# 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


# ANALÝZA CARRIAGE TOP DRIVU VRTNÉ VĚŽE
ANALYSIS OF CARRIAGE OF TOP DRIVE OF DRILLING TOWER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS


AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Bc. Jakub Kříž

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.


BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

# Zadání diplomové práce

| | |
|---|---|
| Ústav: | Ústav automobilního a dopravního inženýrství |
| Student: | **Bc. Jakub Kříž** |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Automobilní a dopravní inženýrství |
| Vedoucí práce: | **Ing. Přemysl Pokorný, Ph.D.** |
| Akademický rok: | 2016/17 |

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:

## Analýza carriage Top Drivu vrtné věže

**Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Při intenzivních vrtných pracech dochází na nosné části carriage Top Drivu vrtné soupravy k výskytu trhlin. Tyto trhliny se objevily opakovaně i po jejich odstranění.

**Cíle diplomové práce:**

– rozbor zatěžovacích stavů
– popis výpočtového modelu a použitých okrajových podmínek
– návrh úprav carriage
– rozbor výsledků analýzy

**Seznam doporučené literatury:**

MICHALÍČEK, M. Dynamika stavebných strojov. 2. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1996. Edícia skrípt. ISBN 80-227-0879-8.

AZAR, J. J. a ROBELLO, G. S. Drilling engineering. Tulsa, Okla.: PennWell Corp., c2007.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

| | |
|---|---|
| prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.<br>ředitel ústavu | doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.<br>děkan fakulty |

# ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je zjištění příčiny výskytu trhlin na carridge Top drivu pro společnost MND Drilling & Services a.s.. Úkolem diplomové práce je provést rozbor zátěžových stavů na součást. Dále vytvoření výpočtového modelu a okrajových podmínek, provést návrhy úprav vedoucí k eliminaci výskytu trhlin a vyhodnotit výsledky z konstrukčních úprav.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Carridge Top Drive, pevnostní analýza, MKP výpočet, vrtná souprava, trhliny ve svarech, žebrování

# ABSTRACT

The subject of this diploma thesis is determination of the cause of crack formation at the carriage Top drive for MND Drilling & Services company. The aim of the diploma thesis is to analyze the load states of the component. Furthermore, the aim is to create a computational model and boundary conditions and to create suggestions of improvements leading to the elimination of cracks. And finally, to evaluate the results of construction improvements..

## KEYWORDS

Carriage Top Drive, strength analysis, FEM calculation, drilling rig, weld cracks, ribbing

# BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Kříž, J. *Analýza carriage Top Drivu vrtné věže*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 61 s. Vedoucí diplomové práce Přemysl Pokorný.

# ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. května 2017 ……..……..……..

Bc. Jakub Kříž

# PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Přemyslovi Pokornému, Ph.D. za jeho odborné vedení, věcné a cenné rady, připomínky, trpělivost a ochotu při tvorbě diplomové práce.

Dále děkuji mým přátelům, přítelkyni i členům mé rodiny za velkou podporu během celého mého studia.

# OBSAH

Úvod ..... 9
1 Cíle práce ..... 10
2 Vrtné soupravy ..... 13
2.1 Bentec 250 ..... 14
2.2 Bentec 450 ..... 15
2.3 Bentec 350 ..... 16
2.4 Ostatní vrtné soupravy. ..... 17
3 Analýza problému ..... 18
3.1 Silový rozbor ..... 18
3.2 Statický rozbor ..... 19
3.3 Příčiny vzniku trhlin ..... 20
4 Model ..... 21
4.1 Zavedení náhrad a zjednodušení pro výpočet ..... 21
4.2 okrajové podmínky pro MKP výpočet ..... 26
5 Výpočet ..... 31
5.1 Zátěžné stavy ..... 31
5.2 Výsledky ..... 38
6 Navržení úprav ..... 40
6.1 Měkké žebro ..... 41
6.2 Uvolnění vnitřního prostoru pro svařování ..... 48
6.3 Technologie svařování ..... 54
Závěr ..... 57
Seznam použitých zkratek a symbolů ..... 60
Seznam příloh ..... 61

# ÚVOD

V dnešní době jsou nedílnou součástí každodenního života produkty z ropy. Tato nerostná surovina se vyskytuje ve svrchních vrstvách zemské kůry, ze kterých je potřeba ji získat. Před samotným těžením je ovšem potřeba nejprve vytvořit vrt a získat přístup k podzemním zásobníkům, ať už se jedná o samotnou ropu či jinou surovinu.

V České republice je společnost MND Drilling & Services a.s. (dále jen MND) největší vrtný kontraktor s mezinárodními aktivitami v celé řadě evropských zemí. Pole působnosti vrtání zahrnuje vystrojování průzkumných a těžebních vrtů na ropu, zemní plyn, hydro a geotermálních vrtů a vrtů pro podzemní zásobníky plynu. Jednu z vrtných plošin používaných pro tyto práce pak lze vidět na obr. 1. [1]

*Obr. 1: Vrtná souprava. [2]*

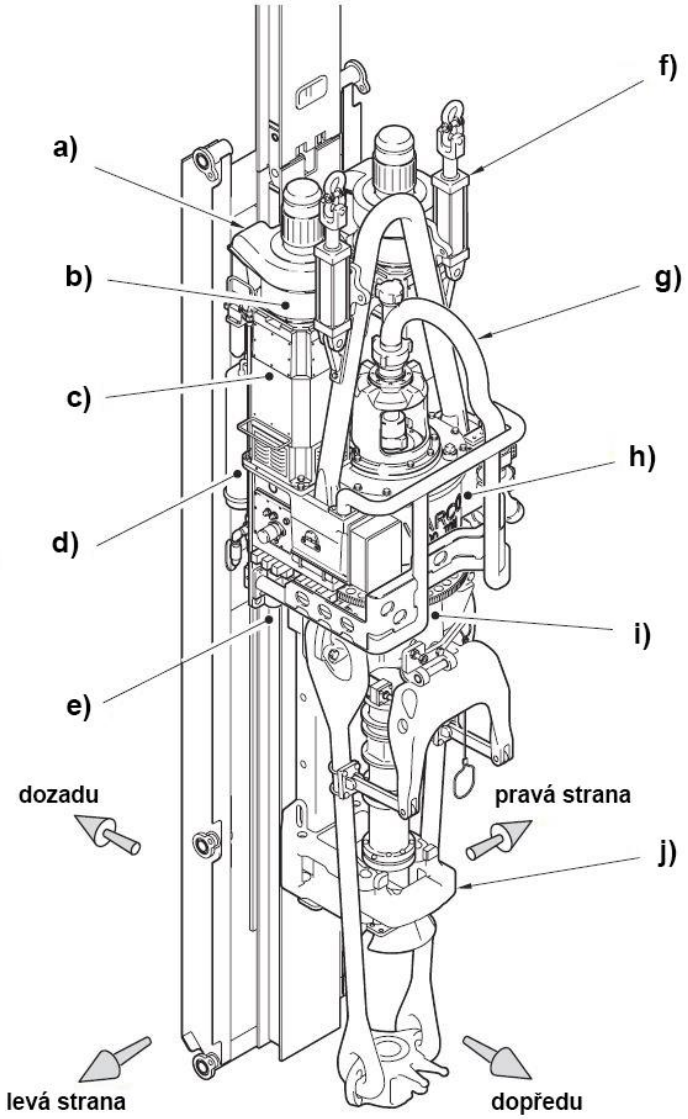
# 1 CÍLE PRÁCE

Společnost MND (Moravské naftové doly) zjistila během intenzivních vrtných prací, že na nosné části carridge Top Drivu vrtné soupravy dochází k výskytu trhlin, přičemž se tyto trhliny objevovaly opakovaně i po jejich odstranění. Konkrétně se jedná o součást přenášející reakci točivého momentu vzniklého na motoru vrtáku vedenou skrz carridge a kladky na vodicí kolejnice vrtné věže. Trhliny vznikly výhradně ve svaru viz obr. 2 a 3.

*Obr. 2: Prasklina na vnější straně žebra.*

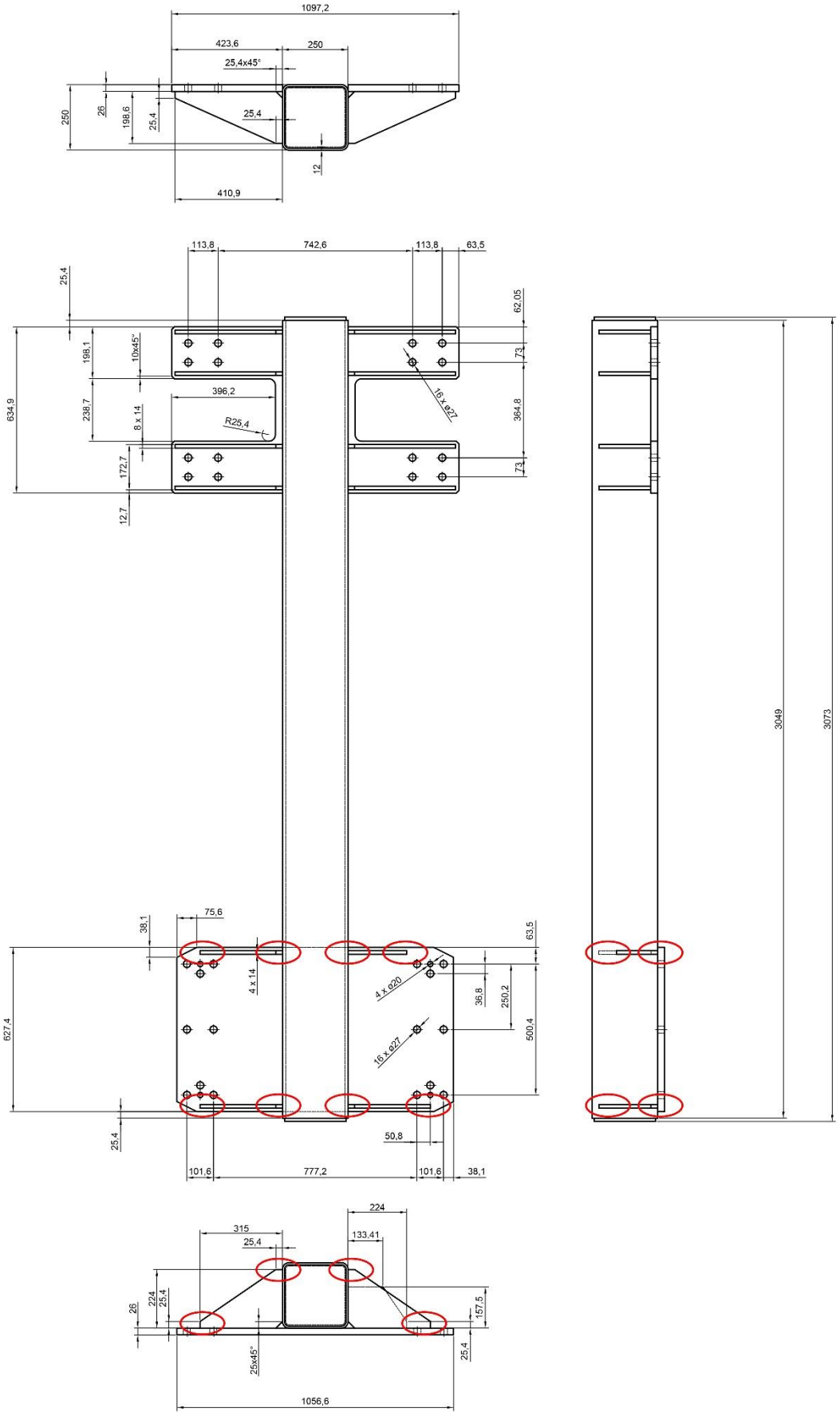
*Obr. 3: Prasklina na vnitřní straně žebra.*

Pojmem Top Drive systém (obr. 4) se pak rozumí sestava komponent jako jsou například: motory, chladicí obvod těchto motorů, hydraulický obvod, převodovka a držák vrtáku.




*Obr. 4: Top Drive systém a) systém chlazení motoru, b) hydraulická kotoučová brzda, c) střídavé motory, d) hydraulický systém, e) vodicí tyč s vozíkem, f) systém protizávaží, g) husí krk (s-trubice), h) převodovka / kryt motoru, i) rotační adaptér, j) držák potrubí. [3]*

Cílem této práce tedy je identifikace příčiny výskytu těchto trhlin na carridgi, viz obr. 5, pomocí vytvoření MKP modelu s okrajovými podmínkami definovanými tak, aby nahrazovaly skutečnou situaci. Dále vyhodnocení vnitřního napětí na tomto modelu a následné vypracovaní návrhu úprav na carridgi vedoucímu k zamezení výskytu dalších trhlin.




*Obr. 5: Schéma carridge s vyznačením vzniku trhlin.*

# 2 VRTNÉ SOUPRAVY

Společnost MND disponuje několika soupravami dle aktuálních požadavků na jednotlivé vrty. Jedná se o moderní vrtné soupravy, které jsou navrženy tak, aby vyhověly vysokým požadavkům na bezpečnost a ekologii. Tyto moderní vrtné soupravy jsou pak plně elektrifikovány a ovládány na dálku z pracoviště obsluhy. Všechny soupravy Bentec, jimiž společnost MND disponuje, jsou konstruovány pro evropské suchozemské podmínky. Pracovní teploty v rozmezí –20 °C až +45 °C. Jedná se o modulární stanice, které jsou na místa přepravovány pomocí nákladních automobilů a následně sestaveny. [4]

## 2.1 BENTEC 250

Vrtná souprava Bentec 250 (obr. 6) je nejmenší plošinou, jenž společnost MND aktuálně vlastní a používá k vrtání. Tato souprava disponuje následujícími charakteristikami: [5]

- výkon vrtáku: 1 250 HP,
- výška soupravy: 53 m,
- maximální zatížení na háku: 300 t,
- Top Drive: Bentec TD-350-HT,
- výplachová čerpadla: 2 x Bentec T-1600 HP,
- hloubka: cca 4 200 m,
- rok výroby: 2014.

*Obr. 6: Vtrná souprava Bentec 250. [6]*

## 2.2 BENTEC 450

Naopak největší vrtnou soupravou je Bentec 450 (obr. 7). [7]

- výkon vrtáku: 2 000 HP,
- výška soupravy: 55,1 m,
- maximální zatížení na háku: 450 t,
- Top Drive: Bentec TD-500HT,
- výplachová čerpadla: 3 x Bentec T-1600 HP,
- max. hloubka cca 7 200 m,
- rok výroby: 2012.

*Obr. 7: Vrtná souprava Bentec 250. [8]*

## 2.3 BENTEC 350

Tato souprava (obr. 8) se pak nachází dle všech charakteristik mezi soupravami právě zmíněnými. Právě na této soupravě se vyskytl problém, o kterém pojednává tato diplomová práce [9].

- výkon vrtáku: 1 500 HP,
- výška soupravy: 55 m,
- maximální zatížení na háku: 350 t,
- Top Drive: NOV Varco TDS 11 SA – 500 t,
- výplachová čerpadla: 3 x EWECO E-1600 HP,
- max. hloubka cca 6 000 m,
- rok výroby: 2008.

*Obr. 8: Vrtná souprava Bentec 350. [10]*

## 2.4 OSTATNÍ VRTNÉ SOUPRAVY.

Společnost Bentek vyrábí také soupravy do extrémních podmínek.

Jedním z extrémů může být vrtání na pouštích. Pro tyto práce je určená řada s označením Desert rigs, která se používá pro vrty při teplotách –20 °C až +55 °C. Největší z těchto souprav s označením Desert rig 3000 HP disponuje nosností na háku 650 t a schopností vytvoření vrtu hlubokého asi 9100 m. [4]

Do regionů s extrémními teplotami pod bodem mrazu se naopak používají soupravy s označením Artic Rigs. Tyto soupravy jsou určeny pro vrty v rozmezí teplot –45 °C až +55 °C. Největší souprava z této řady s označením Arctic Rig SR 6000 pak disponuje nosností na háku 450 t a možností vrtat do hloubky 6000 m. [4]

Posledním speciálním druhem vrtných stanic jsou ty, jenž nevrtají na pevnině. Jedná se o stanice s značením Offshore. Tyto stanice pak připravují vrty na mořském dně (obr. 9). [4]

*Obr. 9: Vrtná stanice pro vrtání na mořském dně. [11]*

# 3 ANALÝZA PROBLÉMU

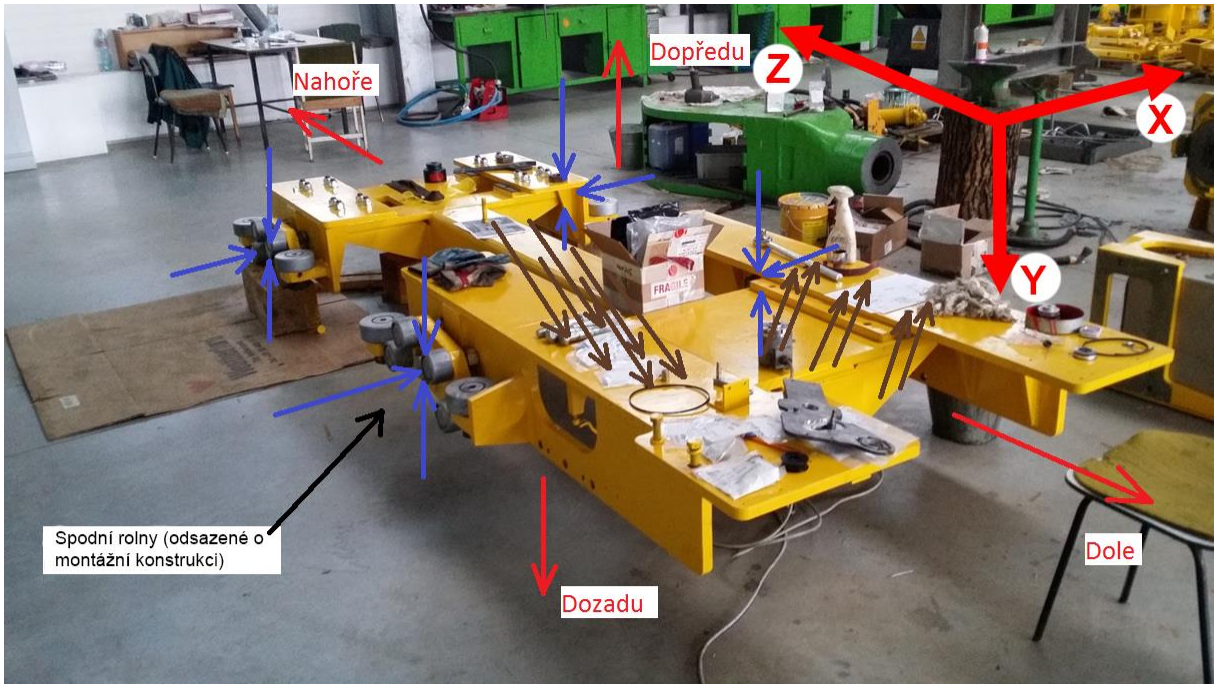
Pro veškeré své výpočty budu předpokládat smluvenou střední hodnotu gravitačního zrychlení:

$$g = -9{,}81\ m \cdot s^{-2} \tag{3.1}$$

## 3.1 SILOVÝ ROZBOR

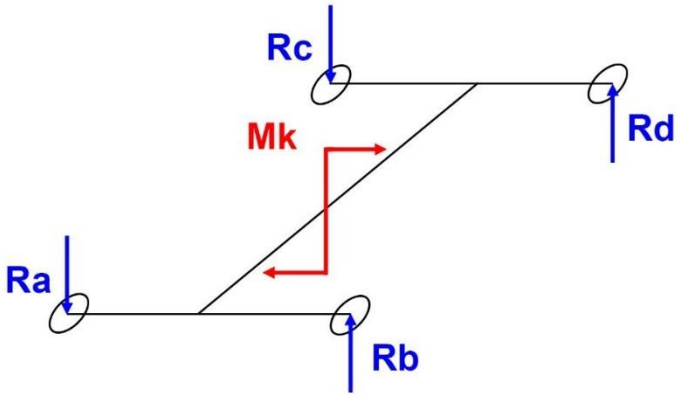
Během práce se carridge spolu s motorem a převodovkou pohybuje pouze ve směru vertikálním, tj. shodném se směrem působícího gravitačního zrychlení. Hmotností celé sestavy vzniká síla působící ve stejném směru jako gravitační zrychlení. Tato síla je zachytávaná pomocí lana uchyceného na horní straně skříně převodovky. Reakce točivého momentu pak působí také ve shodném směru s gravitačním zrychlením, a proto musí být zachycena pomocí carridge s rolnami do směrů kolmých ke gravitační zrychlení.

Na obr. 10 pak můžeme vidět silový rozbor carridge bez osazení převodovky. Červenou barvou jsou označeny šipky určující směry při práci. Pomocí skupin hnědých šipek je vyznačen moment působící od převodovky v místech šroubů uchycení. Modrou barvu pak mají šipky značící směry předpokládaných reakcí na točivý moment od převodovky.




*Obr. 10: Směry, síly a moment na carridgi. Červená – směry při uchycení na vrtné plošině, modrá – směry reakcí na vahadla, hnědá – působení točivého momentu.*

Během pracovního cyklu se obsluha snaží nastavit vždy konstantní točivý moment optimální k vrtání. V běžném rozmezí se pak jedná o hodnoty mezi 2–3 kNm. Během samotného vrtání ovšem dochází k situacím, během nichž dojde k zaseknutí vrtáku a prudkému nárůstu točivého momentu až k hodnotám 50 kNm. Tento točivý moment následně musí být rozložen mezi jednotlivé reakce na vahadlech, které jsou v kontaktu se samotnou věží (obr. 11).




*Obr. 11: Zjednodušené schéma carridge se silovými reakcemi.*

## 3.2 STATICKÝ ROZBOR

Výpočet stupňů volnosti: [12]

$$i = i_v \cdot (n-1) - \sum \xi\ i + \eta \tag{3.2}$$

kde $i$ je počet stupňů volnosti vázaného tělesa, $i_v$ počet stupňů volnosti volného tělesa, $n$ je počet těles, $\sum \xi\ i$ je počet složek mechanického pohybu odebraných stykovými vazbami, $\eta$ je počet deformačních parametrů omezených stykovými vazbami.

V tomto případě po zjednodušení:

$$i = 2 \cdot (2-1) - 4 + 2. \tag{3.3}$$

Posouzení statické určitosti:

$\mu > \upsilon$ je úloha staticky neurčitá,

$\mu < \upsilon$ je úloha staticky přeurčená,

kde $\mu$ je počet nezávislých neznámých parametrů, $\upsilon$ je počet použitelných statických podmínek po dosazení $4 > 2$.

Soustava je dvakrát staticky neurčitá

## 3.3 PŘÍČINY VZNIKU TRHLIN

Při zanedbání podmínek statické určitosti mohla vzniknout první příčina problému způsobujícího praskání svarů carridge. Během návrhu carridge mohlo být předpokládáno, že točivý moment bude rovnoměrně rozložen mezi všechny reakce ABCD, tj. 25 % na každou z nich. Tento předpoklad se ovšem může diametrálně lišit od skutečnosti, jelikož není možné, aby samotné kladky byly dokonale na stejných osách. Podobně v samotném provozu při průjezdu v kolejnicích bude docházet k přenášení reakčních sil v závislosti na kontaktu s kolejnicemi a bude tak vznikat staticky neurčitá soustava, kde se sníží počet deformačních podmínek této soustavy na jednu, či v krajním případě může dojít až k úplné ztrátě přenášení momentu do dvou ze čtyř vahadel a soustava se pak stane staticky určitou.

Hlavní příčinou mající vliv na praskliny bude použití nevhodného profilu žebra. V tomto případě bylo použito žebro s neutrálním profilem. Tento tvar žebra pak nemusí plnit správnou funkci. Při prudkých přechodech mezi tuhostmi součástí v místech přechodu vniká koncentrace napětí. Úkolem žebrování má být přenesení části tohoto napětí do bezpečnější oblasti. Typicky se pak jedná o střed tažené hrany tohoto žebra.

Posledním aspektem by mohla být nevhodně zvolená technologie svařování jednotlivých součástí. Dle informací poskytnutých techniky společnosti se jedná o koutové svary. Použití komplexnějších svarů pak může vést k minimalizaci nebo odstranění vzniku trhlin.

# 4 MODEL

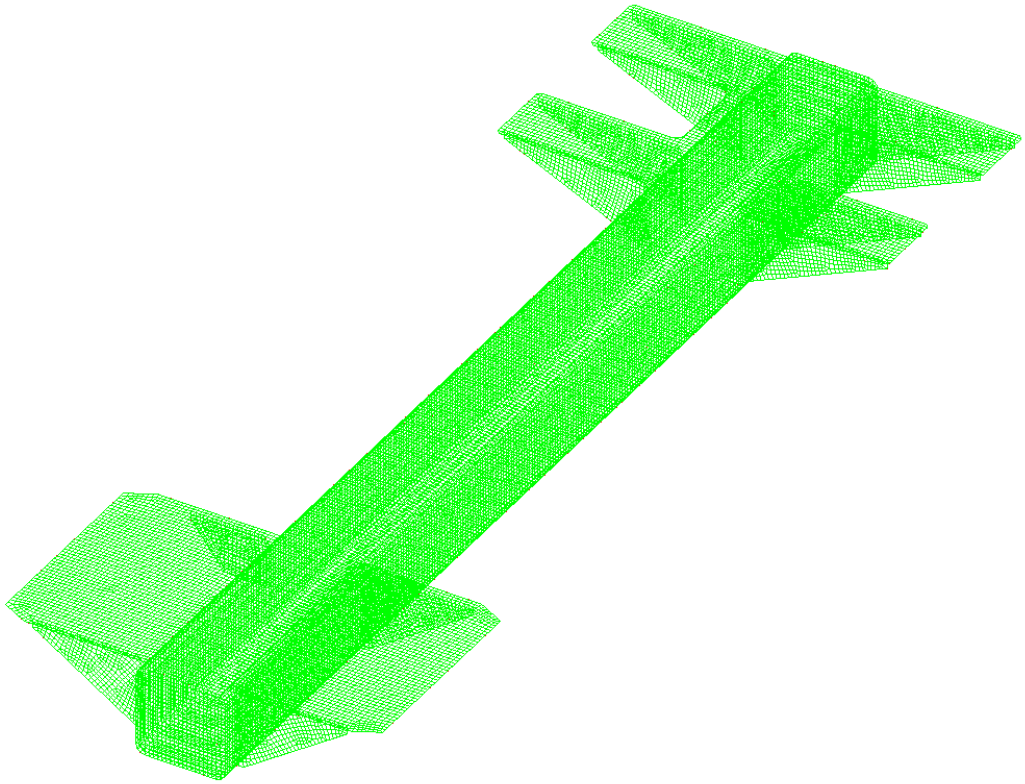
## 4.1 ZAVEDENÍ NÁHRAD A ZJEDNODUŠENÍ PRO VÝPOČET

Pro zjištění příčin výskytu trhlin v oblastech svaru na carridgi bylo učiněno několik zjednodušení, jak na samotném modelu, tak i na všech součástech a okolnostech majících přímý či nepřímý vliv na chování během zátěže.

### 4.1.1 NÁHRADA CARRIDGE

Samotný carridge byl vymodelován přesně dle výkresové dokumentace dodané společností MND. Následně bylo potřeba z modelu vytvořit skořepinový model. Bylo použito tenkostěnných skořepin. Plochy těchto skořepin pak odpovídaly střednicím jednotlivých tlouštěk plechů. Dále jim byly přidány materiálové charakteristiky.

Problematickým aspektem nadále bylo vytvoření sítě na těchto plochách. Problém spočíval zejména v propojení nosných desek a žebrování s hlavním nosníkem (obr. 12).

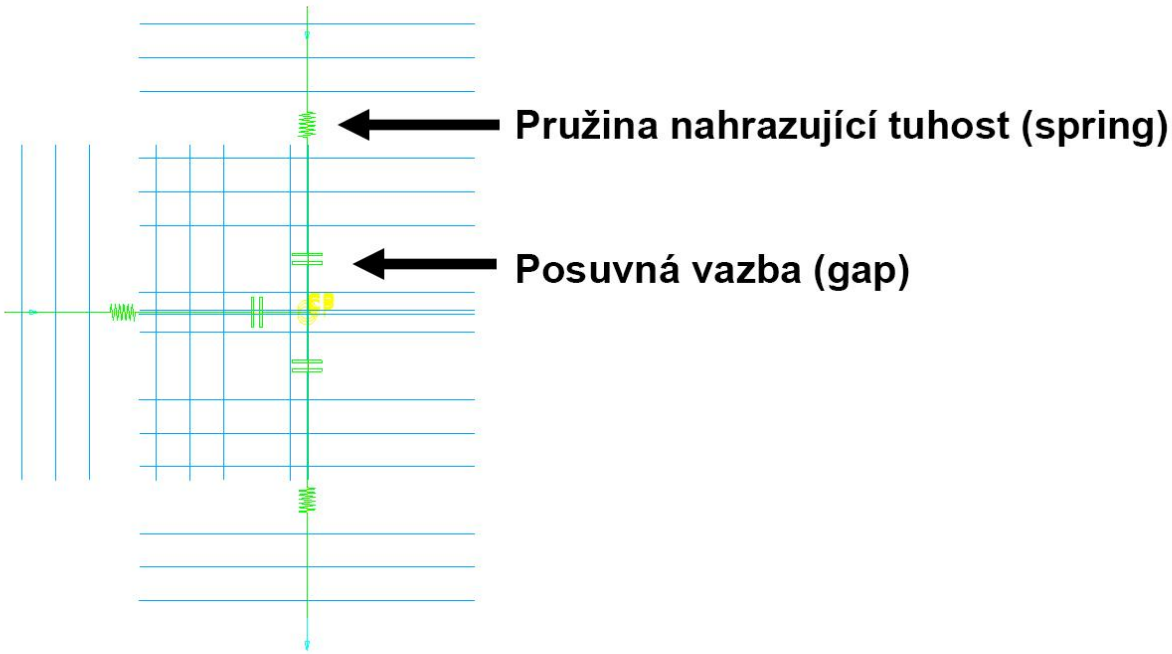


*Obr. 12: Skořepinový model s vytvořenou sítí elementů.*

### 4.1.2 NÁHRADA VAHADEL

Jako náhrada vahadel (obr. 13) bylo použito systému několika vazeb vycházejících z jednoho bodu. Tento bod byl určen protnutím středů drah, po kterých se odvalují samotné kladky. Z takto získaného bodu bylo následně potřeba zajistit správnou funkčnost při práci na samotné věži. První vazbou tak byla vazba translační v každém směru kolmém na směr pohybu. Druhou vazbou pak bylo použití pružiny, která měla za následek simulaci tuhosti samotných kolejí věže, ve kterých se carridge pohybuje. Poslední tak bylo zamezení posunutí v konkrétních směrech.

Pro reálnější hodnoty získané simulací byla na translačních vazbách , které byly proti sobě umístěny protilehle, nastavena vůle 1 mm. Tato vůle má představovat nepřesnosti vzniklé při montáži a umístění na věži.




*Obr. 13: Náhrada vahadel.*

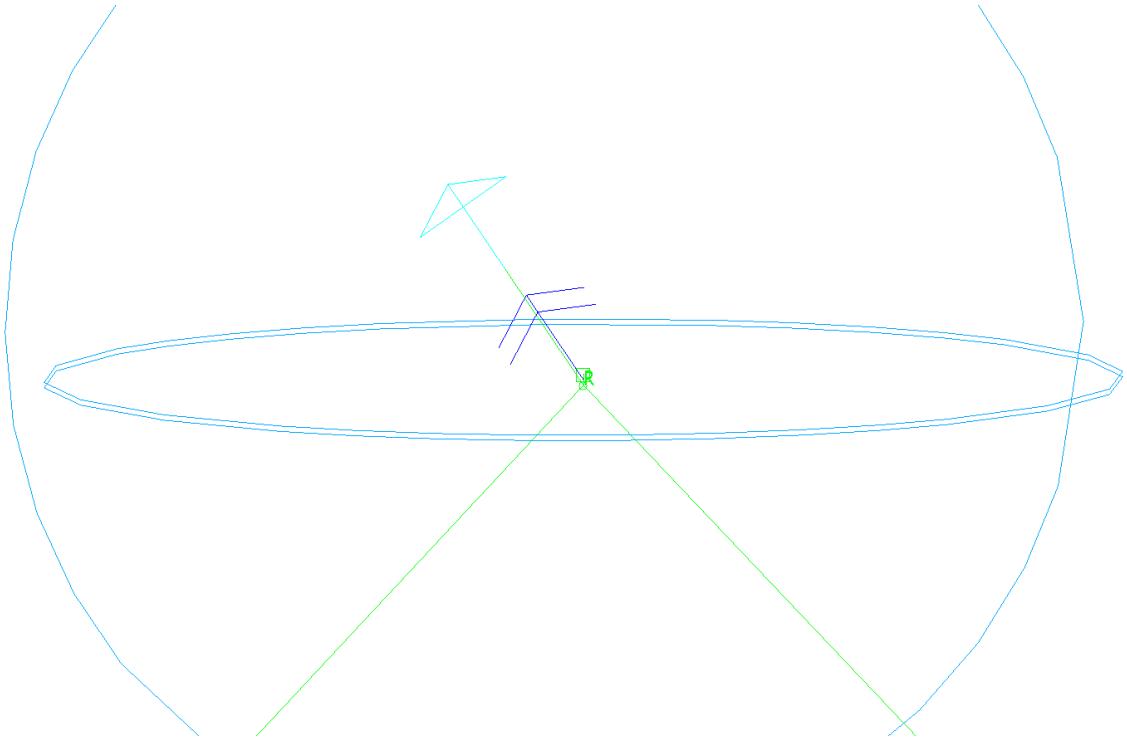
### 4.1.3 NÁHRADA TOP DRIVE SYSTÉMU

Náhrada převodové skříně a samotného Top drive systému byla realizována pomocí hmotného bodu v místě osy vrtáku (obr. 14). Hmotnost Top Drivu, kterou udává výrobce ve své výrobní dokumentaci, je 27 000 lb. Po přepočtu se jedná o 12 246,9 kg. Kvůli výrobní nepřesnosti, hmotnosti spojovacího materiálu, hmotnosti přidaných zařízení mimo původní návrh, naplnění provozních kapalin, případným změnám a inovacím volím konzervativní hodnotu 13 000 kg.

Výpočet převodu mezi lb a kg:

$$1\ \text{lb} = 0.45359237\ \text{kg} \tag{4.1}$$

$$27\,000 \cdot 0{,}45359237 = 12\,246{,}994\ \text{kg}$$



*Obr. 14: Náhrada soustavy převodovky a motoru Top Drive systému.*

### 4.1.4 NÁHRADA ŠROUBŮ

Šrouby jsou součásti, které poskytují spojení mezi jednotlivými tělesy. Používají se v případě potřeby rozebíratelného spojení dvou či více dílů. V tomto případě se jedná o spojení mezi nosnými deskami carridge, patkami na kterých jsou umístěna vahadla a skříní převodovky.

Reálně jsou tyto součásti spojeny pomocí sady šroubů a vytvářejí tak předepnutý šroubový spoj. Nahrazení tohoto spoje proběhlo formou vytvoření prutu o průměru 27 mm rovnajícímu se průměru používaných šroubů a délce 52 mm rovnající se součtu výšek ploch carridge a patky. Tyto pruty se pak nacházejí přesně v místě os šroubů. Dalším krokem pak bylo vytvoření prutu, který by měl za úkol vytvoření předpětí těchto šroubů a zároveň simuloval tuhost patky vahadel do této náhrady. Byla zde vložena posuvná vazba s definovanou zápornou hodnotou, konkrétně se jednalo o hodnotu -0,1 mm, která měla za úkol vnést do simulace zmiňované předpětí na šroubech. Úplná náhrada je na obr. 15.

**Výpočet předpětí vyvolané na šroubech.**

Hookův zákon pro deformaci zní následovně: [13]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{4.2}$$

kde $\varepsilon$ je poměrné délkové prodloužení, $\sigma$ je mechanické napětí E je Youngův modul pružnosti, pro konstrukční oceli je jeho hodnota 210 GPa.

Poměrné délkové prodloužení $\varepsilon$ je dále definováno jako: [13]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \tag{4.3}$$

kde $\Delta l$ délkové přetvoření a $l$ je celková délka.

V našem případě při kombinaci těchto vzorců platí:

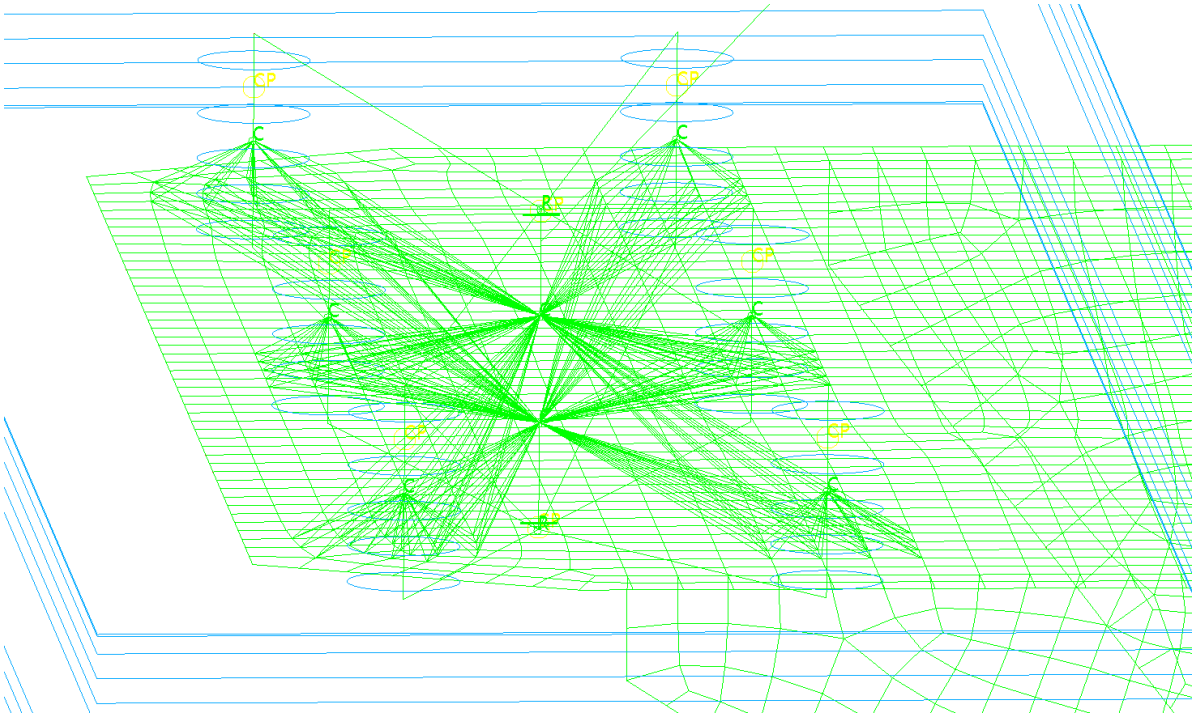
$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l}{l} \cdot E \tag{4.4}$$

$$\sigma = \frac{0{,}1}{52} \cdot 210\,000 = 403{,}846\ MPa$$

Jmenovité hodnoty meze kluzu a meze pevnosti šroubů v tahu jsou dle ČSN EN 1993-1-8. Pro pevnostní třídu 8.8 [14]

Jmenovitá mez kluzu $f_{yb}$ = 640 MPa

Jmenovitá mez pevnosti $f_{ub}$ = 800 MPa



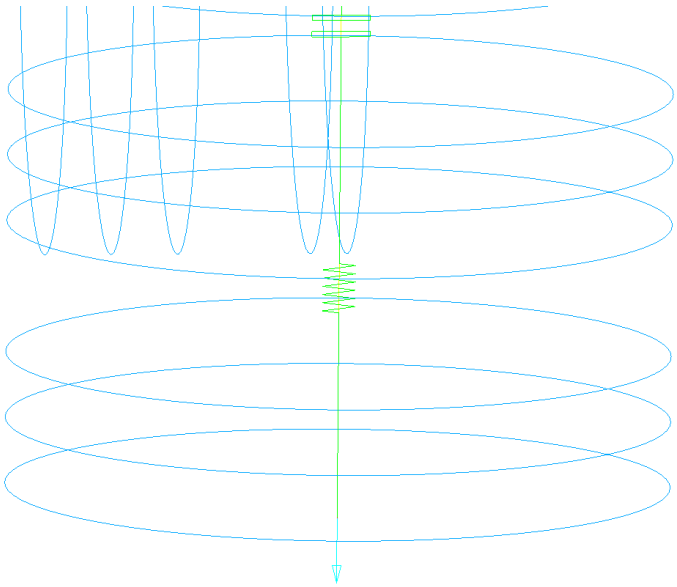
*Obr. 15: Náhrada uchycení carridge spolu s patkou vahadel a převodovkovou skříní.*

Tyto náhrady byly následně propojeny prvkem FE3 se skořepinovým modelem. Vazba FE3 je nehmotný prvek s konečnou tuhostí, proto byla vhodnější volbou něž vazba FE2. [15]

Vazba FE2 je nehmotný prvek s nekonečnou tuhostí a byla použita na propojení všech náhrad mezi sebou. Touto vazbou pak byly propojeny náhrady kolejnic věže s náhradami vahadel a patkou součásti. Stejně tak byla pak propojena náhrada patky s převodovkovou skříní.

## 4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY PRO MKP VÝPOČET

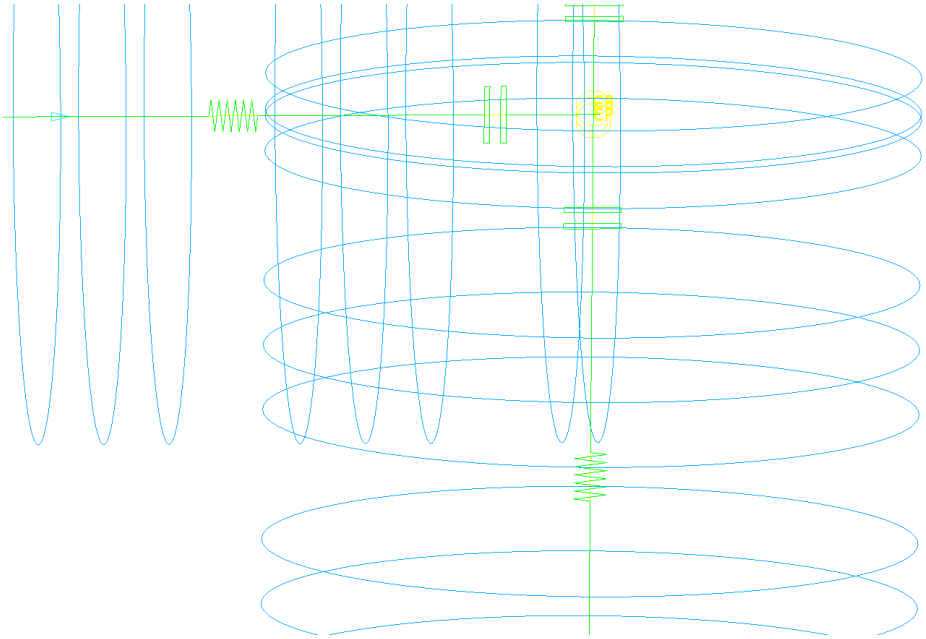
V kapitole 4.1.2 již bylo zmíněno, že na koncích náhrad vahadel bylo použito zamezení translace ve směrech shodných s osou směrů jednotlivých náhrad. Náhradám ležícím v osách X byla odebrána možnost translace právě v ose X, obdobně pokud náhrada leží v ose Y je odebrána translace v ose Y (obr. 16).



*Obr. 16: Omezení translace náhrady v ose Y.*

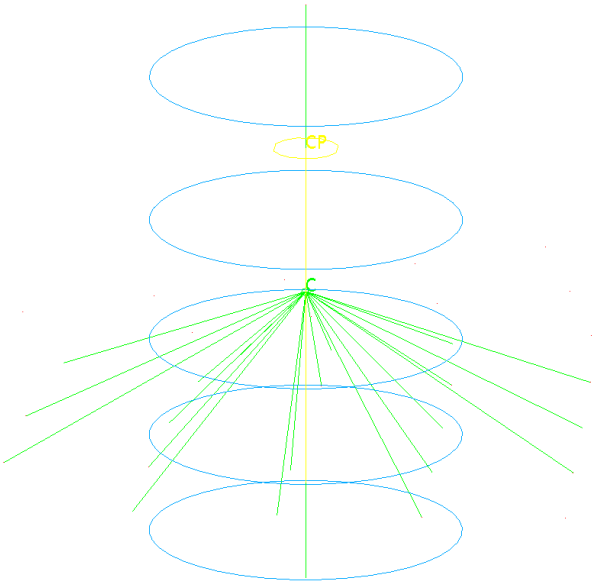
Další okrajovou podmínkou potřebnou pro správnou funkčnost výpočtu pak je odebrání možnosti rotací kolem vlastních os jednotlivých součástí a translací v nežádoucích směrech. Tohoto bylo dosaženo pomocí prvku Coupeled DOF (degrees of freedom) (obr. 17). Pokud se jedná o náhradu v ose X, bylo potřeba zamezit rotaci kolem této osy a odebrat možnosti translace v osách Y a Z. V ose Y pak obdobně rotace Y a translace X, Z. Kompletní seznam okrajových podmínek je na konci kapitoly na obr. 19 a v tabulce 1. [15]

Náhrada vahadel se tedy může pohybovat pouze ve směru translační vazby, tj. ve směru shodném s osou Z, neboli shodném s gravitačním zrychlením.



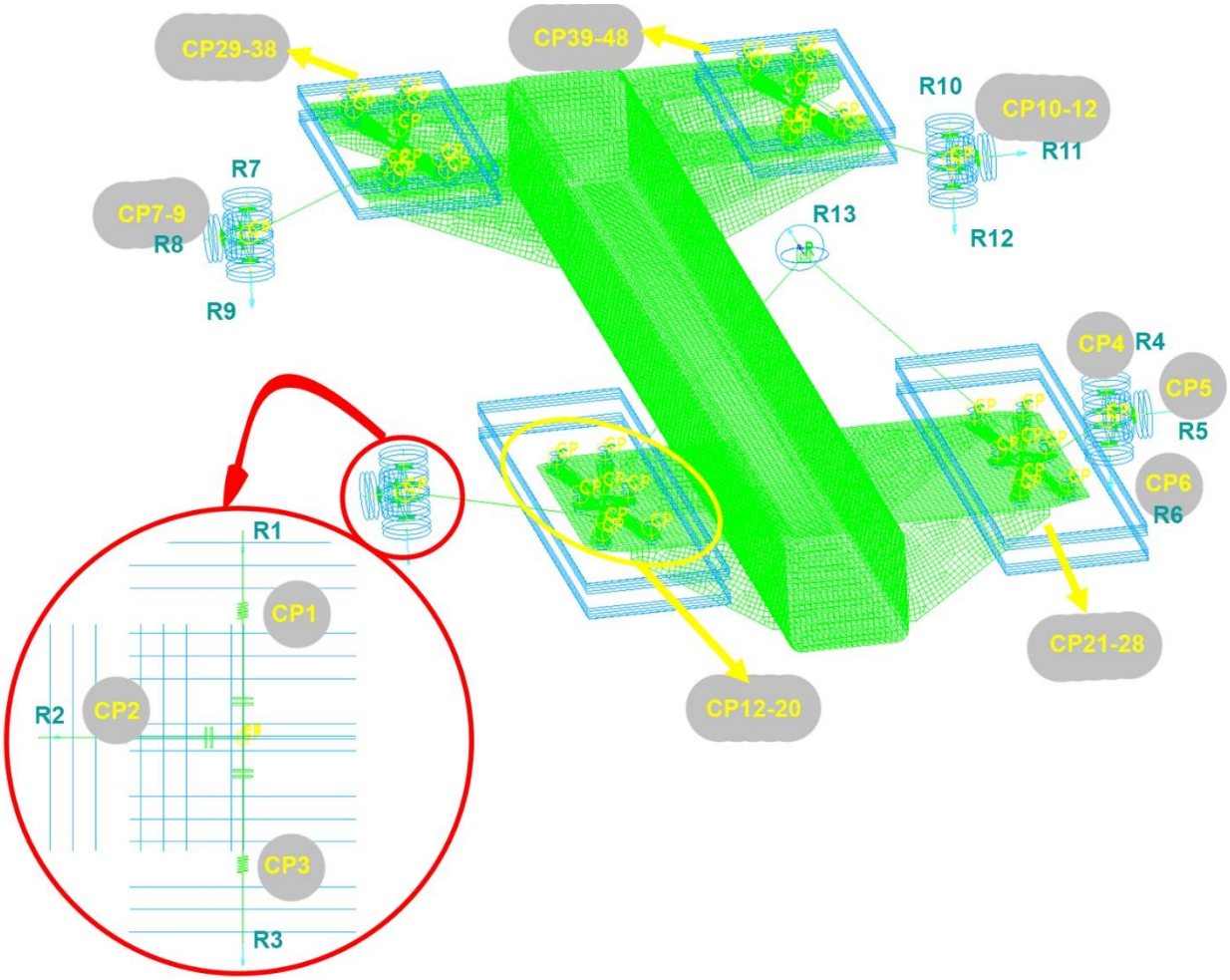
*Obr.17: Zamezení pohybů náhrady pomocí okrajové podmínky Coupeled DOF.*

Podobným způsobem se proti nežádoucím rotacím a translacím musely zabezpečit i náhrady šroubů a jednotlivých patek. Osy všech těchto těles pak ležely rovnoběžně s osou Y a byly jim odebrány všechny možnosti pohybu mimo translaci v ose Y. Tato podmínka pak má za následek možnost pohybu šroubu v místech, kde se reálně nachází díry. Toto omezení bylo realizováno opět pomocí prvku coupeled DOF (obr. 18).




*Obr.18: Pohled na náhradu s okrajovou podmínkou Coupeled DOF jednoho ze štroubů.*

Okrajovou podmínkou, která odebírá možnost tělesa se pohnout do směru osy Z, je pak podmínka v místě převodovkové skříně. Stejně jako reálná součást, pak i simulovaná sestava pak visí v ose za lano. Po odebrání této translace se tedy model stal staticky určitým, věrně nahrazujícím reálný stav a výpočet konvergujícím. Samotnou okrajovou podmínku lze detailně vidět již na obr. 1 v kapitole 4.1.3.




*Obr. 19: Označení okrajových podmínek.*

*Tab. 1: Přehled okrajových podmínek.*

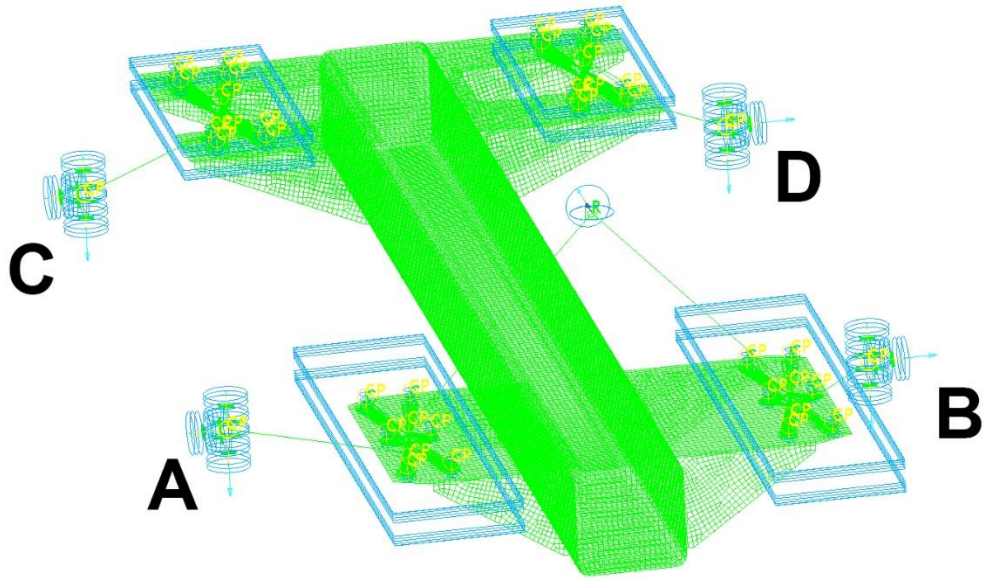
| okrajová podmínka | trans X | trans Y | trans Z | rot X | rot Y | rot Z | okrajová podmínka | trans X | trans Y | trans Z | rot X | rot Y | rot Z |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R1 | - | fixed | - | - | - | - | CP19 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R2 | fixed | - | - | - | - | - | CP20 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R3 | - | fixed | - | - | - | - | CP21 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R4 | - | fixed | - | - | - | - | CP22 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R5 | fixed | - | - | - | - | - | CP23 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R6 | - | fixed | - | - | - | - | CP24 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R7 | - | fixed | - | - | - | - | CP25 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R8 | fixed | - | - | - | - | - | CP26 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R9 | - | fixed | - | - | - | - | CP27 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R10 | - | fixed | - | - | - | - | CP28 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R11 | fixed | - | - | - | - | - | CP29 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R12 | - | fixed | - | - | - | - | CP30 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| R13 | - | - | fixed | - | - | - | CP31 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP1 | fixed | - | fixed | - | fixed | - | CP32 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP2 | - | fixed | fixed | fixed | - | - | CP33 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP3 | fixed | - | fixed | - | fixed | - | CP34 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP4 | fixed | - | fixed | - | fixed | - | CP35 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP5 | - | fixed | fixed | fixed | - | - | CP36 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP6 | fixed | - | fixed | - | fixed | - | CP37 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP7 | fixed | - | fixed | - | fixed | - | CP38 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP8 | - | fixed | fixed | fixed | - | - | CP39 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP9 | fixed | - | fixed | - | fixed | - | CP40 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP10 | fixed | - | fixed | - | fixed | - | CP41 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP11 | - | fixed | fixed | fixed | - | - | CP42 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP12 | fixed | - | fixed | - | fixed | - | CP43 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP13 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed | CP44 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP14 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed | CP45 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP15 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed | CP46 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP16 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed | CP47 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP17 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed | CP48 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed |
| CP18 | fixed | - | fixed | fixed | fixed | fixed | | | | | | | |

Posledním zátěžným vlivem bylo umístění točivého momentu do místa převodovky. Jak bylo zmíněno v kap. 3.1, tak maximální hodnoty při měření dosahované při vrtání a zaseknutí činily 50 kNm. Touto hodnotou byla tedy zatížena celá sestava. Točivý moment byl umístěn v ose Z. Tuto podmínku lze zřetelně vidět již na obr. 14 v kapitole 4.1.3

# 5 VÝPOČET

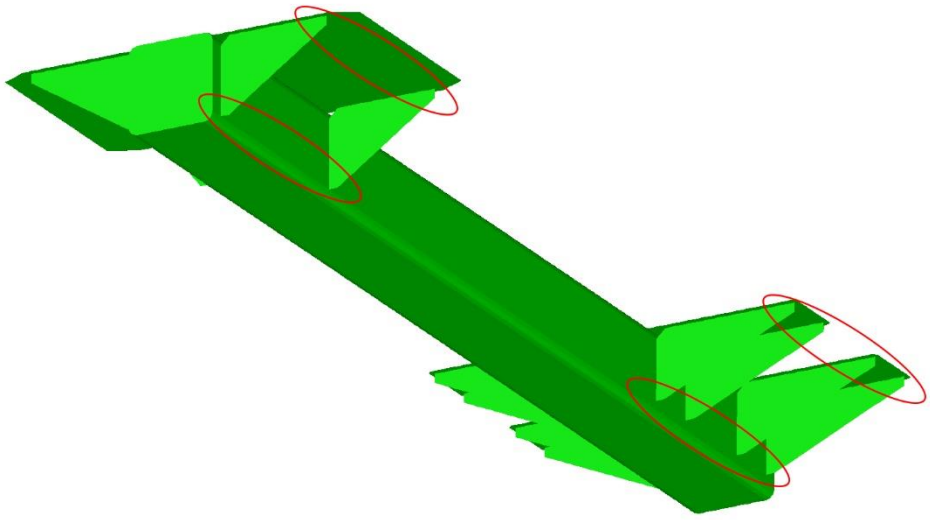
## 5.1 ZÁTĚŽNÉ STAVY

Před samotným zatížením je potřeba označit vazby. Jednotlivé náhrady proto budou považovány za vazby ABC a D viz obr. 20.




*Obr. 20: Označení náhrad jako vazby ABC a D.*

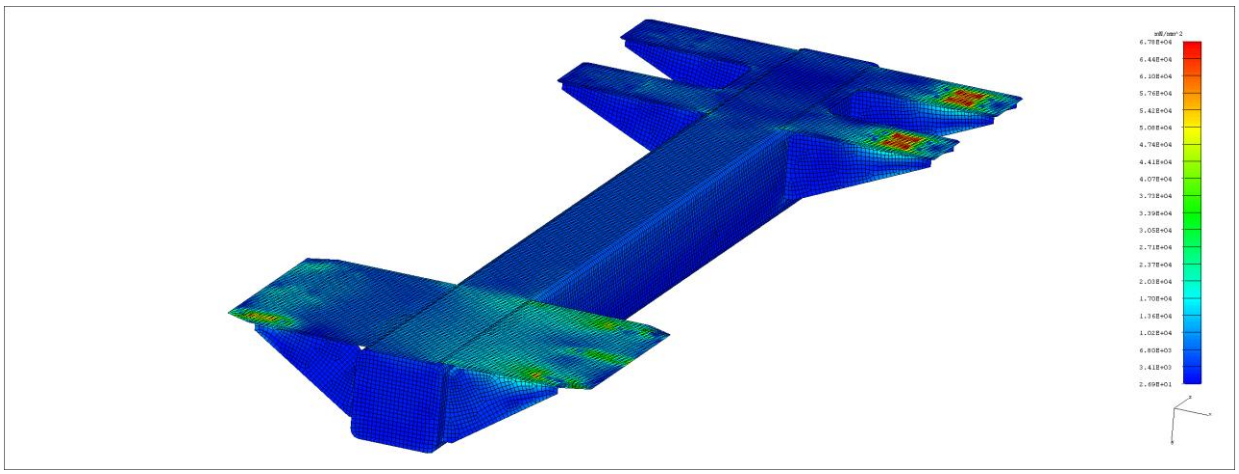
Během zatížení modelu se objevila kritická místa právě v místech, které odpovídají svarům mezi žebry a nosníkem či nosnými plechy, jak je vidět na obr. 22. Z tohoto důvodu byly jako zatěžovací stavy vybrány ty, kdy jsou aktivní všechny 4 vazby ABC i D a stejně tak i stavy, kdy dojde k přerušení kontaktu právě s jednou z vazeb v kritických místech, tj. vazba A a vazba B. Během zjišťování hodnot se prokázalo, že hodnoty napětí v kritických místech jsou vždy rozděleny po sadách (obr. 21), které měly podobné hodnoty napětí.



*Obr. 21: Sady podobných napětí v místech svarů.*

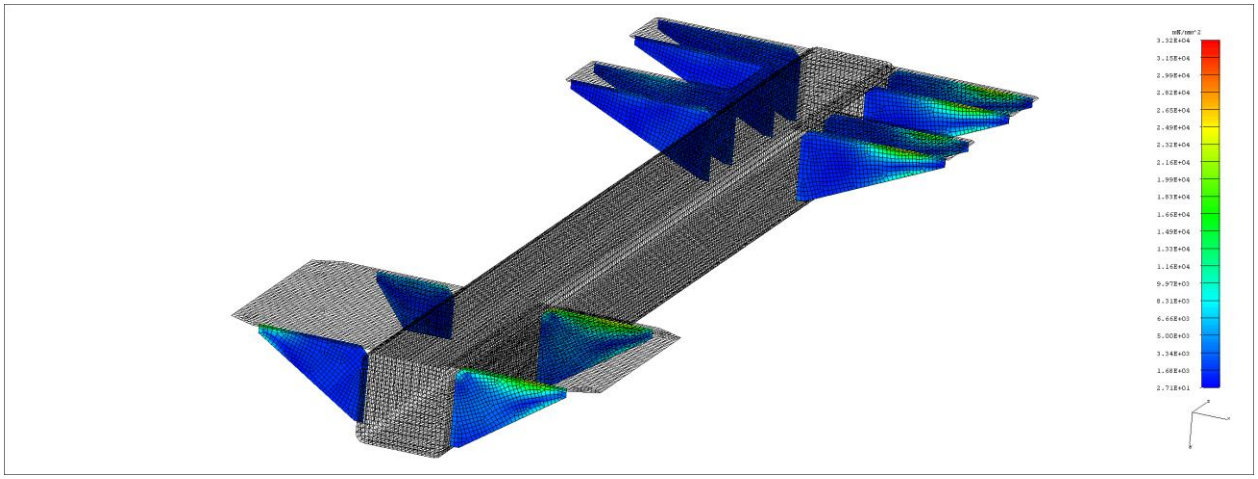
### 5.1.1 ROVNOMĚRNÉ ROZLOŽENÍ DO VŠECH REAKCÍ

Za předpokladu, že všechny vazby správně fungují a model je správně zatížen, jde z obr. 22 vidět, že nejvíce namáhanými částmi jsou desky v přímém kontaktu s patkami vahadel a převodovou skříní. Tyto součásti ovšem můžeme vynechat vzhledem k tomu, že se k těmto součástem reálně přičítá i tuhost převodovkové skříně a součásti nesoucí kladky vahadel.



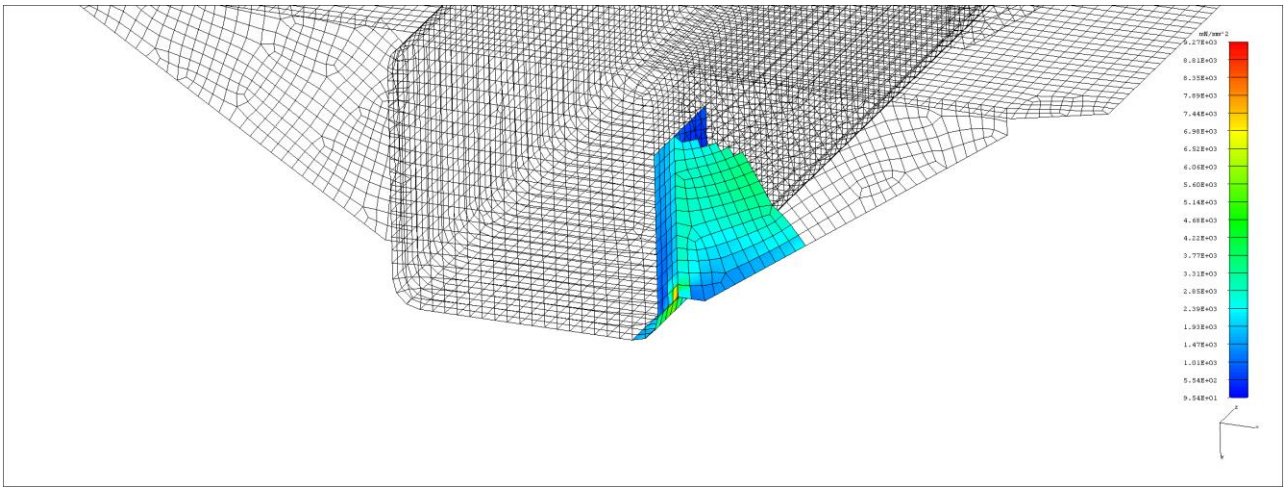
*Obr.22: Zatížení modelu carridge dle původní dokumentace, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, úplné zobrazení shell modelu, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,03–67,8 MPa.*

Při ponechání pouze žebrování lze na obr. 23 vidět, že část s největším napětím, a tedy i nejvíce namáhaná, je horní hrana. Dalšími místy zřetelně více namáhanými jsou některé z rohů, v nichž se vyskytuje svar.

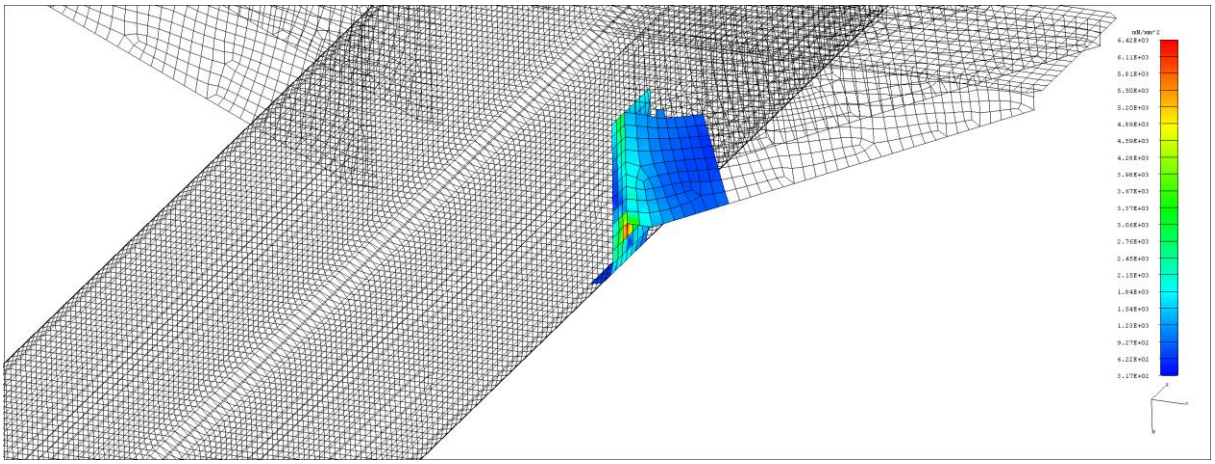


*Obr.23: Napětí na žebrování modelu carridge dle původní dokumentace, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, zobrazení žebrování shell modelu, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,03–33,2 MPa.*

Pokud se detailně podíváme pouze na jeden z přechodů mezi nosníkem a svarem, ať už se jedná o spodní žebro (obr. 24), či horní žebro (obr. 25), je zde zřejmé, že koncentrace napětí je nejvyšší právě v těchto místech. Rozdílem ovšem je napětí v těchto místech, kde na žebru předním je přibližně 9 MPa a za žebru zadním je 6 MPa.



*Obr. 24: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na spodní části carridge dle původní dokumentace, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,09–9,27 MPa.*

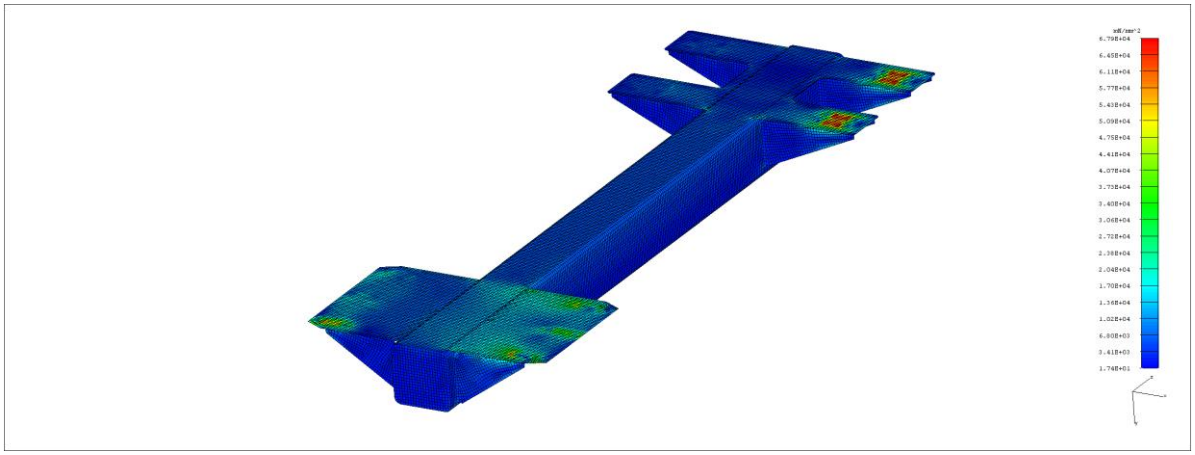


*Obr. 25: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na horní části carridge dle původní dokumentace, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,31–6,42 MPa.*

### 5.1.2 ROZLOŽENÍ DO REAKCÍ BCD

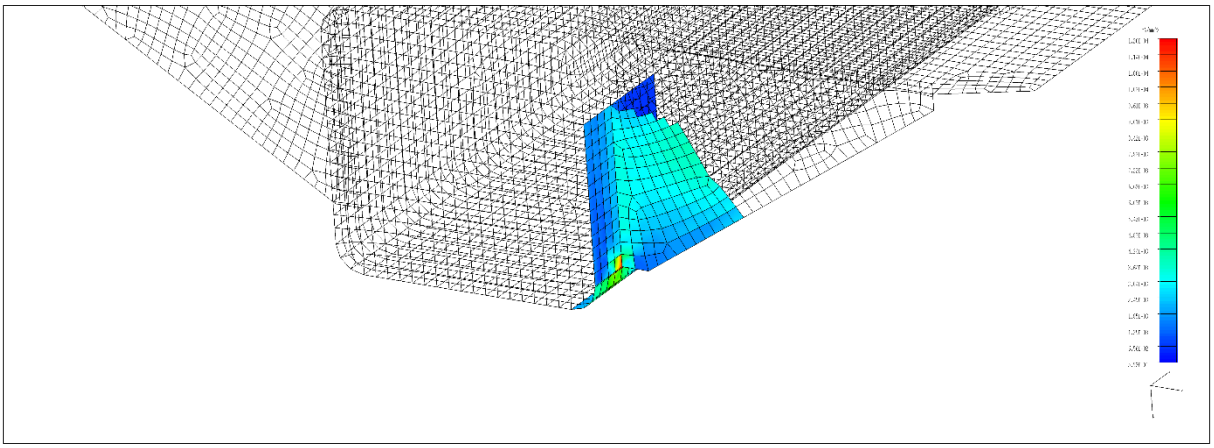
Během tohoto stavu byla nasimulována ztráta kontaktu s náhradou vahadel A (obr. 26).

Na první pohled zde není patrná žádná větší změna. Opět nejvíce namáhanou částí je horní deska, která ovšem zkresluje hodnoty napění na námi požadovaných místech.

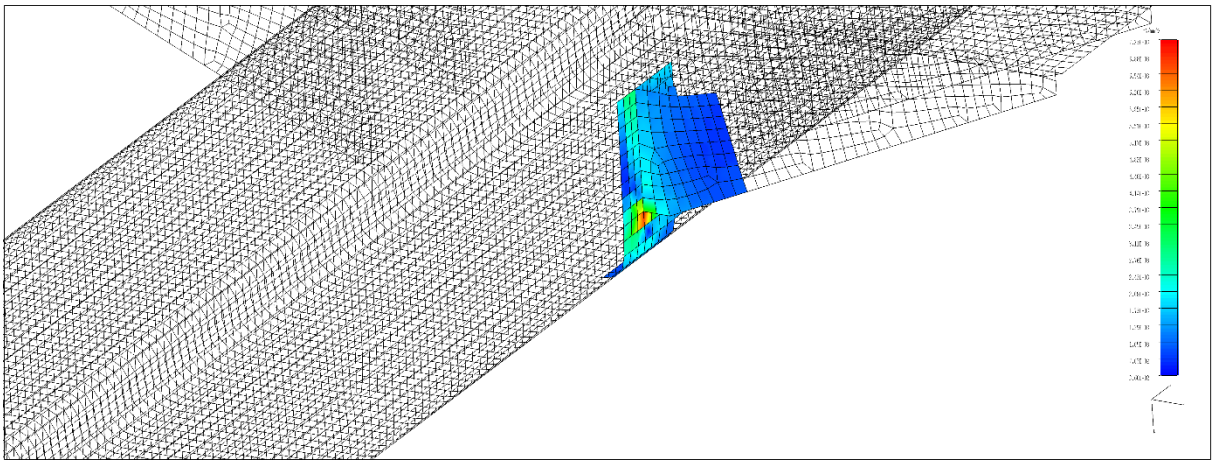


*Obr. 26: Zatížení modelu carridge dle původní dokumentace s nefunkční vazbou A, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, úplné zobrazení shell modelu, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,02–67,9 MPa.*

Na obr. 27 a 28 je pak zřejmé, že při vypuštění vazby A dojde ke zvýšení napětí na kritických místech na přední části až na hodnoty kolem 12 Mpa a na zadním je pak hodnota přibližně 7 MPa. Je tedy patrné, že pokud nejsou všechna vahadla v aktivním a rovnoměrném styku, dochází pak k nárůstu celkového napětí na carridgi.



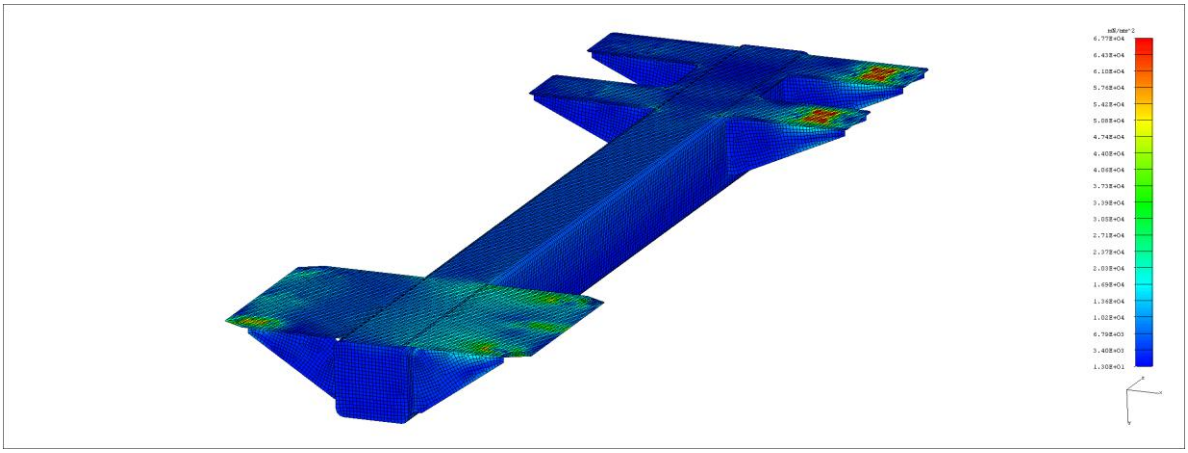
*Obr. 27: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na spodní části carridge dle původní dokumentace s nefunkčí vazbou A, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,06–12,0 MPa.*



*Obr. 28: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na horní části carridge dle původní dokumentace s nefunkčí vazbou A, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,36–7,23 MPa.*

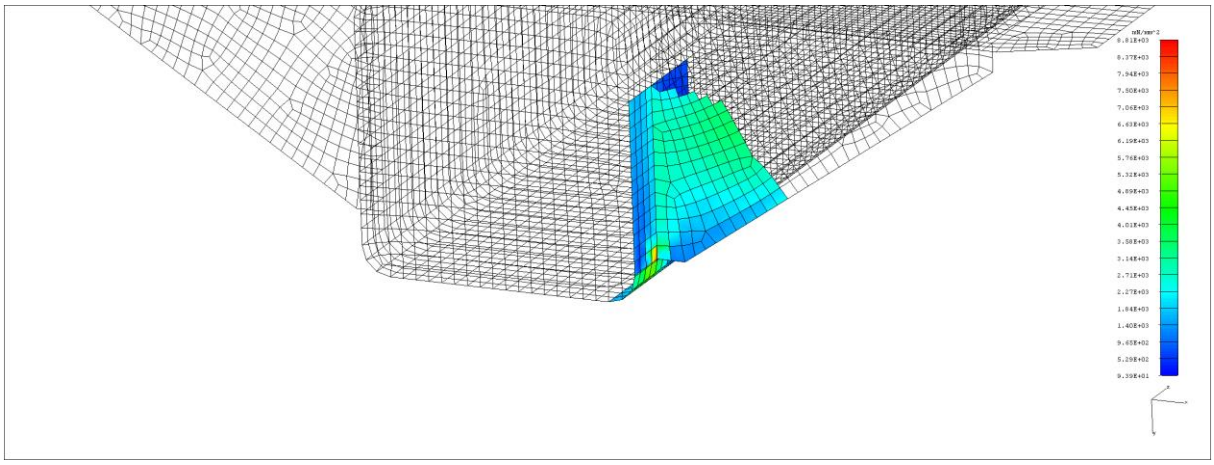
### 5.1.3 ROZLOŽENÍ DO REAKCÍ ACD

Při pohledu na zatížení celého carridge na obr. 29 je vidět úbytek napětí na námi pozorované straně carridge. Tento jev zapříčinila právě absence vazby B. Napětí na carridgi ovšem nezmizelo, pouze bylo přeneseno na část druhou, odvrácená strana než na obr. 21 a 22.

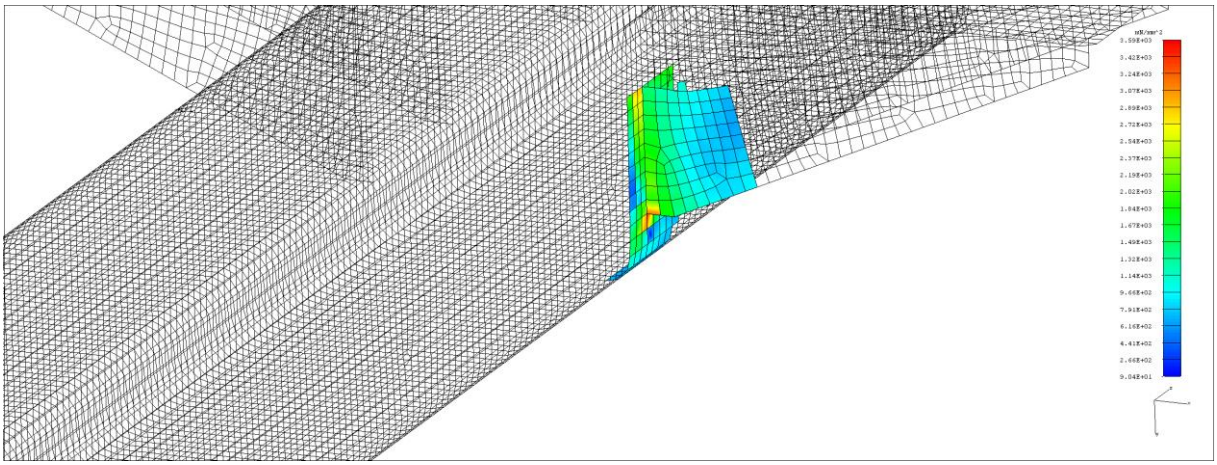


*Obr. 29: Zatížení modelu carridge dle původní dokumentace s nefunkční vazbou B, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, úplné zobrazení shell modelu, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,01–67,7 MPa.*

Při pozorování stejného místa styku žebra s nosníkem (obr. 30 a 31), lze vidět, že toto místo je koncentrátorem napětí. Stále žebro na spodní straně carridge přenáší větší napětí než žebro na horní straně. Hodnoty maximálního napětí jsou ovšem nižší z důvodu vyššího napětí na straně opačné. Konkrétní dosažené maximální hodnoty jsou na spodním pozorovaném žebru 8 MPa a 3 Mpa pro žebro horní.



*Obr.30: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na spodní části carridge dle původní dokumentace s nefunkčí vazbou B, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,09–8,81 MPa.*



*Obr. 31: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na horní části carridge dle původní dokumentace s nefunkčí vazbou B, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,09–3,59 MPa.*

## 5.2 VÝSLEDKY

Ze zátěžných stavů carridge dle původní dokumentace je tedy zřejmé, že tuhost carridge znemožňuje průchod napětí na všechna vahadla ve stejném poměru. Vzhledem k tomu je pak převážná část napětí přenášena pouze vahadly A a B a bylo potvrzeno, že ke vzniku trhlin budou náchylnější svary na spodní straně žebrování carridge.

Už z prvního zatížení, při němž byly funkční všechny 4 vazby, bylo napětí na spodní části carridge vyšší o přibližně 50 % (tab. 2).

Nejvyšších hodnot napětí bylo dosaženo pak při ztrátě kontaktu vazby A. Vzhledem k tuhosti carridge má tok napětí tendenci projít vazbou B. Právě tyto dva jevy, tuhost carridge a možnost ztráty kontaktu vazby, mají za následek velký přírůstek napětí na kritických místech.

*Tab. 2: Přehled napětí na původním modelu.*

| aktvní vazby | Místo | Napětí max [MPa] |
|---|---|---|
| ABCD | spodní | 9,27 |
| | horní | 6,42 |
| BCD | spodní | 12,61 |
| | horní | 7,23 |
| ACD | spodní | 8,81 |
| | horní | 3,59 |

Při stanovení dovoleného napětí tupých a koutových svarů se vychází z hodnot stanovených základním materiálem. V případě žebrování se jedná o materiál S235 JRN. [16]

Pro povolené napětí tedy platí:

$$\sigma_{DSV} = \alpha \cdot \sigma_D = \alpha \cdot \frac{R_e}{k} \tag{5.1}$$

kde $\alpha$ je součinitel tvarového spoje, $\sigma_D$je povolené napětí základního spoje, $R_e$ je mez kluzu základního materiálu a $k$ je součinitel bezpečnosti.

Pro koutový čelní svar namáhaný na tah je tabulkově stanovená hodnota $\alpha$ = 0,75. Koeficient bezpečnosti je zvolen 1,25. Hodnota $R_e$ pro ocel S235 je 235 MPa. Po dosazení do předchozího vzorce:

$$\sigma_{DSV} = 0{,}75 \cdot \frac{235}{1{,}25} = 141\text{MPa} \tag{5.2}$$

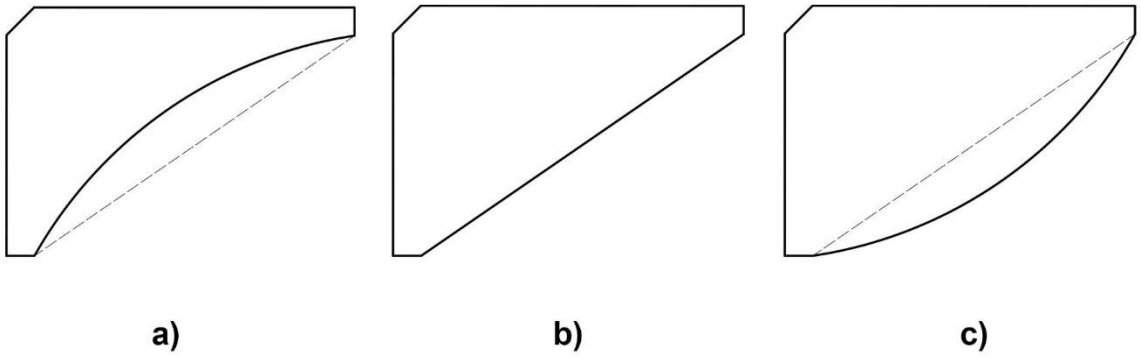
# 6 NAVRŽENÍ ÚPRAV

Do návrhů úprav se dostaly především dva aspekty. První z nich byl konstrukční. Do tohoto se řadí především tvar samotného žebra, jelikož výrazná změna velikosti žebra a umístění či počet žeber bylo problematické vzhledem k mnoha omezením, jak ze strany děr pro šrouby, tak i prostoru potřebného pro práci Top Drivu. Právě z důvodu prostorového omezení bylo vynecháno jedno žebro, vedle kterého při kompletaci sestavy leží schránka, jak lze vidět na obr. 32. Při snížení tuhosti žebrování by pak mohlo docházet ke zlepšení proudění napětí i na zadní desky a tím pádem by došlo k rovnoměrnější distribuci napětí.

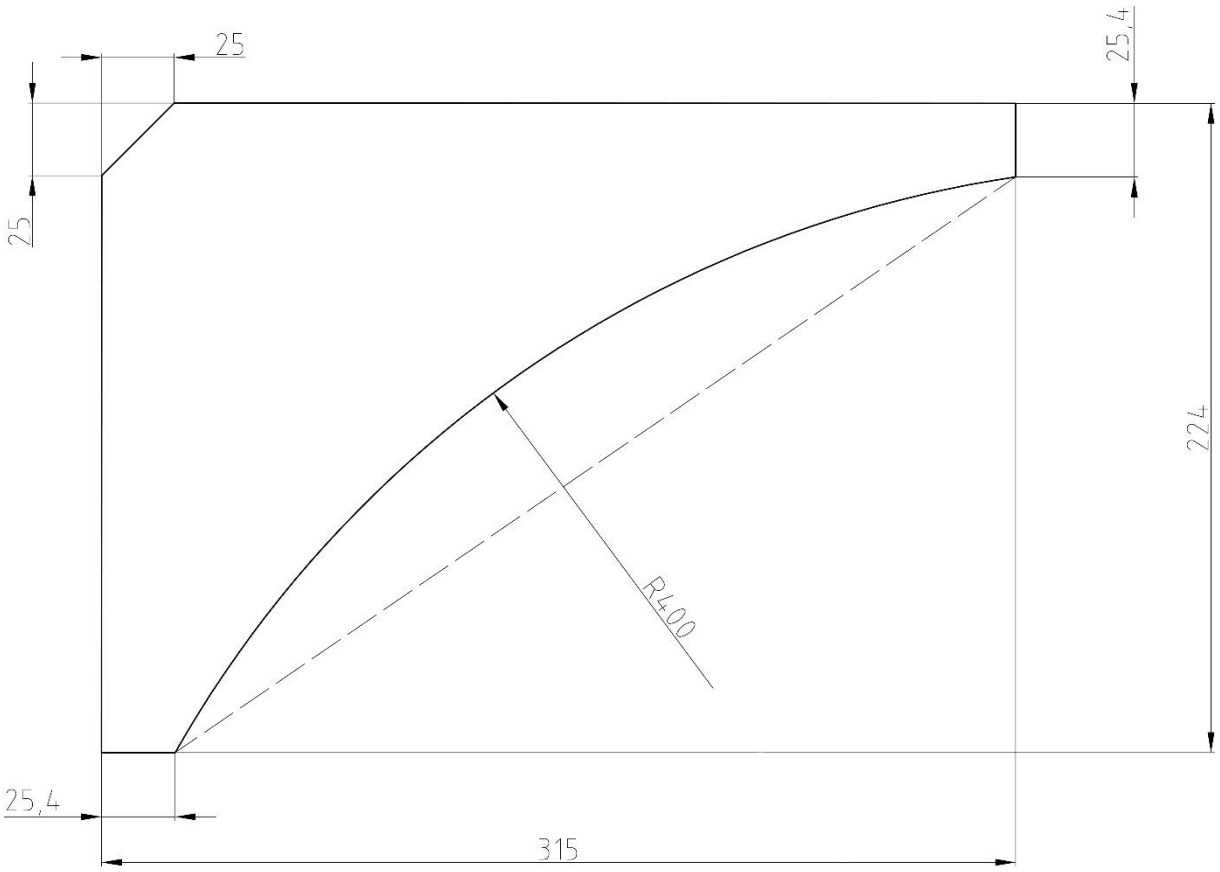
*Obr. 32: Detailní pohled na rozměrově odlišné žebro.*

## 6.1 MĚKKÉ ŽEBRO

Žebrování se dá při zjednodušení rozdělit na tři skupiny (obr. 33). Nejběžnějším a zároveň nejjednodušším typem žebrování je žebro neutrální. Toto žebro mívá svou vnější stranu rovnou. Druhým typem je pak žebro tuhé. Takovéto žebro se vyznačuje výrazně vyšší tuhostí a tvar může mít například na vnější straně konkávní. Posledním ze základního rozdělení žebrování je pak žebro měkké. Toto žebro se pak vyznačuje tuhostí naopak sníženou oproti žebru neutrálnímu. Tvarově pak odpovídá přesně opačně žebru tuhému, tj. konvexní.

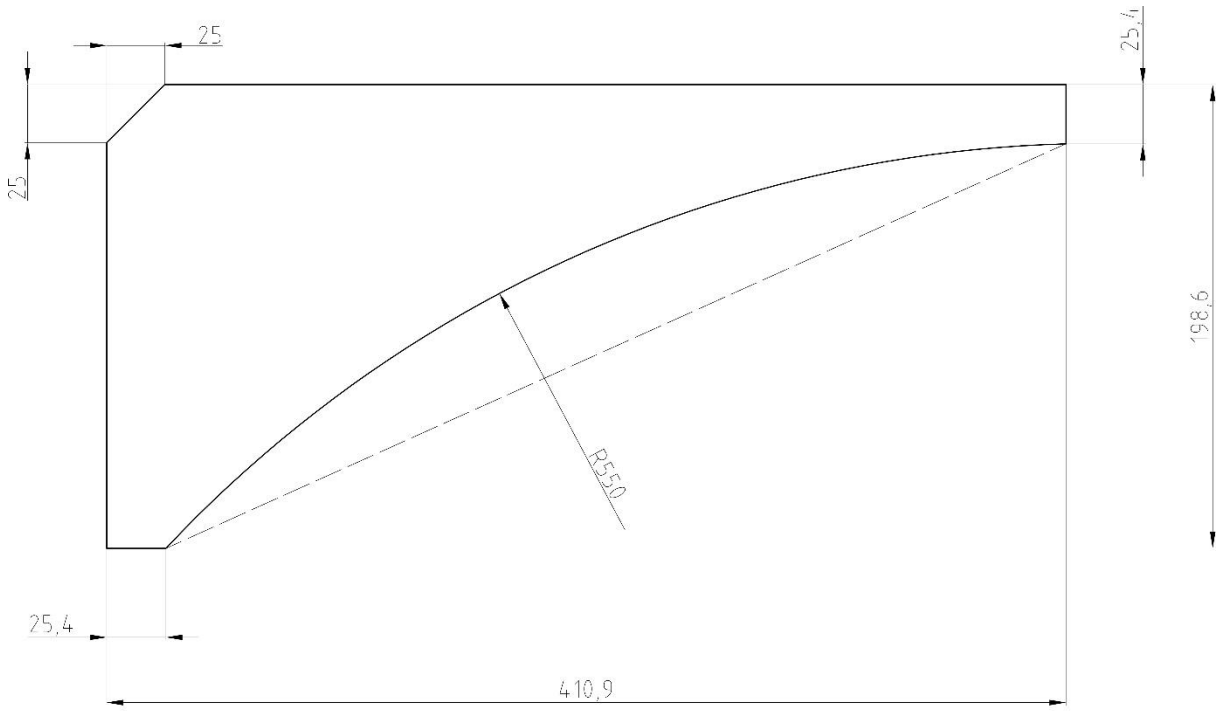



*Obr.33: Základní druhy žebrování a) měkké, b) neutrální, c) tuhé.*



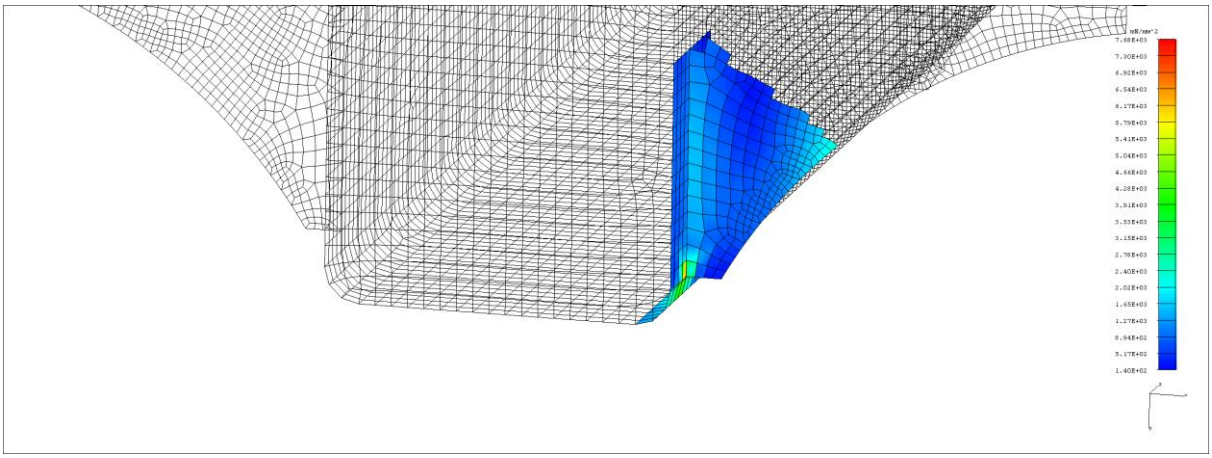

*Obr. 34: Modifikace spodního žebra na měkké.*

Úprava tvaru žebra byla zvolena s ohledem na možnost rychlé aplikace do reálných podmínek spolu s možností snadné aplikace do výroby. Jedná se o vyřezání oblouku kruhovitého tvaru umístěného tak, aby vrcholy pomyslné kružnice ležely co nejblíže hranám konců žeber, ale zároveň byly stále mimo tyto hrany. Úpravy těchto žeber viz obr. 34 a 35.

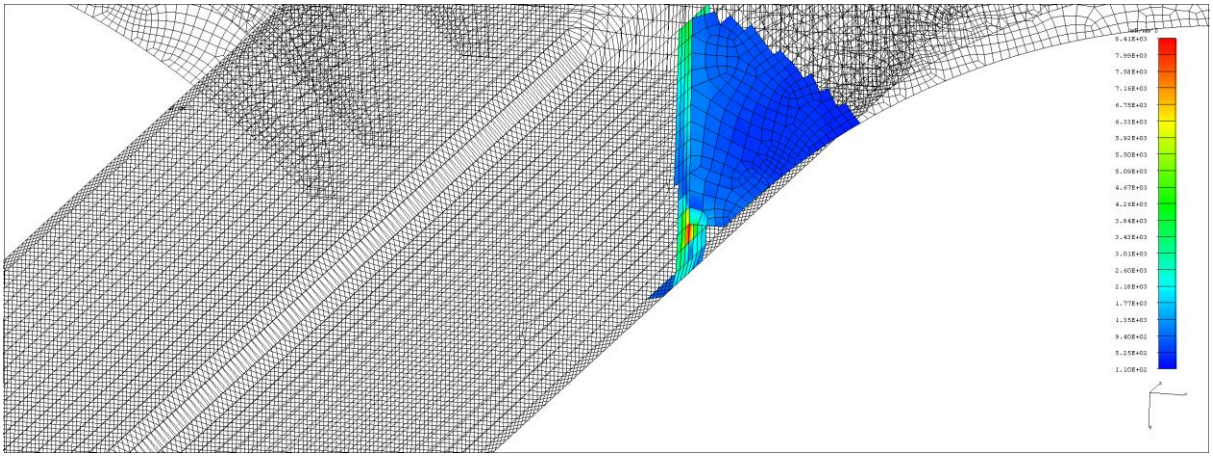



*Obr. 33: Modifikace horního žebra na měkké.*

Při aplikaci měkkého žebra na carridge je patné, že dojde k lepší distribuci točivého momentu napříč součástí. Z tohoto důvodu se pak na obr. 36 a 37 při simulaci zatížení modelu ve sledovaných místech objevilo napětí o hodnotách kolem 7 MPa na předním žebru a 8 MPa na zadním žebru. Tyto hodnoty vycházely z předpokladu všech aktivních vazeb ABCD.

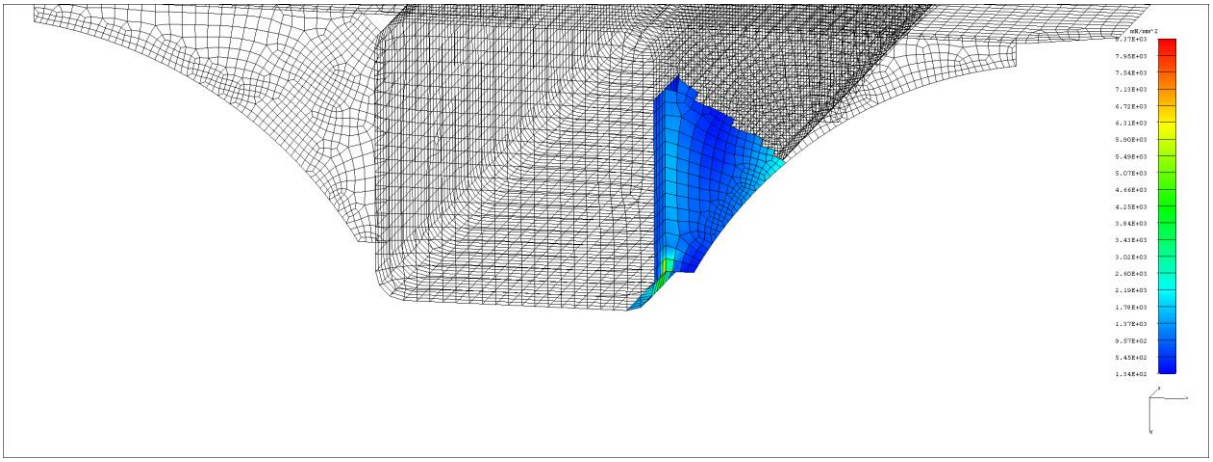


*Obr. 36: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na spodní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,14–7,68 MPa.*

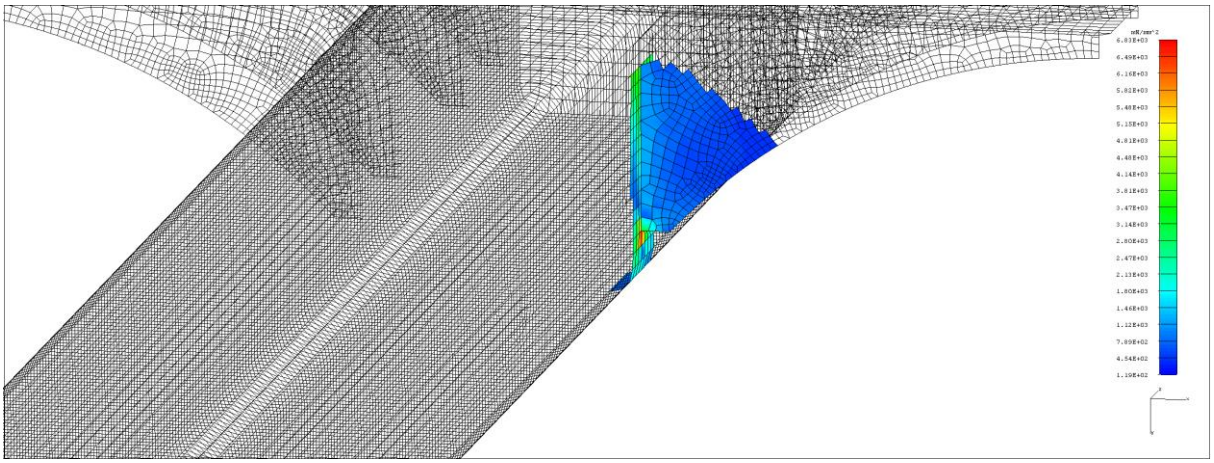


*Obr. 37: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na horní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,11–8,41 MPa.*

Při zatížení součásti jen pomocí vazeb BCD a vynechání vazby A, kde bylo v předchozím případě dosaženo nejvyššího napětí, pak došlo k poklesu hodnot z 12 Mpa na 8 Mpa na žebru spodním (obr. 38). Na žebru horním se pak hodnoty změnily ze 7 Mpa na 6 Mpa (obr 39).

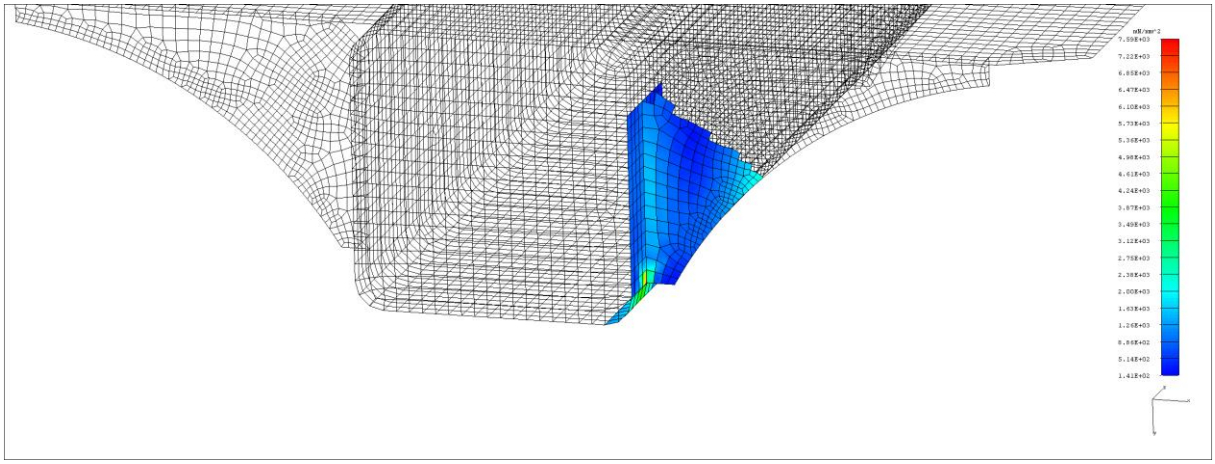


*Obr. 38: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na spodní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil s nefunkčí vazbou A, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,13–8,37 MPa.*

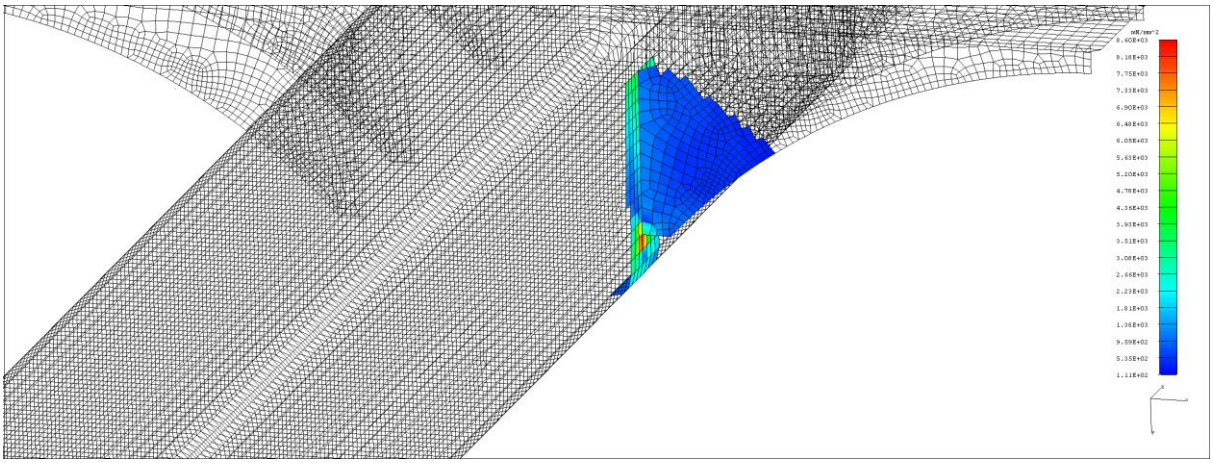


*Obr. 39: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na horní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil s nefunkčí vazbou A, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,11–6,83 MPa.*

Pokud se podíváme, jak dopadly hodnoty napětí na pozorovaných místech s funkčními vazbami ACD a absencí vazby B, lze pozorovat, že napětí na spodní části carridge se snížilo z 8 Mpa na 7 MPa vůči žebru s neutrálním profilem (obr. 40). Na zadní straně se hodnoty zvýšily z 3 MPa na 8 MPa (obr 41).



*Obr. 40: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na spodní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil s nefunkčí vazbou B, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,14–7,59 MPa.*



*Obr. 41: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na horní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil s nefunkčí vazbou B, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,11–8,60MPa.*

*Tab. 3: Přehled napětí na původním modelu a úprava žebrování*

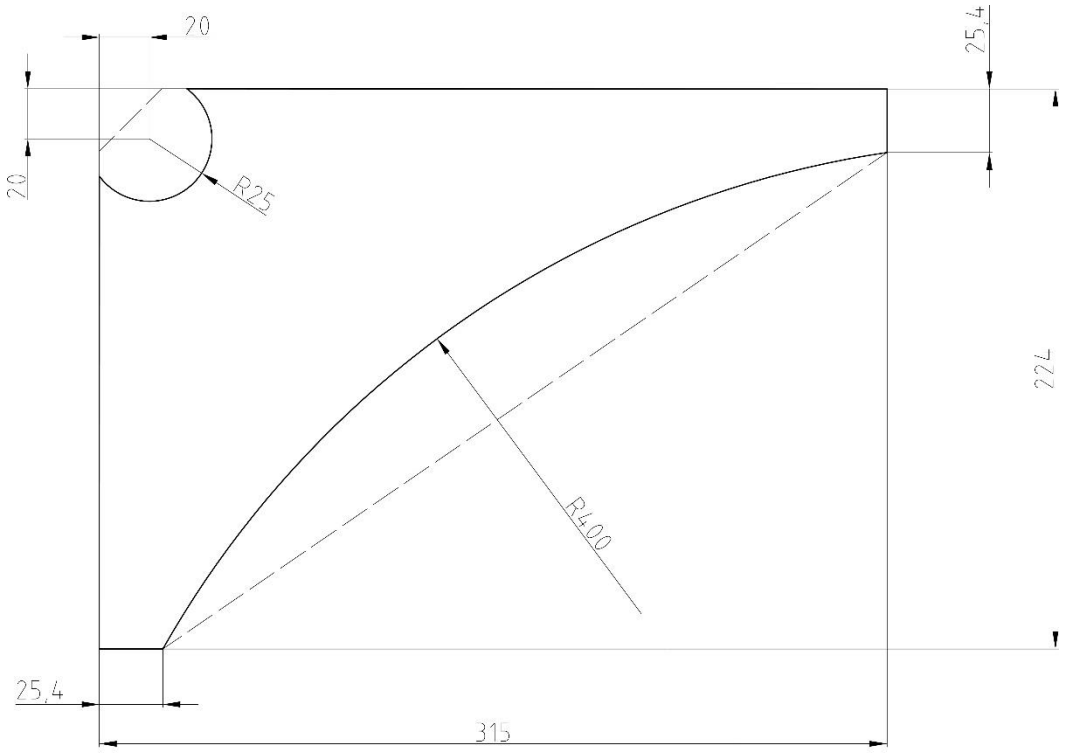
| aktvní vazby | Místo | Napětí max [MPa] | |
|---|---|---|---|
| | | původní | měkké žebro |
| ABCD | spodní | 9,27 | 7,68 |
| | horní | 6,42 | 8,41 |
| BCD | spodní | 12,61 | 8,37 |
| | horní | 7,23 | 6,83 |
| ACD | spodní | 8,81 | 7,59 |
| | horní | 3,59 | 8,31 |

Jak lze vidět v tab. 3, tak na pozorovaných místech styku žebra s nosníkem došlo díky erudované úpravě tvaru žebra k rovnoměrnější distribuci napětí do všech směrů. Původní tok zatěžoval především spodní část carridge. Dále pak při absenci jedné ze spodních vazeb bylo vyšší napětí vždy na celé straně carridge s aktivní vazbou.

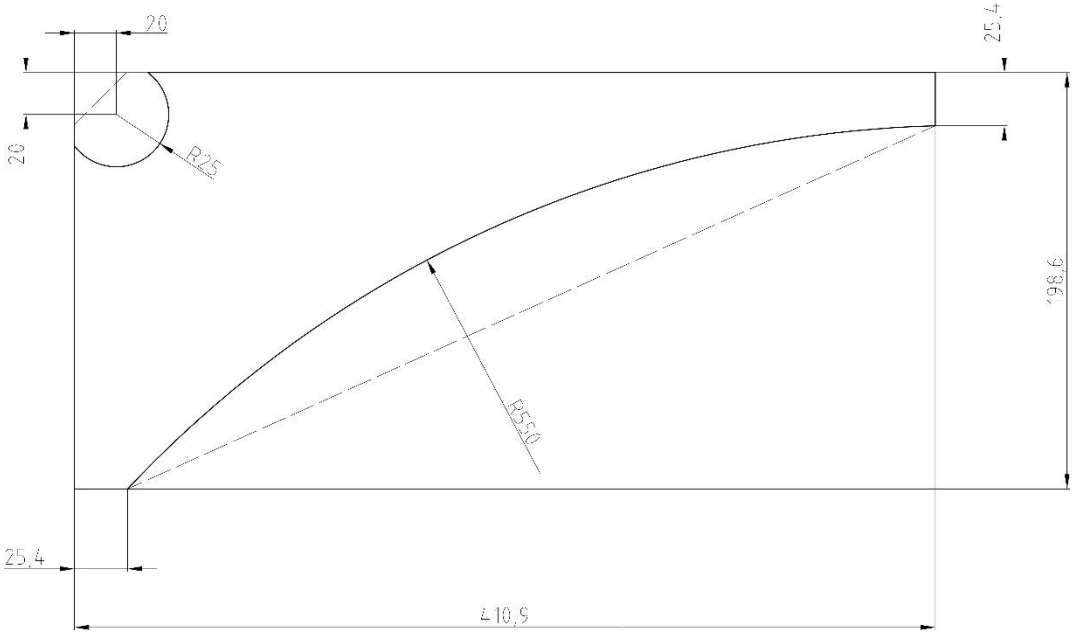
S měkkými žebry pak dochází k rovnoměrné distribuci napětí napříč všemi žebry, ať už se jedná o stav, kdy jsou aktivní všechny vazby ABCD, nebo je vypuštěna jedna z nich.

## 6.2 UVOLNĚNÍ VNITŘNÍHO PROSTORU PRO SVAŘOVÁNÍ

Další modifikací žebrování byla úprava vnitřního prostoru žebra. Jedná se o vyřezání kruhovité díry viz obr. 42 a 43. Tato modifikace žebra nemá na výsledné vnitřní napětí žádný markantní dopad, jak je patrné z porovnání vůči žebru bez této díry (obr. 44–49).

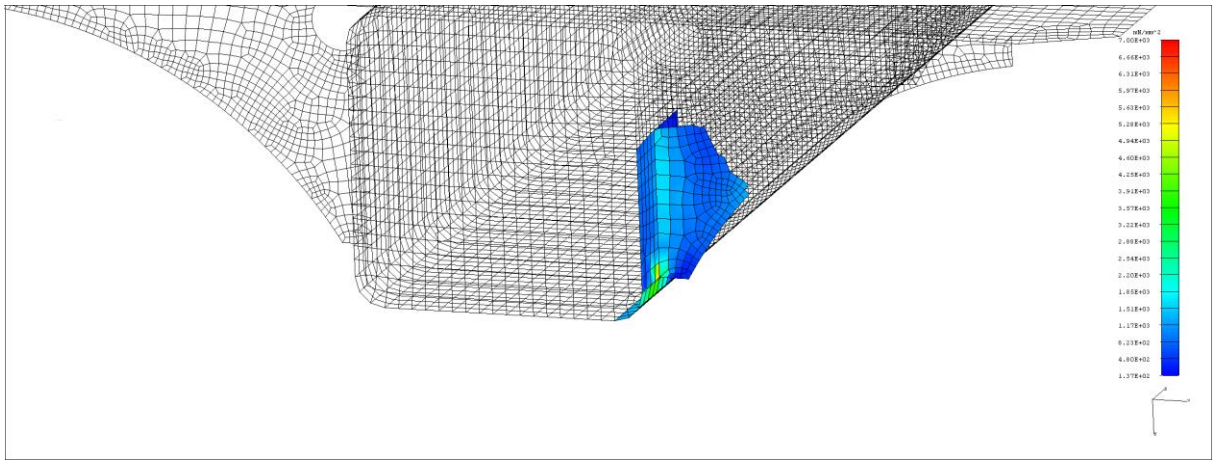



*Obr. 42: Modifikace vnitřního prostoru spodního žebra.*

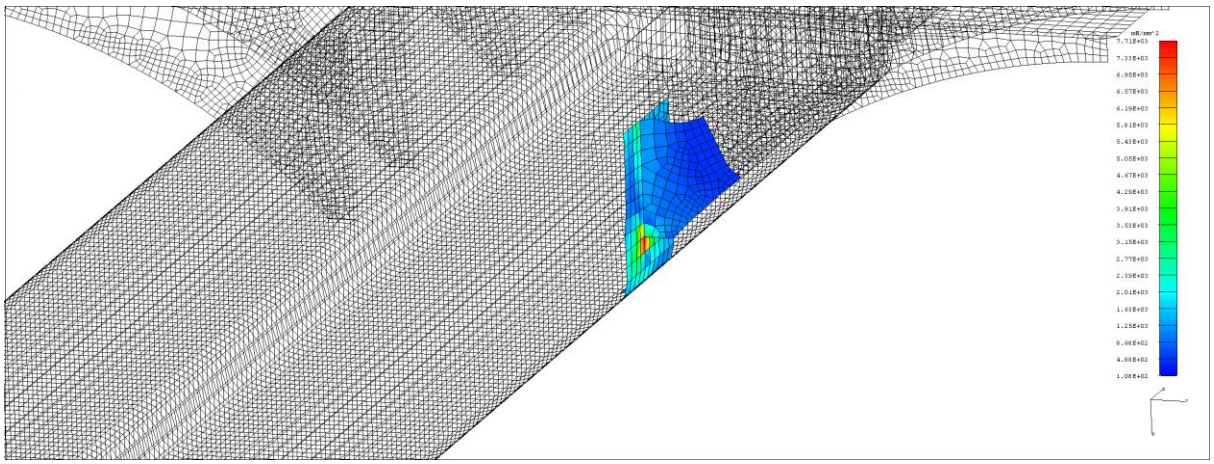



*Obr. 43: Modifikace vnitřního prostoru horního žebra.*

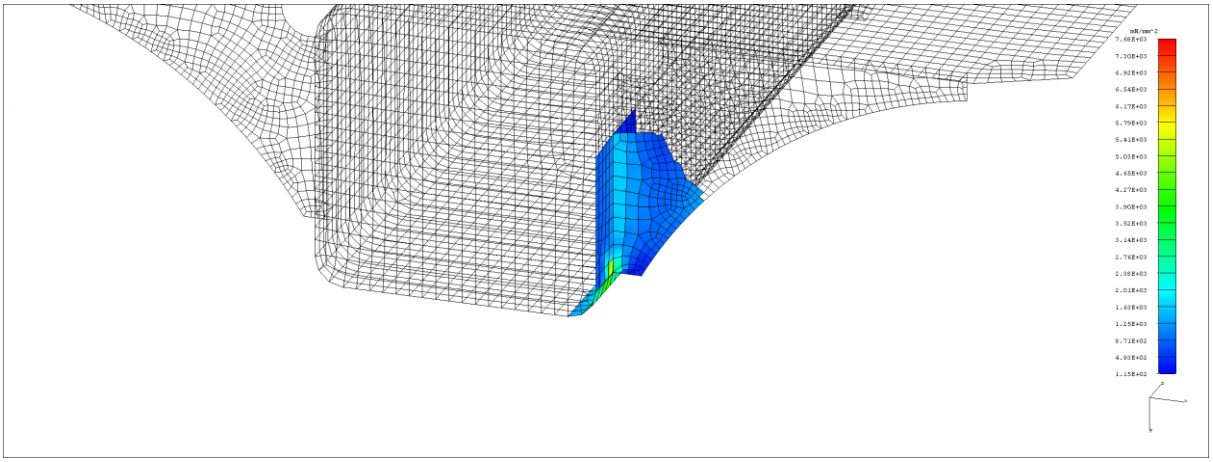
Praktický dopad to však může mít při svařování součástí a tím i nepřímý dopad na výslednou životnost a celkovou odolnost svaru. Původní řešení spočívalo ve vyřezání trojúhelníkového prostoru o délce odvěsen 25,4 mm. Problematika svařování v takto stísněném prostoru může mít za následek zhoršení vlastností svaru.



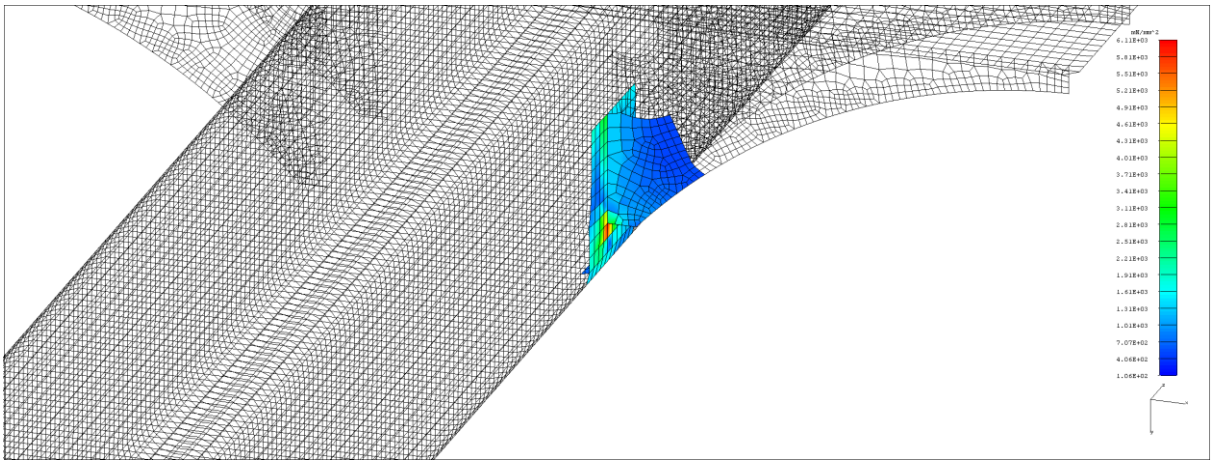
*Obr. 44: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na spodní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil spolu s vyříznutím otvoru, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,13–7,00 MPa.*



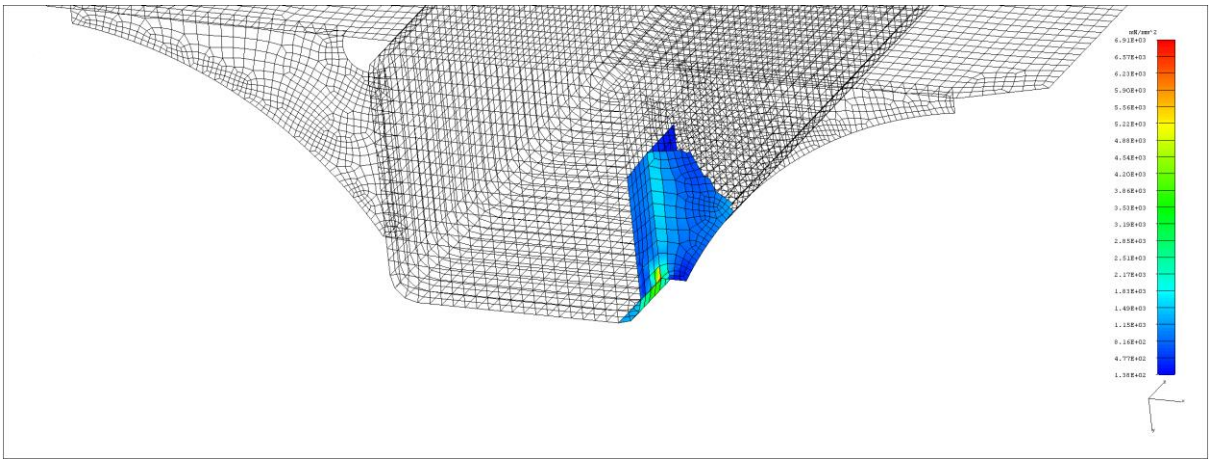
*Obr. 45: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na horní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil spolu s vyříznutím otvoru, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,10–7,71 MPa.*



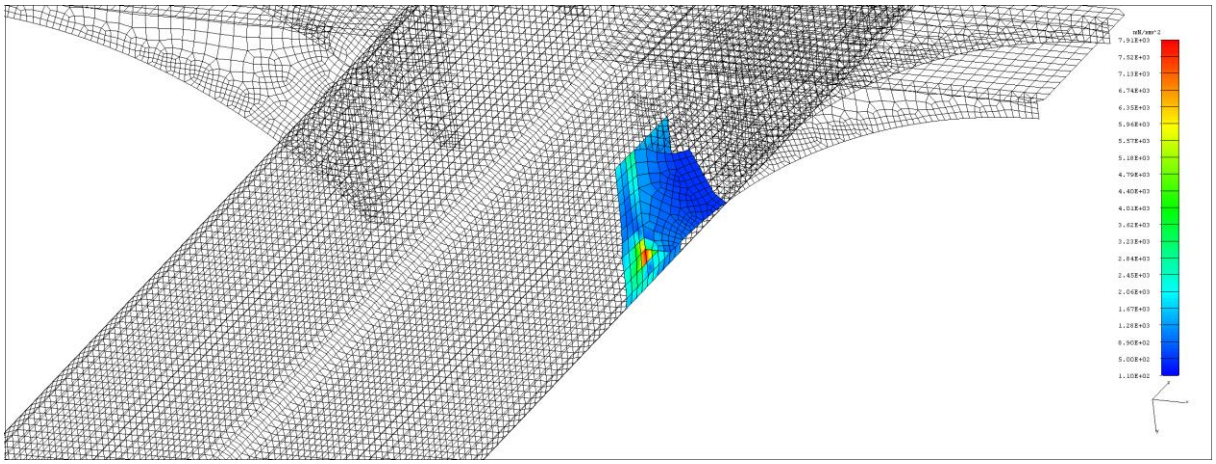
*Obr. 46: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na spodní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil spolu s vyříznutím otvoru s nefunkčí vazbou A, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,11–7,68 MPa.*



*Obr. 47: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na horní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil spolu s vyříznutím otvoru s nefunkčí vazbou A, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,10–6,11 MPa.*



*Obr. 48: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na spodní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil spolu s vyříznutím otvoru s nefunkčí vazbou B, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,13–6,91 MPa.*



*Obr. 49: Pohled na napětí vybraného místa mezi žebrem a nosníkem na horní části carridge s úpravou žebrování na měkký profil spolu s vyříznutím otvoru s nefunkčí vazbou B, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, částečné zobrazení shell modelu, kombinace nosníku a žebrování, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,11–7,91 MPa.*

*Tab. 4: Přehled napětí na původním modelu a po úpravách*

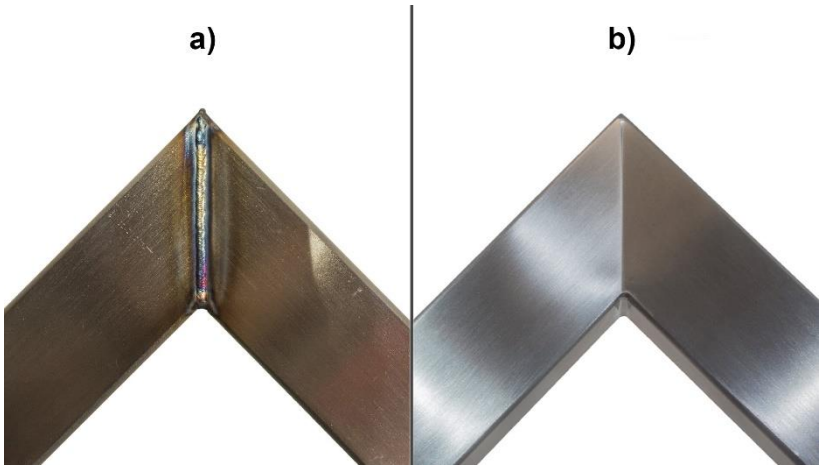
| aktvní vazby | Místo | Napětí max [MPa] | | |
|---|---|---|---|---|
| | | původní | měkké žebro | měkké žebro + výřez |
| ABCD | spodní | 9,27 | 7,68 | 7,00 |
| | horní | 6,42 | 8,41 | 7,71 |
| BCD | spodní | 12,61 | 8,37 | 7,68 |
| | horní | 7,23 | 6,83 | 6,11 |
| ACD | spodní | 8,81 | 7,59 | 6,91 |
| | horní | 3,59 | 8,31 | 7,91 |

Z tab. 4 vyplývá, že modifikace tvaru žebrování významně napomohla zrovnoměrnění zátěže na jednotlivých kritických místech. Vyřezání samotného otvoru také napomohlo k celkovému snížení napětí v těchto místech, nicméně nejvýznamnější dopad tato úprava má na možnost vytvoření preciznějšího svarového spoje.

## 6.3 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ

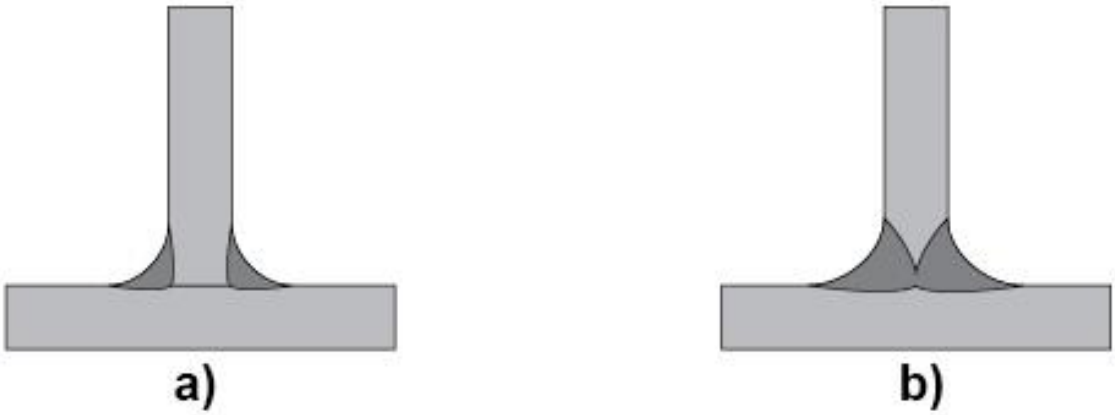
Druhým aspektem je pak technologie výroby samotného carridge. Především svařování jednotlivých částí.

Technologie, jež byla použita na svařování těchto částí, pak může mít taky obrovský dopad na tvorbu trhlin. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, tak dle informací techniků společnosti se v oblasti okrajů hran žebrování jedná o koutové svary. Základní úpravou v případě takovéhoto svaru by mělo být zabroušení (obr. 50), případně zaleštění (obr. 51), tohoto svaru pro eliminaci veškerých nerovností, které působí jako koncentrátory napětí a mají vliv na vznik trhlin. Vhodnějším způsobem by pak mohlo být například provaření kořene při svařování (obr. 52) následované opět zabroušením, případně zaleštěním tohoto svaru.



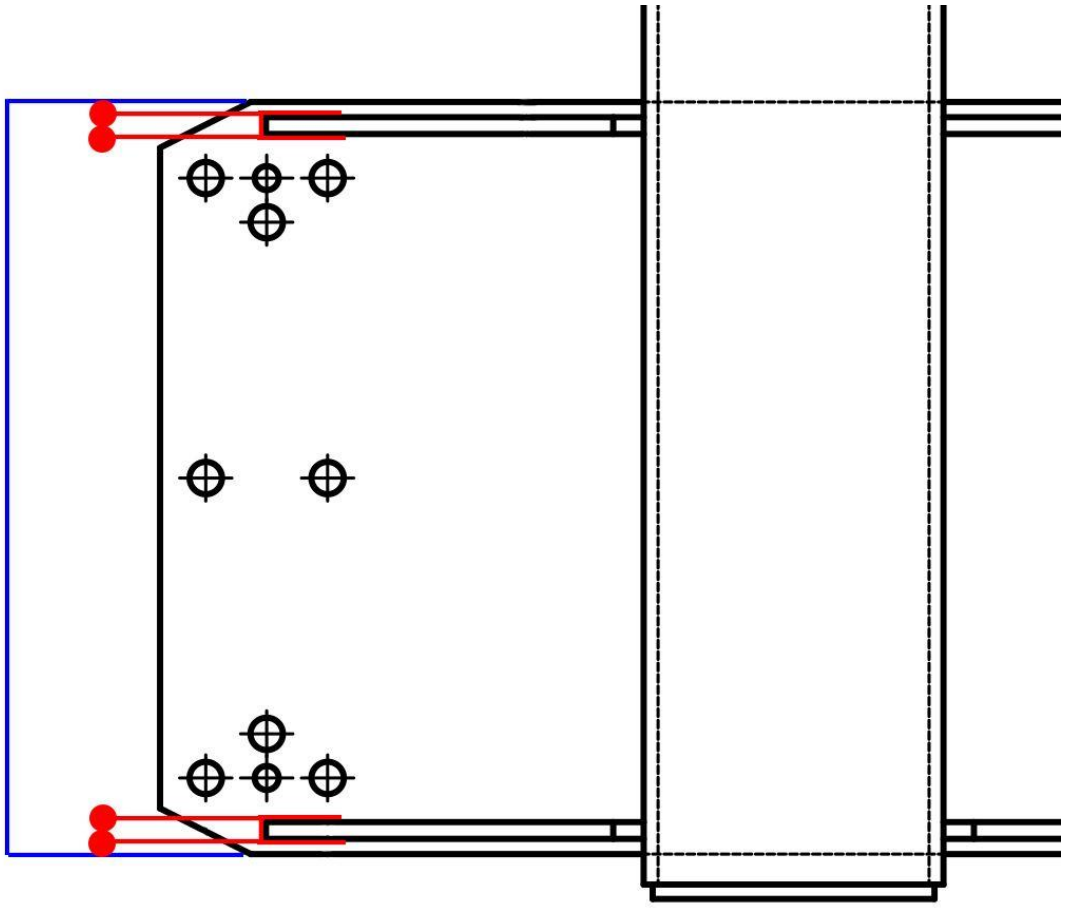

*Obr. 50: Ukázka před a po broušení svaru a) neupravený svar, b) broušený svar. [18]*

*Obr. 51: Ukázka před a po leštění svaru. [19]*




*Obr. 52: a) koutový svar, b) koutový svar s provařením kořene. [20]*

Další z úprav technologie svaru by mohlo být vynesení místa zápalu mimo kritické místo. Tato úprava by však vyžadovala i prodloužení nosných desek carridge. Svar by následně nebyl ukončen v kritickém místě u žebra, ale byl by vyveden dál na konec prodloužené desky, kde by byl ukončen a bylo by zde vytvořeno místo zápalu (obr. 53). Po vytvoření všech svarů by pak tento nadstavený kus desky byl odříznut i s místem zápalu. Problém této metody je ovšem v širší změně celé výroby carridge a možnost aplikace pouze na jeden ze čtyř svarů. [21]



*Obr. 53: Svar s místem zápalu mimo žebro.*

# ZÁVĚR

Oslovil jsem firmu MND (Moravské naftové doly), jenž mi zadala řešení problému výskytu trhlin v oblasti svařovaného spoje na součásti carridge Top Drivu. Tato součást je vysoce namáhána a slouží k přenosu točivého momentu mezi převodovou skříní a vrtnou věží.

V první části diplomové práce je provedena stručná rešerše vrtných souprav, které používá společnost MND.

V druhé části byl proveden rozbor zatěžovacích stavů vedoucí k zjištění výskytu trhlin. Původní předpokládané rozložení zatížení počítalo s rovnoměrnou distribucí točivého momentu na rolny carridge. Volba nevhodného žebrování a technologie svařování učinila součást příliš tuhou pro původní zvolené předpoklady. Statickým rozborem bylo zjištěno, že součást je dvakrát staticky neurčitá. Pro následný MKP model byly redukovány okrajové podmínky.

Na model byly aplikovány zjednodušující výpočtové předpoklady a okrajové podmínky nahrazující reálný stav součásti během provozu. V kapitole č. 4 byly verifikovány zátěžné stavy. Došlo k vytvoření ověřovacího modelu, který pro nás sloužil jako etalon.

Výpočty a simulace prokázaly velkou tuhost součásti. Toto chování způsobovalo nerovnoměrnou distribuci točivého momentu na jednotlivé rolny a inkriminovaná svařovaná místa fungovala jako velké koncentrátory napětí.

Následně se zabývám úpravami carridge. Při použití měkkého profilu žebra bylo dosaženo lepších mechanických vlastností a rovnoměrnějšího rozložení napětí v celé součásti. Sekundární úpravou měkkého žebra bylo vytvoření díry na jeho vnitřní straně pro lepší přístup během svařování. Mou další navrhovanou změnou byla náhrada „koutového svaru“ za „koutový svar s provařeným kořenem“ a protažením místa zápalu mimo kritická místa. Finální úpravou svarů bylo broušení a leštění za účelem minimalizování potenciálního místa vzniku trhlin.

V závěru diplomové práce se zabývám analýzou vypočtených MKP výsledků, jenž shrnuje tabulka č.3. Změnou profilu žebra došlo ke snížení maximálních hodnot napětí a lepší celkové distribuci napětí. Toto napětí po změnách dosahuje maximální hodnoty 7,91 MPa, což broušený a leštěný svar z hlediska vysokocyklové únavy vydrží.

# POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] O Společnosti. MND Drilling & Services [online]. Lužice, 2017 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.mnd-drilling.eu/cs/o-spolecnosti/

[2] Galerie Fotek. *MND Drilling & Services* [online]. Lužice, 2015 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.mnd-drilling.eu/wp-content/uploads/2015/09/P2201717.jpg

[3] *Technical manual land drilling rig "BENTEC 350 AC"*. Berlin, 2006.

[4] Bentec Drilling rigs. In: *BenTEC* [online]. Bad Bentheim, 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.bentec.com/wp-content/uploads/2016/12/Bentec_Drilling_Rigs_EN_122016.pdf

[5] *BENTEC 250 Drilling Rig*. Lužice, 2014. Dostupné také z: http://www.mnd-drilling.eu/wp-content/uploads/2015/09/210x297_Drilling_Rig_BENTEC_250.pdf

[6] Bentec 250 AC. *MND Drilling & Services a.s.* [online]. Lužice, 2016 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.mnd-drilling.eu/wp-content/uploads/2015/07/B250-e1460636395289-630x800.jpg

[7] *BENTEC 450 Drilling Rig*. Lužice, 2012. Dostupné také z: http://www.mnd-drilling.eu/wp-content/uploads/2015/09/210x297_Drilling_Rig_BENTEC_450.pdf

[8] Bentec 450 AC. *MND Drilling & Services a.s.* [online]. Lužice, 2016 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.mnd-drilling.eu/wp-content/uploads/2015/07/Bentec-450-630x800.jpg

[9] *BENTEC 350 Drilling Rig*. Lužice, 2008. Dostupné také z: http://www.mnd-drilling.eu/wp-content/uploads/2015/09/210x297_Drilling_Rig_BENTEC_350.pdf

[10] Bentec 350 AC. *MND Drilling & Services a.s.* [online]. Lužice, 2016 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.mnd-drilling.eu/cs/vrtani/seznam-vrtnych-souprav/#item-2078

[11] Offshore Oil Drilling Rig. In: *EP mag* [online]. 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://www.epmag.com/sites/default/files/article-images/2016/01/offshore%20oil%20drilling%20rig%20platform.jpg

[12] FLORIAN, Z., PELLANT, K., SUCHÁNEK, M.: *Technická mechanika I – Statika.* Brno: Učební text: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2004.

[13] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). 2010. Konstruování strojních součástí. Překlad Marti n Hartl. V Brně: VUTIUM. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

[14] Česká technická norma - Eurokód 3: *Navrhování ocelových konstrukcí* ČSN EN 1993-1-8: Část 1-8: Navrhování styčníků. 2006. Praha: Český normali zační institut.

[15] *NX I-deas 6.1:* Návod k softwaru, společnost Siemens, 2009

[16] 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.

*[17]* ČSN EN ISO 12215-5 *Malá plavidla - Konstrukce trupu a rozměry - Část 5: Výpočtové tlaky pro jednotrupá plavidla, výpočtová napětí, stanovení rozměrů*. Praha: Český normalizační institut, 2008

[18] Vierkantrohr - Gehrungsschleifen. In: *Youtube* [online]. 2015 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://i.ytimg.com/vi/rRRHnwCfhiI/maxresdefault.jpg

[19] Welded joint options. In: *CDS Architectural Metalwork* [online]. 2014 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://cdsmetalwork.ie/wp-content/uploads/wordpress/1-11.jpg

[20] Weld joint. In: *ASpiersoft* [online]. 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://static1.olympus-ims.com/data/Image/fd-tutorial/Sec6_WeldJointOvrvw.png?rev=6809

[21] *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. Lucembursko: Euro Inox, 2007 [cit. 2017-05-22]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | | |
|---|---|---|
| g | [m·s$^{-2}$] | Gravitační zrychlení |
| HP | [W] | Imperiální jednotka výkonu |
| *t* | [10$^3$·Nm] | Tuna |
| *kNm* | [10$^3$·Nm] | Točivý moment |
| *MND* | [-] | Moravské naftové doly |
| $\mu$ | [-] | počet nezávislých neznámých parametrů |
| $\upsilon$ | [-] | počet použitelných statických podmínek |
| *lb* | [kg] | Imperiální jednotka hmotnosti |
| *FE2* | [-] | nehmotný prvek s nekonečnou tuhostí |
| *FE3* | [-] | nehmotný prvek s konečnou tuhostí |
| *i* | [-] | počet stupňů volnosti vázaného tělesa |
| $i_v$ | [-] | počet stupňů volnosti volného tělesa |
| *n* | [-] | počet těles |
| $\xi$ | [-] | počet složek mechanického pohybu |
| $\eta$ | [-] | počet deformačních parametrů omezených stykovými vazbami |
| $\varepsilon$ | [-] | poměrné délkové prodloužení |
| $\sigma$ | [MPa] | mechanické napětí |
| *E* | [MPa] | Youngův modul pružnosti |
| $\Delta l$ | [m] | délkové přetvoření |
| *l* | [m] | celková délka |
| $f_{yb}$ | [MPa] | Jmenovitá mez kluzu |
| $f_{ub}$ | [MPa] | Jmenovitá mez pevnosti |
| $\sigma_{DSV}$ | [MPa] | povolené napětí svaru |
| $\sigma_D$ | [MPa] | povolené napětí základního spoje |
| $R_e$ | [MPa] | mez kluzu materiálu |
| $\alpha$ | [-] | součinitel tvarového spoje |
| *k* | [-] | Koeficient bezpečnosti |
| *A* | [-] | Vazba A |
| *B* | [-] | Vazba B |
| *C* | [-] | Vazba C |
| *D* | [-] | Vazba D |

# SEZNAM PŘÍLOH

Příloha – 1: Deformované modely

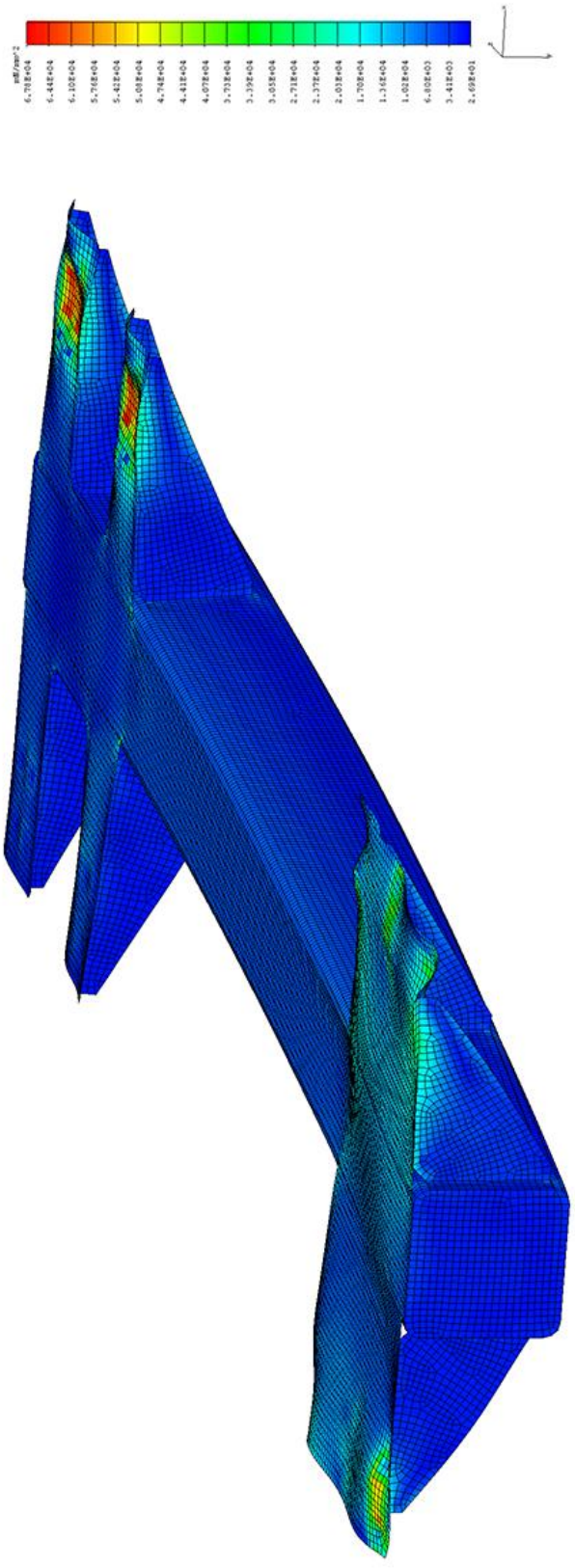
Příloha – 2: Napětí na žebrování

Příloha – 3: Označení žebrování

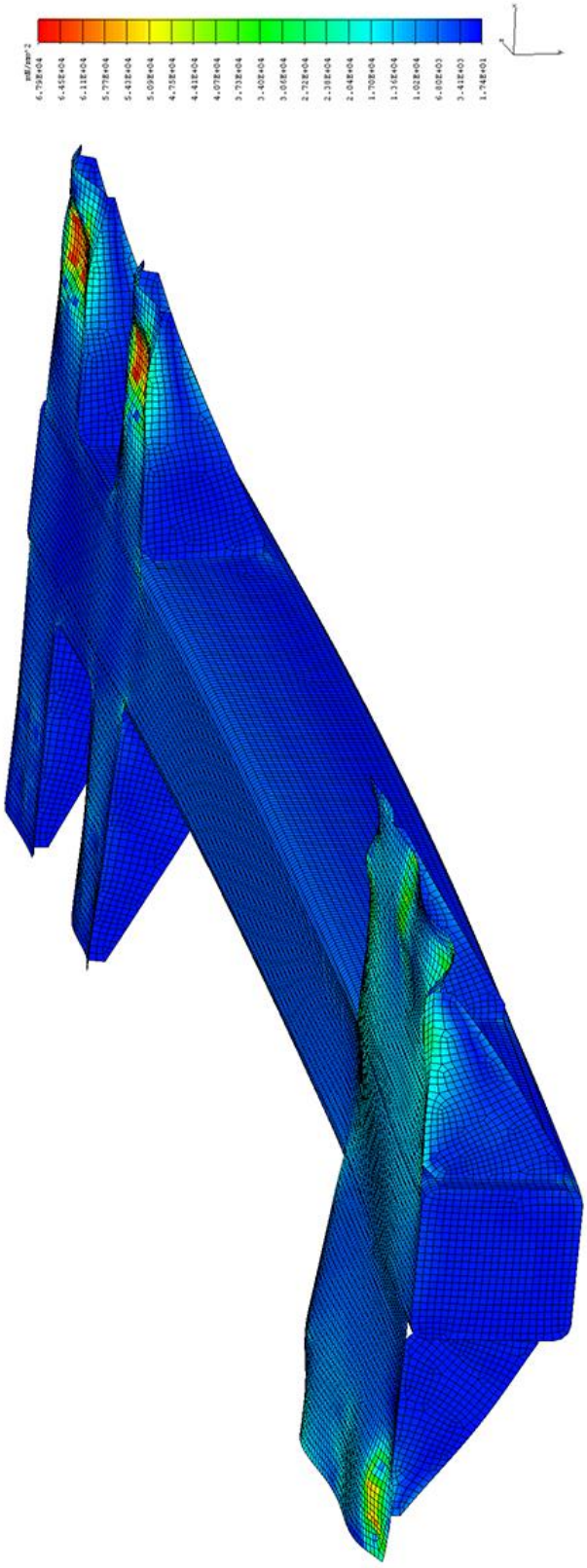
Příloha – 4: Tabulka napětí v kritických místech

Příloha – 5: Grafy napětí v kritických místech

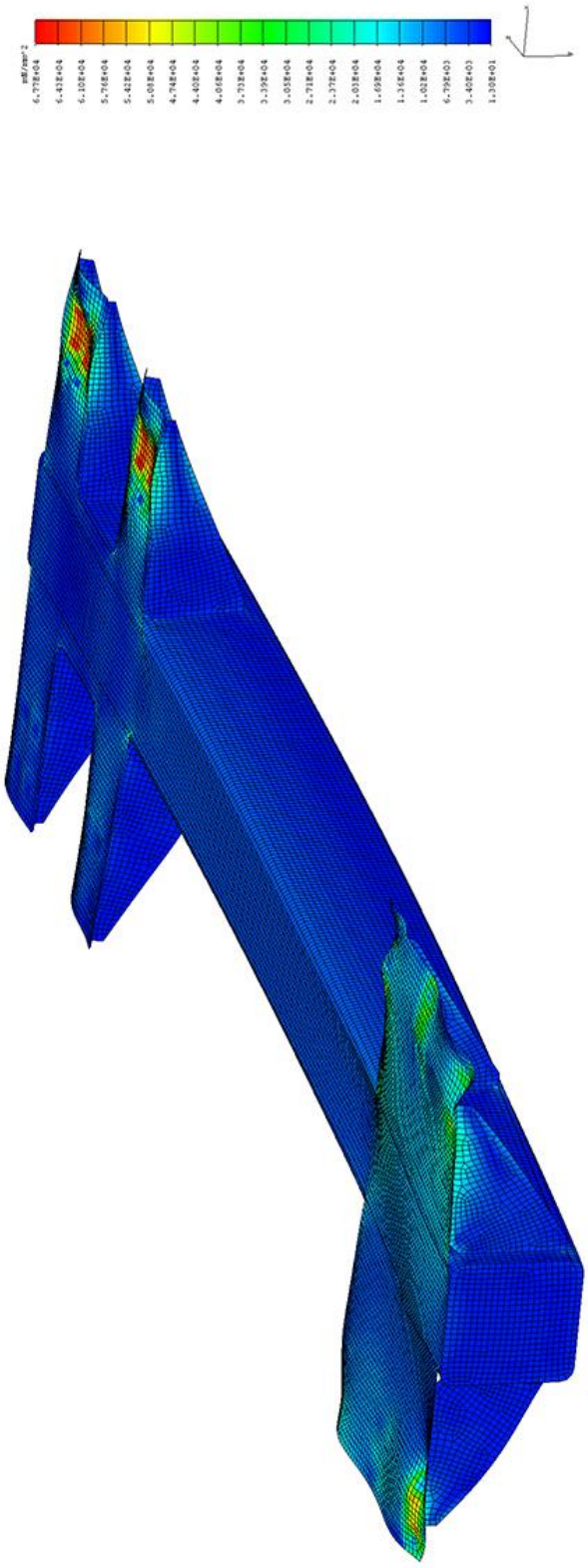
Zatížení modelu carridge dle původní dokumentace, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazby ABCD, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazení napětí 0,03–67,8 MPa, maximální deformace 1,29 mm.



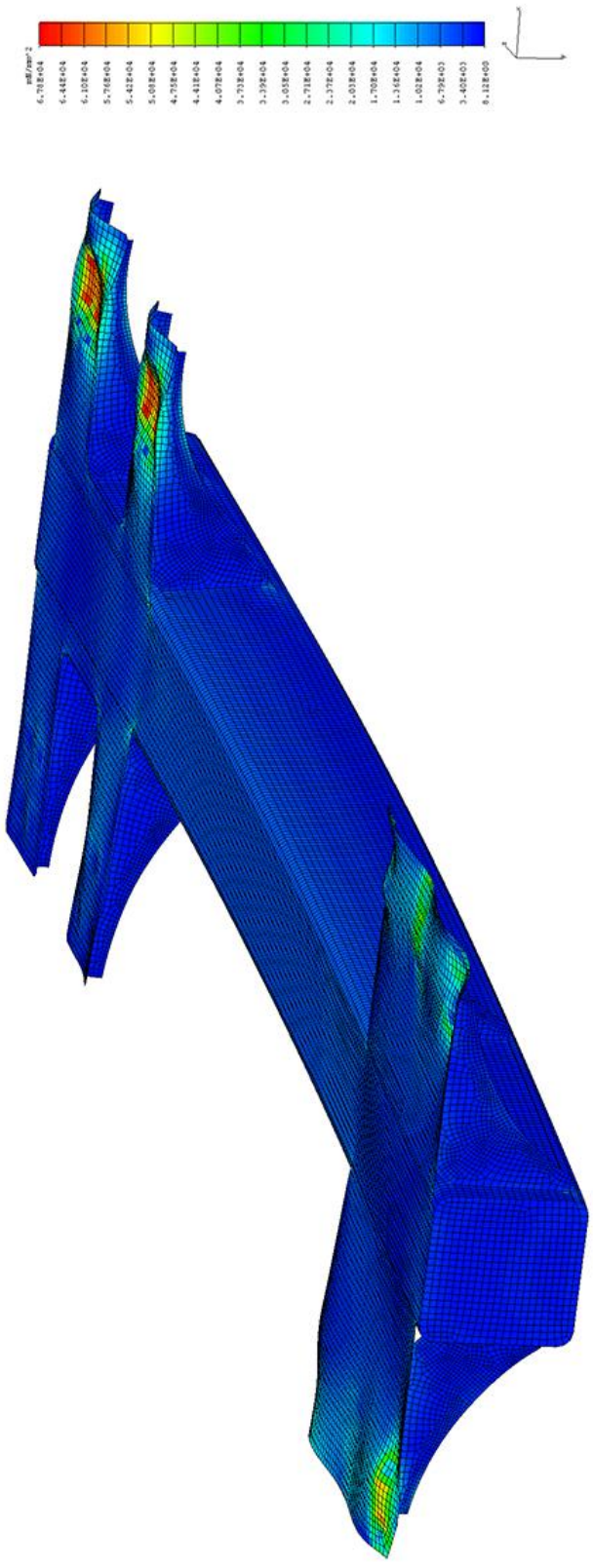
Zatížení modelu carridge dle původní dokumentace, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazby BCD, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazení napětí 0,02–67,9 MPa, maximální deformace 1,30 mm.



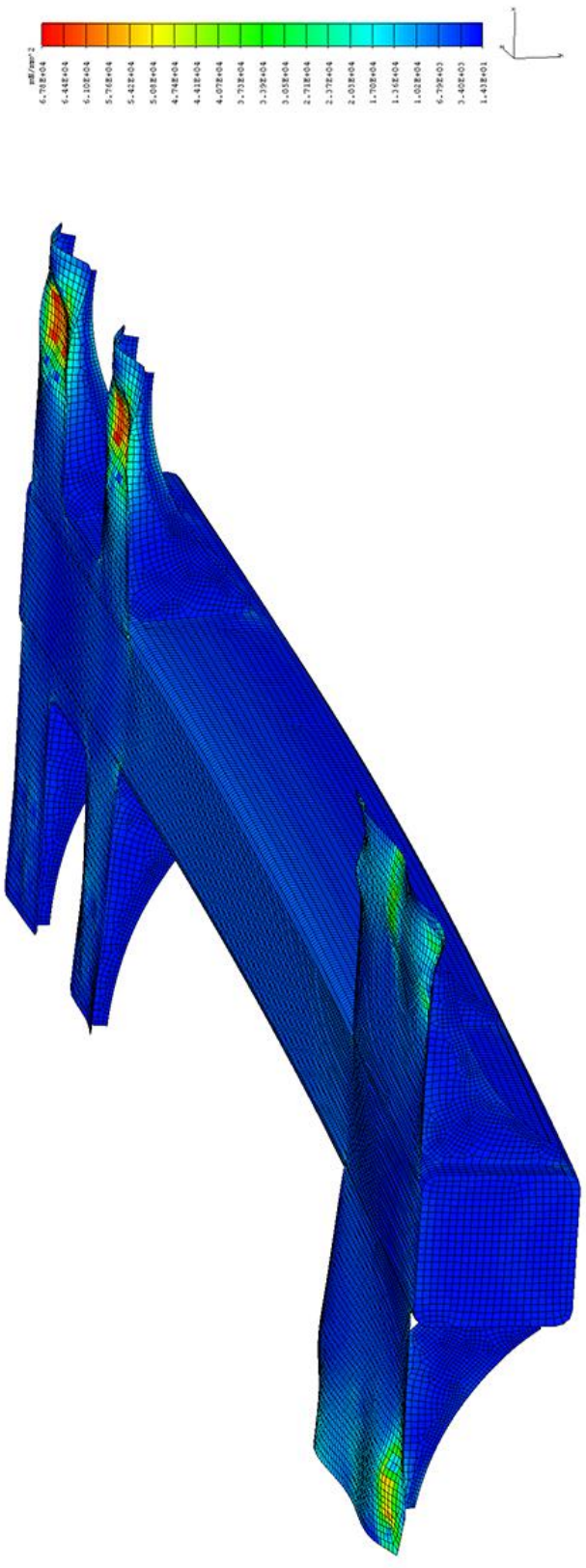
Zatížení modelu carridge dle původní dokumentace, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazby ACD, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazení napětí 0,01–67,7 MPa, maximální deformace 1,29 mm.



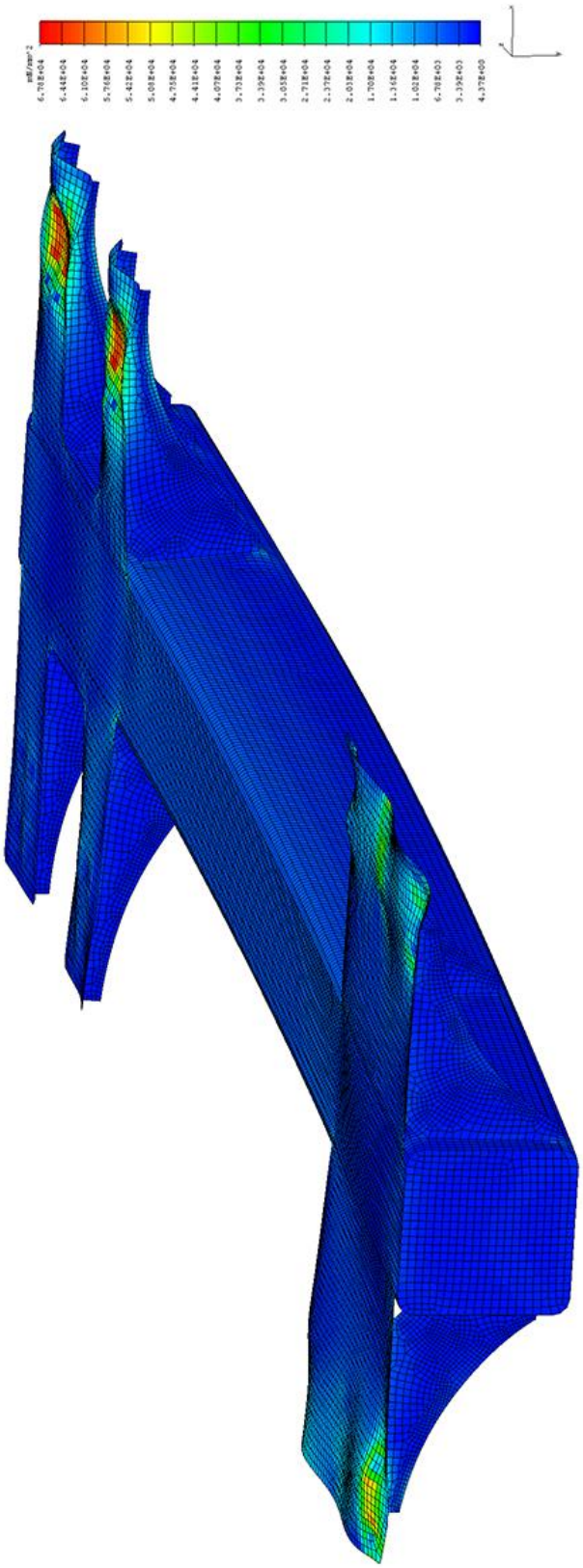
Zatížení modelu carridge s měkkým žebrováním, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazby ABCD, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazení napětí 0,01–67,8 MPa, maximální deformace 1,28 mm.



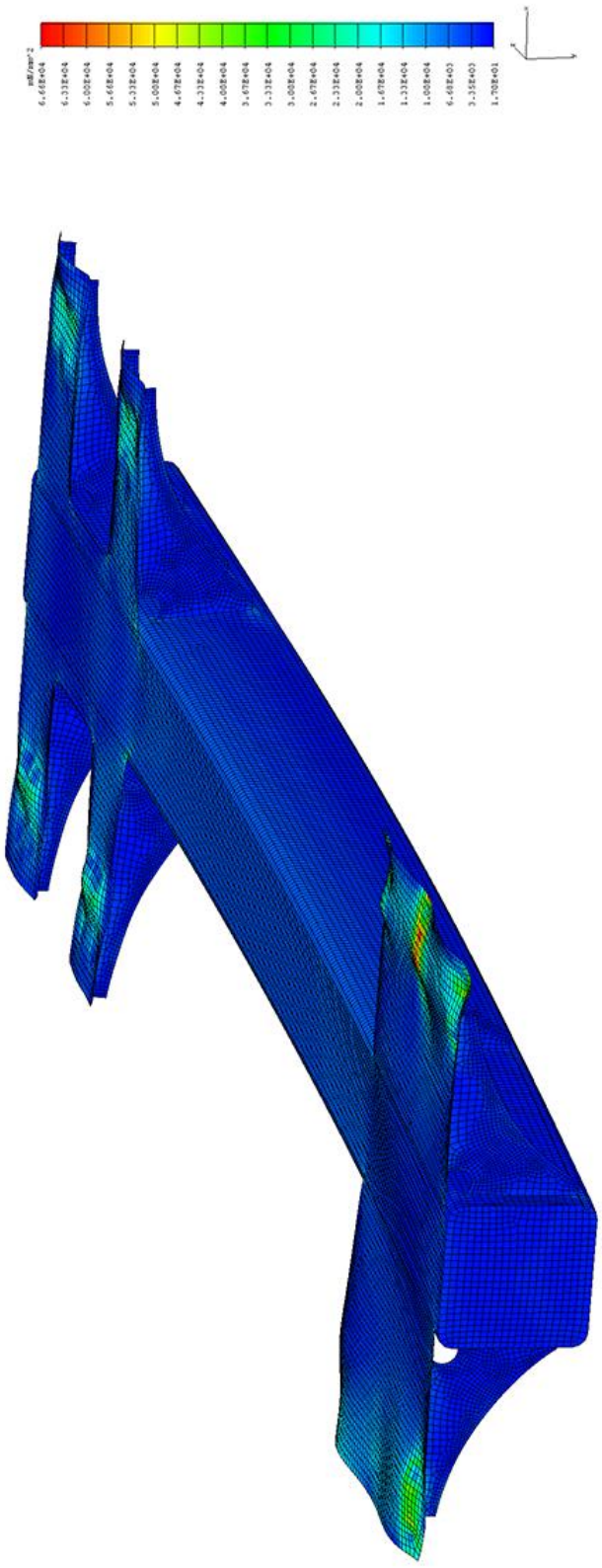
Zatížení modelu carridge s měkkým žebrováním, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazby BCD, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazení napětí 0,01–67,8 MPa, maximální deformace 1,28 mm.



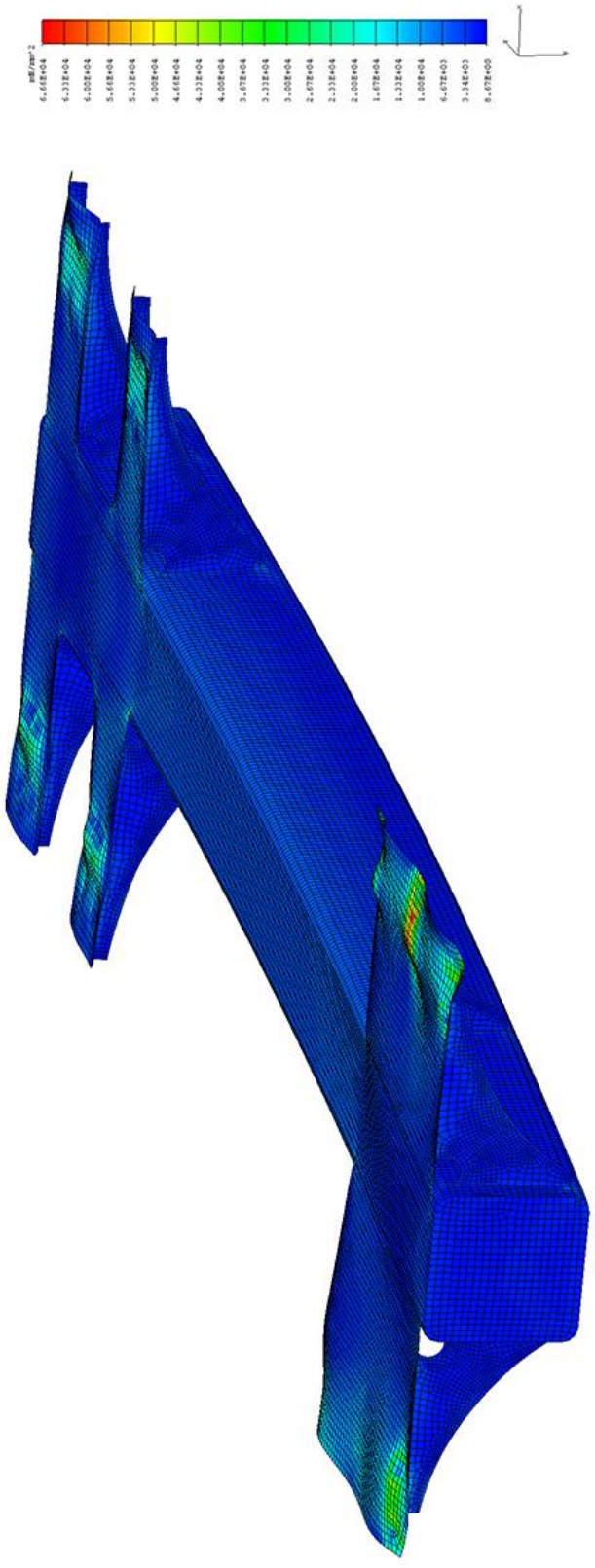
Zatížení modelu carridge s měkkým žebrováním, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazby ACD, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazení napětí 0,01–67,8 MPa, maximální deformace 1,28 mm.



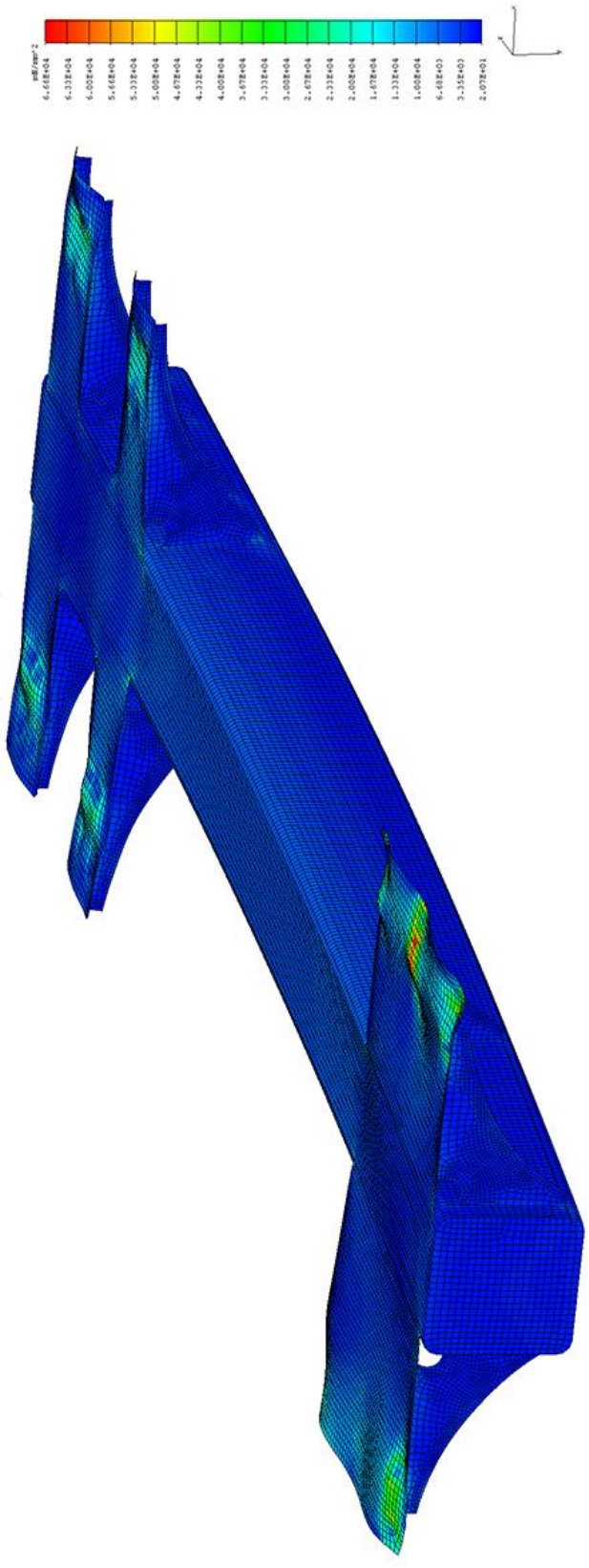
Zatížení modelu carridge s měkkým žebrováním a výřezem, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazby ABCD, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazení napětí 0,02–66,6 MPa, maximální deformace 1,28 mm.



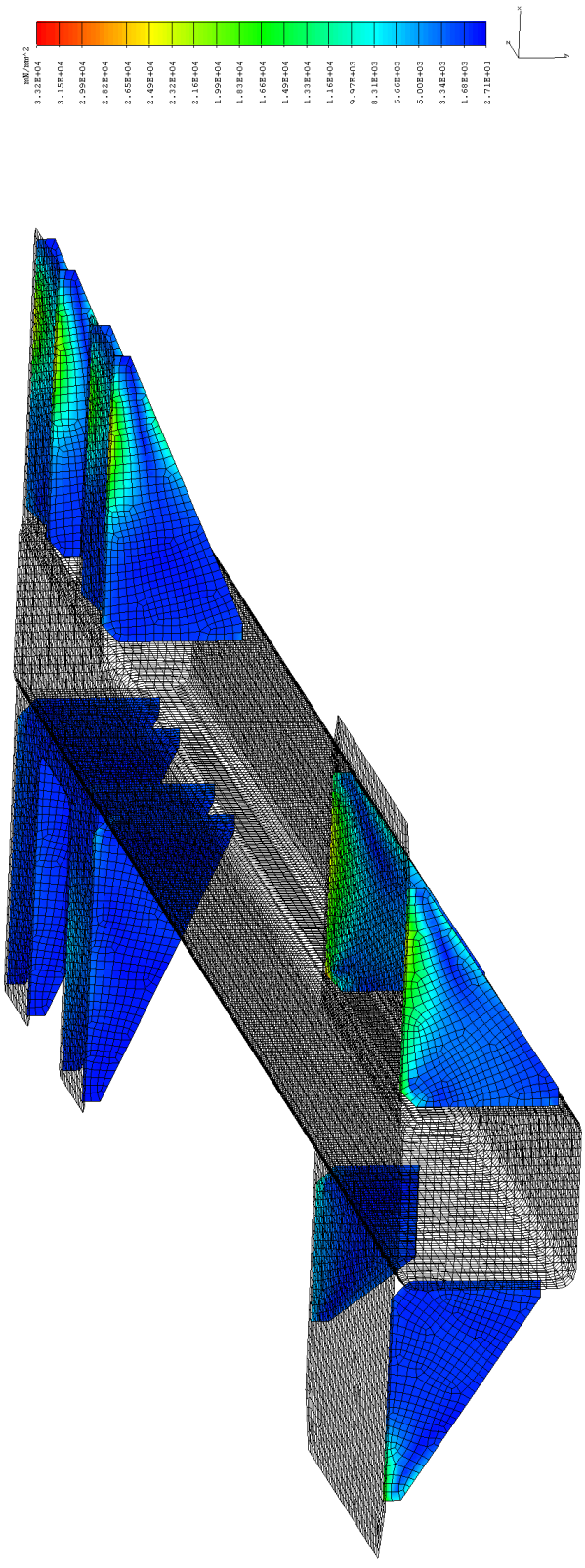
Zatížení modelu carridge s měkkým žebrováním a výřezem, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazby BCD, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazení napětí 0,01–66,6 MPa, maximální deformace 1,28 mm.



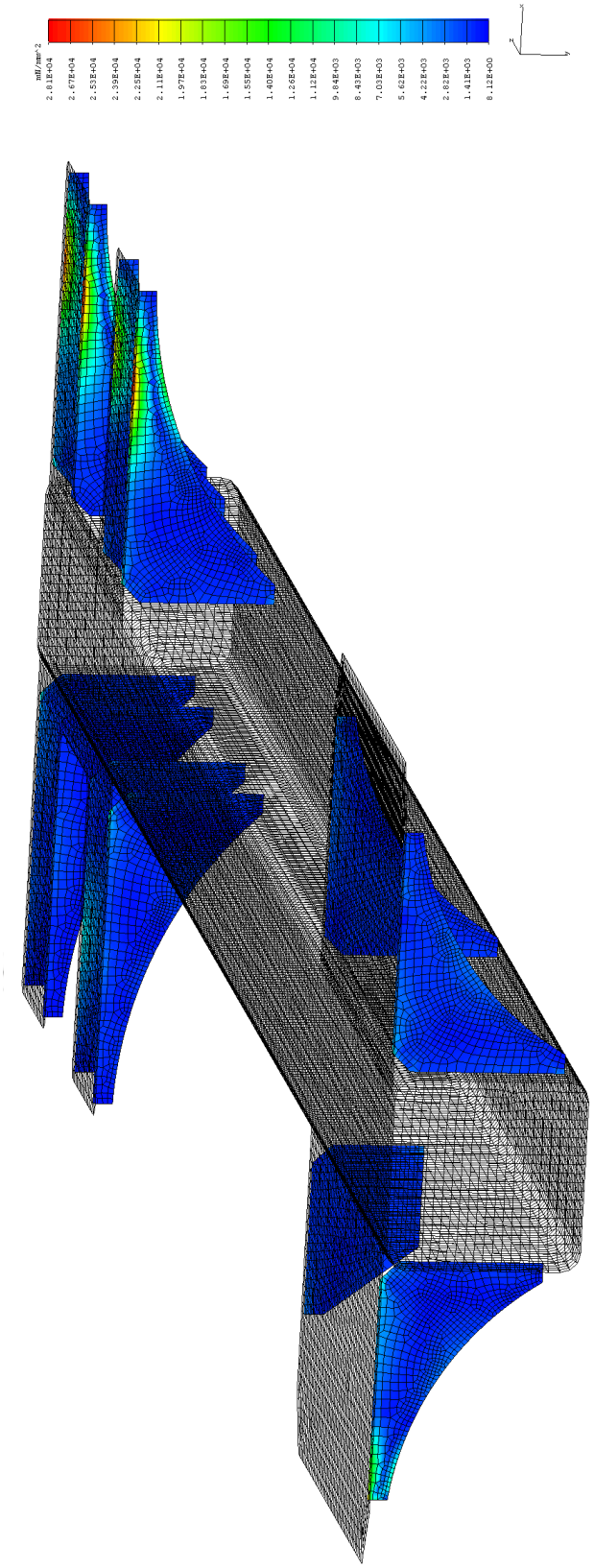
Zatížení modelu carridge s měkkým žebrováním a výřezem, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazby ACD, měřítko deformace modelu 10, rozsah zobrazení napětí 0,0–66,6 MPa, maximální deformace 1,28 mm.



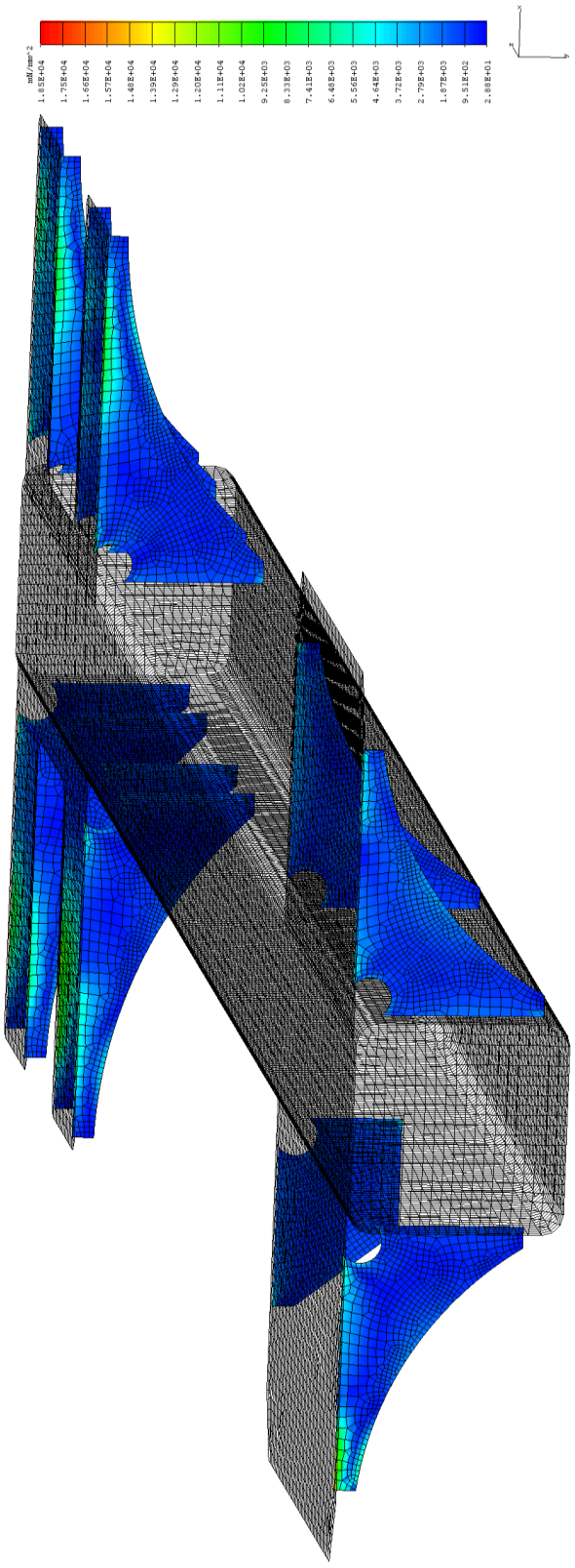
Zatížení žebrování carridge dle původní dokumentace, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazba ABCD, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,03–33,2 MPa.

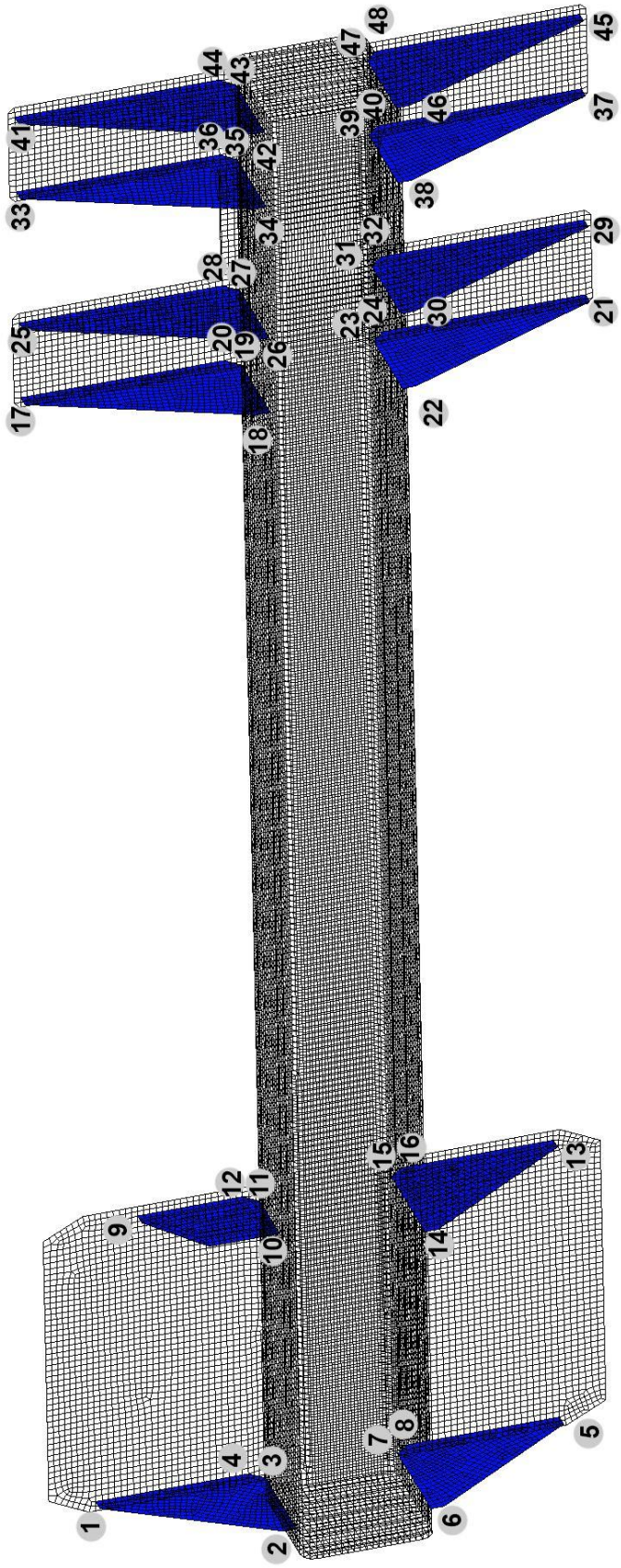


Zatížení žebrování carridge s měkkým profilem, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazba ABCD, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,01–28,1 MPa.



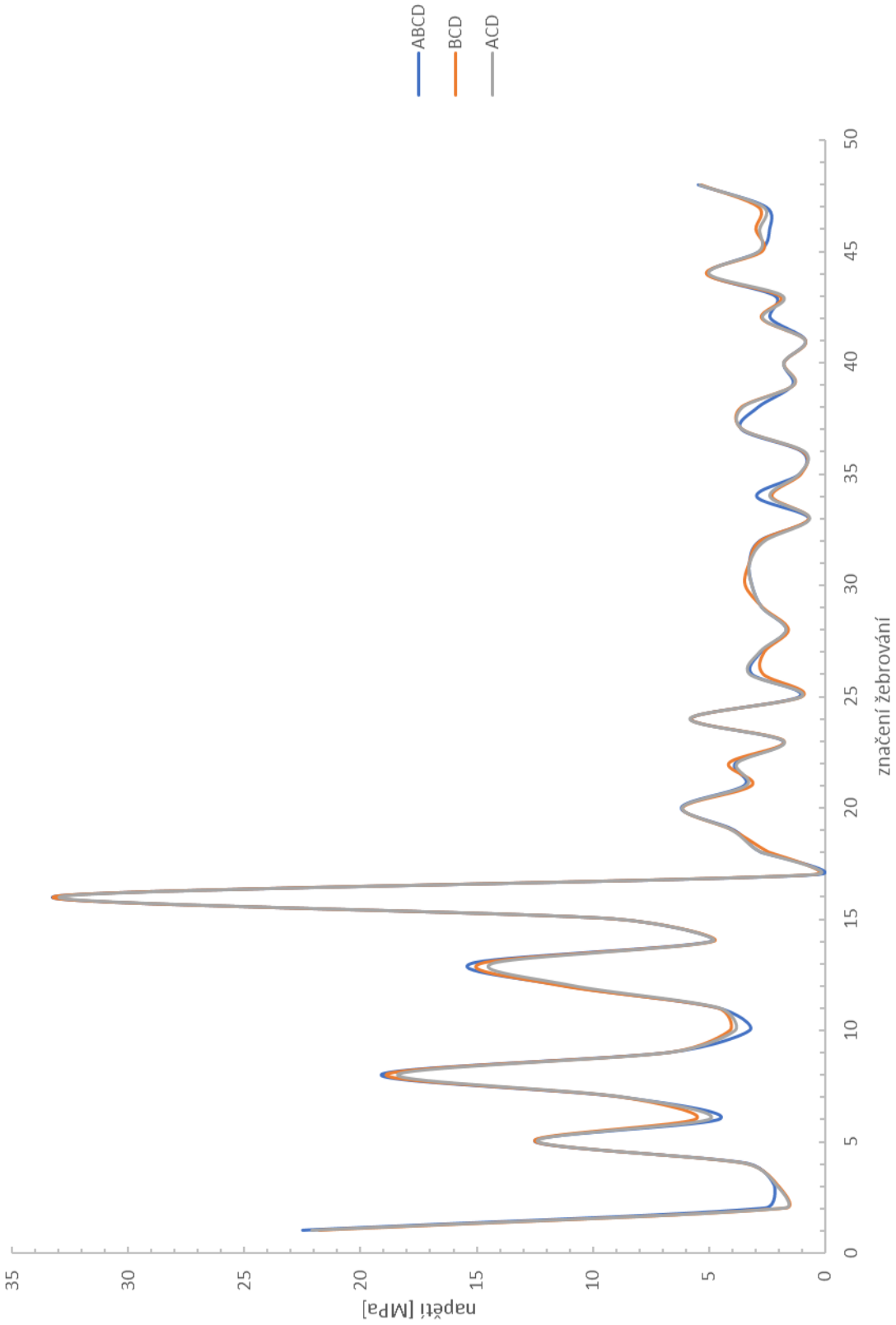
Zatížení žebrování carridge s měkkým žebrováním a dírou, pohled zepředu, redukované napětí podle podmínky HMH, aktivní vazba ABCD, nedeformovaný model, rozsah zobrazení napětí 0,03–18,5 MPa.



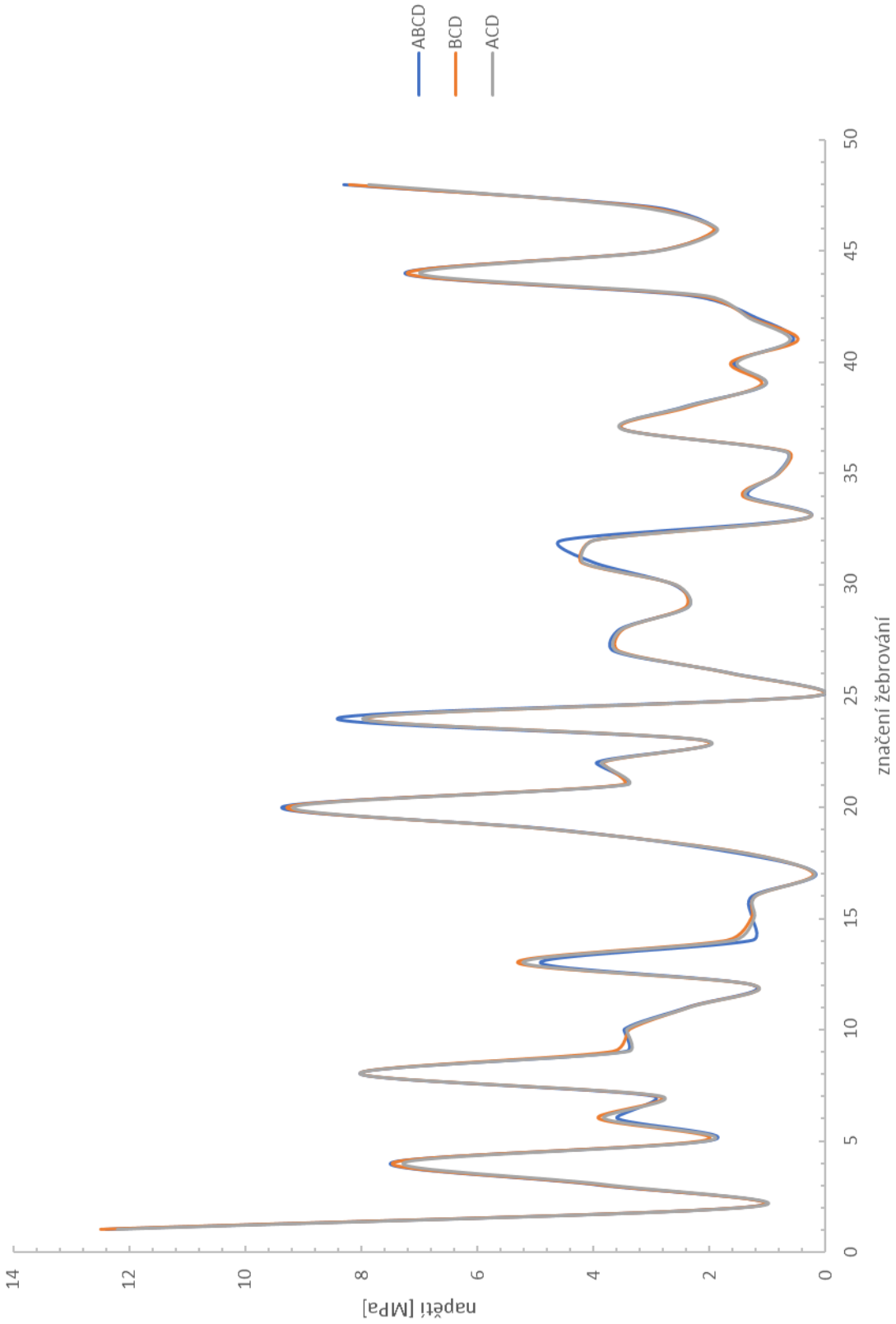

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48

| značka | Napětí v kritických místech na žebrování [MPa] | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | původní tvar | | | měkké žebro | | | měkké žebro s dírou | | |
| | ABCD | BCD | ACD | ABCD | BCD | ACD | ABCD | BCD | ACD |
| 1 | 22,5 | 21,8 | 22,1 | 12,4 | 12,5 | 12,2 | 11,5 | 11,5 | 11,4 |
| 2 | 2,56 | 1,68 | 1,72 | 1,34 | 1,35 | 1,29 | 1,63 | 1,65 | 1,62 |
| 3 | 2,17 | 2,02 | 2,08 | 3,94 | 3,89 | 3,76 | 2,7 | 2,64 | 2,7 |
| 4 | 3,32 | 3,43 | 3,42 | 7,47 | 7,45 | 7,26 | 7,65 | 7,64 | 7,65 |
| 5 | 12,5 | 12,5 | 12,4 | 1,97 | 2,09 | 1,98 | 6,7 | 7,63 | 6,73 |
| 6 | 4,53 | 5,56 | 4,96 | 3,59 | 3,92 | 3,82 | 2,75 | 3,08 | 2,7 |
| 7 | 8,88 | 8,88 | 8,79 | 2,98 | 2,92 | 2,86 | 2,48 | 2,42 | 2,49 |
| 8 | 19,1 | 18,9 | 18,4 | 8,02 | 8,02 | 8,02 | 5,83 | 5,84 | 5,83 |
| 9 | 6,65 | 6,65 | 6,63 | 3,44 | 3,67 | 3,4 | 4,84 | 4,82 | 4,86 |
| 10 | 3,22 | 4,08 | 3,86 | 3,46 | 3,38 | 3,42 | 4,36 | 4,7 | 4,53 |
| 11 | 4,63 | 4,64 | 4,58 | 2,36 | 2,34 | 2,32 | 1,52 | 1,41 | 1,39 |
| 12 | 11,3 | 11,4 | 10,9 | 1,26 | 1,26 | 1,25 | 1,03 | 1,04 | 1,12 |
| 13 | 15,2 | 14,8 | 14,3 | 4,91 | 5,31 | 5,21 | 6,59 | 7,01 | 6,82 |
| 14 | 4,84 | 4,78 | 4,83 | 1,26 | 1,7 | 1,58 | 1,41 | 1,66 | 1,33 |
| 15 | 9,14 | 9,15 | 9,12 | 1,26 | 1,28 | 1,23 | 2,34 | 2,4 | 2,4 |
| 16 | 33,2 | 33,2 | 32,9 | 1,25 | 1,2 | 1,2 | 8,93 | 8,75 | 8,88 |
| 17 | 0,28 | 0,46 | 0,42 | 0,16 | 0,21 | 0,18 | 1,53 | 1,61 | 1,58 |
| 18 | 2,77 | 2,43 | 2,78 | 1,69 | 1,54 | 1,56 | 1,73 | 1,58 | 1,61 |
| 19 | 3,93 | 4,02 | 4,04 | 4,71 | 4,79 | 4,78 | 2,22 | 2,28 | 2,26 |
| 20 | 6,18 | 6,13 | 6,15 | 9,36 | 9,28 | 9,17 | 7,78 | 7,78 | 7,7 |
| 21 | 3,46 | 3,15 | 3,38 | 3,44 | 3,51 | 3,43 | 2,23 | 2,32 | 2,5 |
| 22 | 3,85 | 4,14 | 3,79 | 3,94 | 3,84 | 3,86 | 3,42 | 3,01 | 3,39 |
| 23 | 1,81 | 1,77 | 1,79 | 2,1 | 2,12 | 2,08 | 1,48 | 1,49 | 1,47 |
| 24 | 5,77 | 5,79 | 5,82 | 8,4 | 7,94 | 7,96 | 7,35 | 7,33 | 7,38 |
| 25 | 1,08 | 0,98 | 1,01 | 0,16 | 0,19 | 0,17 | 1,09 | 1,39 | 1,11 |
| 26 | 3,15 | 2,67 | 3,26 | 1,59 | 1,63 | 1,61 | 1,59 | 1,48 | 1,58 |
| 27 | 2,75 | 2,62 | 2,82 | 3,63 | 3,55 | 3,58 | 2,46 | 2,41 | 2,39 |
| 28 | 1,66 | 1,58 | 1,68 | 3,54 | 3,49 | 3,51 | 1,73 | 1,72 | 1,8 |
| 29 | 2,71 | 2,69 | 2,73 | 2,36 | 2,41 | 2,36 | 1,32 | 1,35 | 1,36 |
| 30 | 3,14 | 3,44 | 3,16 | 2,61 | 2,59 | 2,58 | 2,32 | 1,99 | 2,36 |
| 31 | 3,25 | 3,26 | 3,25 | 3,99 | 4,21 | 4,18 | 2,48 | 2,44 | 2,4 |
| 32 | 2,79 | 2,77 | 2,59 | 4,53 | 3,99 | 3,98 | 2,14 | 2,12 | 2,14 |
| 33 | 0,69 | 0,69 | 0,67 | 0,34 | 0,32 | 0,32 | 1,7 | 1,7 | 1,71 |
| 34 | 2,94 | 2,29 | 2,38 | 1,33 | 1,43 | 1,38 | 1,44 | 1,54 | 1,48 |
| 35 | 1,08 | 1,03 | 1,11 | 0,83 | 0,81 | 0,82 | 1,07 | 1,04 | 1,03 |
| 36 | 0,98 | 0,93 | 0,89 | 0,69 | 0,66 | 0,69 | 5,71 | 5,79 | 5,62 |
| 37 | 3,58 | 3,55 | 3,56 | 3,48 | 3,49 | 3,51 | 2,2 | 2,2 | 2,19 |
| 38 | 2,88 | 3,61 | 3,56 | 2,44 | 2,35 | 2,42 | 2,4 | 2,42 | 2,41 |
| 39 | 1,39 | 1,34 | 1,36 | 1,03 | 1,11 | 1,04 | 0,96 | 0,94 | 1,03 |
| 40 | 1,76 | 1,77 | 1,79 | 1,57 | 1,63 | 1,52 | 5,74 | 5,74 | 5,86 |
| 41 | 0,83 | 0,84 | 0,86 | 0,55 | 0,48 | 0,61 | 1,27 | 1,21 | 1,36 |
| 42 | 2,34 | 2,73 | 2,69 | 1,18 | 1,29 | 1,32 | 1,12 | 1,25 | 1,18 |
| 43 | 2,14 | 1,96 | 1,83 | 2,31 | 2,18 | 2,06 | 2 | 2,2 | 1,97 |
| 44 | 5,04 | 5,11 | 5,01 | 7,24 | 7,21 | 6,99 | 6,79 | 6,77 | 6,79 |
| 45 | 2,83 | 2,72 | 2,86 | 2,95 | 2,95 | 2,91 | 1,58 | 1,52 | 1,55 |
| 46 | 2,38 | 2,98 | 2,82 | 1,88 | 1,92 | 1,86 | 1,73 | 1,88 | 1,71 |
| 47 | 2,53 | 2,87 | 2,66 | 2,99 | 3,12 | 3,26 | 2,69 | 2,84 | 2,67 |
| 48 | 5,45 | 5,34 | 5,41 | 8,3 | 8,21 | 7,87 | 6,53 | 6,51 | 6,53 |

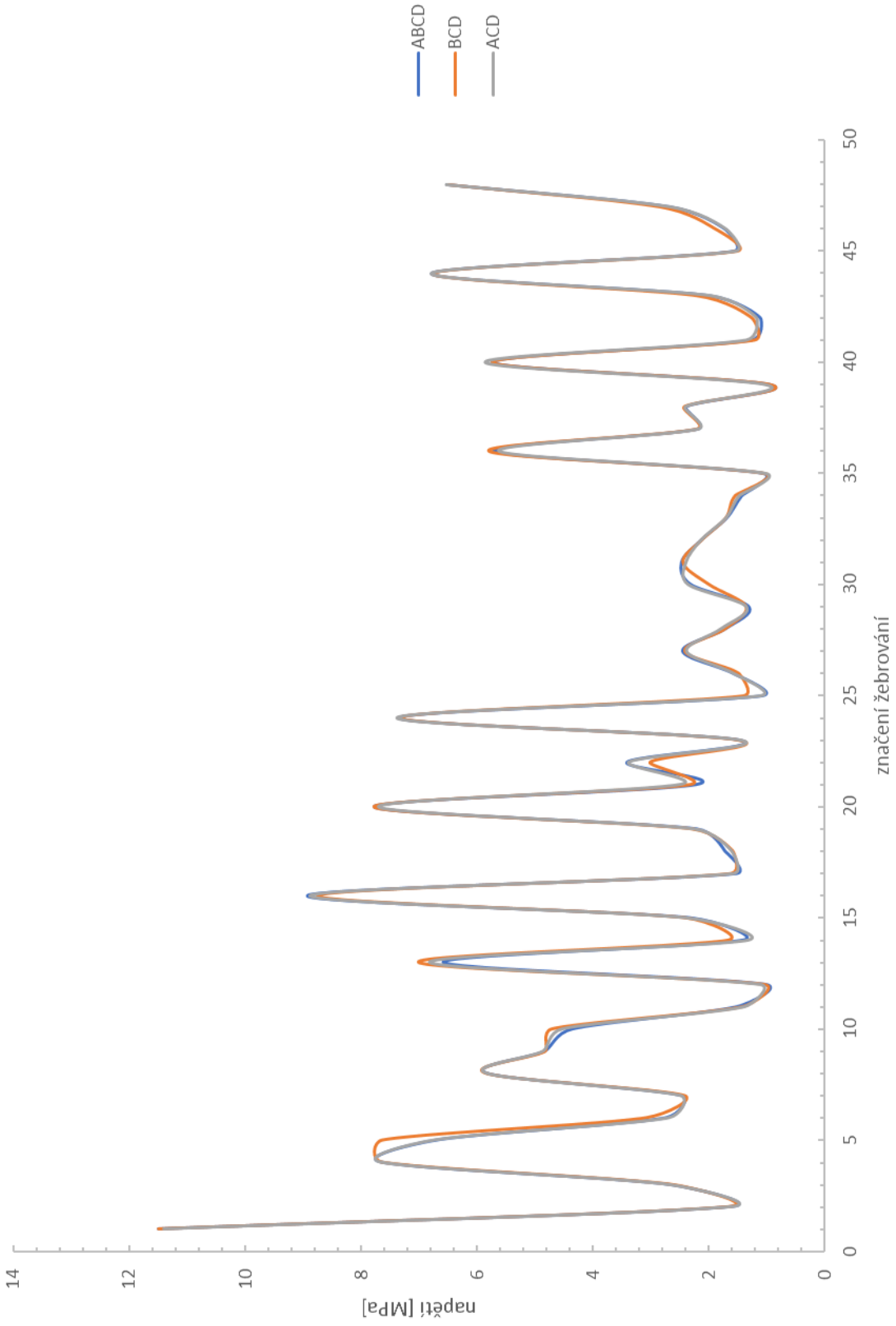
Graf napětí v místech svarů. Profil dle původní dokumentace.



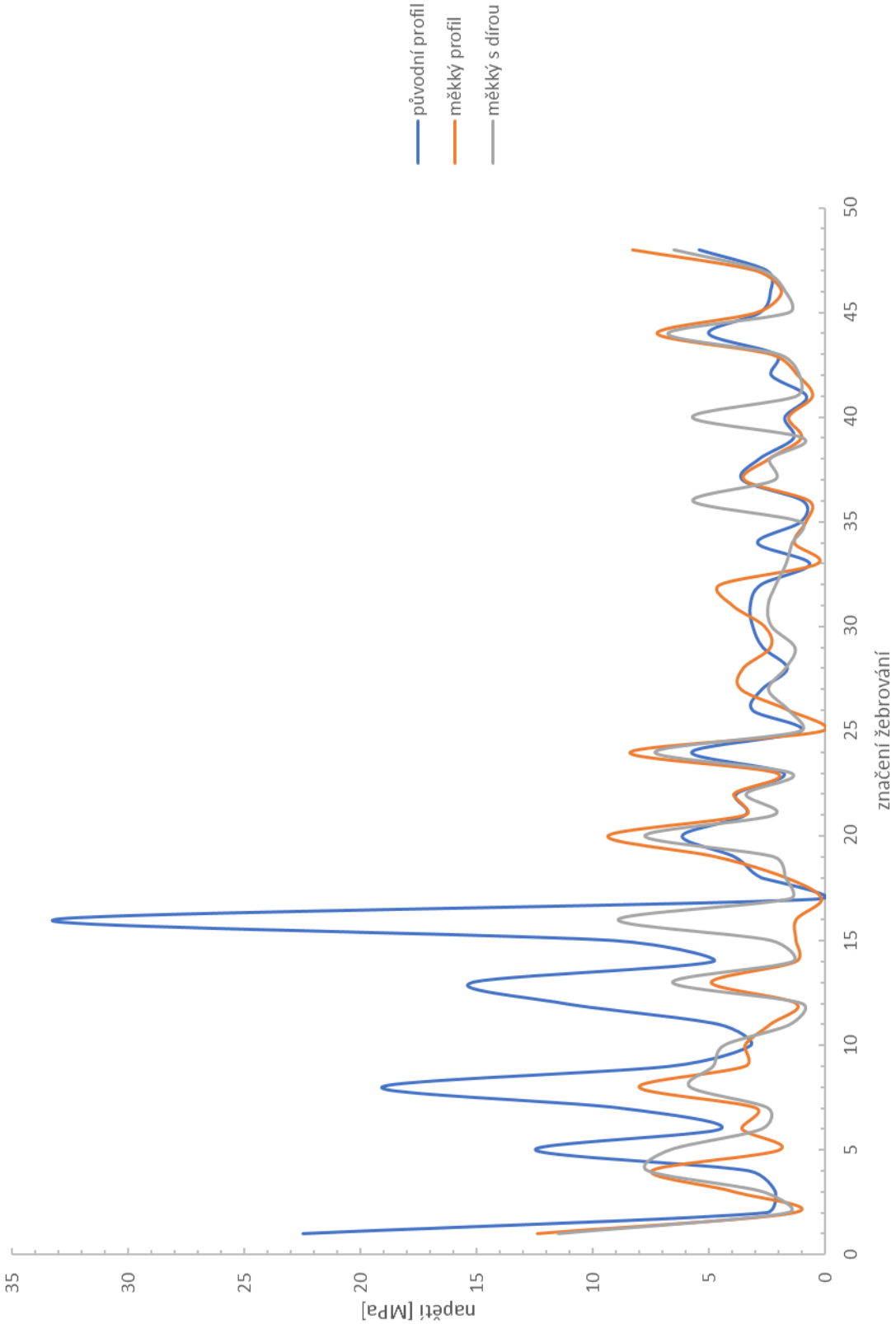
Graf napětí v místech svarů. Měkký profil žebrování



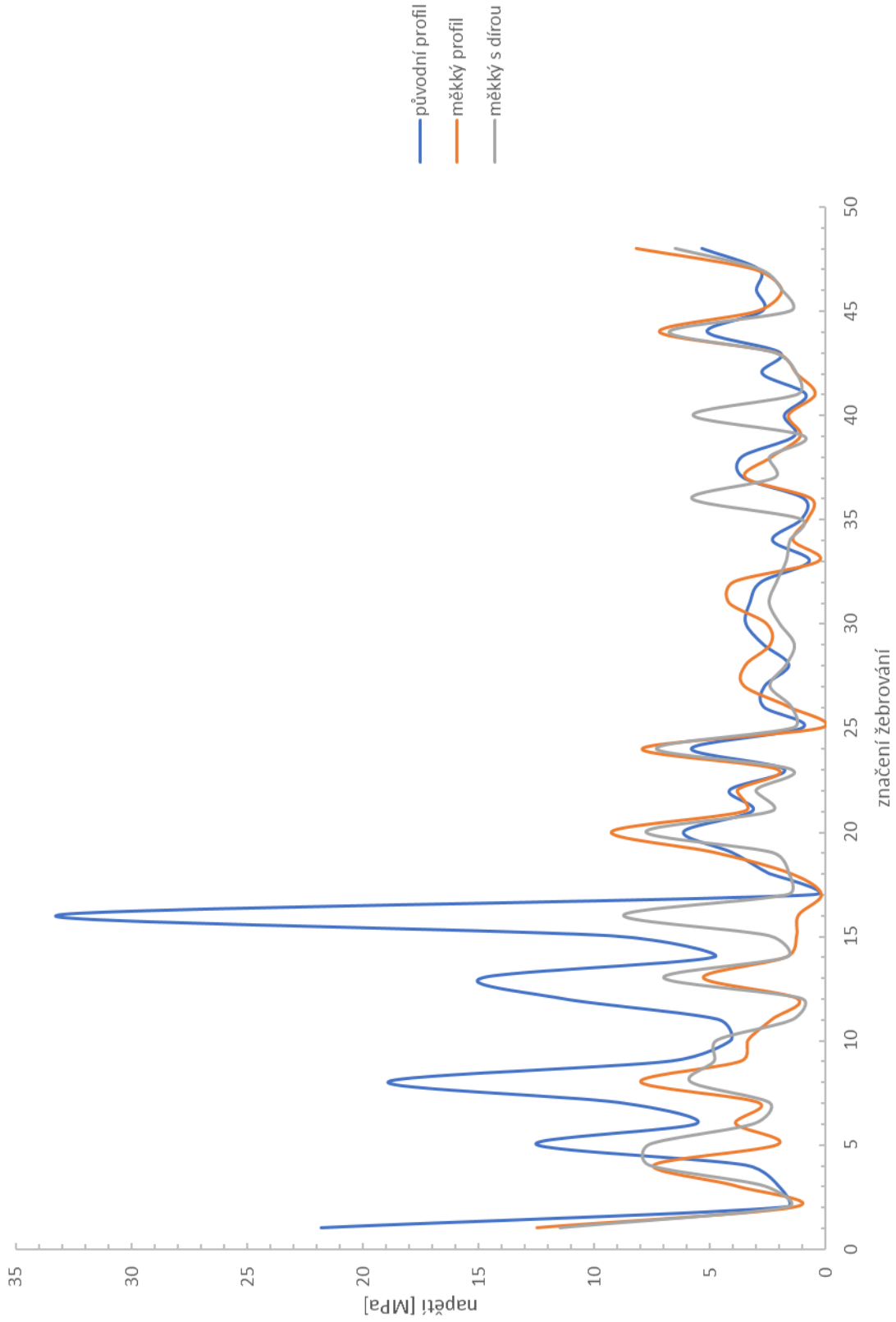
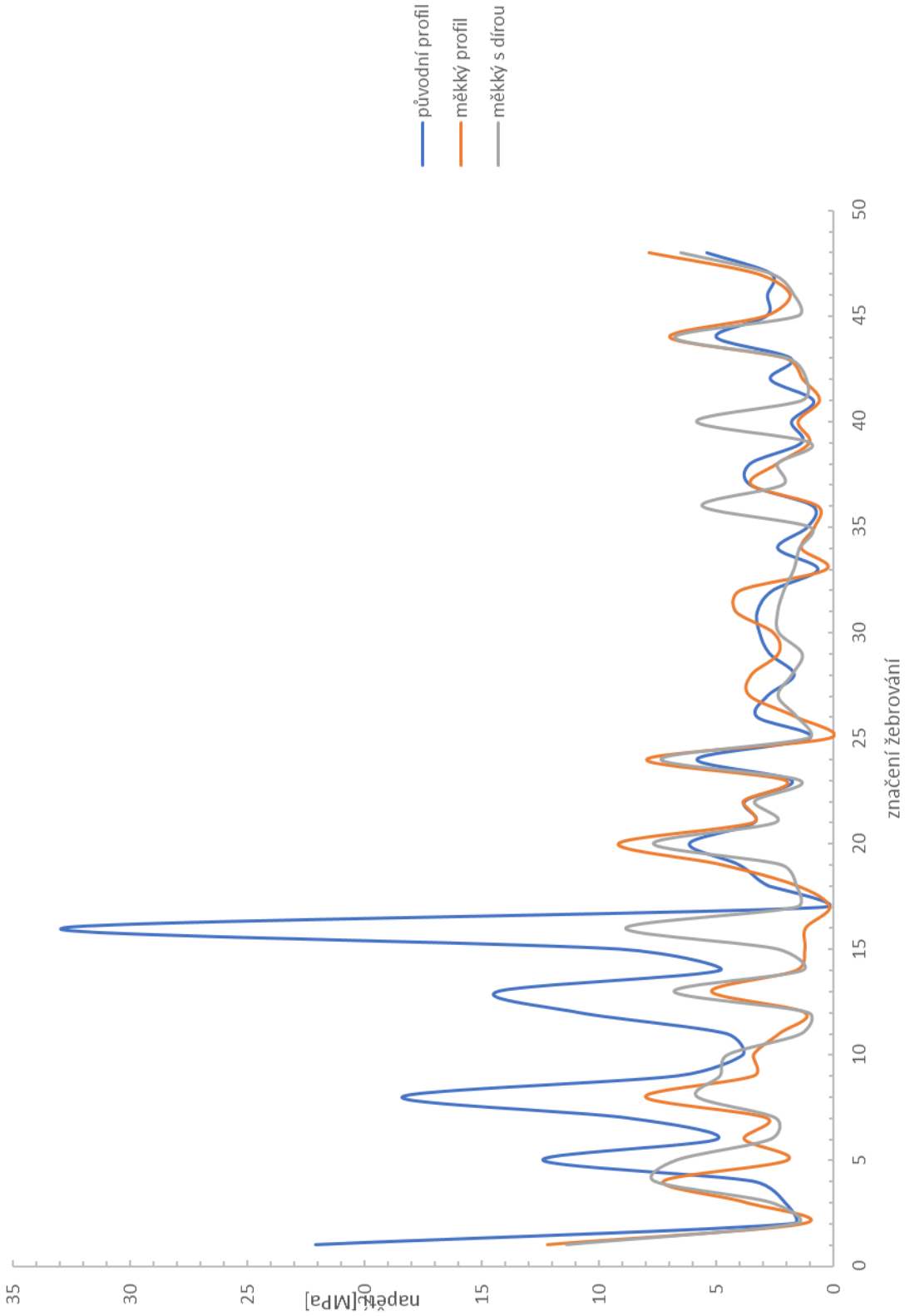
Graf napětí v místech svarů. Měkký profil žebrování a vyříznutou dírou.



Graf napětí v místech svarů. Kombinace profilů žebrování s aktivními vazbami ABCD



Graf napětí v místech svarů. Kombinace profilů žebrování s aktivními vazbami BCD



Graf napětí v místech svarů. Kombinace profilů žebrování s aktivními vazbami ACD