jeřábu na dráze dvojice sil, působící kolmo na kolejnici v úrovni horní hrany. Síly dvojice se určí podle [7], str. 12. Velikosti zatížení vahadel na více zatížené větvi jeřábové dráhy K1 a K2 jsem získal z dodané výkresové dokumentace firmy Slovácké strojírna, a.s.

Výpočet síly dvojice H_{tp} :

$$H_{tp} = \lambda \cdot \sum K \quad (5.11)$$

$$H_{tp} = 0,0963 \cdot (927 \cdot 10^3 + 894 \cdot 10^3)$$

$$H_{tp} = \underline{\underline{175,4 \text{ kN}}}$$

kde:

$$\lambda = 0,025 \cdot \frac{L}{s} \quad (5.12)$$

$$\lambda = 0,025 \cdot \frac{25,8}{6,7}$$

$$\lambda = 0,0963$$

L ... rozpětí jeřábu [m]

s ... rozvor jeřábu [m]

$\sum K = K1 + K2$... zatížení vahadel na více zatížené větvi jeřábové dráhy

5.1.3 Zatížení mimořádná

Tyto zatížení zahrnují zatížení od nárazu jeřábu nebo kočky na nárazníky, zatížení vzniklé při dopravě a montáži, při poruše zdvihacího zařízení nebo odpadnutí břemena atd. [7]

5.1.3.1 Zatížení při zkouškách jeřábu

Dle [9], tab. 3, str. 11 byla stanovena hmotnost zkušebního břemena pro statickou a dynamickou zkoušku jeřábu. Výpočet je proveden v kapitole 5.2.4.

5.1.3.2 Zatížení při poruše zdvihacího zařízení

Dle [7], str. 19 zatížení, vzniklé při poruše zdvihacího mechanismu nebo při odpadnutí břemena se při výpočtu napětí v konstrukci uvažuje jako 25% celkového břemena působící směrem vzhůru. Toto zatížení je uvažováno v základních kombinacích zatížení.

5.1.3.3 Zatížení od nárazu na nárazníky

Podle normy ČSN 27 0103 musí konstrukce mostových jeřábů odolávat silám vznikajícím při najetí jeřábu na nárazníky poloviční rychlostí. Uvažuje se břemeno stálé a 80% břemena jmenovitého v nejnepříznivější poloze. Sílu na nárazníky určíme z kinetické energie pohybujících se částí jeřábu poloviční rychlostí.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot (m_g + m_s + 0,8 \cdot m_h) \cdot \left(\frac{v_j}{2}\right)^2 \quad (5.13)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot (72500 + 30770 + 100000) \cdot \left(\frac{0,66}{2}\right)^2$$

$$E_k = \underline{\underline{11\,068\,J}}$$

kde:

v_j ... pojezdová rychlost jeřábu

m_g ... hmotnost konstrukce jeřábu

m_s ... hmotnost stálého břemena

m_h ... hmotnost břemena hlavního zdvihu

$$\text{Energie na jeden nárazník } E_{k1} = \frac{11\,068}{2} = \underline{\underline{5,5\text{ kJ}}} \quad (5.14)$$

Podle katalogu výrobce nárazníků je síla na nárazník F_{n1} při absorbované energii 5,5 kJ přibližně $F_{n1} = 100$ kN.

Podle normy ČSN EN 13001-2 se síly na nárazníky určí z kinetické energie všech příslušných částí jeřábu pohybující se rychlostí 0,7-1 násobku jmenovité rychlosti jeřábu. Byl zvolen 0,7 násobek rychlosti, neboť na jeřábu jsou použity koncové vypínače, které omezují, případně úplně vypínají pojezd jeřábu při dojezdu k nárazníkům.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot (m_g + m_s) \cdot (0,7 \cdot v_j)^2 \quad (5.15)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot (72500 + 30770) \cdot (0,7 \cdot 0,66)^2$$

$$E_k = \underline{\underline{11\,021\text{ J}}}$$

$$\text{Energie na jeden nárazník } E_{k2} = \frac{11\,021}{2} = \underline{\underline{5,5\text{ kJ}}} \quad (5.16)$$

Síla na nárazníky F_{n2} vypočítaná podle normy EN 13001-2 je tedy přibližně stejná jako síla F_{n1} . Podle obou norem vyšly síly na nárazníky stejné, ale výsledné síly se pro každou z norem násobí jiným součinitelem, proto budu kontrolovat zatížení od nárazu na nárazníky podle obou norem. Zatížení od nárazu na nárazníky je v práci označeno jako Z7.

$$Z7 = F_{n1} = F_{n2} = 100\text{ kN}$$

Výpočet zpomalení jeřábu při nárazu na nárazníky:

$$a_{z1} = -\frac{2 \cdot F_{n1}}{m_g + m_s} = -\frac{2 \cdot 100 \cdot 10^3}{72500 + 30770} = \underline{\underline{-1,9367\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}} \quad (5.17)$$

$$a_{z2} = a_{z1} = -1,9367\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

5.2 Zatížení a jejich kombinace

Jednotlivá základní zatížení, ze kterých byly sestaveny všechny kombinace zatížení, které mohou při provozu jeřábu nastat, jsou označeny písmeny Z a vypsány zde:

Z1 = Zatížení od hmotnosti konstrukce jeřábu

Z2 = Zatížení od stálého břemena

Z3 = Zatížení od jmenovitého břemena 125t

Z4 = Zatížení od jízdy mostu – od zrychlení

Z5 = Zatížení od jízdy kočky – od zrychlení

Z6 = Zatížení od přícení jeřábu

Z7 = Zatížení od nárazu na nárazníky

Posouzení konstrukce bylo provedeno pro dvě polohy kočky: kočka ve středu mostu a na kraji mostu u nárazníků.

5.2.1 Zadání zatížení do programu I-DEAS

Z1 → Zadáno gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
+ „Vazby_normalni“

Z2 → Zadána síla do těžiště kočky $F_y = -m_s \cdot g$
+ „Vazby_normalni“

Z3 → Zadána síla od břemena do uzlu v ose horní skupiny kladek hlavního zdvihu
 $F_y = -m_h \cdot g$
+ „Vazby_normalni“

Z4 → Zadáno zrychlení od rozjezdu mostu v ose z $a_z = 0,3668 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, dále pak síla do těžiště kočky $F_z = -m_s \cdot a_z$ a síla od břemena $F_z = -m_h \cdot a_z$
+ „Vazby_normalni“

Z5 → Zadány síly do uzlů v ose pojezdových kol kočky $F_x = -\frac{m_s \cdot a_x}{2}$, síla od břemena $F_x = -m_h \cdot a_x$
+ „Vazby_normalni“

Z6 → Zadána dvojice sil do uzlů v ose vahadel na více zatížené větvi jeřábové dráhy
 $F_x = \pm Z6$
+ „Vazby_priceni“

Z7 → Zadáno zpomalení jeřábu od nárazu na nárazníky v ose z $a_{z1} = -1,9367 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,

dále pak síla do těžiště kočky $F_z = m_s \cdot a_{z1}$

+ „Vazby_narazniky“

5.2.2 Definované vazby

„Vazby_normalni“

Tyto vazby zamezují posuvu v ose y u všech vahadel. Dále pak na vahadlech pravé strany jeřábu posuv v ose x a na dvou poháněných vahadlech posuv v ose z .

„Vazby_priceni“

Tyto vazby zamezují posuvu v ose y u všech vahadel. Dále pak na vahadlech pravé strany jeřábu posuv v ose x a na pravém poháněném vahadle posuv v ose z .

„Vazby_narazniky“

Tyto vazby zamezují posuvu v ose y u všech vahadel. Dále pak na vahadlech pravé strany jeřábu posuv v ose x . Posuvu v ose z je zamezeno v uzlech nárazníků.

5.2.3 Základní kombinace zatížení

Tyto kombinace zatížení byly sestaveny z jednotlivých výpočtových zatížení dle kombinací z [7], tab. 9, str. 21.

L1 je základní kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu, stálým břemenem a břemenem jmenovitým 125t.

$$L1 = Z1 \cdot \gamma_g \cdot \delta_t + Z2 \cdot \gamma_g \cdot \delta_h + Z3 \cdot \gamma_{10} \cdot \delta_h \quad (5.18)$$

$$L1 = Z1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 + Z2 \cdot 1,1 \cdot 1,213 + Z3 \cdot 1,2 \cdot 1,213$$

$$L1 = Z1 \cdot 1,21 + Z2 \cdot 1,3343 + Z3 \cdot 1,4556$$

L2 je základní kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu, stálým břemenem a břemenem jmenovitým 125t při rozjezdu mostu.

$$L2 = L1 + Z4 \cdot \gamma_i \quad (5.19)$$

$$L2 = L1 + Z4 \cdot 1,1$$

L3 je základní kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu, stálým břemenem a břemenem jmenovitým 125t při rozjezdu kočky.

$$L3 = L1 + Z5 \cdot \gamma_i \quad (5.20)$$

$$L3 = L1 + Z5 \cdot 1,1$$

L4 je základní kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu, stálým břemenem a břemenem jmenovitým 125t při rozjezdu mostu i kočky.

$$L4 = L1 + (Z4 + Z5) \cdot \gamma_i \quad (5.21)$$

$$L4 = L1 + (Z4 + Z5) \cdot 1,1$$

Další kombinace zatížení při brzdění (L5, L6, L7) se počítají obdobně.

L8 je základní kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu a zatížením při odpadnutí břemena.

$$L8 = Z1 \cdot \gamma_g \cdot \delta_t - 0,25 \cdot (Z2 + Z3) \cdot \gamma_{10} \cdot \delta_h \quad (5.22)$$

$$L8 = Z1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 - 0,25 \cdot (Z2 + Z3) \cdot 1,2 \cdot 1,213$$

$$L8 = Z1 \cdot 1,21 - 0,3639 \cdot (Z2 + Z3)$$

L9 je základní kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu a zatížením při odpadnutí břemena při rozjezdu mostu.

$$L9 = L8 + Z4 \cdot \gamma_i \quad (5.23)$$

$$L9 = L8 + Z4 \cdot 1,1$$

L10 je základní kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu a zatížením při odpadnutí břemena při rozjezdu kočky.

$$L10 = L8 + Z5 \cdot \gamma_i \quad (5.24)$$

$$L10 = L8 + Z5 \cdot 1,1$$

L11 je základní kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu a zatížením při odpadnutí břemena při rozjezdu mostu i kočky.

$$L11 = L8 + (Z4 + Z5) \cdot \gamma_i \quad (5.25)$$

$$L11 = L8 + (Z4 + Z5) \cdot 1,1$$

Další kombinace zatížení při brzdění (L12, L13, L14) se počítají obdobně.

L15 je základní kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu, stálým břemenem a břemenem jmenovitým 125t. Dále pak obsahuje zatížení vzniklé při příčném jeřábu.

$$L15 = Z1 \cdot \gamma_g \cdot \delta_t + Z2 \cdot \gamma_g + Z3 \cdot \gamma_{10} + Z6 \quad (5.26)$$

$$L15 = Z1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 + Z2 \cdot 1,1 + Z3 \cdot 1,2 + Z6$$

$$L15 = Z1 \cdot 1,21 + Z2 \cdot 1,1 + Z3 \cdot 1,2 + Z6$$

kde:

$$Z6 = H_{tp} \cdot \gamma_{tp} \quad (5.27)$$

$$Z6 = 175,4 \cdot 1,1$$

$$Z6 = \underline{\underline{192,9 \text{ kN}}}$$

γ_{tp} ... součinitel zatížení od příčných sil, dle [7], str. 13 uvažují $\gamma_{tp} = 1,1$.

L16 je kombinace pro posouzení maximálního průhybu nosníků od stálého a jmenovitého břemena.

$$L16 = Z2 + Z3 \quad (5.28)$$

Tab. 3: Přehled základních kombinací zatížení

Označení	Výpočet	Popis
L1	$L1 = Z1 \cdot 1,21 + Z2 \cdot 1,3343 + Z3 \cdot 1,4556$	Vlastní hmotnost jeřábu, stálé břemeno a břemeno jmenovité 125t.
L2	$L2 = L1 + Z4 \cdot 1,1$	Rozjezd mostu, stálé břemeno a břemeno jmenovité 125t.
L3	$L3 = L1 + Z5 \cdot 1,1$	Rozjezd kočky, stálé břemeno a břemeno jmenovité 125t.
L4	$L4 = L1 + (Z4 + Z5) \cdot 1,1$	Rozjezd mostu i kočky, stálé břemeno a břemeno jmenovité 125t.
L5	$L5 = L1 - Z4 \cdot 1,1$	Brzdění mostu, stálé břemeno a břemeno jmenovité 125t.
L6	$L6 = L1 - Z5 \cdot 1,1$	Brzdění kočky, stálé břemeno a břemeno jmenovité 125t.
L7	$L7 = L1 - (Z4 + Z5) \cdot 1,1$	Brzdění mostu i kočky, stálé břemeno a břemeno jmenovité 125t.
L8	$L8 = Z1 \cdot 1,21 - 0,3639 \cdot (Z2 + Z3)$	Odpadnutí břemena.
L9	$L9 = L8 + Z4 \cdot 1,1$	Odpadnutí břemena při rozjezdu mostu.
L10	$L10 = L8 + Z5 \cdot 1,1$	Odpadnutí břemena při rozjezdu kočky.
L11	$L11 = L8 + (Z4 + Z5) \cdot 1,1$	Odpadnutí břemena při rozjezdu mostu i kočky.
L12	$L12 = L8 - Z4 \cdot 1,1$	Odpadnutí břemena při brzdění mostu.

L13	$L13 = L8 - Z5 \cdot 1,1$	Odpadnutí břemena při brzdění kočky.
L14	$L14 = L8 - (Z4 + Z5) \cdot 1,1$	Odpadnutí břemena při brzdění mostu i kočky.
L15	$L15 = Z1 \cdot 1,21 + Z2 \cdot 1,1 + Z3 \cdot 1,2 + Z6$	Stálé břemeno a břemeno jmenovité 125t bez pojezdu jeřábu nebo kočky při přičení jeřábu.
L16	$L16 = Z2 + Z3$	Stálé břemeno a břemeno jmenovité 125t pro posouzení průhybu nosníků.

Jednotlivé kombinace zatížení byly sestaveny v programu NX I-deas ze základních zatížení Z1 až Z7, které byly sečteny či odečteny a vynásobeny jednotlivými součiniteli dle jednotlivých kombinací uvedených v tab. 3. Obdobně se postupovalo u sestavování mimořádných kombinací a kombinací pro posouzení únavy.

Postup vzniku kombinace L1 je uveden v přílohách. Příloha P1 zobrazuje napětí na konstrukci od zatížení Z1 = vlastní hmotnost konstrukce, příloha P2 zobrazuje napětí na konstrukci od zatížení Z2 = stálé břemeno a příloha P3 zobrazuje napětí na konstrukci od zatížení Z3 = jmenovité břemeno. Výsledná kombinace L1, která vznikla součtem těchto tří základních zatížení a vynásobením jednotlivými součiniteli je uvedena v příloze P4.

U všech základních kombinací vychází napětí dostatečně nízké od návrhové hodnoty pevnosti materiálu. U všech příloh je zvolena barevná škála napětí v rozsahu právě návrhové hodnoty pevnosti materiálu 355 MPa, která má pro celou konstrukci stejnou hodnotu. Špičky napětí, které se u jednotlivých zatěžovacích stavů nacházejí byly u šroubového spoje příčnicku a to z důvodu nahrazení šroubů dokonale tuhými prvky Rigid. Další místo vzniku špiček napětí se nachází u nahrazení koutových svarů plechů pro přišroubování vahadel k příčnicku, které jsou nahrazeny vysíťovanou plochou po obvodu přivařeného plechu. Tyto špičky napětí jsou zobrazeny v příloze P7 u zatěžovacího stavu L4 a vznikají v důsledku velké změny tuhosti v místě křížení svaru s boční pásnicí příčnicku. Další napěťové špičky se nachází v místech příchytů kolejnice na horní pásnici nosníku a to díky nedokonalé náhradě kolejnice.

Největší napětí vzniká při plném zatížení jeřábu při poloze kočky na kraji mostu. U těchto zatěžovacích stavů (L2, L3, L4, L5, L6, L7) vznikalo v okolí spoje příčnicku s nosníkem velké napětí, které dosahovalo hodnot okolo 250 MPa, viz příloha P8. U zatěžovacího stavu L15 = kombinace při přičení jeřábu bylo napětí obdobné, ale navíc u spoje příčnicku s nosníkem vznikají napěťové špičky s hodnotou až 300 MPa, viz příloha P11, P12. Proto, pokud při provozu jeřábu nastane při plném zatížení přičení jeřábu, je pro konstrukci tento stav nejhorší. Snížení namáhání spoje příčnicku s nosníkem by vyžadovalo zásadní úpravu místa spoje a také změnu tvaru nosníku tak, aby došlo v místě tohoto uzlu k rovnoměrnějšímu rozložení napětí, provedení by mohlo vypadat podobně jako u jeřábu firmy Abus na obr. 9.



Obr. 9: Provedení nosníků od firmy ABUS [11]

Maximální průhyb nosníků od stálého a jmenovitého břemena je 25,4 mm, při poloze kočky ve středu mostu, viz příloha P13. Maximální doporučený průhyb nosníků y_D dle [7] vypočítaný na začátku této kapitoly vyšel 36,86 mm.

5.2.4 Mimořádné zatížení

Zatížení při zkoušce jeřábu

Pro výpočet těchto zatížení byly použity vzorce z [7], tab. 10, str. 22. Pro jeřáb mostového typu nad 50t se dle [9] hmotnost zkušebního břemena vypočte pro statickou zkoušku jako 1,2 násobek jmenovitého břemena a pro dynamickou zkoušku jako 1,1 násobek jmenovitého břemena.

Zatížení při statické zkoušce zdvihu 125t.

$$L17 = 1,2 \cdot Z3 \quad (5.29)$$

Zatížení při dynamické zkoušce zdvihu 125t.

$$L18 = \frac{1 + \delta_h}{2} \cdot 1,1 \cdot Z3 \quad (5.30)$$

$$L18 = \frac{1 + 1,213}{2} \cdot 1,1 \cdot Z3$$

$$L18 = 1,21715 \cdot Z3$$

Zatížení od nárazu na nárazníky

Při posuzování zatížení jeřábu od nárazu na nárazníky byl dle ČSN 27 0103 uvažován součinitel zatížení od nárazu jeřábu na nárazníky $\gamma_n = 1,0$. Výpočet dle [7], tab. 10, str. 22.

$$L19 = Z7 \cdot \gamma_n \quad (5.31)$$

$$L19 = Z7 \cdot 1$$

Podle ČSN EN 13001-2 se do výpočtu zatížení od nárazu jeřábu na nárazníky uvažuje součinitel ϕ_7 závislý na charakteristice použitých nárazníků. Na jeřábu jsou použity nárazníky firmy Wampfler 018112 na bázi polyuretanu, kde se dá předpokládat charakteristika lineární a proto byl zvolen z [8], str. 26 součinitel $\phi_7 = 1,25$.

$$L20 = Z7 \cdot \phi_7 \quad (5.32)$$

$$L20 = Z7 \cdot 1,25$$

5.2.5 Mimořádné kombinace zatížení

Tyto kombinace zatížení byly sestaveny z jednotlivých výpočtových zatížení podle kombinací z [7], tab. 10, str. 22.

L21 je kombinace zatížení od vlastní hmotnosti konstrukce jeřábu, stálého břemena a 0,8 násobku břemena jmenovitého 125t při nárazu na nárazníky dle ČSN 27 0103.

$$L21 = Z1 + Z2 + 0,8 \cdot Z3 + L19 \quad (5.33)$$

L22 je kombinace zatížení od vlastní hmotnosti konstrukce jeřábu, stálého břemena při nárazu na nárazníky dle ČSN EN 13001-2.

$$L22 = Z1 + Z2 + L20 \quad (5.34)$$

L23 je základní kombinace zatížení od vlastní hmotnosti konstrukce jeřábu a stálého břemena.

$$L23 = Z1 \cdot \gamma_g \cdot \delta_t + Z2 \cdot \gamma_g \quad (5.35)$$

$$L23 = Z1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 + Z2 \cdot 1,1$$

$$L23 = Z1 \cdot 1,21 + Z2 \cdot 1,1$$

L24 je kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu, stálého břemena a zkušebního břemena při rozjezdu mostu při dynamické zkoušce.

$$L24 = L23 + Z4 \cdot \gamma_i + L18 \quad (5.36)$$

$$L24 = L23 + Z4 \cdot 1,1 + L18$$

L25 je kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu, stálého břemena a zkušebního břemena při rozjezdu kočky při dynamické zkoušce.

$$L25 = L23 + Z5 \cdot \gamma + L18 \quad (5.37)$$

$$L25 = L23 + Z5 \cdot 1,1 + L18$$

Další kombinace při brzdění kočky nebo mostu při dynamické zkoušce (L26, L27) se počítají obdobně.

L28 je kombinace zatížení vzniklá působením vlastní hmotností jeřábu, stálým břemenem a břemenem zkušebním při statické zkoušce.

$$L28 = Z1 \cdot \gamma_g + Z2 \cdot \gamma_g + L17 \quad (5.38)$$

$$L28 = Z1 \cdot 1,1 + Z2 \cdot 1,1 + L17$$

$$L28 = (Z1 + Z2) \cdot 1,1 + L17$$

Tab. 4: Přehled mimořádných kombinací zatížení

Označení	Výpočet	Popis
L17	$L17 = 1,2 \cdot Z3$	Zatížení při statické zkoušce zdvihu 125t.
L18	$L18 = 1,21715 \cdot Z3$	Zatížení při dynamické zkoušce zdvihu 125t.
L19	$L19 = Z7$	Zatížení při nárazu na nárazníky dle ČSN 270103.
L20	$L20 = Z7 \cdot 1,25$	Zatížení při nárazu na nárazníky dle ČSN EN 13001-2.
L21	$L21 = Z1 + Z2 + 0,8 \cdot Z3 + L19$	Vlastní hmotnost jeřábu, stálé a jmenovité břemeno při nárazu na nárazníky dle ČSN 27 0103.
L22	$L22 = Z1 + Z2 + L20$	Vlastní hmotnost jeřábu, stálé břemeno při nárazu na nárazníky dle ČSN EN 13001-2.
L23	$L23 = Z1 \cdot 1,21 + Z2 \cdot 1,1$	Zatížení od vlastní hmotnosti konstrukce jeřábu a stálého břemena.
L24	$L24 = L23 + Z4 \cdot 1,1 + L18$	Rozjezd mostu, zkušební břemeno při dynamické zkoušce.
L25	$L25 = L23 + Z5 \cdot 1,1 + L18$	Rozjezd kočky, zkušební břemeno při dynamické zkoušce.
L26	$L26 = L23 - Z4 \cdot 1,1 + L18$	Brzdění mostu, zkušební břemeno při dynamické zkoušce.
L27	$L27 = L23 - Z5 \cdot 1,1 + L18$	Brzdění kočky, zkušební břemeno při dynamické zkoušce.
L28	$L28 = (Z1 + Z2) \cdot 1,1 + L17$	Stálé břemeno a břemeno zkušební při statické zkoušce.

U všech mimořádných kombinací vychází napětí dostatečně nízké od návrhové hodnoty pevnosti materiálu, dokonce ani špičky napětí u šroubového spoje a u svarů nedosahovaly velikosti návrhové hodnoty pevnosti. U kombinací se zatížením jeřábu od nárazu na nárazníky vznikalo větší napětí v místech nárazníků u kombinace sestavené dle normy ČSN EN 13001-2, viz příloha P16. Podle této normy se síla na nárazníky násobí součinitelem ϕ , který sílu zvyšuje. U kombinace dle normy ČSN 27 0103 je konstrukce více zatížena od jmenovitého břemena, ale vodorovný účinek od jmenovitého břemena se neuvažuje, proto je v okolí nárazníků napětí menší, viz příloha P15.

5.2.6 Kombinace zatížení pro posouzení únavy

Při posuzování konstrukce na únavu se vychází z kombinací zatížení L29 a L30, které byly sestaveny podle [7], tab. 11, str. 23. Dále pak z kombinace L31, která zahrnuje zatížení od vlastní hmotnosti jeřábu a stálého břemena.

L29 je kombinace obsahující zatížení od vlastní hmotnosti jeřábu, stálého a jmenovitého břemena při rozjezdu mostu.

$$L29 = \delta_t \cdot Z1 + \delta_h \cdot Z2 + \delta_h \cdot Z3 + Z4 \quad (5.39)$$

$$L29 = 1,1 \cdot Z1 + 1,213 \cdot Z2 + 1,213 \cdot Z3 + Z4$$

L30 je kombinace obsahující zatížení od vlastní hmotnosti jeřábu, stálého a jmenovitého břemena při rozjezdu kočky.

$$L30 = \delta_t \cdot Z1 + \delta_h \cdot Z2 + \delta_h \cdot Z3 + Z5 \quad (5.40)$$

$$L30 = 1,1 \cdot Z1 + 1,213 \cdot Z2 + 1,213 \cdot Z3 + Z5$$

L31 je kombinace obsahující zatížení od vlastní hmotnosti jeřábu a stálého břemena.

$$L31 = \delta_t \cdot Z1 + \delta_h \cdot Z2 \quad (5.41)$$

$$L31 = 1,1 \cdot Z1 + 1,213 \cdot Z2$$

Tab. 5: Přehled kombinací zatížení pro posouzení únavy

Označení	Výpočet	Popis
L29	$L29 = 1,1 \cdot Z1 + 1,213 \cdot Z2 + 1,213 \cdot Z3 + Z4$	Zatížení pro posouzení únavy, břemeno, rozjezd mostu
L30	$L30 = 1,1 \cdot Z1 + 1,213 \cdot Z2 + 1,213 \cdot Z3 + Z5$	Zatížení pro posouzení únavy, břemeno, rozjezd kočky
L31	$L31 = 1,1 \cdot Z1 + 1,213 \cdot Z2$	Základní zatížení pro posouzení únavy

6 ÚNOSNOST KONSTRUKCE PŘI ÚNAVĚ

Při posuzování konstrukce na únavu se zohledňuje provozní skupina jeřábu a základní vrubové skupiny jednotlivých konstrukčních prvků a svarů jeřábu podle [7]. Tyto konstrukční prvky a svary mohou při velkém počtu cyklů způsobit únavové poškození konstrukce jeřábu. Jeřáb je zařazen do provozní skupiny J4, z tohoto zařazení se stanoví základní výpočtové pevnosti při únavě $R_{fat(-1)}$ pro konstrukční prvky, svary a spojovací díly z materiálu řady 52.

Tab. 6: Základní výpočtové pevnosti při únavě podle vrubových skupin vyskytujících se na konstrukci

Provozní skupina	W2 [MPa]	K1 [MPa]	K3 [MPa]	K4 [MPa]
J4	129,3	150	90	54

Vztah mezi základní výpočtovou pevností a výpočtovou pevností při únavě je pro tah dle [7], obr. 4, str. 29:

$$R_{fat,t(0)} = \frac{5}{3} \cdot R_{fat(-1)} \quad (6.1)$$

Tab. 7: Výpočtové pevnosti při únavě pro tah podle vrubových skupin vyskytujících se na konstrukci

Provozní skupina	W2 [MPa]	K1 [MPa]	K3 [MPa]	K4 [MPa]
J4	215,5	250	150	90

Vztah mezi základní výpočtovou pevností a výpočtovou pevností při únavě je pro tlak dle [7], obr. 4, str. 29:

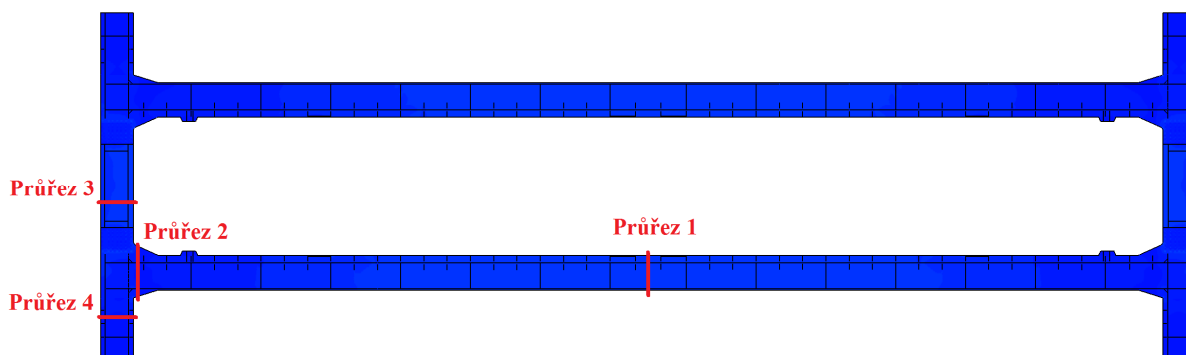
$$R_{fat,p(0)} = 2 \cdot R_{fat(-1)} \quad (6.2)$$

Tab. 8: Výpočtové pevnosti při únavě pro tlak podle vrubových skupin vyskytujících se na konstrukci

Provozní skupina	W2 [MPa]	K1 [MPa]	K3 [MPa]	K4 [MPa]
J4	258,6	300	180	108

Posouzení konstrukce na únavu bylo provedeno na čtyřech zvolených průřezech při poloze kočky ve středu mostu. První dva průřezy byly zvoleny na více zatíženém nosníku (s elektrickou výzbrojí), první průřez ve středu nosníku a druhý u spoje nosníku s příčnickem. Další dva průřezy byly zvoleny na příčnicku. Třetí průřez je mezi středovými žebry příčnicku,

blíže k více namáhanému nosníku. Čtvrtý průřez je mezi žebry příčnicku nacházejících se u vahadel, řez je opět blíže k nosníku. Rozmístnění všech průřezů na konstrukci je znázorněno na obr. 10.



Obr. 10: Rozmístnění jednotlivých průřezů pro posouzení únavy

Z kombinací pro posouzení únavy L29 a L30 byly odečteny mezní hodnoty normálového napětí σ_{\max} ve zvolených průřezech. Dále byla pro elementy s mezní hodnotou napětí odečtena z kombinace L31 hodnota normálového napětí, která vyjadřuje minimální hodnotu napětí σ_{\min} .

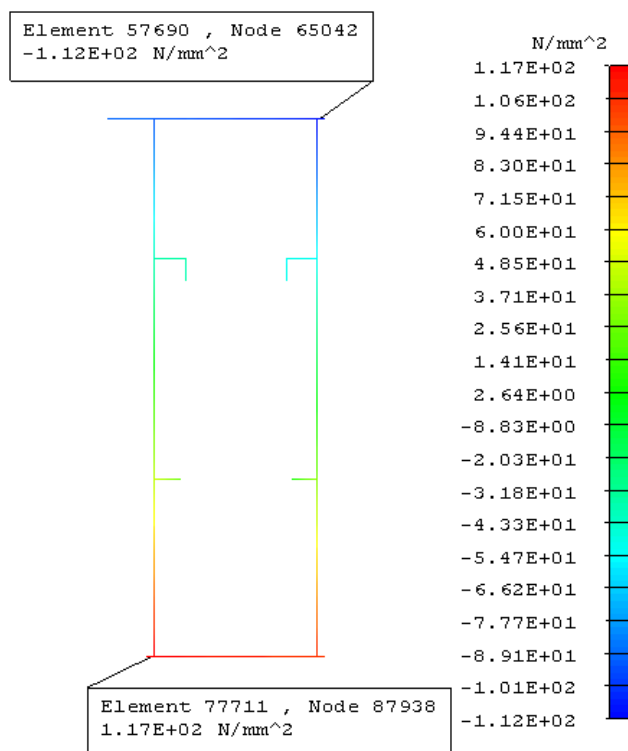
6.1 Průřez 1

Největší vrubový účinek u tohoto průřezu mají výztuhy přivařené oboustranným koutovým svarem a boční pásnice provařené ½ V svarem, dle [7] se jedná o vrubovou skupinu K3. Výpočtová pevnost při únavě pro tlak je tedy 180 MPa a pro tah 150 MPa.

Maximální hodnota normálového napětí na horní pásnici se vyskytovala u kombinace L29. Dosahovala hodnoty -112 MPa na elementu č. 57690 na vnější straně pásnice. Jedná se tedy o tlakové namáhání.

Tab. 9: Posouzení horní pásnice průřezu 1

Pásnice: Horní		
Element číslo: 57690		
Kombinace zatížení:	L29	L31
	σ_{\max}	σ_{\min}
σ_x	-112 MPa	-33,7 MPa
HMH	112 MPa	33,8 MPa
max τ	56 MPa	16,9 MPa



Obr. 11: Průřez 1

Pomocí vzorce z [7], str. 23 vypočtu poměr mezních napětí:

$$\kappa = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \tag{6.3}$$

$$\kappa = \frac{-33,7}{-112} = 0,3009$$

Podle [7], tab. 17, str. 29 se jedná o míjivé namáhání, neboť platí $0 < \kappa < 1$.

Vzorec pro maximální dovolené napětí při únavě pro tlak:

$$R_{fat,p(x)} = \frac{R_{fat,p(0)}}{1 - \left(1 - \frac{R_{fat,p(0)}}{0,9 \cdot R_m}\right) \cdot \kappa} \tag{6.4}$$

kde:

$R_{fat,p(0)}$... výpočtová pevnost při únavě pro tlak

R_m ... mez pevnosti oceli S355 J2

κ ... poměr mezních napětí

$$R_{fat,p(x)} = \frac{180}{1 - \left(1 - \frac{180}{0,9 \cdot 490}\right) \cdot 0,3009} = 219 \text{ MPa}$$

$$R_{fat,p(x)} > |\sigma_{max}|, \quad 219 \text{ MPa} > 112 \text{ MPa} \rightarrow \text{Horní pásnice průřezu 1 vyhovuje.}$$

Maximální hodnota normálového napětí na spodní pásnici se vyskytovala u kombinace L29. Dosahovala hodnoty 117 MPa na elementu č. 77711 na vnější straně pásnice. Jedná se tedy o tahové namáhání.

Tab. 10: Posouzení spodní pásnice průřezu 1

Pásnice: Spodní		
Element číslo: 77711		
Kombinace zatížení:	L29	L31
	σ_{max}	σ_{min}
σ_x	117 MPa	36,6 MPa
HMH	117 MPa	36,6 MPa
max τ	58,7 MPa	18,3 MPa

Výpočet poměru mezních napětí dle vzorce (6.3):

$$\kappa = \frac{36,6}{117} = 0,3128$$

Podle [7], tab. 17, str. 29 se jedná o míjivé namáhání, neboť platí $0 < \kappa < 1$.

Vzorec pro maximální dovolené napětí při únavě pro tah:

$$R_{fat,t(x)} = \frac{R_{fat,t(0)}}{1 - \left(1 - \frac{R_{fat,t(0)}}{0,75 \cdot R_m}\right) \cdot \kappa} \quad (6.5)$$

kde:

$R_{fat,t(0)}$... výpočtová pevnost při únavě pro tah

R_m ... mez pevnosti oceli S355 J2

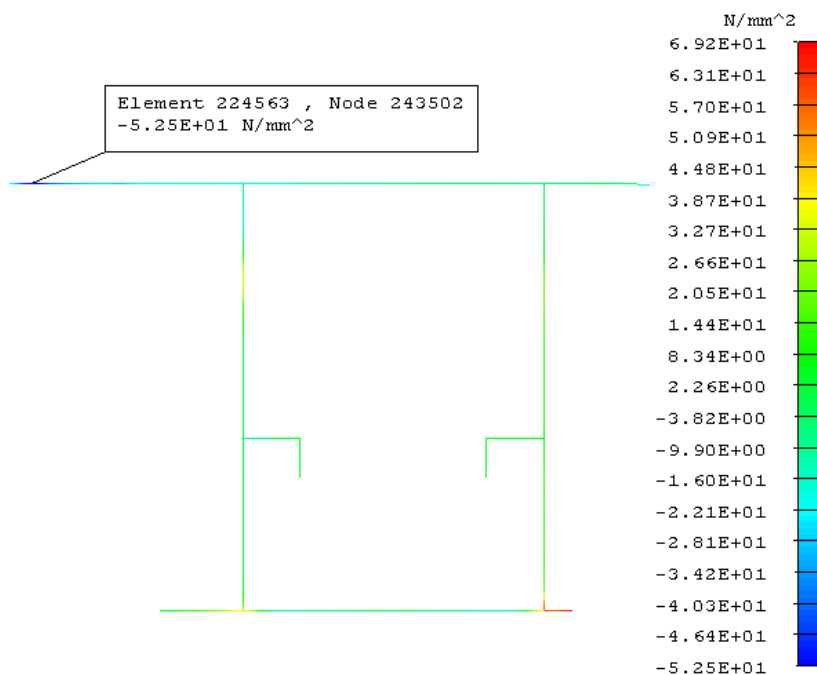
κ ... poměr mezních napětí

$$R_{fat,t(x)} = \frac{150}{1 - \left(1 - \frac{150}{0,75 \cdot 490}\right) \cdot 0,3128} = 184,1 \text{ MPa}$$

$$R_{fat,t(x)} > |\sigma_{max}|, \quad 184,1 \text{ MPa} > 117 \text{ MPa} \rightarrow \text{Spodní pásnice průřezu 1 vyhovuje.}$$

6.2 Průřez 2

Velký vrubový účinek u tohoto průřezu má tupý svar s podložkou u horní pásnice, ale v blízkosti tohoto průřezu jsou na příčnicku jednostranné koutové svary, které se dle [7] řadí do vrubové skupiny K4. Výpočtová pevnost při únavě je tedy pro tlak 108 MPa a pro tah 90 MPa.



Obr. 12: Průřez 2 – horní pásnice

Maximální hodnota normálového napětí na horní pásnici se vyskytovala u kombinace L29. Dosahovala hodnoty -52,5 MPa na elementu č. 65675 na vnitřní straně pásnice. Jedná se tedy o tlakové namáhání.

Tab. 11: Posouzení horní pásnice průřezu 2

Pásnice: Horní		
Element číslo: 65675		
Kombinace zatížení:	L29	L31
	σ_{\max}	σ_{\min}
σ_x	-52,5 MPa	-14,9 MPa
HMH	133 MPa	37,8 MPa
max τ	67,7 MPa	19,3 MPa

Výpočet poměru mezních napětí dle vzorce (6.3):

$$\kappa = \frac{-14,9}{-52,5} = 0,2838$$

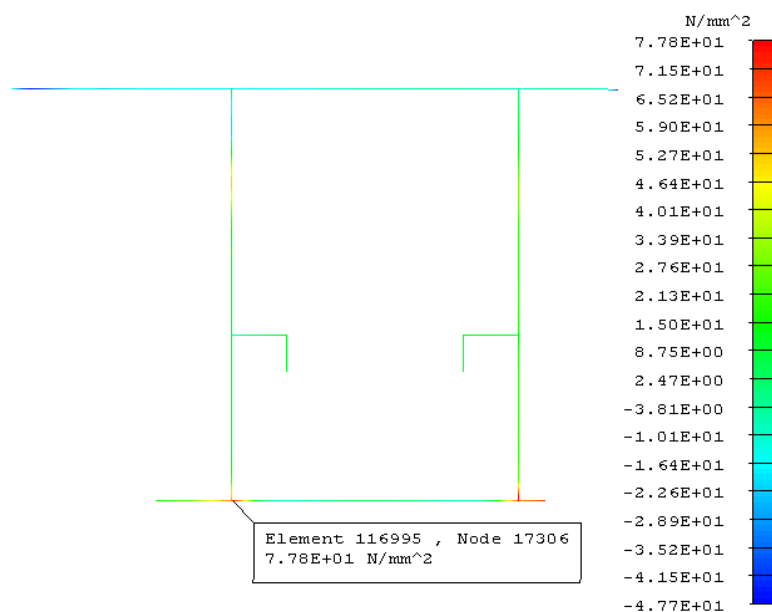
Podle [7], tab. 17, str. 29 se jedná o míjivé namáhání, neboť platí $0 < \kappa < 1$.

Dle vzorce (6.4):

$$R_{fat,p(x)} = \frac{108}{1 - \left(1 - \frac{108}{0,9 \cdot 490}\right) \cdot 0,2838} = 137,5 \text{ MPa}$$

$$R_{fat,p(x)} > |\sigma_{max}|, \quad 137,5 \text{ MPa} > 52,5 \text{ MPa} \rightarrow \text{Horní pásnice průřezu 2 vyhovuje.}$$

Maximální hodnota normálového napětí na spodní pásnici se vyskytovala u kombinace L30. Dosahovala hodnoty 77,8 MPa na elementu č. 116995 na vnější straně pásnice. Jedná se tedy o tahové namáhání.



Obr. 13: Průřez 2 – spodní pásnice

Tab. 12: Posouzení spodní pásnice průřezu 2

Pásnice: Spodní		
Element číslo: 116995		
Kombinace zatížení:	L30	L31
	σ_{max}	σ_{min}
σ_x	77,8 MPa	27,6 MPa
HMH	98,1 MPa	34,5 MPa
max τ	49,9 MPa	17,6 MPa

Výpočet poměru mezních napětí dle vzorce (6.3):

$$\kappa = \frac{27,6}{77,8} = 0,3548$$

Podle [7], tab. 17, str. 29 se jedná o míjivé namáhání, neboť platí $0 < \kappa < 1$.

Dle vzorce (6.5):

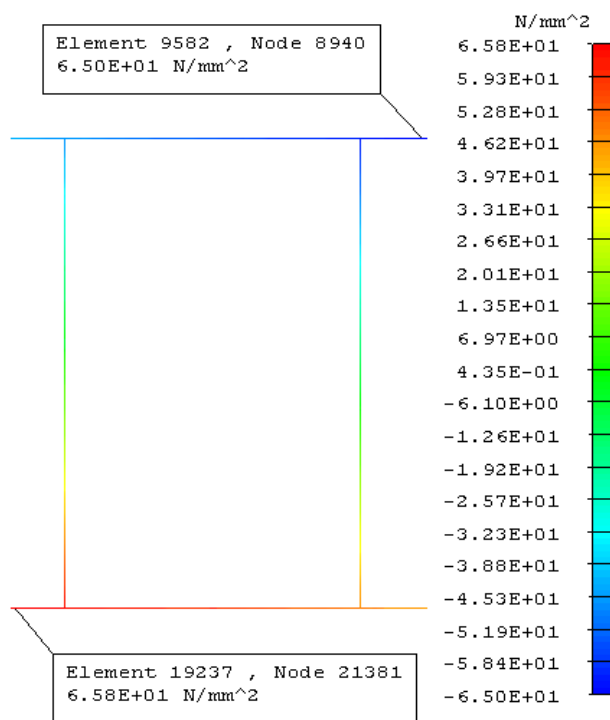
$$R_{fat,t(x)} = \frac{90}{1 - \left(1 - \frac{90}{0,75 \cdot 490}\right) \cdot 0,3548} = 122,9 \text{ MPa}$$

$$R_{fat,t(x)} > |\sigma_{\max}|, \quad 122,9 \text{ MPa} > 77,8 \text{ MPa} \rightarrow \text{Spodní pásnice průřezu 2 vyhovuje.}$$

6.3 Průřez 3

V blízkosti tohoto průřezu se nachází šroubový spoj příčnicku, ale větší vrubový účinek mají boční pásnice přivařené jednostranným koutovým svarem, dle [7] se jedná o vrubovou skupinu K4. Výpočtová pevnost při únavě je tedy pro tlak 108 MPa a pro tah 90 MPa.

Maximální hodnota normálového napětí na horní pásnici se vyskytovala u kombinace L29. Dosahovala hodnoty -65 MPa na elementu č. 9582 na vnější straně pásnice. Jedná se tedy o tlakové namáhání.



Obr. 14: Průřez 3

Tab. 13: Posouzení horní pásnice průřezu 3

Pásnice: Horní		
Element číslo: 9582		
Kombinace zatížení:	L29	L31
	σ_{\max}	σ_{\min}
σ_z	-65 MPa	-22,9 MPa
HMH	65 MPa	22,9 MPa
max τ	32,5 MPa	11,4 MPa

Výpočet poměru mezních napětí dle vzorce (6.3):

$$\kappa = \frac{-22,9}{-65} = 0,3523$$

Podle [7], tab. 17, str. 29 se jedná o mívivé namáhání, neboť platí $0 < \kappa < 1$.

Dle vzorce (6.4):

$$R_{fat,p(x)} = \frac{108}{1 - \left(1 - \frac{108}{0,9 \cdot 490}\right) \cdot 0,3523} = 147,1 \text{ MPa}$$

$$R_{fat,p(x)} > |\sigma_{\max}|, \quad 147,1 \text{ MPa} > 65 \text{ MPa} \rightarrow \text{Horní pásnice průřezu 3 vyhovuje.}$$

Maximální hodnota normálového napětí na spodní pásnici se vyskytovala u kombinace L29. Dosahovala hodnoty 65,8 MPa na elementu č. 19237 na vnější straně pásnice. Jedná se tedy o tahové namáhání.

Tab. 14: Posouzení spodní pásnice průřezu 3

Pásnice: Spodní		
Element číslo: 19237		
Kombinace zatížení:	L29	L31
	σ_{\max}	σ_{\min}
σ_z	65,8 MPa	23,2 MPa
HMH	65,9 MPa	23,2 MPa
max τ	33 MPa	11,6 MPa

Výpočet poměru mezních napětí dle vzorce (6.3):

$$\kappa = \frac{23,2}{65,8} = 0,3526$$

Podle [7], tab. 17, str. 29 se jedná o mívivé namáhání, neboť platí $0 < \kappa < 1$.

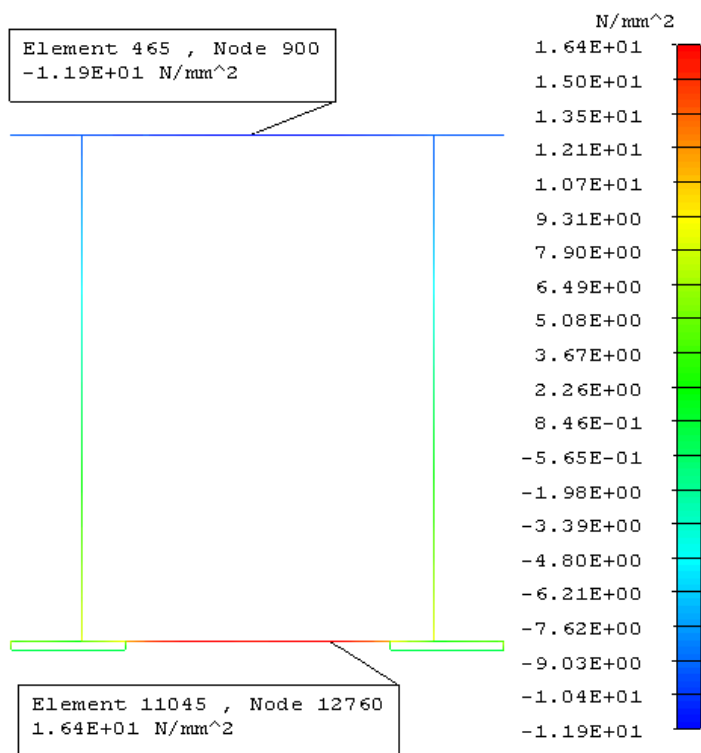
Dle vzorce (6.5):

$$R_{fat,t(x)} = \frac{90}{1 - \left(1 - \frac{90}{0,75 \cdot 490}\right) \cdot 0,3526} = 122,7 \text{ MPa}$$

$$R_{fat,t(x)} > |\sigma_{\max}|, \quad 122,7 \text{ MPa} > 65,8 \text{ MPa} \rightarrow \text{Spodní pásnice průřezu 3 vyhovuje.}$$

6.4 Průřez 4

U tohoto průřezu se nachází šroubové spojení vahadel příčnicku, ale největší vrubový účinek mají opět boční pásnice přivařené jednostranným koutovým svarem, dle [7] se jedná o vrubovou skupinu K4. Výpočtová pevnost při únavě je tedy pro tlak 108 MPa a pro tah 90 MPa.



Obr. 15: Průřez 4

Maximální hodnota normálového napětí na horní pásnici se vyskytovala u kombinace L29. Dosahovala hodnoty -11,9 MPa na elementu č. 465 na vnitřní straně pásnice. Jedná se tedy o tlakové namáhání.

Tab. 15: Posouzení horní pásnice průřezu 4

Pásnice: Horní		
Element číslo: 465		
Kombinace zatížení:	L29	L31
	σ_{\max}	σ_{\min}
σ_z	-11,9 MPa	-4,44 MPa
HMH	12,5 MPa	4,88 MPa
max τ	6,47 MPa	2,59 MPa

Výpočet poměru mezních napětí dle vzorce (6.3):

$$\kappa = \frac{-4,44}{-11,9} = 0,3731$$

Podle [7], tab. 17, str. 29 se jedná o míjivé namáhání, neboť platí $0 < \kappa < 1$.

Dle vzorce (6.4):

$$R_{fat,p(x)} = \frac{108}{1 - \left(1 - \frac{108}{0,9 \cdot 490}\right) \cdot 0,371} = 150 \text{ MPa}$$

$$R_{fat,p(x)} > |\sigma_{\max}|, \quad 150 \text{ MPa} > 11,9 \text{ MPa} \rightarrow \text{Horní pásnice průřezu 4 vyhovuje.}$$

Maximální hodnota normálového napětí na spodní pásnici se vyskytovala u kombinace L29. Dosahovala hodnoty 16,4 MPa na elementu č. 11045 na vnitřní straně pásnice. Jedná se tedy o tahové namáhání.

Tab. 16: Posouzení spodní pásnice průřezu 4

Pásnice: Spodní		
Element číslo: 11045		
Kombinace zatížení:	L29	L31
	σ_{\max}	σ_{\min}
σ_z	16,4 MPa	6,14 MPa
HMH	15,5 MPa	5,76 MPa
max τ	8,76 MPa	3,28 MPa

Výpočet poměru mezních napětí dle vzorce (6.3):

$$\kappa = \frac{6,14}{16,4} = 0,3744$$

Podle [7], tab. 17, str. 29 se jedná o míjivé namáhání, neboť platí $0 < \kappa < 1$.

Dle vzorce (6.5):

$$R_{fat,t(x)} = \frac{90}{1 - \left(1 - \frac{90}{0,75 \cdot 490}\right) \cdot 0,3744} = 125,5 \text{ MPa}$$

$$R_{fat,t(x)} > |\sigma_{\max}|, \quad 125,5 \text{ MPa} > 16,4 \text{ MPa} \rightarrow \text{Spodní pásnice průřezu 4 vyhovuje.}$$

7 ZÁVĚR

Úkolem této diplomové práce bylo posouzení pevnosti konstrukčního návrhu mostového jeřábu o nosnosti 125t pro firmu Slovácké strojírna, a.s. Tato pevnostní analýza byla provedena s využitím metody konečných prvků v programu I-deas na skořepinovém modelu jeřábu. Pevnostní analýza byla provedena podle normy ČSN 27 0103. Z provedené analýzy vyplývá, že na konstrukci je u všech zatěžovacích stavů hodnota napětí menší než návrhová hodnota pevnosti materiálu a konstrukce tedy vyhovuje. Špičky napětí na konstrukci jsou u šroubů způsobeny náhradou šroubů dokonale tuhými prvky Rigid. U svarů plechů pro přišroubování vahadel k příčnicku jsou špičky napětí způsobeny velkou změnou tuhosti v místě křížení svaru s boční pásnicí příčnicku. Díky této skutečnosti je důležité dbát zvýšené pozornosti na technologii provedení svarových spojů. Z hlediska maximálního doporučeného průhybu nosníků dle normy ČSN 27 0103 konstrukce také vyhovuje, maximální průhyb nosníku s elektrickou výzbrojí je 25,4 mm.

Největší napětí na konstrukci vznikalo u kombinace zatížení při přičení jeřábu. Při tomto zatížení vznikala v místě spojení příčnicku s nosníkem napěťová špička dosahující hodnoty 300 MPa. Proto byla tato oblast konstrukce vyhodnocena jako nejslabší místo na konstrukci a pokud by se měly provádět nějaké konstrukční úpravy, bylo by to právě na tomto místě. Snížení namáhání spoje příčnicku s nosníkem by vyžadovalo zásadní úpravu místa spoje a také změnu tvaru nosníku tak, aby došlo v místě tohoto uzlu k rovnoměrnějšímu rozložení napětí. Takto rozsáhlou úpravu v mé diplomové práci z hlediska časového rozsahu nešlo provést. Z tohoto důvodu má práce neobsahuje žádnou výkresovou dokumentaci. Je tedy na zvážení, zda se do tak rozsáhlé úpravy pustit nebo raději toto nejvíce namáhané místo hlídat a pokusit se zamezit výraznému přičení jeřábu. Při údržbě jeřábu se doporučuje vizuální kontrola tohoto místa, neboť v nejvíce namáhaném místě se může objevit popraskaný lak či koroze materiálu.

Dále byla konstrukce kontrolována na únosnost při únavě dle normy ČSN 27 0103, pro tuto kontrolu byly na konstrukci zvoleny 4 průřezy, na kterých bylo posouzení únosnosti provedeno. Na konstrukci se nachází šroubové spoje a mnoho druhů svarů a tím i mnoho míst s velkým vrubovým účinkem. I přes tuto skutečnost byly na všech zvolených průřezích hodnoty napětí menší než dovolené hodnoty a tedy všechny zvolené průřezy při posuzování na únavu vyhověly.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] REMTA, F., KUPKA, L., DRAŽAN, F.: Jeřáby, 2., přeprac. a dopln. vyd., SNTL Praha, 1975.
- [2] Feyrer K.: Drahtseile, ed. Springer, Berlin, 2000, s. 468, ISBN-10: 3-540-67829-8, ISBN-13: 978-3-540-67829-8.
- [3] Hoffmann, K., Krenn, E., Tanker, G.: Fördertechnik 2, ed. Oldenbourg Industieverla, 2006, s. 320, ISBN-10: 3-8356-3060-1, ISBN-13: 978-3-8356-3060-4.
- [4] Osterrieder P.; Richter S.: Kranbahnträger aus Walzprofilen, ed. Vieweg, 2002, s. 299, ISBN-10: 3-528-12559-4, ISBN-13: 978-3-528-12559-2.
- [5] Kašpárek, J.: Dopravní a manipulační zařízení pro posluchače bakalářského studia FSI VUT v Brně, Brno: Ústav dopravní techniky, 2002, 126 s.
- [6] ČSN EN 1993-1-1: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006.
- [7] ČSN 27 0103: Navrhování ocelových konstrukcí jeřábů, 1989.
- [8] ČSN EN 13001-2: Jeřáby - Návrh všeobecně - Část 2: Účinky zatížení, 2011.
- [9] ČSN 27 0142: Jeřáby a zdvihadla - Zkoušení, 1989.
- [10] Vše o dopravě [online]. [cit. 2012-01-30]. Dostupné z: <<http://www.vseodoprave.eu/jakou-maji-jeřaby-historii.html>>.
- [11] ITECO s.r.o. [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z: <<http://www.iteco.cz>>.
- [12] GIGA, spol. s r.o. [online]. [cit. 2012-01-30]. Dostupné z: <<http://www.gigasro.cz/vyrobní-program.html>>.

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_x	[m.s ⁻²]	Zrychlení od rozjezdu kočky
a_z	[m.s ⁻²]	Zrychlení od rozjezdu mostu
a_{z1}, a_{z2}	[m.s ⁻²]	Zpomalení jeřábu při nárazu na nárazníky
C_x, C_y	[mm]	Souřadnice těžiště plně zatížené kočky
E_k	[J]	Kinetická energie při výpočtu sil na nárazníky
E_{k1}, E_{k2}	[kJ]	Energie na jeden nárazník
F_x	[N]	Zatížení od rozjezdu kočky
F_z	[N]	Zatížení od rozjezdu mostu
F_{n1}, F_{n2}	[kN]	Síla na jeden nárazník
g	[m.s ⁻²]	Gravitační zrychlení, $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
Hi	[-]	Součinitel zdvihové třídy jeřábu
HMH	[MPa]	Redukované napětí podle hypotézy HMH
H_{tp}	[kN]	Síla dvojice vznikající při přičení jeřábu
i_j	[-]	Korekční součinitel jeřábu pro výpočet zrychlení
i_k	[-]	Korekční součinitel kočky pro výpočet zrychlení
$K1, K2$	[N]	Zatížení poháněných kol kočky
$K1, K2, K4$	[N]	Zatížení vahadel jeřábu
L1, L2, L3...	[-]	Kombinace zatížení
L	[mm]	Rozpětí jeřábu
max τ	[MPa]	Redukované napětí podle hypotézy max τ
m	[kg]	Hmotnost
m_c	[kg]	Hmotnost kočky a jmenovitého břemena
m_g	[kg]	Hmotnost konstrukce jeřábu
m_h	[kg]	Hmotnost břemena hlavního zdvihu
m_K	[kg]	Hmotnost kočky
m_{poh}	[kg]	Hmotnost na straně poháněných kol kočky
m_s	[kg]	Hmotnost stálého břemena
NM1, NM2 ...	[kg]	Nestrukturální hmotnosti
Re	[MPa]	Mez kluzu oceli S355 J2
$R_{fat(-1)}$	[MPa]	Základní výpočtová pevnost při únavě
$R_{fat,p(0)}$	[MPa]	Výpočtová pevnost při únavě pro tlak

$R_{fat,t(0)}$	[MPa]	Výpočtová pevnost při únavě pro tah
$R_{fat,t(x)}$	[MPa]	Maximální dovolené napětí při únavě pro tah
$R_{fat,p(x)}$	[MPa]	Maximální dovolené napětí při únavě pro tlak
R_{ch}	[mm]	Rozchod kočky
R_m	[MPa]	Mez pevnosti oceli S355 J2
R_r	[mm]	Rozvor kočky
s	[mm]	Rozvor jeřábu
S	[mm ²]	Plocha prvků nestrukturální hmotnosti
T_x, T_y, T_z	[mm]	Souřadnice těžiště kočky
y_D	[mm]	Maximální doporučený průhyb nosníků
Z1, Z2, Z3...	[-]	Jednotlivé základní zatěžovací stavy
x, y, z	[mm]	Souřadnice v jednotlivých osách
γ_{10}	[-]	Součinitel zatížení od břemena
γ_g	[-]	Součinitel pro zatížení vyvozená vlastní hmotností
γ_i	[-]	Součinitel zatížení od setrvačných sil
γ_n	[-]	Součinitel zatížení od nárazu jeřábu na nárazníky dle [7]
γ_{tp}	[-]	Součinitel zatížení od příčných sil
δ_h	[-]	Dynamický součinitel zdvihový
δ_t	[-]	Dynamický součinitel pojezdový
ϕ_7	[-]	Součinitel zatížení od nárazu jeřábu na nárazníky dle [8]
κ	[-]	Poměr mezních napětí
μ	[-]	Součinitel tření $\mu = 0,14$
v_h	[m.s ⁻¹]	Rychlost hlavního zdvihu
v_j	[m.s ⁻¹]	Pojezdová rychlost jeřábu
v_k	[m.s ⁻¹]	Pojezdová rychlost kočky
σ_x, σ_z	[MPa]	Hodnoty normálových napětí
σ_{max}	[MPa]	Maximální hodnota normálového napětí
σ_{min}	[MPa]	Minimální hodnota normálového napětí

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

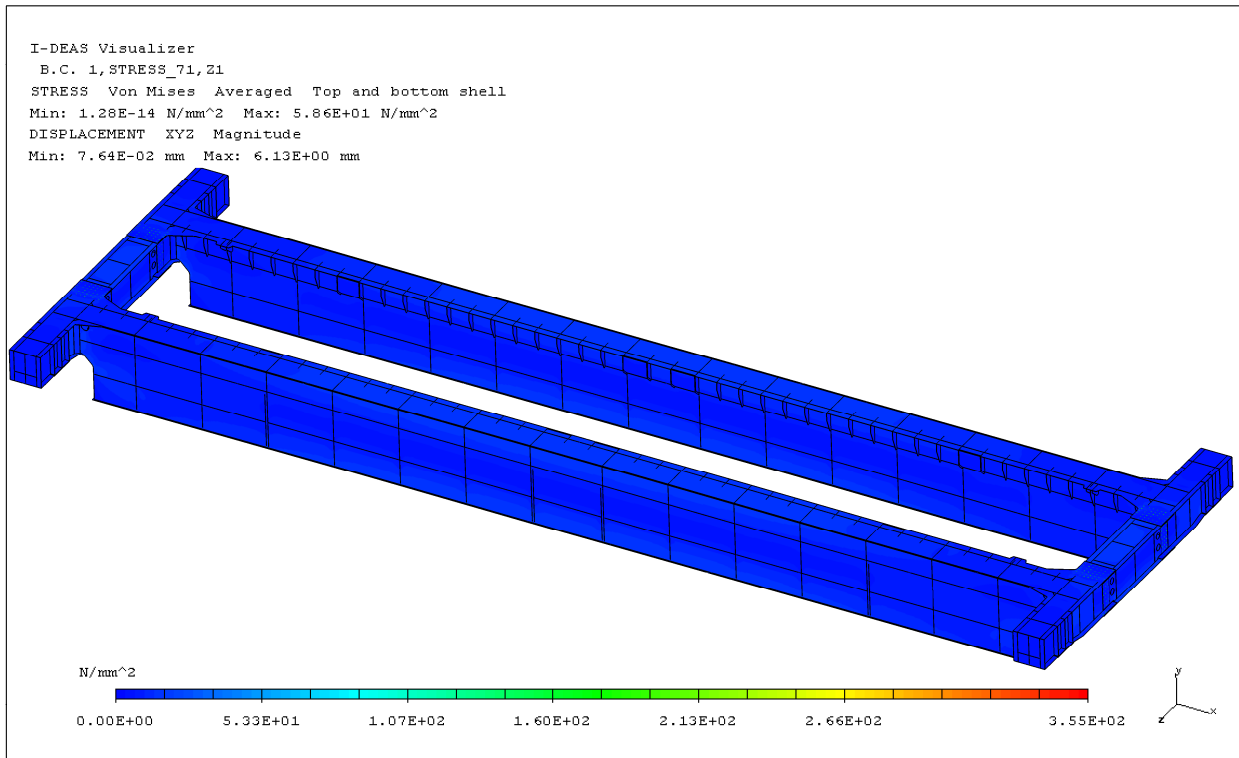
Obr. 1: Dvounosníkový mostový jeřáb.....	10
Obr. 2: Mostový jeřáb 125t firmy Slovácké strojírna, a.s	11
Obr. 3: Pohled na část modelu s barevně odlišenými prvky různých tloušťek	13
Obr. 4: Nahrazení vahadla pomocí prvku Rigid.....	15
Obr. 5: Nahrazení šroubů u příčnicku pomocí prvků Rigid.....	16
Obr. 6: Nahrazení kočky a kolejnice pomocí prvků Constraint	16
Obr. 7: Rozložení hmotností na kočce pro určení těžiště.....	17
Obr. 8: Umístění hlavního zdvihu na kočce	19
Obr. 9: Provedení nosníků od firmy ABUS	34
Obr. 10: Rozmístění jednotlivých průřezů pro posouzení únavy	39
Obr. 11: Průřez 1	40
Obr. 12: Průřez 2 – horní pásnice	42
Obr. 13: Průřez 2 – spodní pásnice.....	43
Obr. 14: Průřez 3	44
Obr. 15: Průřez 4	46

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Přehled vytvořených skupin v modelu a tloušťky plechů ve skupině.....	12
Tab. 2: Přehled jednotlivých hmotností na kočce.....	17
Tab. 3: Přehled základních kombinací zatížení.....	32
Tab. 4: Přehled mimořádných kombinací zatížení.....	36
Tab. 5: Přehled kombinací zatížení pro posouzení únavy	37
Tab. 6: Základní výpočtové pevnosti při únavě podle vrubových skupin vyskytujících se na konstrukci	38
Tab. 7: Výpočtové pevnosti při únavě pro tah podle vrubových skupin vyskytujících se na konstrukci	38
Tab. 8: Výpočtové pevnosti při únavě pro tlak podle vrubových skupin vyskytujících se na konstrukci	38
Tab. 9: Posouzení horní pásnice průřezu 1	39
Tab. 10: Posouzení spodní pásnice průřezu 1.....	41
Tab. 11: Posouzení horní pásnice průřezu 2.....	42
Tab. 12: Posouzení spodní pásnice průřezu 2.....	43
Tab. 13: Posouzení horní pásnice průřezu 3.....	44
Tab. 14: Posouzení spodní pásnice průřezu 3.....	45
Tab. 15: Posouzení horní pásnice průřezu 4.....	46
Tab. 16: Posouzení spodní pásnice průřezu 4.....	47

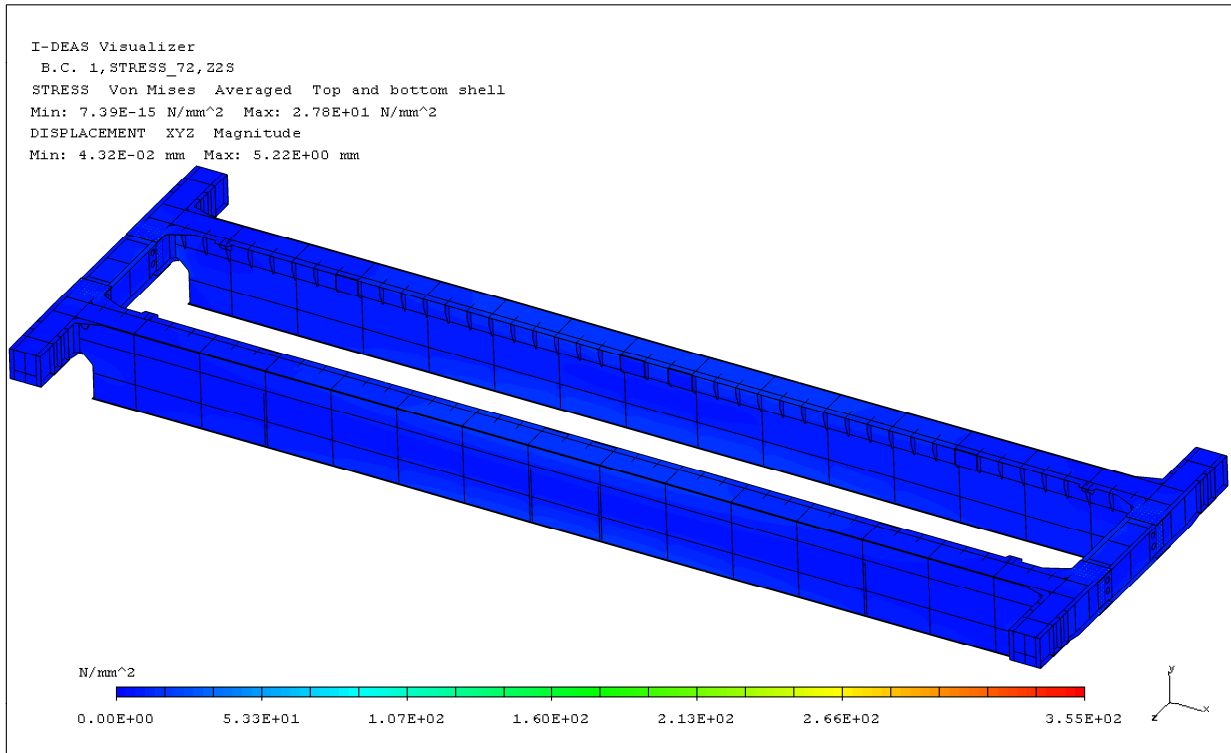
12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P1: Zatěžovací stav Z1 - kočka ve středu mostu.....	54
Příloha P2: Zatěžovací stav Z2 - kočka ve středu mostu.....	54
Příloha P3: Zatěžovací stav Z3 - kočka ve středu mostu.....	55
Příloha P4: Zatěžovací stav L1 - kočka ve středu mostu.....	55
Příloha P5: Zatěžovací stav L4 - kočka ve středu mostu.....	56
Příloha P6: Zatěžovací stav L4 - kočka na kraji mostu	56
Příloha P7: Zatěžovací stav L4 - kočka na kraji mostu, detail svaru plechů u vahadel	57
Příloha P8: Zatěžovací stav L4 - detail okolí spoje příčnicku s nosníkem	57
Příloha P9: Zatěžovací stav L15 - kočka ve středu mostu.....	58
Příloha P10: Zatěžovací stav L15 - kočka na kraji mostu	58
Příloha P11: Zatěžovací stav L15 - kočka na kraji mostu, detail spoje příčnicku s nosníkem ..	59
Příloha P12: Zatěžovací stav L15 - kočka na kraji mostu, detail spoje příčnicku s nosníkem ..	59
Příloha P13: Deformace při zatížení stálým a jmenovitým břemenem	60
Příloha P14: Zatěžovací stav L11 - kočka ve středu mostu.....	60
Příloha P15: Zatěžovací stav L21 - kočka na kraji mostu	61
Příloha P16: Zatěžovací stav L22 - kočka na kraji mostu	61
Příloha P17: Zatěžovací stav L24 - kočka ve středu mostu.....	62
Příloha P18: Zatěžovací stav L28 - kočka ve středu mostu.....	62



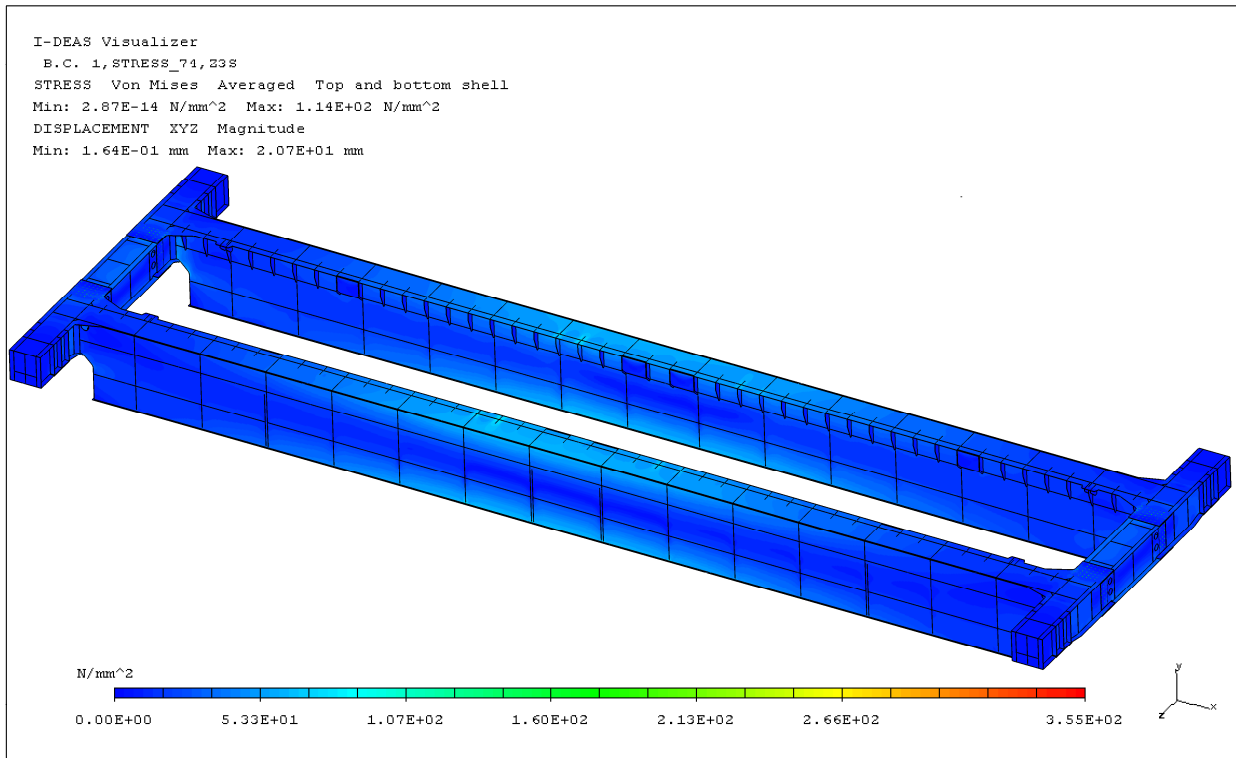
Příloha P1: Zatěžovací stav Z1 - kočka ve středu mostu

Zobrazení: nedeformované, maximální průhyb 6,13 mm, maximální napětí HMH 58,6 MPa



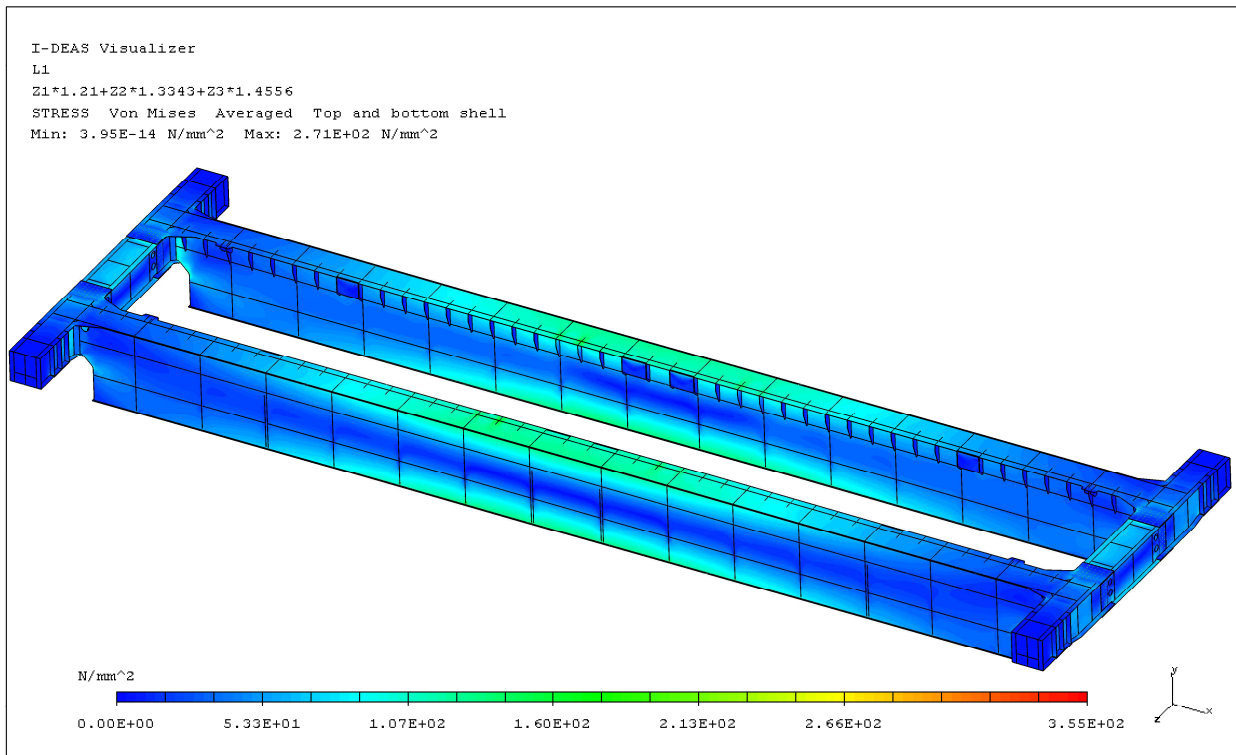
Příloha P2: Zatěžovací stav Z2 - kočka ve středu mostu

Zobrazení: nedeformované, maximální průhyb 5,22 mm, maximální napětí HMH 27,8 MPa



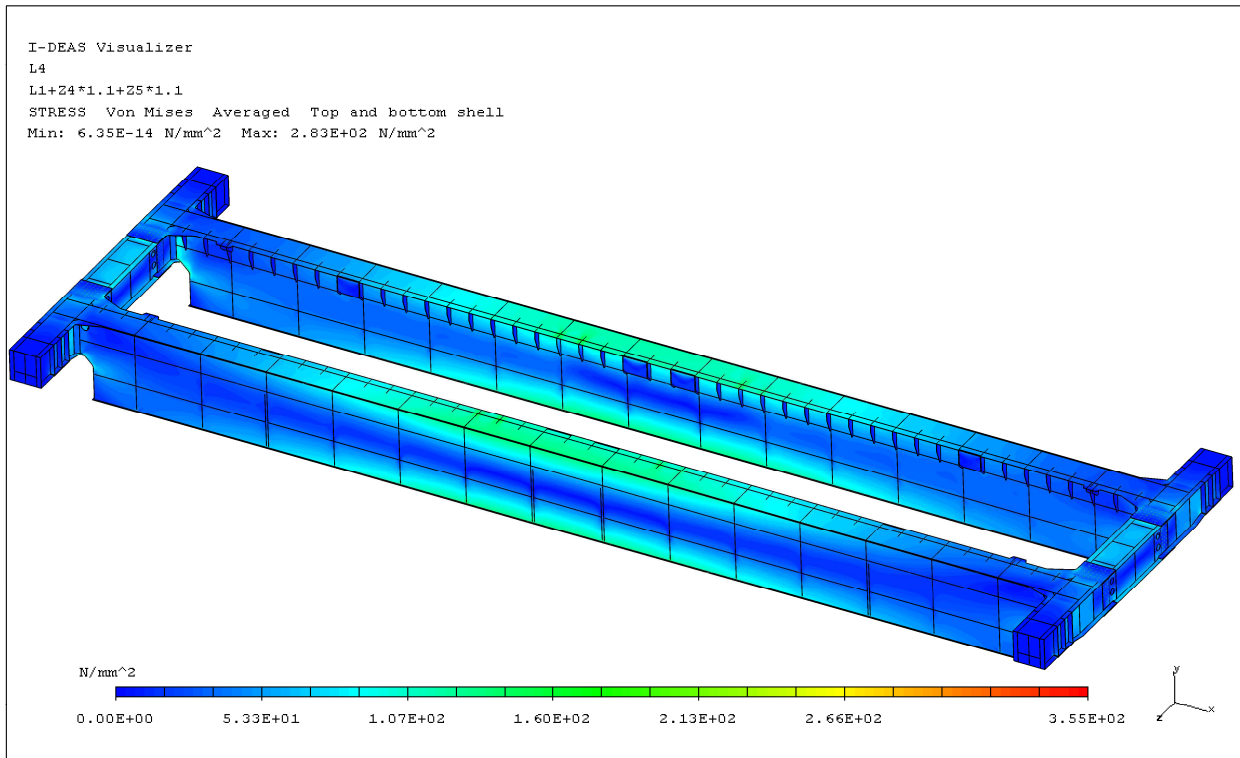
Příloha P3: Zatěžovací stav Z3 - kočka ve středu mostu

Zobrazení: nedeformované, maximální průhyb 20,7 mm, maximální napětí HMM 114 MPa

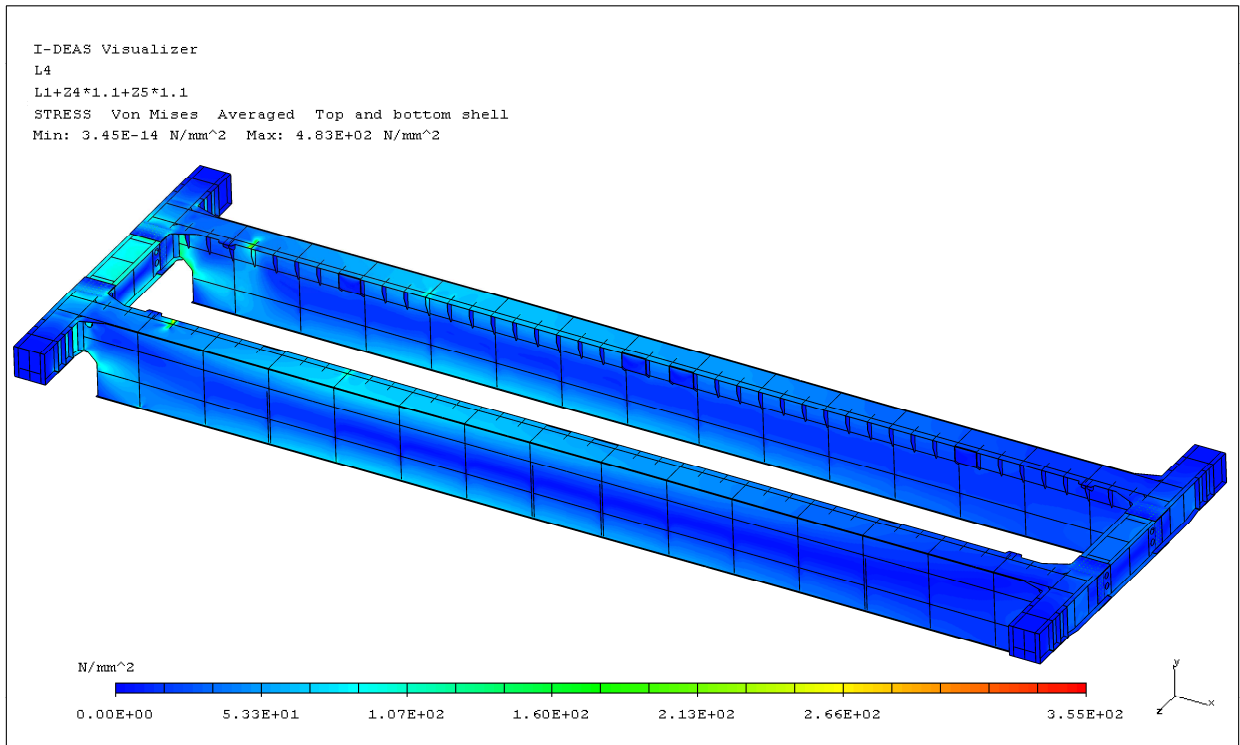


Příloha P4: Zatěžovací stav L1 - kočka ve středu mostu

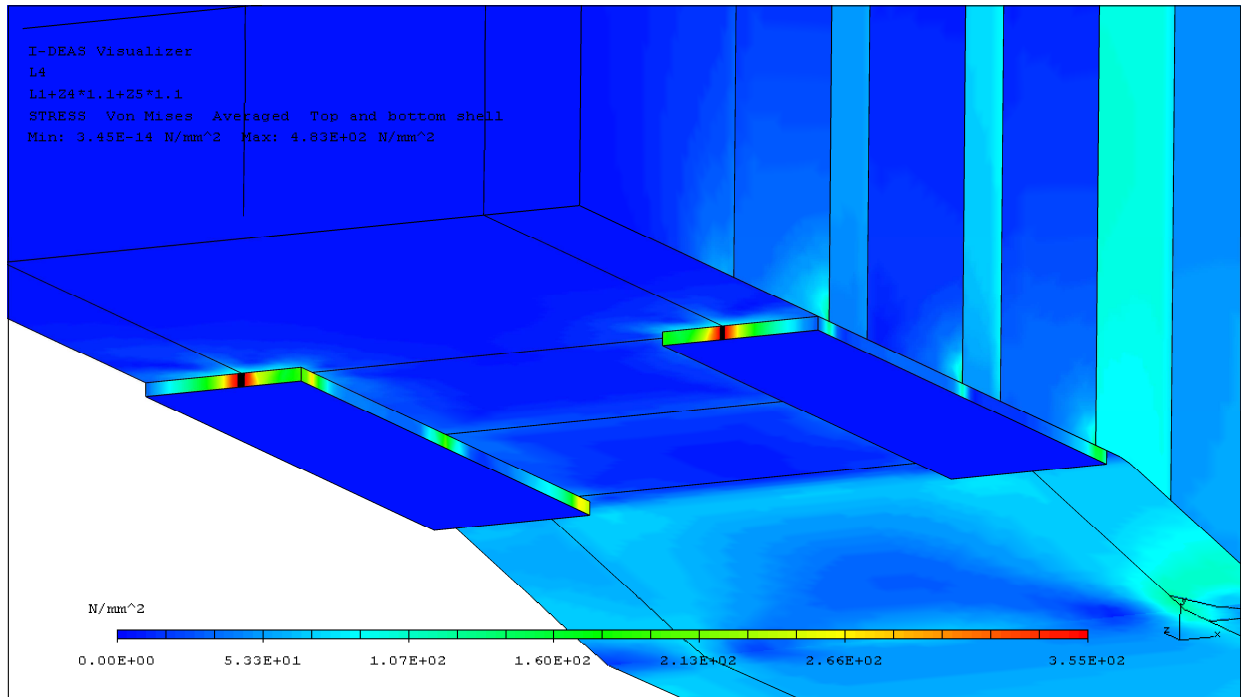
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 271 MPa



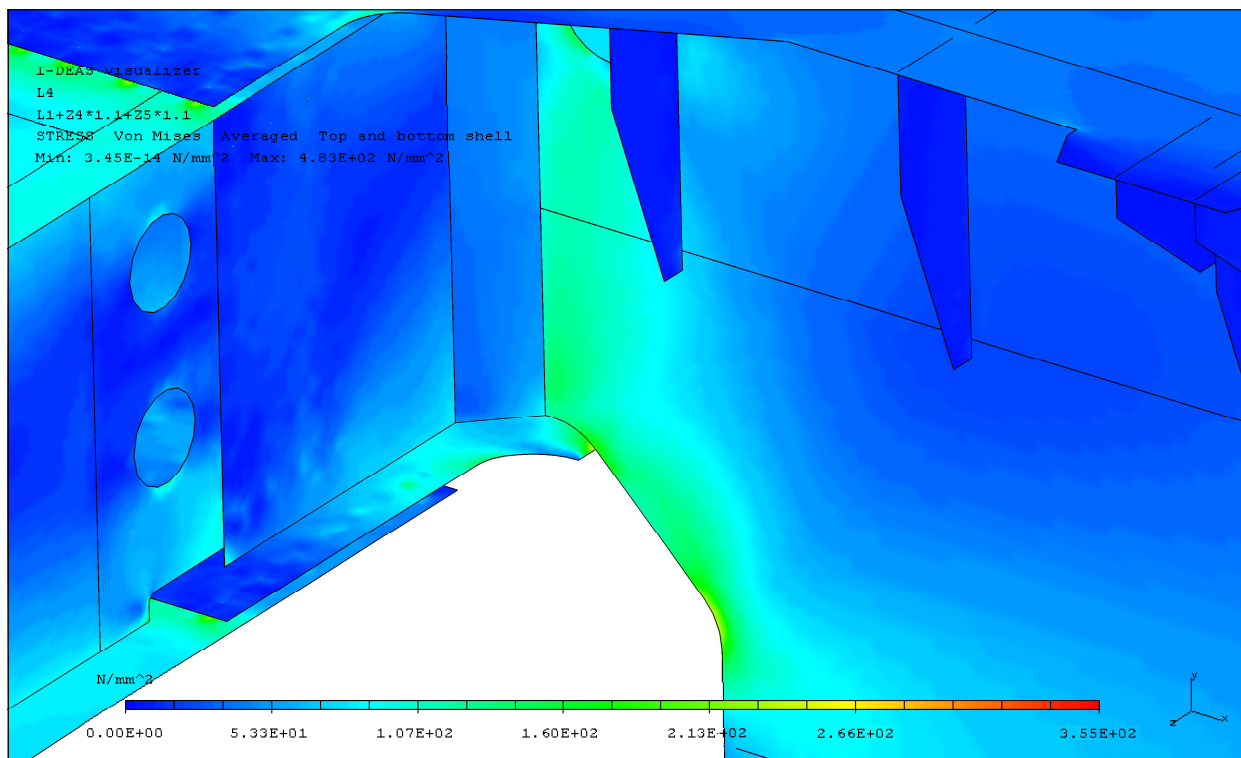
*Příloha P5: Zatěžovací stav L4 - kočka ve středu mostu
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 283 MPa*



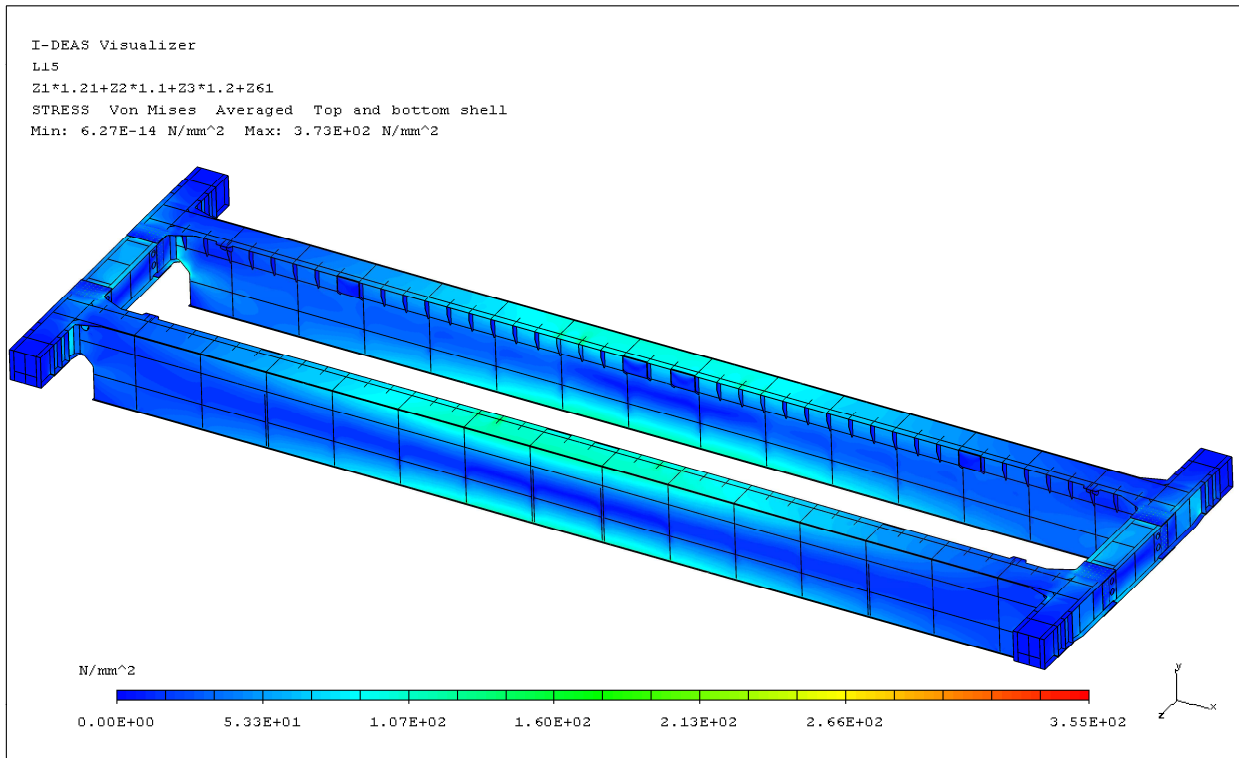
*Příloha P6: Zatěžovací stav L4 - kočka na kraji mostu
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 483 MPa*



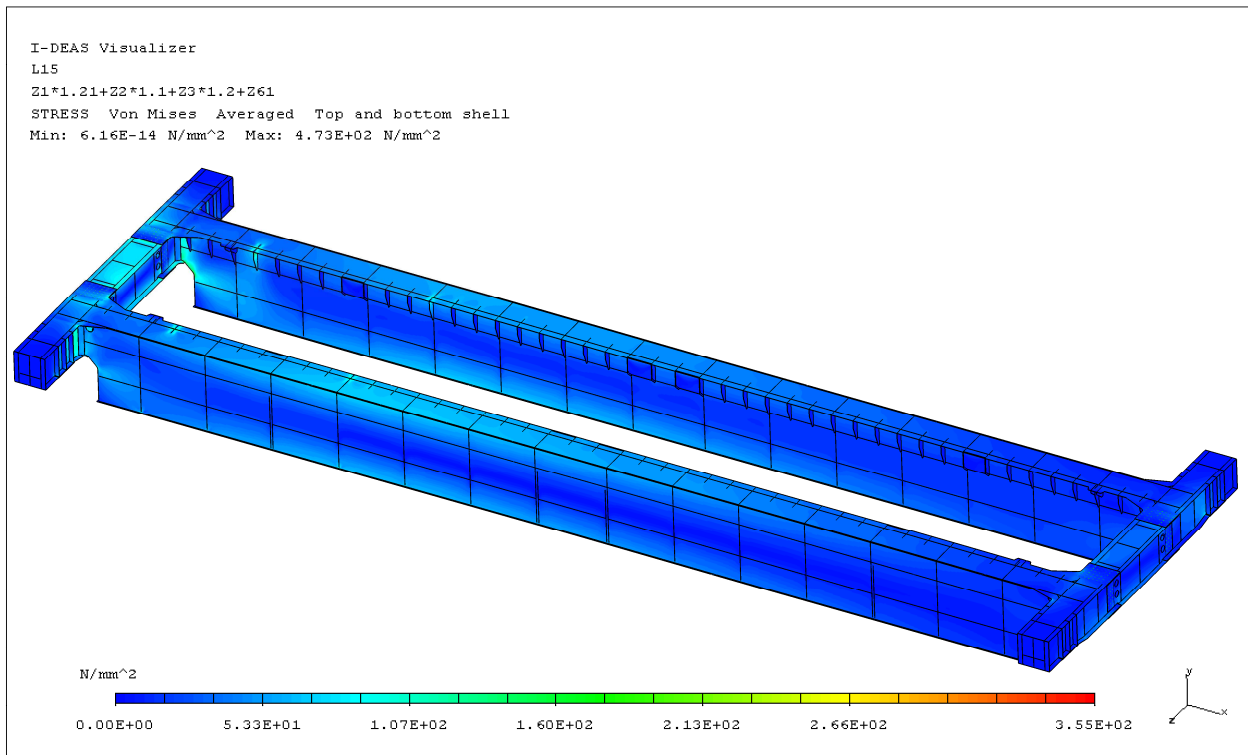
*Příloha P7: Zatěžovací stav L4 - kočka na kraji mostu, detail svaru plechů u vahadel
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 483 MPa*



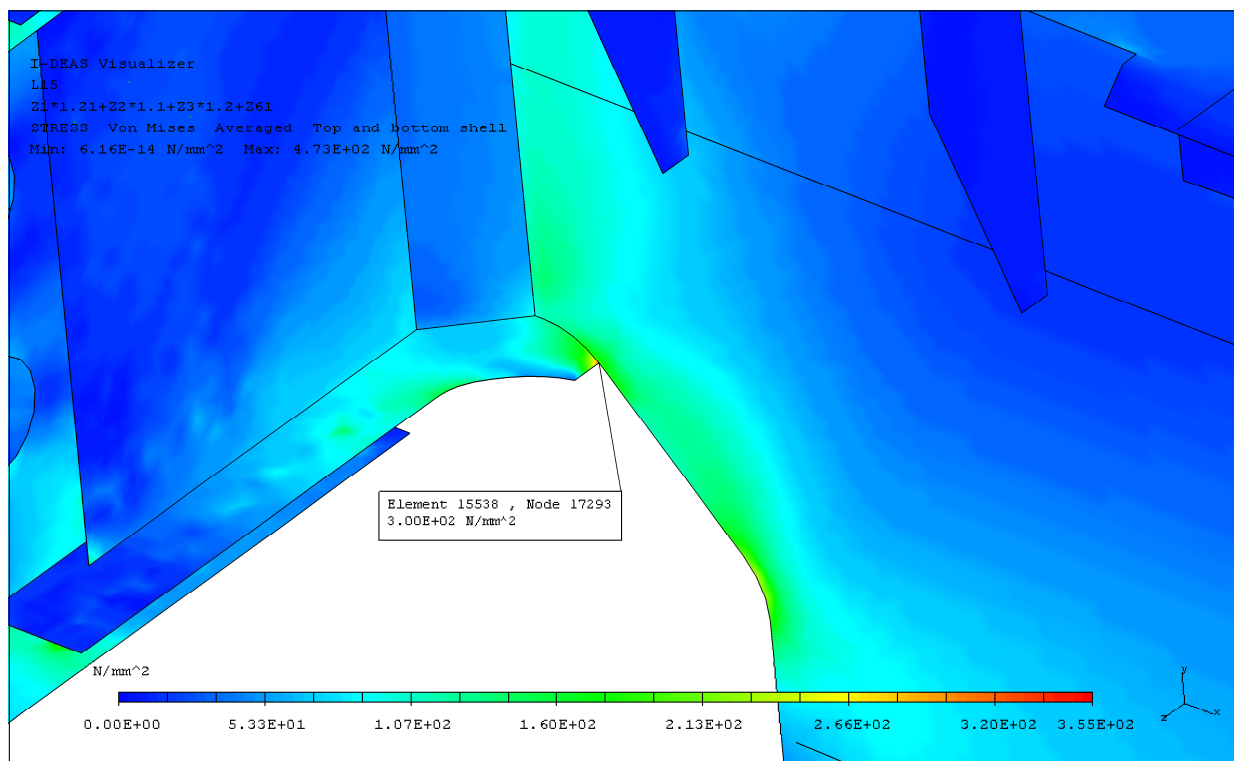
*Příloha P8: Zatěžovací stav L4 - kočka na kraji mostu, detail okolí spoje příčnicku s nosníkem
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 483 MPa*



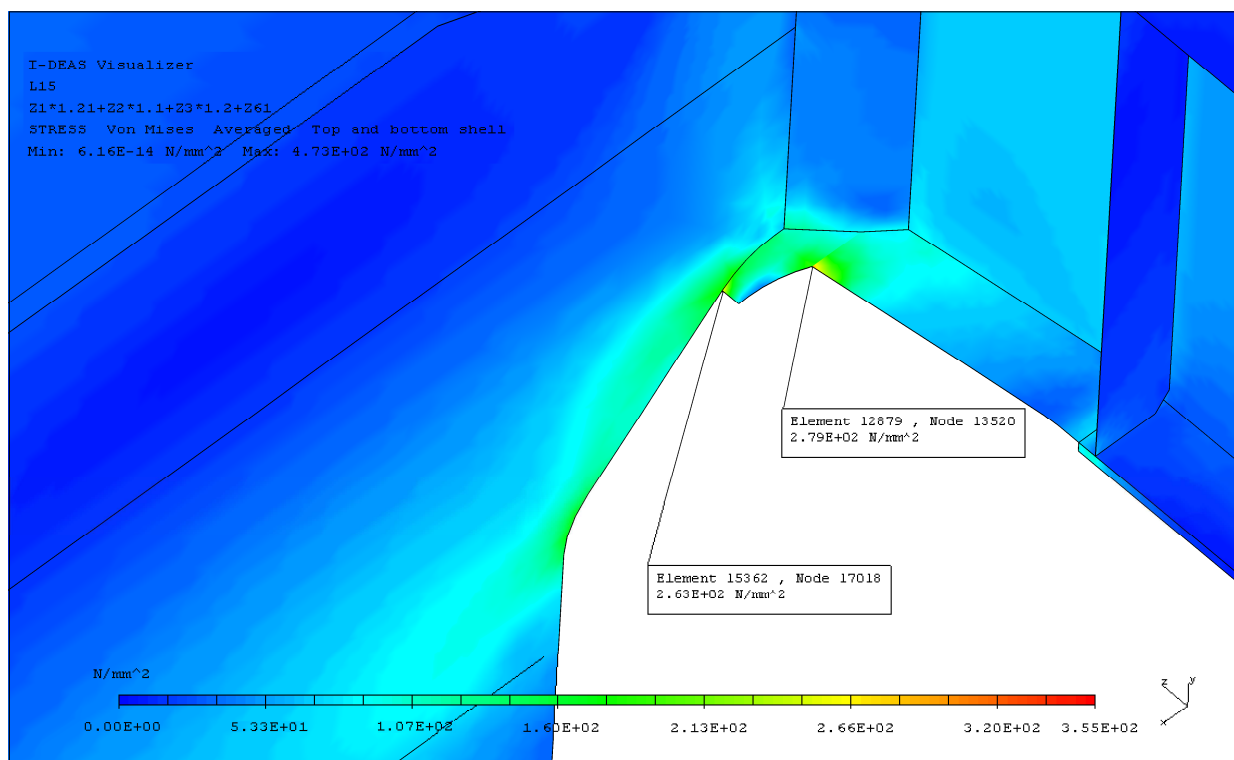
*Příloha P9: Zatěžovací stav L15 - kočka ve středu mostu
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 373 MPa*



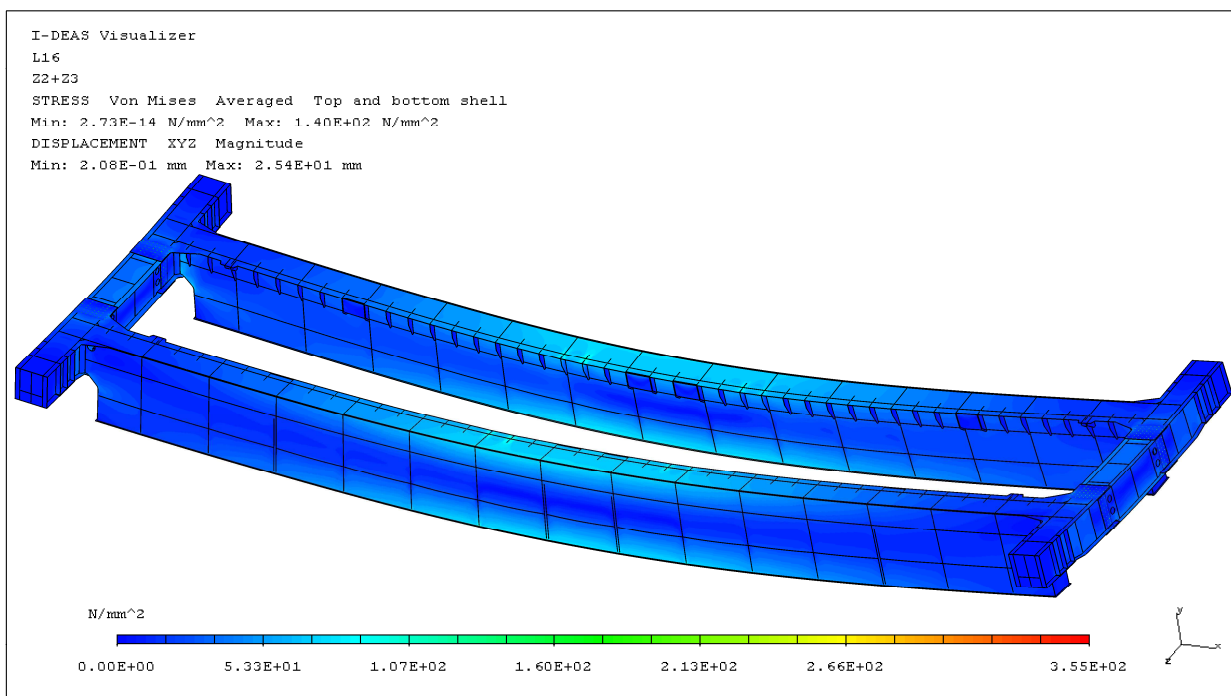
*Příloha P10: Zatěžovací stav L15 - kočka na kraji mostu
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 473 MPa*



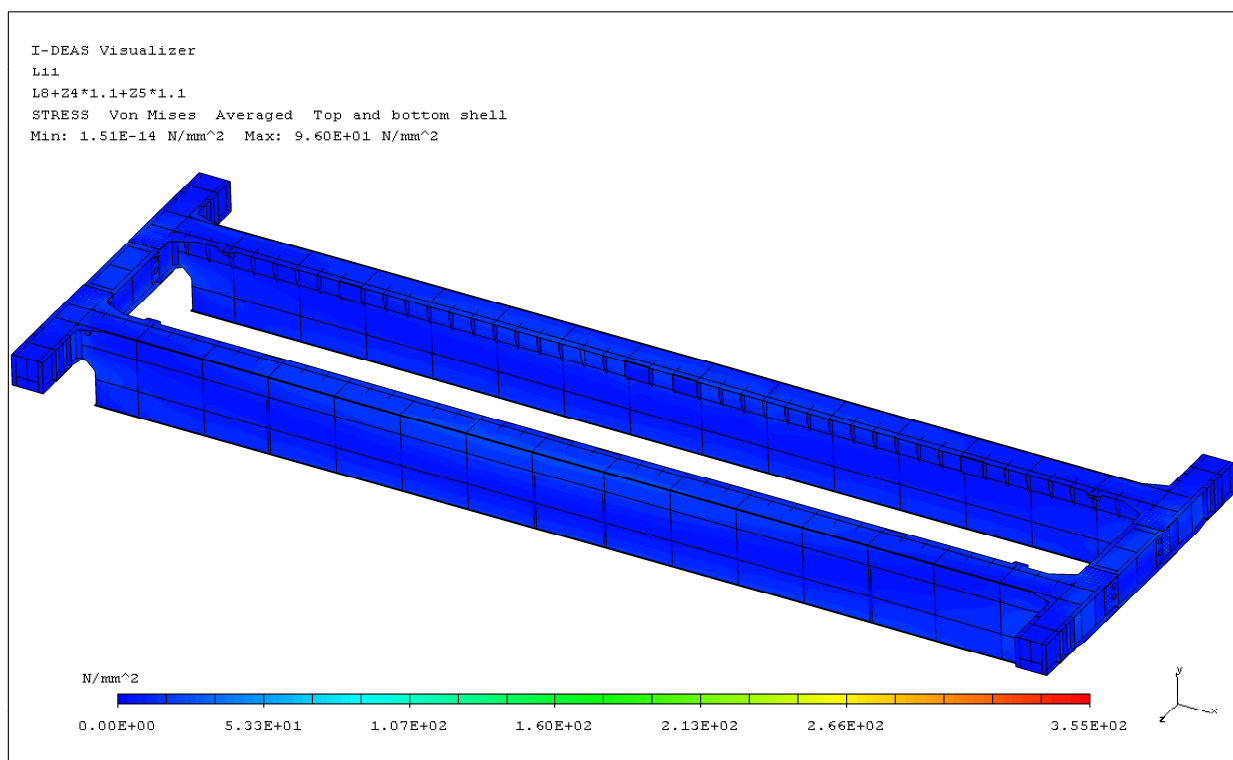
Příloha P11: Zatěžovací stav L15 - kočka na kraji mostu, detail spoje příčnicku s nosníkem
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 473 MPa



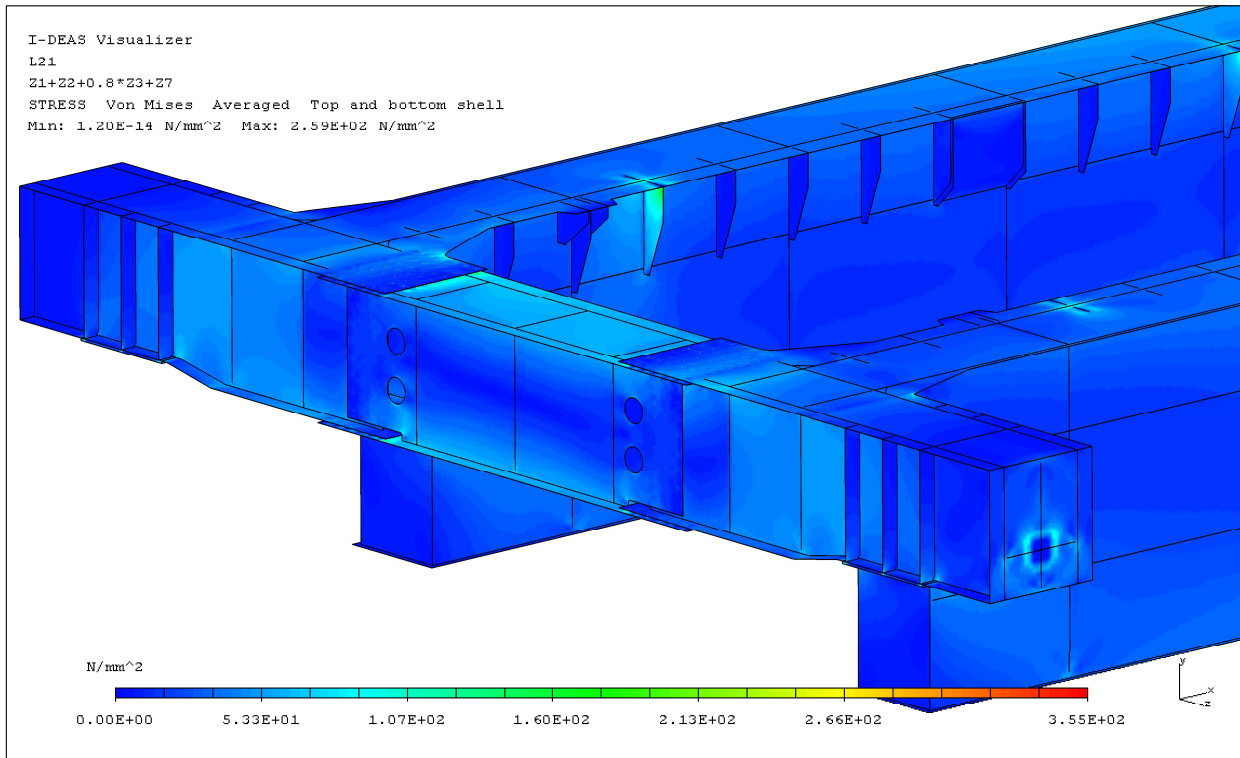
Příloha P12: Zatěžovací stav L15 - kočka na kraji mostu, detail spoje příčnicku s nosníkem
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 473 MPa



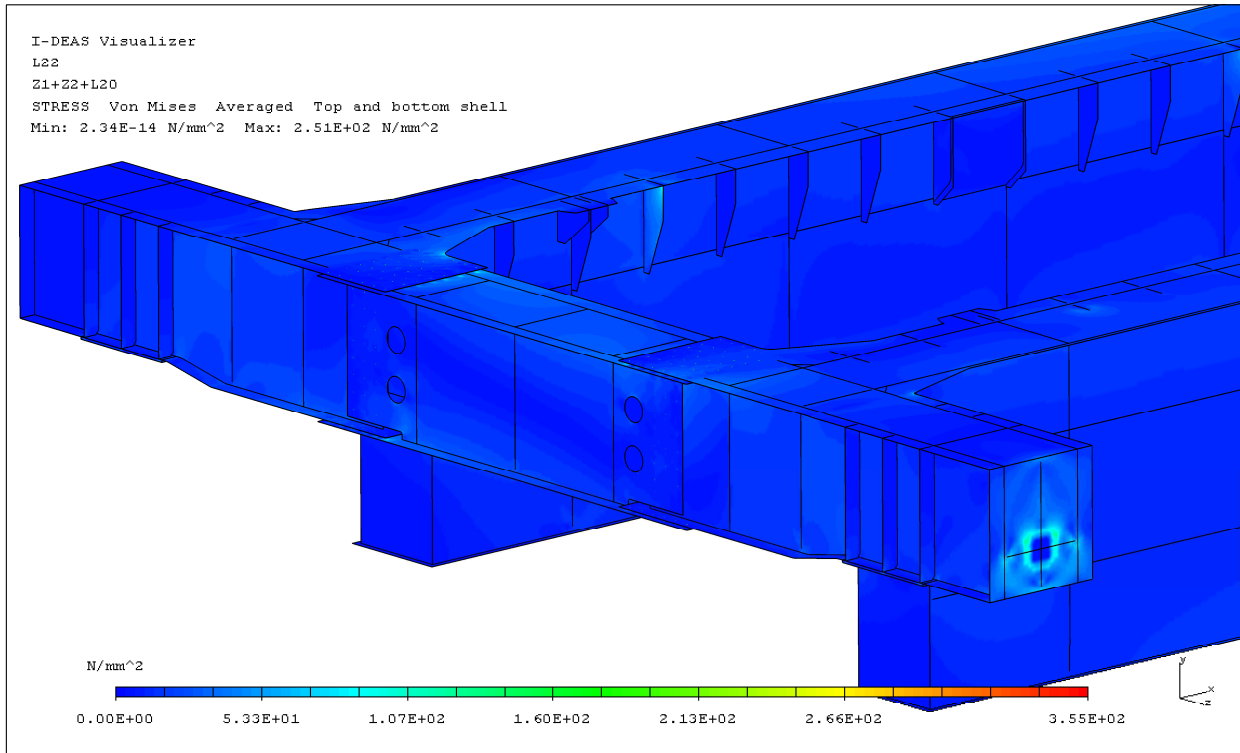
*Příloha P13: Deformace při zatížení stálým a jmenovitým břemenem - kočka ve středu mostu
Zobrazení: deformované (50:1), maximální průhyb 25,4 mm, maximální napětí HMH 140 MPa*



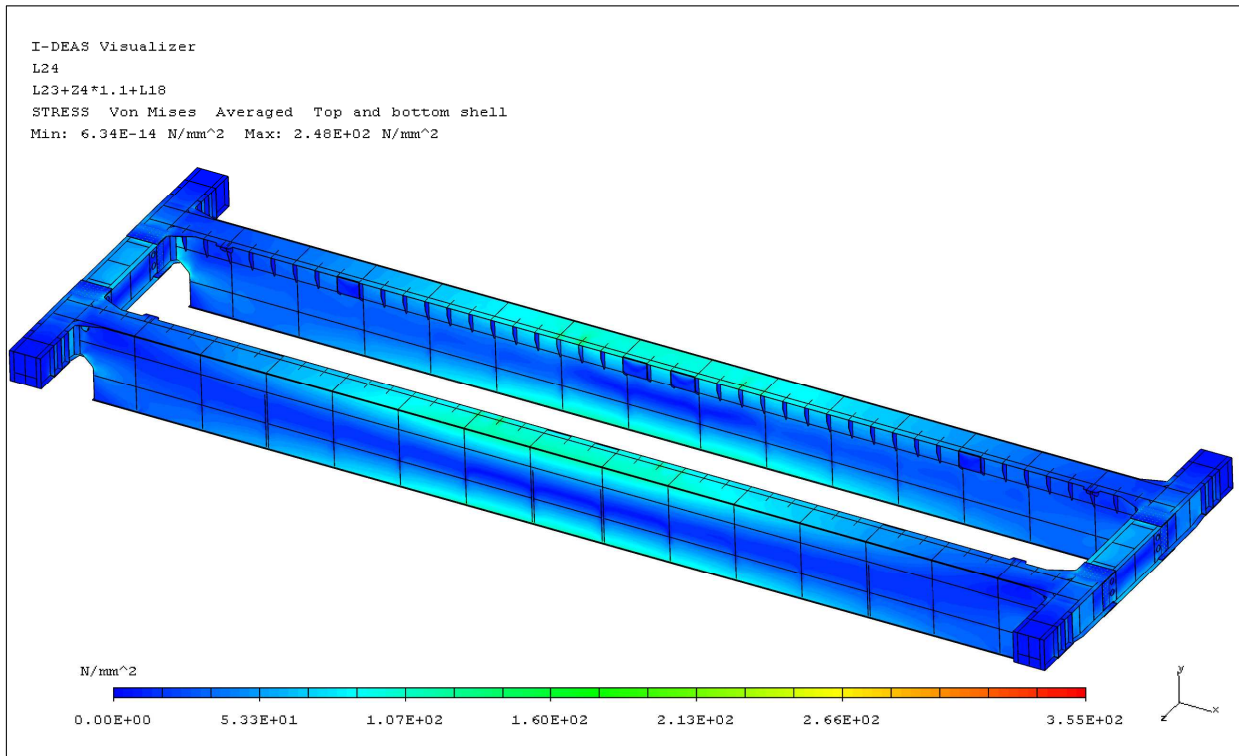
*Příloha P14: Zatěžovací stav L11 - kočka ve středu mostu
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMH 96 MPa*



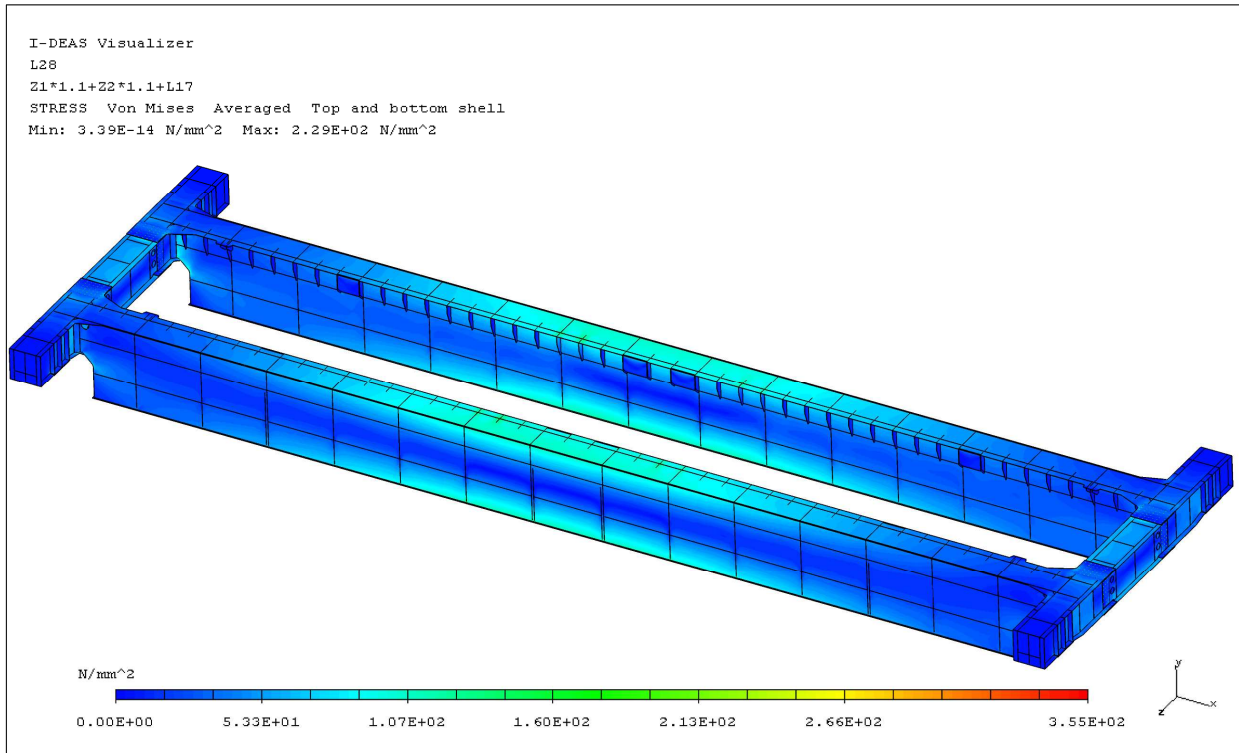
*Příloha P15: Zatěžovací stav L21 - kočka na kraji mostu
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 259 MPa*



*Příloha P16: Zatěžovací stav L22 - kočka na kraji mostu
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 251 MPa*



*Příloha P17: Zatěžovací stav L24 - kočka ve středu mostu
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 248 MPa*



*Příloha P18: Zatěžovací stav L28 - kočka ve středu mostu
Zobrazení: nedeformované, maximální napětí HMM 229 MPa*