

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Stavba jaderně energetických zařízení**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Analýza namáhání opěrných prvků tlakové nádoby jaderného reaktoru  
VVER 440

Autor: **Bc. Kamil ŠIMEČEK**  
Vedoucí práce: **Prof. RNDr. Josef VOLDŘICH, CSc.**

Akademický rok 2018/2019

## **Zadání diplomové práce**

### **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

**V Plzni dne:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Kamil Šimeček  
podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Šimeček	Jméno Kamil	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Stavba jaderně energetických zařízení		
<b>VEDOUČÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Prof. RNDr. Voldřich, CSc.	Jméno Josef	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Analýza namáhání opěrných prvků tlakové nádoby jaderného reaktoru VVER 440		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	66	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	66	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Předkládaná diplomová práce se zabývá analýzou opěrných prvků jaderného reaktoru typu VVER 440/213. Všechny výpočty byly provedeny v software ANSYS využívajícím metodu konečných prvků. Úvodní část podává základní přehled o jaderných elektrárnách, kde se počítané opěrné prvky nacházejí. Následuje popis jejich konstrukce, vlastností použitých materiálů a zatížení. Čtvrtá kapitola vysvětluje použitý výpočtový model, který je rozdělen na několik menších celků. V páté kapitole je podrobně popsán výpočet teplotních polí. Práce porovnává několik různých okrajových podmínek a jejich vliv na výsledky. Teplotní pole jsou jen podkladem pro výpočet napěťových polí. Šestá kapitola popisuje výpočet napěťových polí od jednotlivých statických zátěžných stavů pomocí modelu rozděleného na dvě části spojené tuhostními vazbami. Poté jsou výsledky výpočtů vyhodnoceny. Sedmá kapitola srovnává napěťová pole od teplotních dilatací a od statických zátěžných stavů. V závěrečné osmé kapitole je stručně popsána kontrola nízkocyklové únavy vybraných šroubů na opěrném prvku.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Jaderný reaktor, VVER 440, opěrný systém, metoda konečných prvků, sálání, tuhostní vazba, LOCA, nízkocyklová únava</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Šimeček	Name Kamil	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Design of nuclear power equipment		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. RNDr. Voldřich, CSc.	Name Josef	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Stress analysis of supporting elements of a nuclear reactor VVER 440		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2019
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	66	<b>TEXT PART</b>	66	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This presented master thesis deals with an analysis of supporting elements of a nuclear reactor (type VVER 440/213). All calculations were done by the software ANSYS which uses the finite element method. In the beginning there is a basic overview about nuclear power plants using this design of supporting elements. The following part is a description of their detailed design, properties of used materials and loads. Fourth chapter describes the used calculation model which is divided into some smaller models. In fifth chapter, there is a detailed description of the model of the temperature fields. Some variants of boundary conditions are compared between each other. The temperature fields are only the basis for the calculation of stress fields. Sixth chapter describes the calculation of stress fields caused by different types of static loading using the model which is deviated into two parts connected by springs. Next, the solutions are evaluated. Seventh chapter combines results from sixth and seventh one. The last eighth part shortly describes the solution of the low-cycle fatigue of some selected screws in the supporting elements.</p>
<b>KEY WORDS</b>	Nuclear reactor, VVER 440, supporting system, finite element method, radiation, spring, LOCA, low-cycle fatigue

## **Poděkování**

Tato práce vznikla v rámci institucionální podpory pro dlouhodobý rozvoj výzkumné instituce poskytované společností Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s. r. o. Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky.

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu prof. RNDr. Josefu Voldřichovi, CSc. za ochotu a vstřícný přístup během psaní práce, konzultantovi Ing. Petru Polcarovi, Ph.D. a celému kolektivu pracovníků odboru Aplikovaná mechanika Výzkumného a zkušebního ústavu Plzeň, s. r. o. za přínosné rady a konstruktivní připomínky k mé práci.

V neposlední řadě musím vzpomenout své nejbližší, kteří mě během psaní práce i během celého studia podporovali.

autor

# Obsah

1 Úvod .....	8
1.1 Vývojová řada VVER.....	8
1.2 Popis konstrukce opěrného systému .....	9
2 Materiály a jejich vlastnosti.....	12
3 Zatížení .....	14
4 Výpočtový model.....	16
4.1 Symetrie.....	16
4.2 Společné předpoklady .....	18
5 Teplotní výpočet.....	19
5.1 Výpočet teplotních polí .....	19
5.2 Napěťové pole vlivem teplotní dilatace .....	28
6 Statický výpočet.....	35
6.1 Určení tuhosti segmentu .....	35
6.2 Výpočet namáhání opěrného prstenu bez zatížení LOCA .....	43
6.3 Výpočet namáhání segmentu bez zatížení LOCA .....	47
6.4 Výpočet namáhání opěrného prstenu pro zatížení LOCA .....	49
6.5 Výpočet namáhání segmentu pro zatížení LOCA .....	52
7 Vyhodnocení výsledků.....	56
8 Výpočet únavového poškození.....	57
9 Závěr .....	58
10 Reference.....	59
Přehledy.....	60
Seznam symbolů.....	60
Seznam zkratk.....	61
Seznam tabulek .....	61
Seznam obrázků .....	61
Příloha - Tabulky vlastností materiálů .....	64

# 1 Úvod

Jaderné elektrárny představují v řadě zemí nepostradatelnou součást jejich elektrizační soustavy. Ve většině zemí východní Evropy i v České republice jsou používány ruské (sovětské) reaktory vývojové řady VVER.

## 1.1 Vývojová řada VVER

Práce předkládá analýzu namáhání opěrného rámu tlakové nádoby jaderného reaktoru, který se nachází na jaderných elektrárnách postavených podle projektu VVER 440/213. S ohledem na konstrukční podobnost lze předpokládat využití velmi podobného (nebo totožného) opěrného rámu i na dalších typech reaktorů VVER 440/230, VVER 440/270 a VVER 440/179 (typ VVER 440/318 nebyl dokončen). Číslo 440 před lomítkem představuje elektrický výkon jednoho bloku elektrárny v MW (liší se dle ročního období a konkrétní elektrárny). Číslo za lomítkem označuje konkrétní projekt jaderné elektrárny (Neplatí, že vyšší číslo představuje pokročilejší projekt.).

VVER 440/179 byl prototypový projekt postavený pouze v Novovoronežské jaderné elektrárně.

VVER 440/230 byl navazující projekt určený pro sériovou výstavbu. Na rozdíl od dalších variant je u tohoto typu reaktoru největší havárie typu LOCA definována jako porušení hlavního cirkulačního potrubí podélnou trhlinou stanovených rozměrů. Tyto bloky byly v zemích Evropské unie odstaveny (elektrárny Jaslovské Bohunice, Nord a Kozloduj).

VVER 440/270 je projekt vycházející z VVER 440/230, ale seizmicky zodolněný. Jediná Jaderná elektrárna Metsamor se nachází v seizmicky aktivní oblasti.

VVER 440/213 je projekt vycházející z VVER 440/230, ale oproti němu s předdefinovanou havárií typu LOCA na prasknutí hlavního cirkulačního potrubí příčným lomem (přirovnává se ke stěti gilotinou). Tato změna si vynutila doplnění primárního okruhu o barbotážní věž.

Následující Tabulka 1 obsahuje seznam jaderných elektráren, na kterých se nachází totožný nebo obdobný opěrný systém.

Země	Elektrárna	Pracující				Odstavené			Nedokončené	
		179	270	230	213	270	230	213	213	318
Arménie	Metsamor		1			1				
Bulharsko	Kozloduj						4			
Česko	Dukovany				4					
Finsko	Lovisa				2					
Kuba	Jaragua									4
Maďarsko	Paks				4					



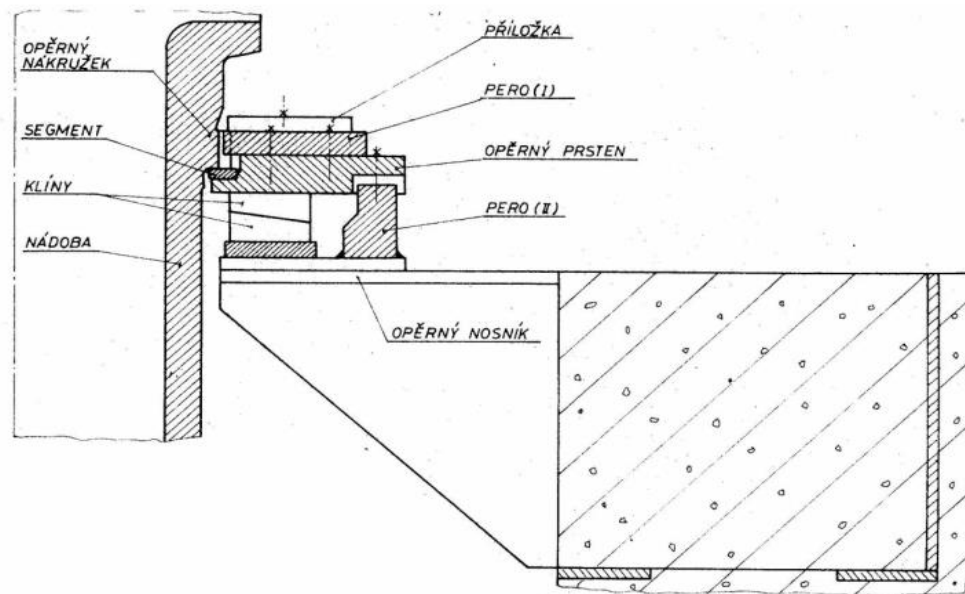
Německo	Nord						4	1	3	
Polsko	Žarnovec								4	
Rusko	Kolská			2	2					
Rusko	Novovoronežská	2								
Slovensko	Jaslovské Bohunice				2		2			
Slovensko	Mochovce				2				2	
Ukrajina	Rovenská				2					
Celkem		2	1	2	18	1	10	1	9	4

Tabulka 1 Přehled jaderných reaktorů typu VVER 440

O podobě opěrného systému na prototypových (dnes už zrušených) elektrárnách dle projektů VVER 210, VVER 365 (oba na Jaderné elektrárně Novovoronežská) a VVER 70 (Jaderná elektrárna Rheinsberg v bývalé Německé demokratické republice) není v České republice dostatek dostupných informací. Konstrukce opěrných prvků v projektu jaderných elektráren VVER 1000 je koncepčně odlišná. Důvodem je zřejmě zahrnutí zátěžného stavu LOCA havárie již do návrhu opěrných prvků a jejich optimalizace pro tento případ. Konstrukce opěrných prvků na dalších moderních projektech reaktorů VVER bude nejspíše také bližší provedení VVER 1000 a velmi odlišná od té uváděné dále.

## 1.2 Popis konstrukce opěrného systému

Počítaný opěrný rám zajišťuje spojení jaderného reaktoru (jeho tlakové nádoby) a stavební konstrukce reaktorového bloku. Opěrný rám přenáší do stavební konstrukce silové účinky plynoucí z vlastní váhy reaktoru (včetně paliva, chladiwa atd.), dilatací potrubních systémů vlivem rozdílů teplot, provozních pulzací atd. Označení jednotlivých částí opěrného rámu, které je v práci dále používáno, je uvedeno na Obrázek 1.



Obrázek 1 Označení jednotlivých komponentů opěrného systému [4]

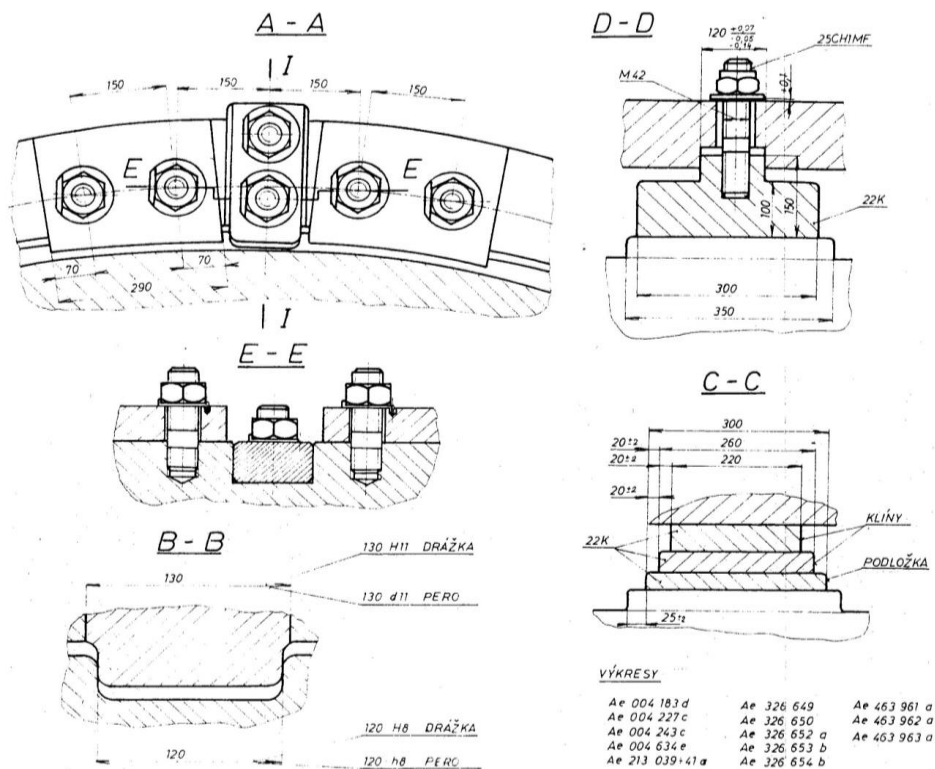
Největší síla působí ve svislém směru (směr gravitačního zrychlení) a přechází z opěrného nákrůžku tlakové nádoby reaktoru přes přechodový segment do opěrného prstenu. Opěrný prsten má kruhový tvar, proto se negeneruje silový moment, který by s ním rotoval (propadal se směrem k nádobě). Opěrný prsten je podepřen na 24 místech opěrnými klíny, které přenáší silové účinky do opěrného nosníku. Opěrné klíny nemají kruhový, ale obdélníkový tvar a slouží k přesnému vodorovnému usazení tlakové nádoby reaktoru při její montáži. Klíny jsou s opěrným nosníkem i mezi sebou pevně spojeny (svařeny na okrajích koutovými svary) a prokluz je umožněn jen mezi nimi a opěrným prstenem.

Vodorovné síly v tečném směru zachycují pera II, která je přenáší do opěrného nosníku. Vodorovných per je také 24 s pravidelnými roztečemi po  $15^\circ$ , a proto zachycují vodorovné síly ve všech směrech. Pera II jsou spojena šrouby s opěrným prstenem. Ty ale přenáší pouze síly ve svislém směru (nejsou lícované). Je předpokládán prokluz mezi perou a prstenem v radiálním směru.

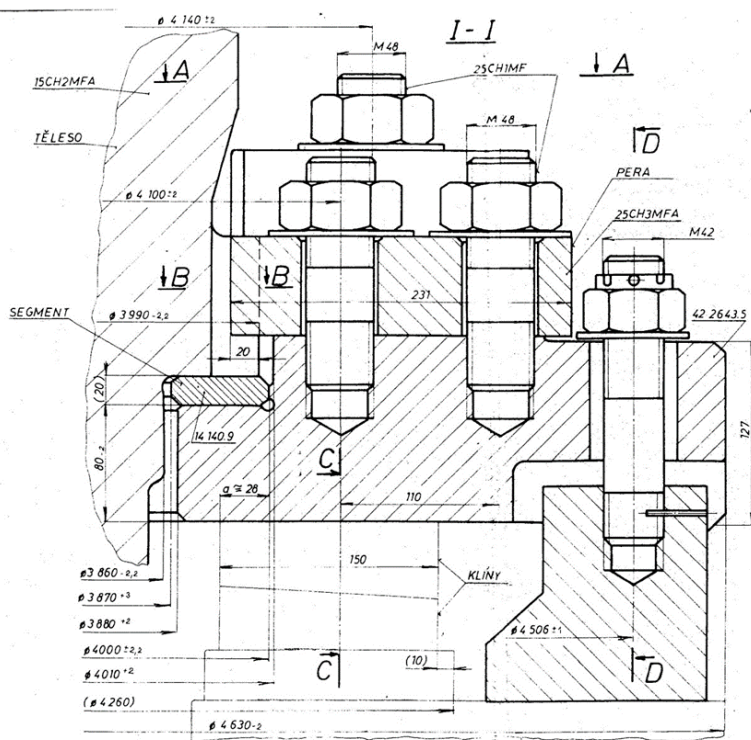
V případě, že by tlaková nádoba reaktoru působila v některém segmentu svislou silou vzhůru, budou tyto síly zachyceny perou I a přes opěrný prsten a perou II přeneseny do opěrného nosníku.

Tímto uspořádáním je zajištěno bezpečné a staticky určité uložení tlakové nádoby.

Detaily opěrného prvku ukazují Obrázek 2 a Obrázek 3.



Obrázek 2 Detaily opěrného systému [4]

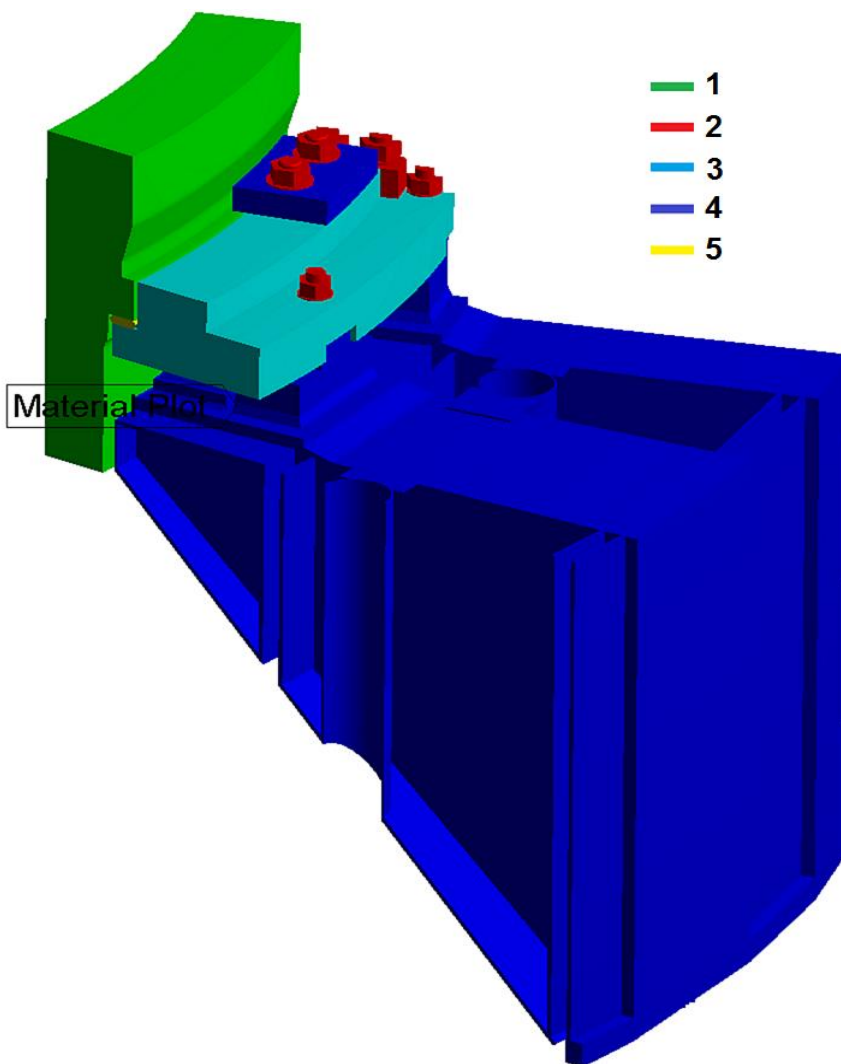


Obrázek 3 Řez opěrným systémem [4]

## 2 Materiály a jejich vlastnosti

Opěrný rám tlakové nádoby reaktoru je vyroben ze 6 druhů materiálů. 5 typů ocelí je znázorněno na Obrázek 4, šestým je serpentinitový beton. Vlastnosti materiálů vycházejí ze zpráv VZÚ Plzeň [4].

V celé práci jsou oceli značeny dle ruských norem, tak jako to je v oboru jaderné energetiky běžné.



Obrázek 4 Přehled materiálů [4]

Následující Tabulka 2 shrnuje některé základní vlastnosti použitých ocelí (při teplotě 350 °C, která je konzervativně zvolena jako výpočtová). Hodnoty dovolených napětí jsou vypočítány ze vztahů [5], kde jsou zvoleny bezpečnosti  $n_{0,2} = 1,5$  a  $n_m = 2,6$ .

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{R_{p0,2}}{n_{0,2}}; \frac{R_m}{n_m} \right\} \quad (2.1)$$

Pro šrouby a svorníky platí jiný vztah [5], kde  $n_{0,2} = 2$ .

$$[\sigma]_w = \frac{R_{p0,2}}{n_{0,2}} \quad (2.2)$$

Všechny šrouby jsou z materiálu 25Ch1MF.

Hodnoty dovoleného maximálního smykového napětí jsou polovinou hodnot dovoleného napětí (výslovně uvedeno i v normě [5]). Užíváme je, protože software ANSYS umožňuje jejich zobrazení snáze než u redukovaného napětí.

$$[\tau] = \frac{[\sigma]}{2} \quad (2.3)$$

Číslo	Označení	Součásti	$R_{p0,2} /$ MPa	$R_m /$ MPa	$[\sigma] /$ MPa	$[\tau] /$ MPa
1	15Ch2MFA	tlaková nádoba reaktoru	441	539	208	104
2	25Ch1MF	pero I, matice a podložky	491	638	246	123
2	25Ch1MF	všechny šrouby	491	638	246	-
3	25L	opěrný prsten	176	343	118	59
4	22K	klíny, pero II, opěrný nosník, příložka	176	343	118	59
5	40Ch	segment	638	824	316	158

Tabulka 2 Základní vlastnosti ocelí

Podrobné tabulky s vlastnostmi ocelí jsou v příloze této práce.

### 3 Zatížení

Výpočet je rozdělen do dvou směrů. První směr výpočtu (pátá kapitola) se zabývá modelováním napěťových polí vlivem dilatací, které vznikají teplotním rozdílem mezi odstávkou a provozním stavem reaktoru.

Druhý směr výpočtu (šestá kapitola) řeší zatížení opěrných prvků statickými silami. Toto zatížení bylo rozděleno do 8 zátěžných stavů, které vycházejí z provozních režimů jaderného reaktoru [4].

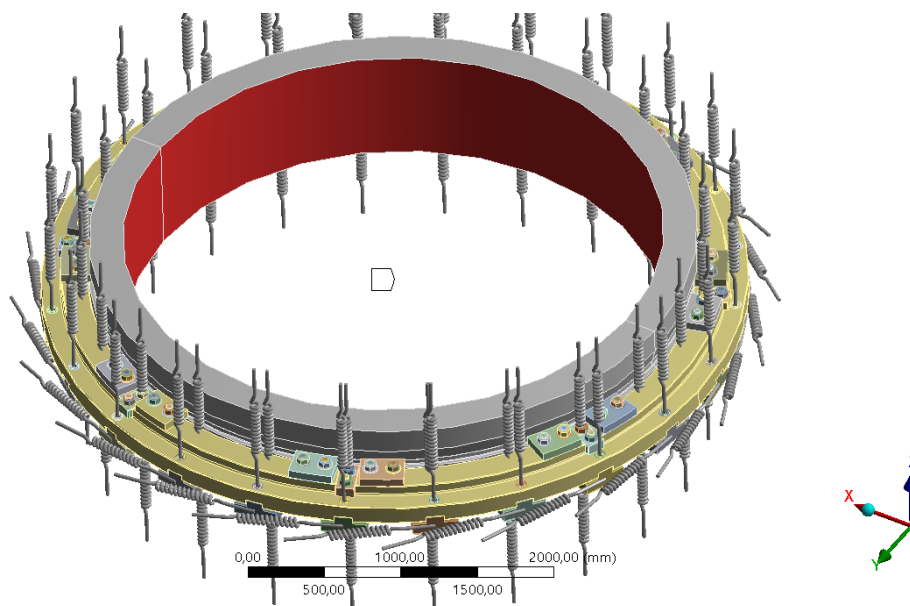
1. Tepelné dilatace reaktoru za provozu na nominálním výkonu, zatížení vlastní vahou reaktoru a navazujících potrubí a provozním přetlakem v tlakové nádobě reaktoru.
2. Tepelné dilatace reaktoru za provozu na minimálním stabilním výkonu, zatížení vlastní vahou reaktoru a navazujících potrubí a provozním přetlakem v tlakové nádobě reaktoru (přetlak je stejný ve stavech 1 i 2).
3. Tepelné dilatace reaktoru při hydrozkoušce, zatížení vlastní vahou reaktoru a navazujících potrubí a provozním přetlakem v tlakové nádobě reaktoru
4. Tepelné dilatace reaktoru při najíždění (při teplotě 180 °C), zatížení vlastní vahou reaktoru a navazujících potrubí a provozním přetlakem v tlakové nádobě reaktoru.
5. Tepelné dilatace reaktoru při najíždění (při teplotě 240 °C), zatížení vlastní vahou reaktoru a navazujících potrubí a provozním přetlakem v tlakové nádobě reaktoru
6. Zatížení vlastní vahou reaktoru.
7. Zatížení vlastní vahou potrubí.
8. Zatížení při havárii typu LOCA na hlavním cirkulačním potrubí.

V Tabulka 3 jsou síly a momenty, které působí na celý opěrný systém (jejich působíště je uvažováno na vnitřní straně tlakové nádoby reaktoru, viz Obrázek 5) v jednotlivých zátěžných stavech. Složka sil ve směru z je svislá, složky x a y vodorovné (odpovídá směrům souřadnicových os na Obrázek 5).

Zátěžný stav	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
	N	N	N	N · m	N · m	N · m
1	-88 391	-10 359	-7 699 600	55 045	-46 819	235 060
2	-65 946	-7 109	-7 718 600	50 606	-2 818	217 030
3	-21 770	-137	-7 608 900	39 116	-40 088	100 610
4	-41 975	-5 830	-7 655 000	47 934	-25 168	139 190
5	-57 302	-9 565	-7 698 300	53 675	-5 430	184 440
6	0	0	-7 000 000	0	0	0
7	5 249	859	-731 210	28 215	96 636	-55
8	3 327 200	-3 422 200	-7 725 100	7 013 400	6 939 400	218 20

Tabulka 3 Síly a momenty působící na opěrný systém

ZatíženíSíla  
18.03.2019 11:56  
■ ZatíženíSíla



Obrázek 5 Souřadnice zadaných sil

Hodnoty silových účinků, které působí na opěrný systém v jednotlivých zátěžných stavech, jsou dostupné ve VZÚ Plzeň [4].

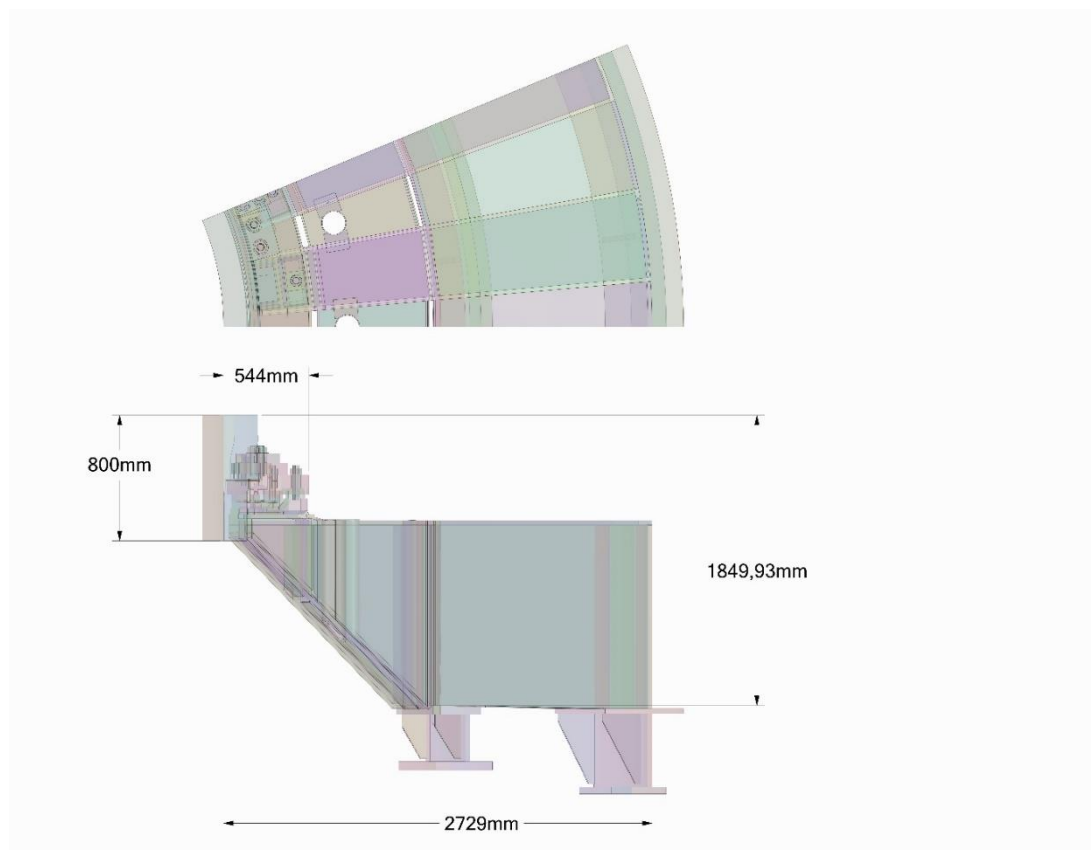
## 4 Výpočtový model

Pro výpočet bylo využito softwarové vybavení VZÚ Plzeň, konkrétně program ANSYS Mechanical 19.0.

### 4.1 Symetrie

Z důvodu výpočtové schůdnosti nebylo využito jednoho modelu opěrného systému, ale několika dílčích modelů, které dohromady spojené vazbami vytvářejí celek. Modely využívají cyklické symetrie opěrného systému.

Model pro teplotní úlohu (Obrázek 6) představuje 1/16 celého opěrného kruhu (výšeč 22,5°). Zahrnuje jeden celý a polovinu opěrné konzoly a polovinu příložky a pera I. Zadní části betonu s teplotou okolí jsou skryty, aby měl výpočtový model nižší počet elementů.

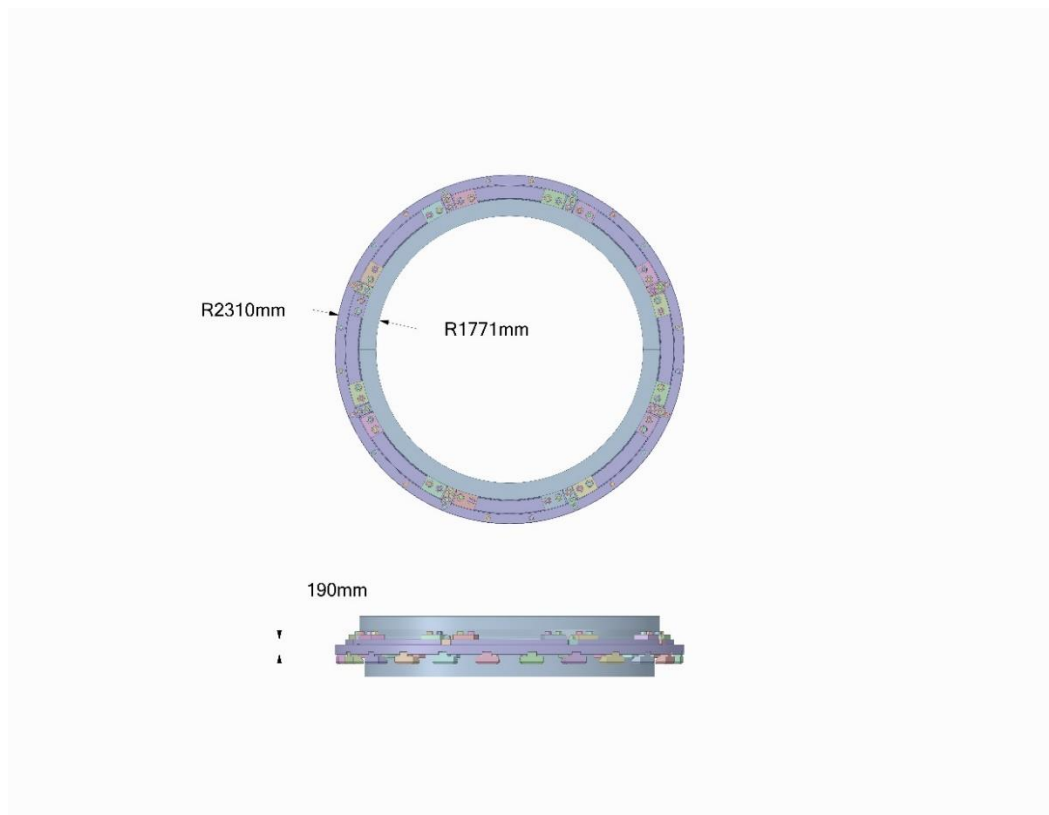


Obrázek 6 Geometrie využitá pro model teplotní úlohy

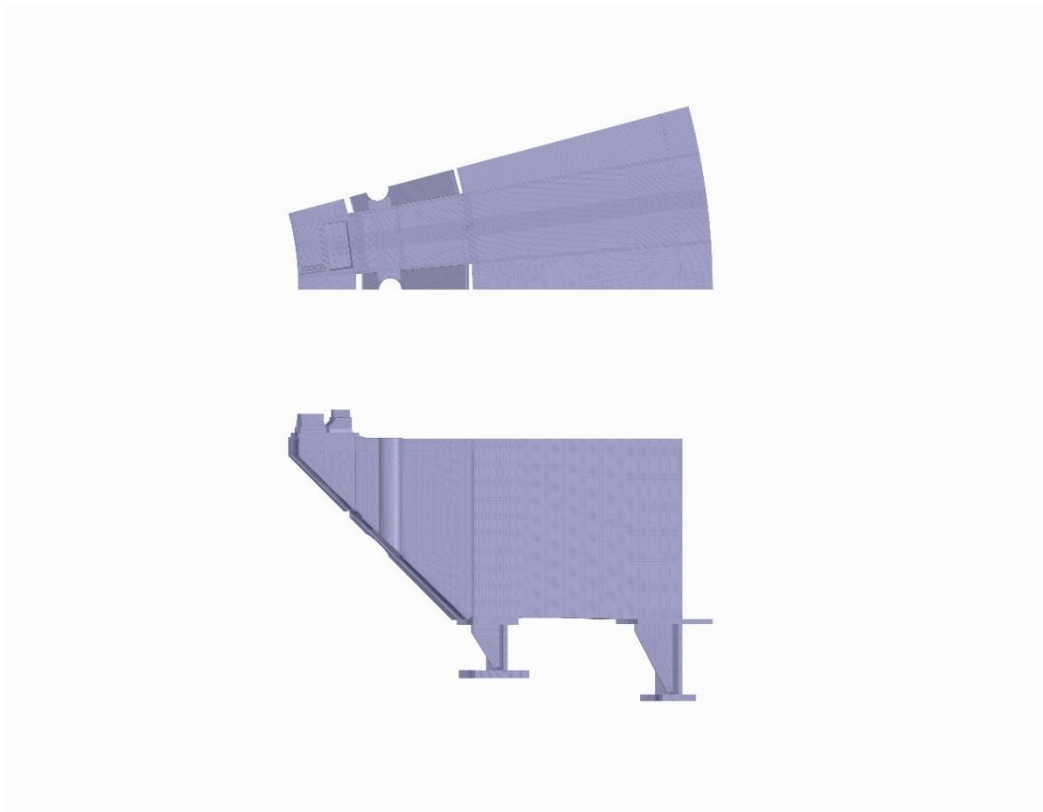
Pro statické výpočty je s ohledem na nesymetrické zatížení opěrného systému (zvláště v případě LOCA havárie) nezbytné počítat alespoň některé části opěrného systému jako jeden celek kruhového tvaru. Proto byl celý model rozdělen na vnitřní část (model opěrného prstenu, viz Obrázek 7) a model opěrného segmentu jako kruhové výseče s úhlem 15°, (tedy 1/24, viz Obrázek 8). Segmenty jsou v modelu celého kruhu nahrazeny pomocí tuhostních vazeb (pružin).



Výsledkem této úlohy je napěťové pole v opěrném prstenu a síly, které tyto pružiny přenášejí do modelu segmentu (byly konzervativně vybrány maxima z 24 sil), a dále napěťové pole segmentu.



Obrázek 7 Geometrie využitá pro model opěrného kruhu



Obrázek 8 Geometrie využitá pro model segmentu

## 4.2 Společné předpoklady

Veškeré výpočty uváděné v této diplomové práci zohledňují několik společných podmínek a předpokladů.

1. Hodnoty materiálových parametrů jsou v případě teplotních výpočtů funkcí skutečné teploty v daném bodě. V případě statických výpočtů jsou konzervativně vybrány ty pro teplotu 350 °C.
2. I přesto, že hodnoty napětí v některých bodech jsou vysoké a překračují mez kluzu dané oceli, materiálový model je lineární a předpokládá platnost Hookova zákona.
3. Všechna zatížení mají statický charakter, včetně zatížení způsobeného havárií typu LOCA.
4. Výpočet vychází z Normativně technické dokumentaci Asociace strojních inženýrů [5]. Některé její předpoklady týkající se zátěžného stavu LOCA jsou velmi konzervativní. Platí to pro uvažovanou bezpečnost  $k = 2$ , která je shodná s bezpečností pro všechny zátěžné stavy. Havárie typu LOCA by neměla nikdy nastat, neboť materiál tlakové nádoby reaktoru, parogenerátorů a hlavních cirkulačních potrubí je natolik tažný, že před křehkým porušením gilotinového charakteru by vznikla malá průchozí trhlinka. Únik chladiva touto trhlinkou by byl oproti celkovému množství chladiva v I. okruhu zanedbatelný, ale bezpečně detekovatelný pro diagnostické systémy. Tato situace umožňuje reaktor včas bezpečně odstavit (princip *Leak before Break*). Navíc, pokud by došlo k většímu úniku chladiva z primárního okruhu a k doplňování chladiva ze zásobníků havarijního dochlazování, nastane tlakově-teplotní šok na tlakové nádobě reaktoru, který by ubral její životnost tak výrazně, že by reaktor nemohl být znovu spuštěn [6].

## 5 Teplotní výpočet

### 5.1 Výpočet teplotních polí

Tento výpočet stanovuje na základě zvolených okrajových podmínek teplotní pole segmentu opěrného systému jaderného reaktoru. Z něj jsou odvozena napěťová pole vyvolaná tímto teplotním pnutím, která jsou poté vyhodnocena.

Byla využita geometrie dostupná ve VZÚ Plzeň [13]. Došlo k drobným geometrickým změnám některých částí a úpravě definice kontaktů mezi modelovanými objemy. Hodnoty tepelných odporů by měly být nulové v případě, že dva a více výpočtových objemů představují jedno fyzikální těleso. V dalších případech by se nule měly blížit, neboť se jedná o velmi těsný a dlouhodobý styk součástí.

Pro teplotní výpočet jsou uvažovány pouze ocelové součásti. Toto zjednodušení lze připustit, jak dokládá následující analytický výpočet.

Z modelů bylo odečteno, že příčné plochy ocelových a betonových dílů mají velikost:

$$S_{beton} = 0,086\ 025\ m^2 \quad (5.1)$$

$$S_{ocel} = 0,023\ 175\ m^2 \quad (5.2)$$

Tepelné vodivosti ocelí a betonu (v tomto přiblížení považovány za konstanty):

$$\lambda_{beton} = 0,91\ Wm^{-2}K^{-1} \quad (5.3)$$

$$\lambda_{ocel} = 51,7\ Wm^{-2}K^{-1} \quad (5.4)$$

Platí Fourierův zákon [2]:

$$d\dot{Q} = -\lambda \cdot grad\ T \cdot dS \quad (5.5)$$

Po úpravě:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot grad\ T \cdot S \quad (5.6)$$

Platí i následující tepelná bilance:

$$\dot{q}_{celkové} = \dot{q}_{ocel} + \dot{q}_{beton} = -\lambda_{beton} \cdot grad\ T \cdot S_{beton} - \lambda_{ocel} \cdot grad\ T \cdot S_{ocel} \quad (5.7)$$

Po úpravě a dosazení:

$$\frac{\dot{q}_{celkové}}{-grad\ T} = \lambda_{beton} \cdot S_{beton} + \lambda_{ocel} \cdot S_{ocel} = \quad (5.8)$$

$$= 0,91 \cdot 0,086025 + 51,7 \cdot 0,023175 \cong 1,276 \quad (5.8)$$

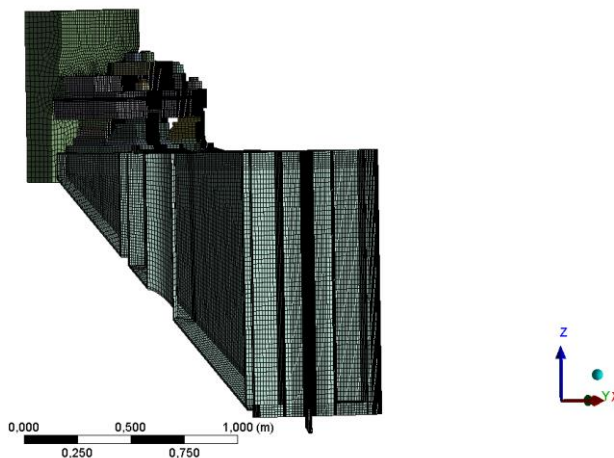
Po sečtení a převodu na procenta.

$$1,198 + 0,078 = 1,276 \quad (5.9)$$

$$93,9\ \% + 6,1\ \% = 100\ \% \quad (5.10)$$

Přes ocelové části prochází 93,9 % tepelného toku a přes betonové části jen zbývajících 6,1 %. Následující výpočty budou tedy pro jednoduchost a schůdnost počítat jen s ocelovými částmi (materiály 1-5, materiál 6 vynechán).

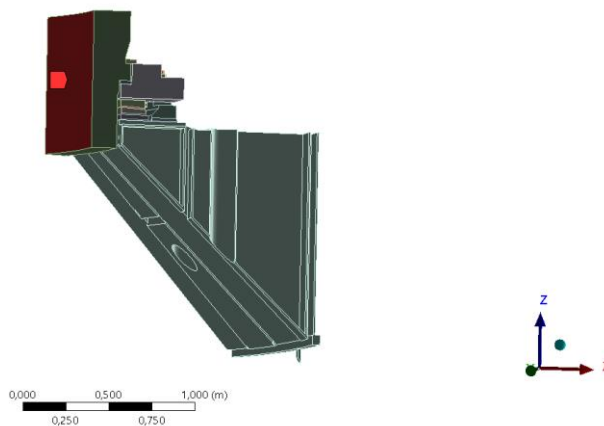
Síť má celkem 1 474 443 uzlů a 314 313 prvků převážně tvaru šestistěnu (s výjimkami), viz Obrázek 9.



Obrázek 9 Výpočtová síť teplotní úlohy

Okrajové podmínky výpočtu byly zadány ve třech různých variantách. V základní je vnitřní povrch stěny tlakové nádoby (Obrázek 10) ohříván – okrajová podmínka stálé teploty plochy (*Temperature*) 268 °C a zároveň je ochlazována vnější strana nosníku umístěná ve stavební konstrukci (Obrázek 11) – okrajová podmínka stálé teploty plochy (*Temperature*) 40°C.

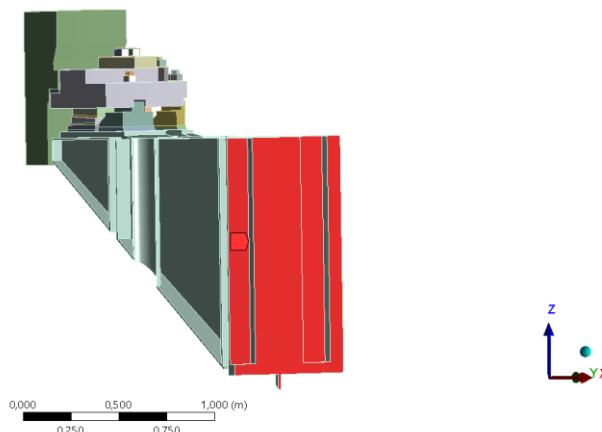
B: Vedení + salání  
Reaktor  
Time: 1, s  
04.02.2019 9:58  
■ Reaktor: 268, °C



Obrázek 10 Okrajová podmínka na vnitřní stěně tlakové nádoby

B: Vedení + sálání  
 Beton zadní  
 Time: 1, s  
 04.02.2019 9:58

■ Beton zadní: 40, °C



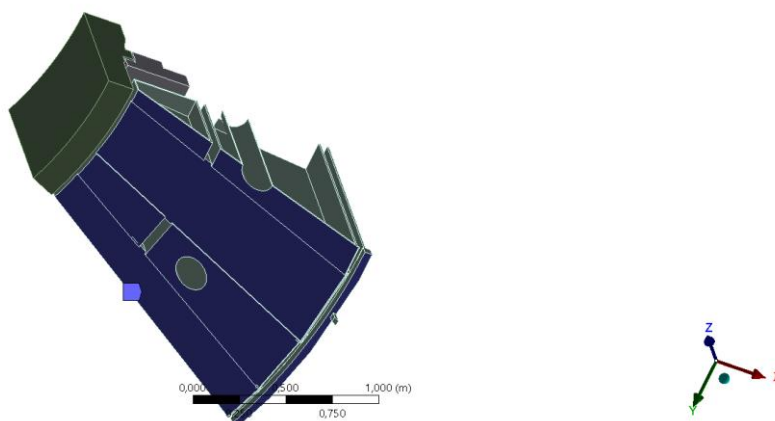
Obrázek 11 Okrajová podmínka na vnější straně opěrného segmentu

Dále je uvažován přestup tepla do okolí vedením na vnějších plochách, součinitel přestupu tepla byl stanoven  $\alpha = 5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Hodnota je stejná jako v jiných modelech obdobné součásti.

Ve druhé variantě je kromě předchozích okrajových podmínek zahrnuto i sálání ohřátých ploch do volného prostoru nebo mezi sebou navzájem. Sálání do volného prostoru neboli sálání, kdy osálaná plocha není v modelu (*To Ambient*), platí pro okrajové podmínky 1 a 2 (viz Obrázek 12 a Obrázek 13). V obou případech je stanovena teplota osálané plochy  $60 \text{ °C}$  a emisivita sálající plochy 0,9.

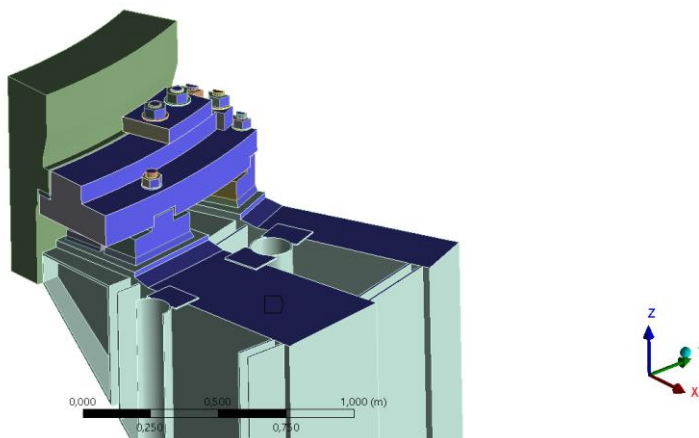
B: Vedení + sálání  
 Radiation 1  
 Time: 1, s  
 04.02.2019 10:31

■ Radiation 1: 60, °C, 0,9



Obrázek 12 Okrajová podmínka sálání číslo 1

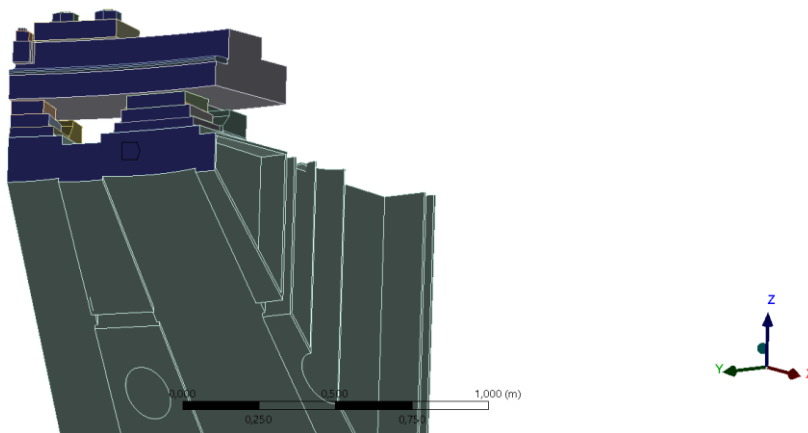
B: Vedení + sálání  
Radiation 2  
Time: 1, s  
04.02.2019 10:30  
■ Radiation 2: 60, °C, 0,9



Obrázek 13 Okrajová podmínka sálání číslo 2

Sálání s uvažováním dvou vzájemně sálajících ploch (*Surface to Surface*) se v modelu uplatňuje u okrajových podmínek 3 a 4 (viz Obrázek 14 a Obrázek 15). Tento typ podmínky je poměrně komplexní, neboť umožňuje počítat sálání nejen mezi vzájemně svázanými plochami (*Enclosure Type Perfect*), ale i mezi vzájemně svázanými plochami a okolím (*Enclosure Type Open*). Právě druhý typ byl využit i v našem případě. Parametry pro výpočet je teplota okolí (také 60 °C) a emisivita sálající plochy (také 0,9).

B: Vedení + sálání  
Radiation 3  
Time: 1, s  
04.02.2019 10:31  
■ Radiation 3: 60, °C, 0,9 , 1,



Obrázek 14 Okrajová podmínka sálání číslo 3

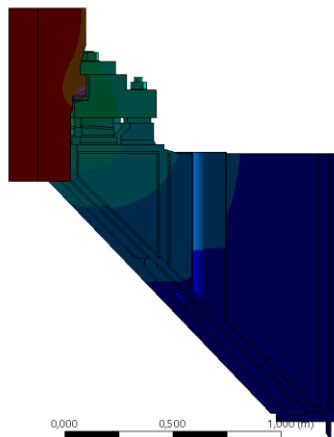
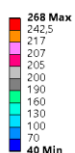
B: Vedení + sálání  
Radiation 6  
Time: 1, s  
04.02.2019 10:32



Obrázek 15 Okrajová podmínka sálání číslo 4

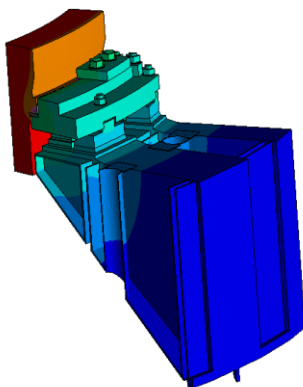
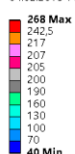
Teplotní pole bylo určeno iterativní metodou řešení a je znázorněno na Obrázek 16 a Obrázek 17.

B: Vedení + sálání  
Temperature  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1  
04.02.2019 11:29



Obrázek 16 Teplotní pole po průřezu modelu (teplota studeného konce 40°C)

B: Vedení + sálání  
Temperature  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1  
04.02.2019 11:29



Obrázek 17 Teplotní pole v náhledu (teplota studeného konce 40°C)

Pro kontrolu reálnosti výsledků lze určit tepelný tok segmentem. Plocha  $S_{TNR}$  na obrázku (Obrázek 18) přenáší stejný tepelný tok jako celý segment:

$$S_{TNR} = 0,556\ 38\ m^2 \quad (5.11)$$

Průměrný tepelný tok touto plochou je:

$$\overline{q_{PL}} = 5844,1\ W \cdot m^{-2} \quad (5.12)$$

Celkový tepelný tok plochou jednoho segmentu je:

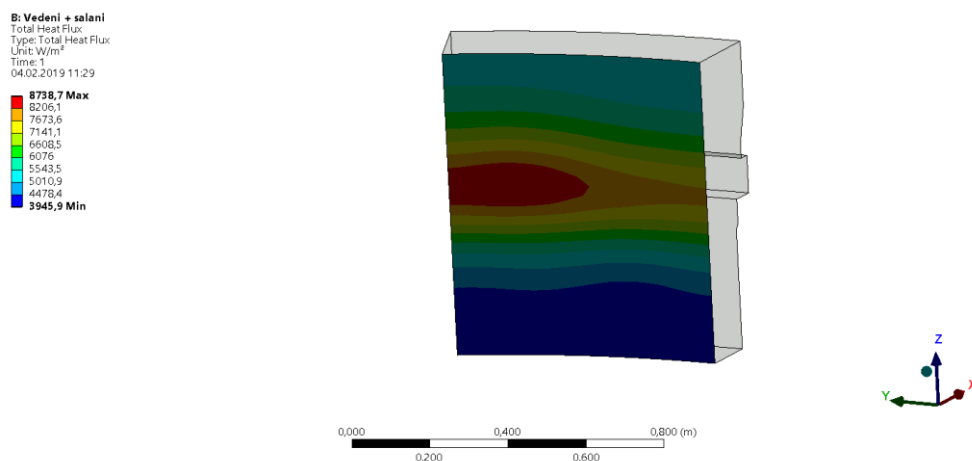
$$q_{PL} = \overline{q_{PL}} \cdot S = 5844,1 \cdot 0,556\ 38 \approx 3\ 251,5\ W \quad (5.13)$$

Pro všech 24 segmentů jde o celkový tok:

$$\sum q_{PL} = 24 \cdot q_{PL} = 24 \cdot 3\ 251,5 = 78\ 036\ W \quad (5.14)$$

Tepelný výkon reaktoru je cca  $\dot{Q}_R = 1\ 375\ MW = 1,375\ 10^9\ W$  [12], platí tedy, že opěrným prvkem je odveden procentuální poměr tepelného výkonu:

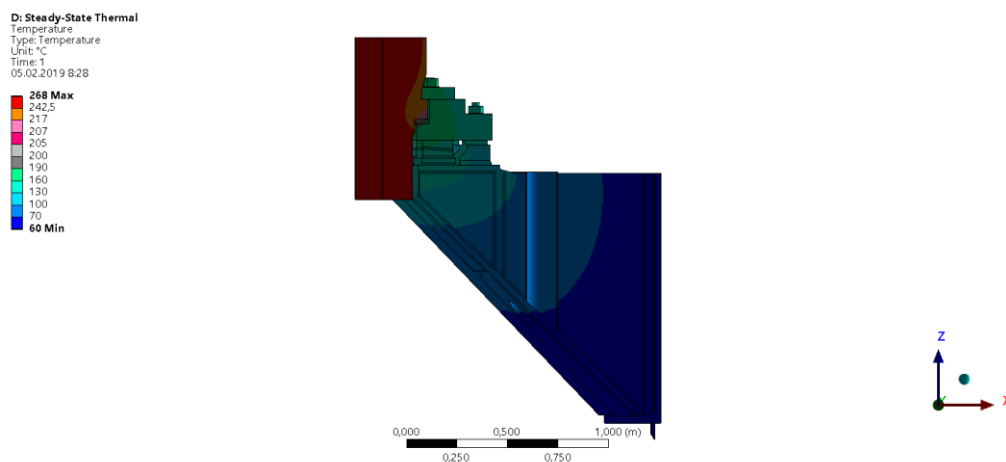
$$\frac{\sum q_{PL}}{\dot{Q}_R} = \frac{78\ 036}{1,375 \cdot 10^9} \approx 5,7 \cdot 10^{-5} = 5,7 \cdot 10^{-3}\ \% \quad (5.15)$$



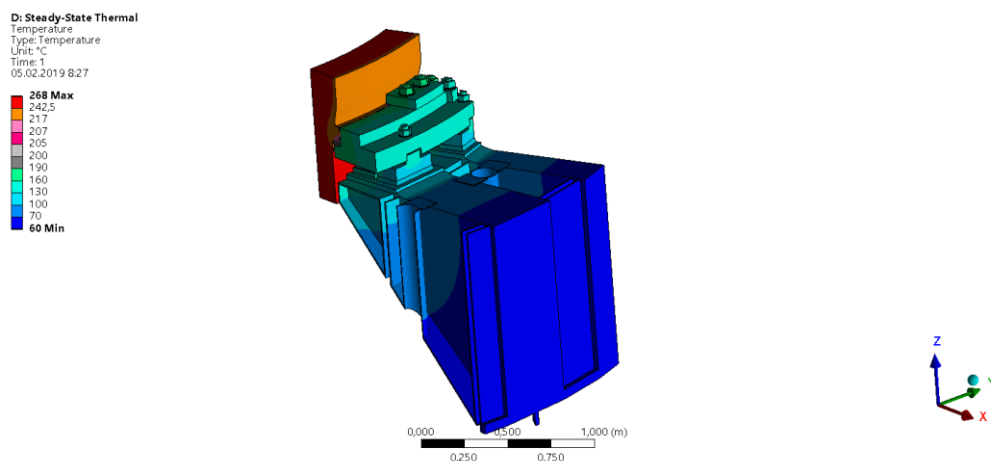
Obrázek 18 Plocha, která přenáší stejný tepelný tok jako celý segment

Byl proveden i výpočet teplotního pole pro teplotu betonu nikoliv 40 °C, ale 60 °C, aby bylo možné určit, jaký vliv má tato změna teploty na celkové výsledky. Na Obrázek 16, Obrázek 17, Obrázek 19 a Obrázek 20 představují jednotlivé barvy tytéž teploty.





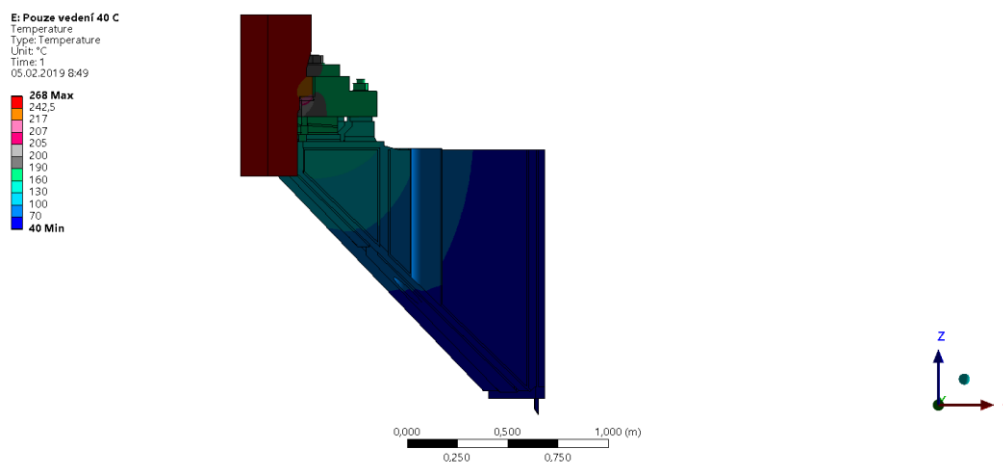
Obrázek 19 Teplotní pole po průřezu modelu (teplota studeného konce 60°C)



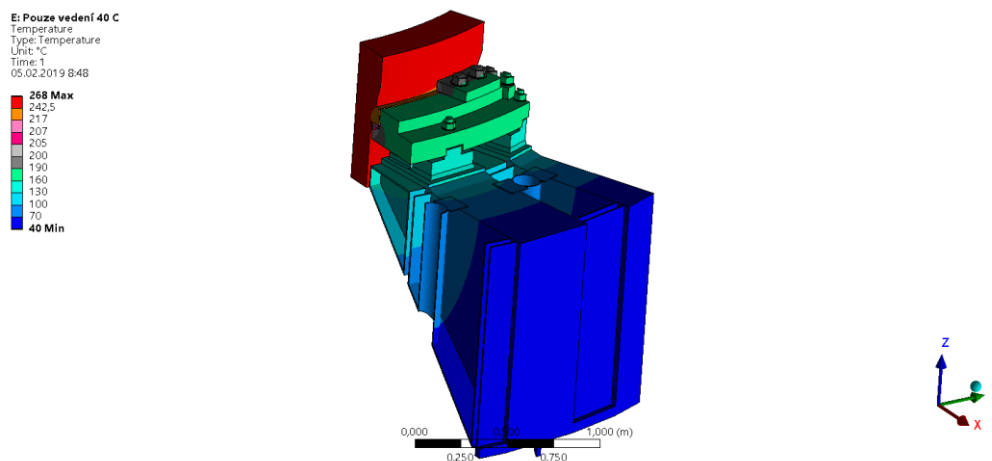
Obrázek 20 Teplotní pole v nadhledu (teplota studeného konce 60°C)

Porovnáním obrázků lze říci, že rozdíl v okrajové podmínce teploty betonu nemá význam v rozložení teplot na opěrném prvku. Významnější rozdíly se projevují hlavně v části blízké betonu, která má ale v obou případech relativně nízkou teplotu (pod 100 °C).

Další odstavce se věnují posouzení vlivu sálající okrajové podmínky na celkové výsledky. Byly opět využity totožné okrajové podmínky (úloha pro teplotu betonu 40 °C), jen s vyloučením sálání.

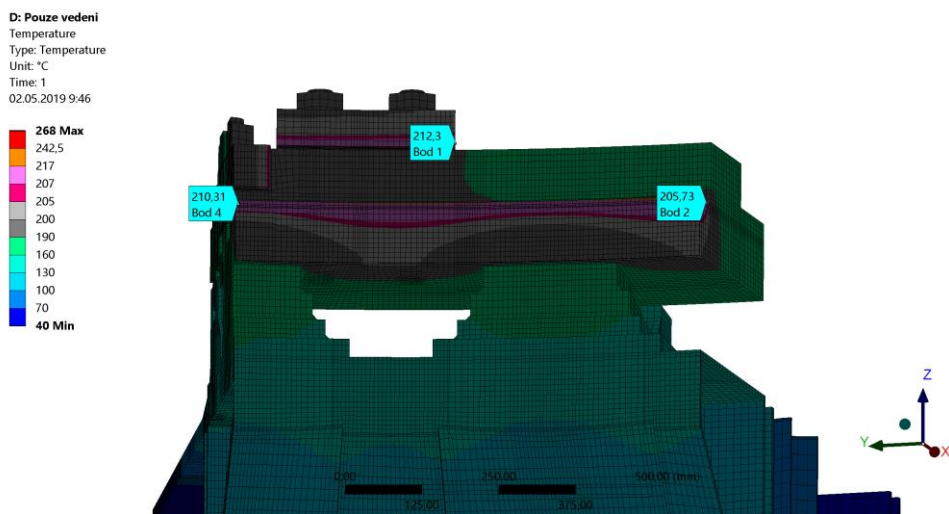


Obrázek 21 Teplotní pole po průřezu modelu (bez vlivu sálání)

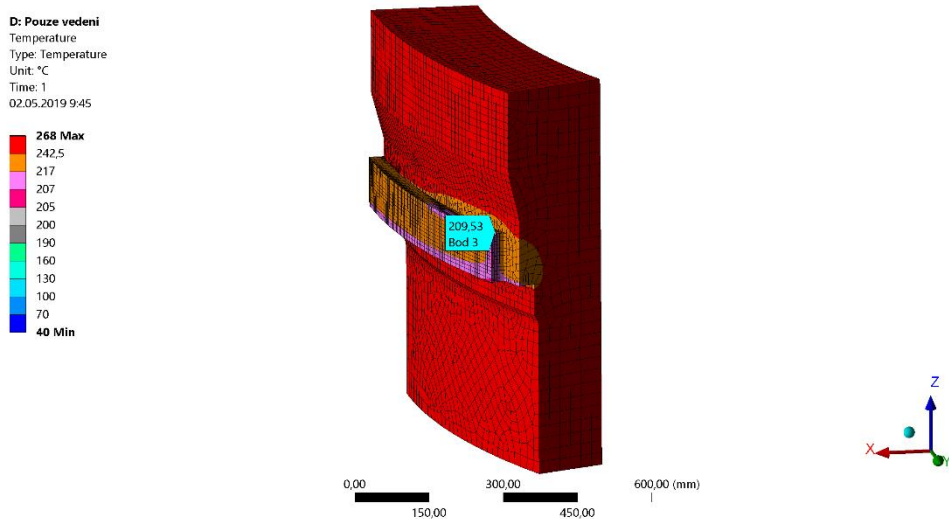


Obrázek 22 Teplotní pole v náhledu (bez vlivu sálání)

Neboť je značně obtížné porovnání teplotních polí z Obrázek 19 a Obrázek 20 oproti Obrázek 21 a Obrázek 22, byly vyhledány čtyři různé uzly (Obrázek 23 a Obrázek 24) výpočtové sítě a odečtena jejich teplota v obou porovnávaných variantách (Tabulka 4).



Obrázek 23 Umístění posuzovaných uzlů



Obrázek 24 Umístění posuzovaných uzlů

Bod číslo	Teplota bez sálání / °C	Teplota se sáláním / °C
1	212,3	192,3
2	205,7	185,9
3	209,5	184,4
4	210,3	193,5

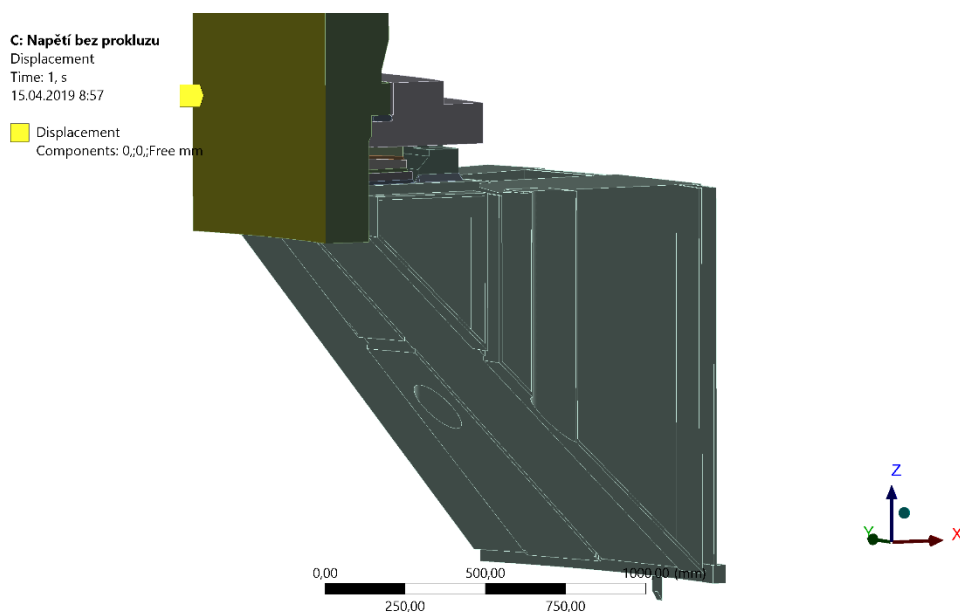
Tabulka 4 Porovnání teplot ve vybraných uzlech

Jak vyplývá z Tabulka 4, ve variantě výpočtu bez zahrnutí sálání je teplota všech čtyřech zkoumaných bodů vyšší než ve variantě se sáláním. Tento výsledek lze předpokládat, neboť ve variantě bez sálání je zhoršený přestup tepla z opěrného systému do vzduchu.

## 5.2 Napěťové pole vlivem teplotní dilatace

Následuje výpočet napěťových polí. Většina kontaktů mezi tělesy má charakter pevného spojení (*Bonded*), ale výpočtový model umožňuje prokluz bez tření (okrajová podmínka *Frictionless*) v místě opření tlakové nádoby reaktoru o opěrný systém.

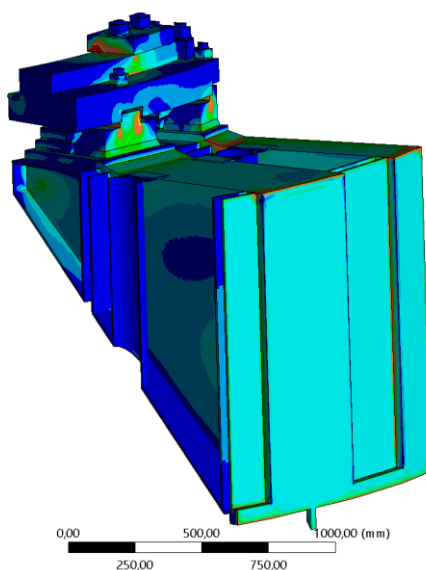
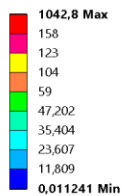
Pro výpočet napěťových polí byly uplatněny tyto okrajové podmínky. Pevná podpora (*Fixed Support*) působí na stejné plochy jako okrajové podmínky teploty betonu (Obrázek 11). Navíc je omezen posuv výseče tlakové nádoby reaktoru (Obrázek 25).



Obrázek 25 Okrajová podmínka bránící pohybu tlakové nádoby reaktoru

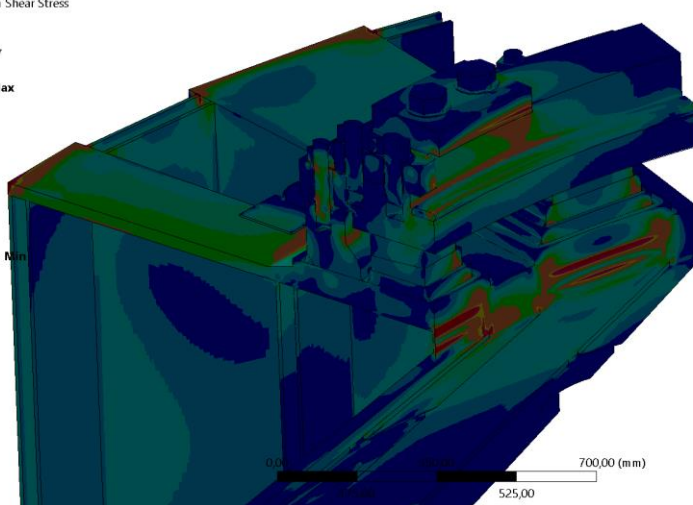
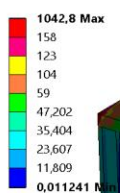
Model byl zatížen vypočítaným teplotním polem. Výsledné hodnoty napětí jsou znázorněny na Obrázek 26 a Obrázek 27. Část tlakové nádoby není zobrazena, neboť není hodnocena. Světlé barvy ukazují oblasti, kde bylo překročeno dovolené napětí jednotlivých materiálů a bude nezbytné jejich dílčí hodnocení. Červená představuje překročení dovoleného napětí pro materiál 5 (158 MPa), růžová překročení u materiálu 2 (123 MPa), žlutá překročení u materiálu 1 (104 MPa) a oranžová překročení u materiálů 3 a 4 (pro oba 59 MPa).

C: Napětí bez prokluzu  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
13.04.2019 9:26



Obrázek 26 Napětí od teplotního pole

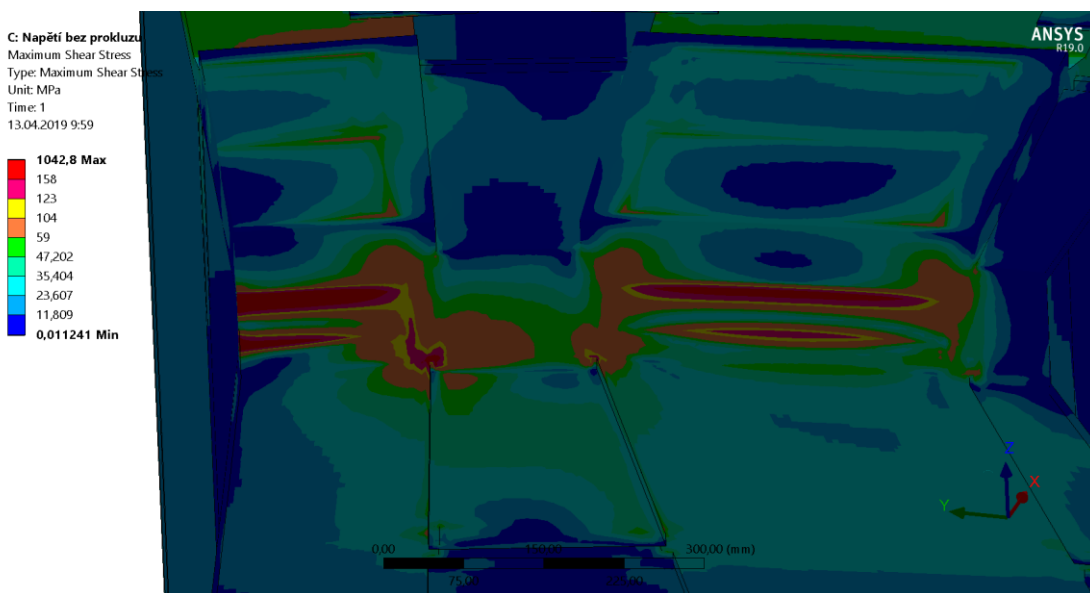
C: Napětí bez prokluzu  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
13.04.2019 9:27



Obrázek 27 Napětí od teplotního pole

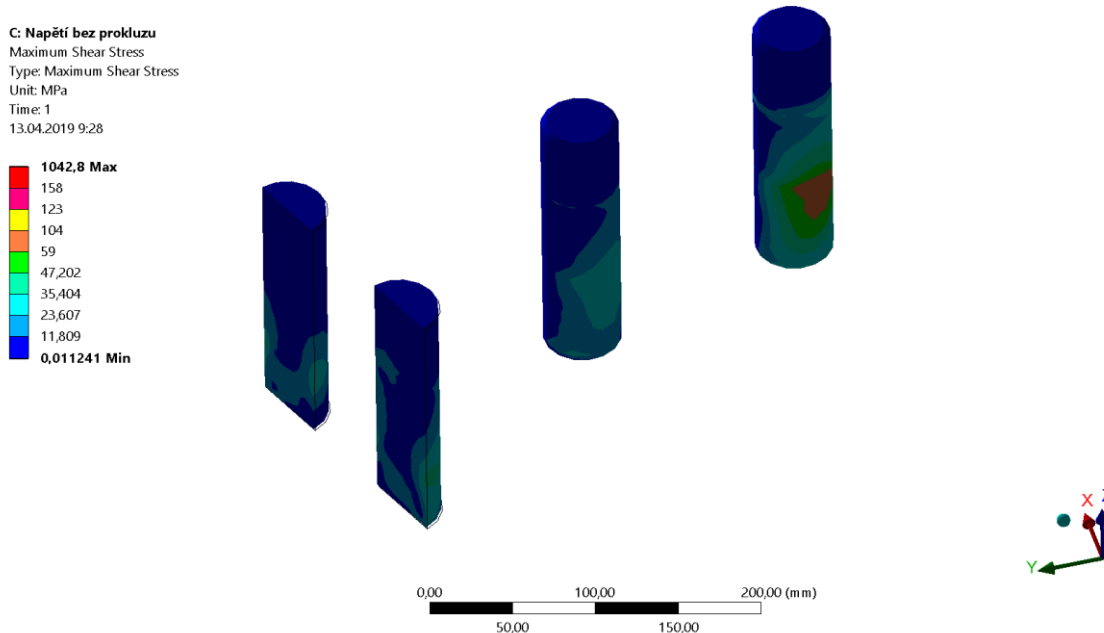
Následuje popis částí, jež je nutné hodnotit zvlášť.

- 1) Přední část opěrného systému (Obrázek 28) je značně zatížena, ale jak vyplývá z dokumentace a z výkresů [13], nemá nosný charakter. Její význam je umožnit vylití segmentů opěrného kruhu stínícím serpentinitovým betonem. Proto překročení dovoleného napětí (světlé barvy znázorňující oblasti s napětím nad 59 MPa) není považováno za závadné.



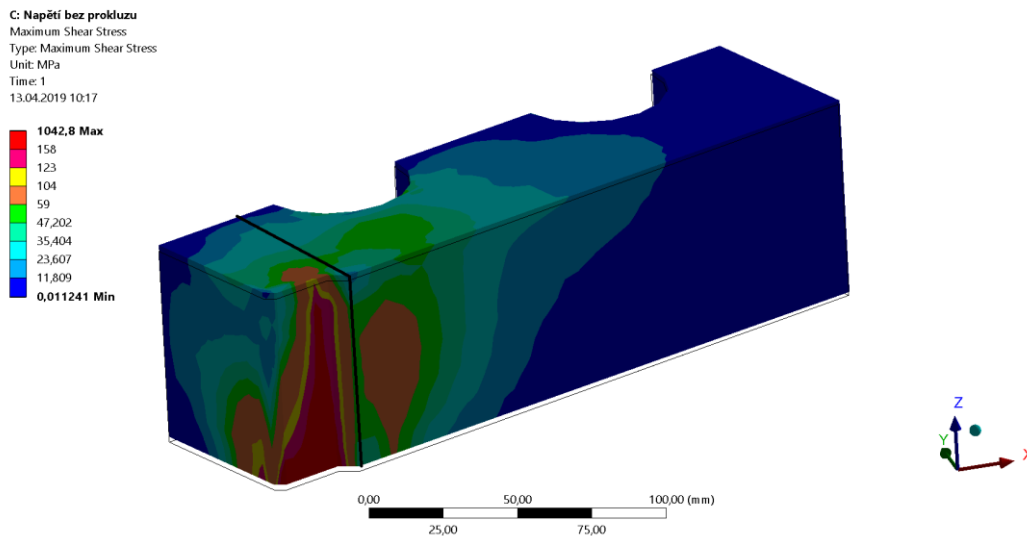
Obrázek 28 Detail přední části segmentu

- 2) Méně zatížené šrouby v horní části opěrného systému (zajišťující pero I a příložku) jsou znázorněny na Obrázek 29. Podle normy [5] by měly být všechny šrouby hodnoceny odděleně. Tyto ale vykazují nízké ekvivalentní napětí (maximum nižší než 104 MPa) a s ohledem na vysoké dovolené napětí (123 MPa) je lze považovat za bezpečné.

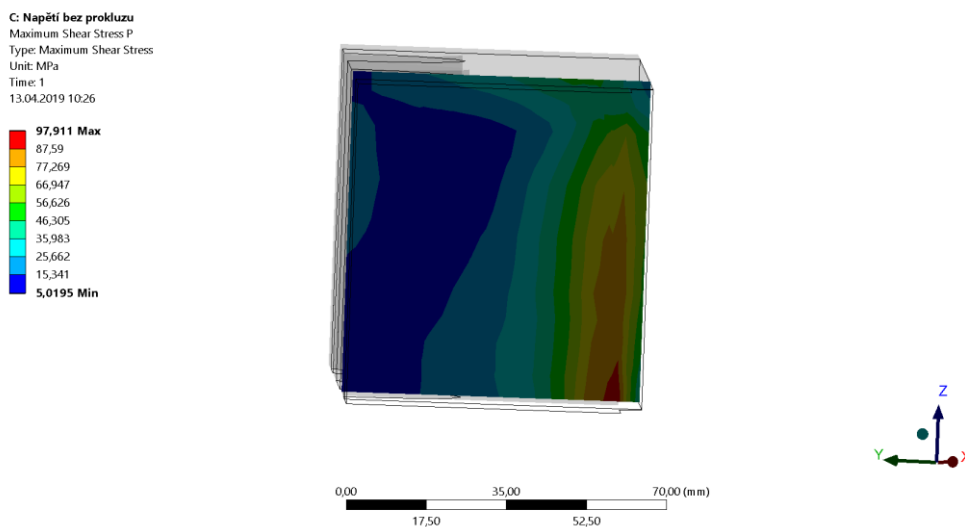


Obrázek 29 Méně zatížené šrouby

- 3) Dovolené napětí pera I (Obrázek 30) je vyšší než u ostatních částí (123 MPa, oblasti červené a růžové) a vypočtená napětí překračující napětí dovolené mají převážně kontaktní charakter. V rovině namáhané na smyk (na Obrázek 30 je ukázána její poloha černou čarou) již nedosahují tak vysokých hodnot (Obrázek 31) a v žádném bodě nepřekračují maximální dovolené napětí.

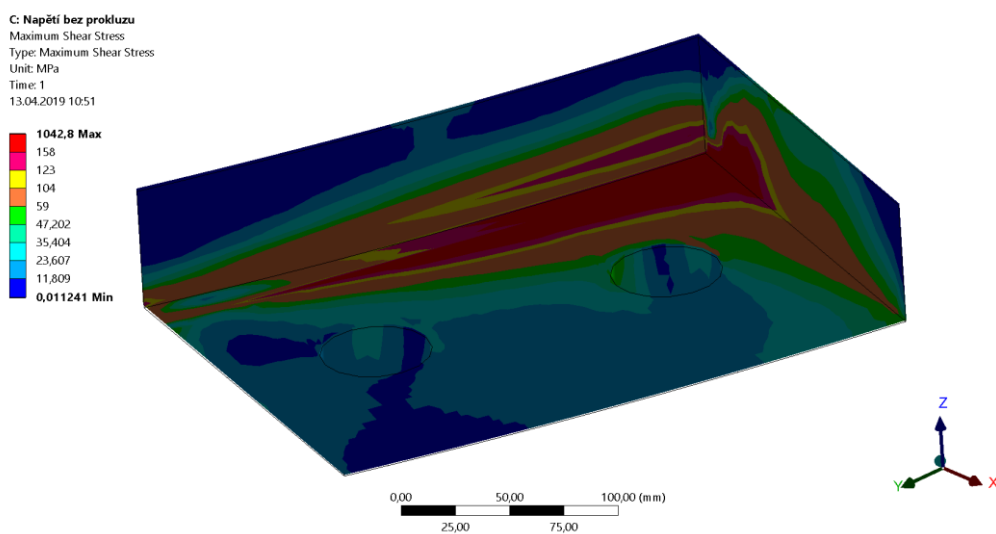


Obrázek 30 Zatížení pera I od teploty (oblast roviny stříhu ukazuje černá čára).

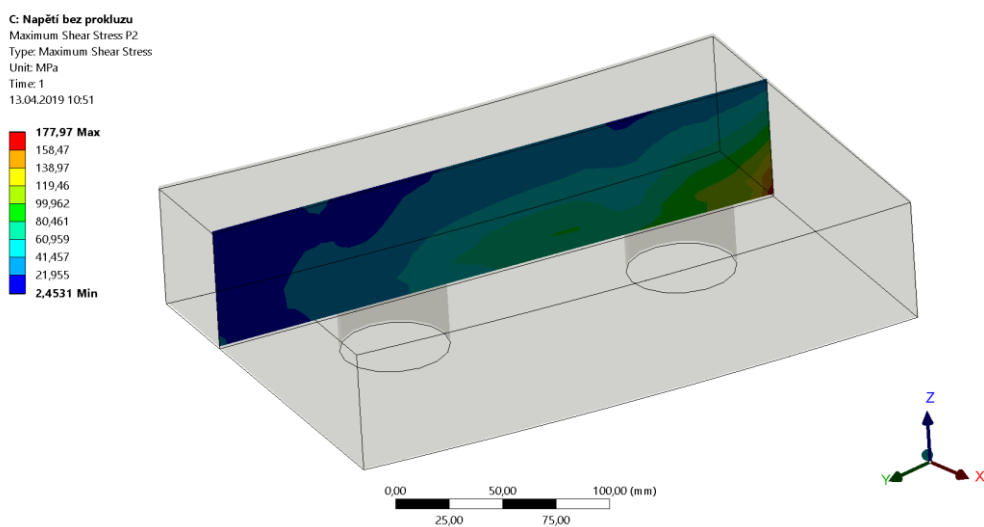


Obrázek 31 Řez rovinou s nejvyšším smykovým napětím (její polohu ukazuje Obrázek 30)

- 4) Dalším prvkem s vyšším napětím jsou příložky shora zajišťující tlakovou nádobu reaktoru proti „vyklopení“. Vysoké hodnoty napětí (nad dovolené 59 MPa, tedy oranžová, žlutá, růžová a červená barva) opět zasahují jen omezenou oblast (Obrázek 32). V rovině nejvíce namáhané na smyk (na přechodu mezi nákrůžkem tlakové nádoby reaktoru a opěrným prstenem) ekvivalentní napětí překračuje hodnotu maximálního dovoleného napětí jen v malé ploše (Obrázek 33).



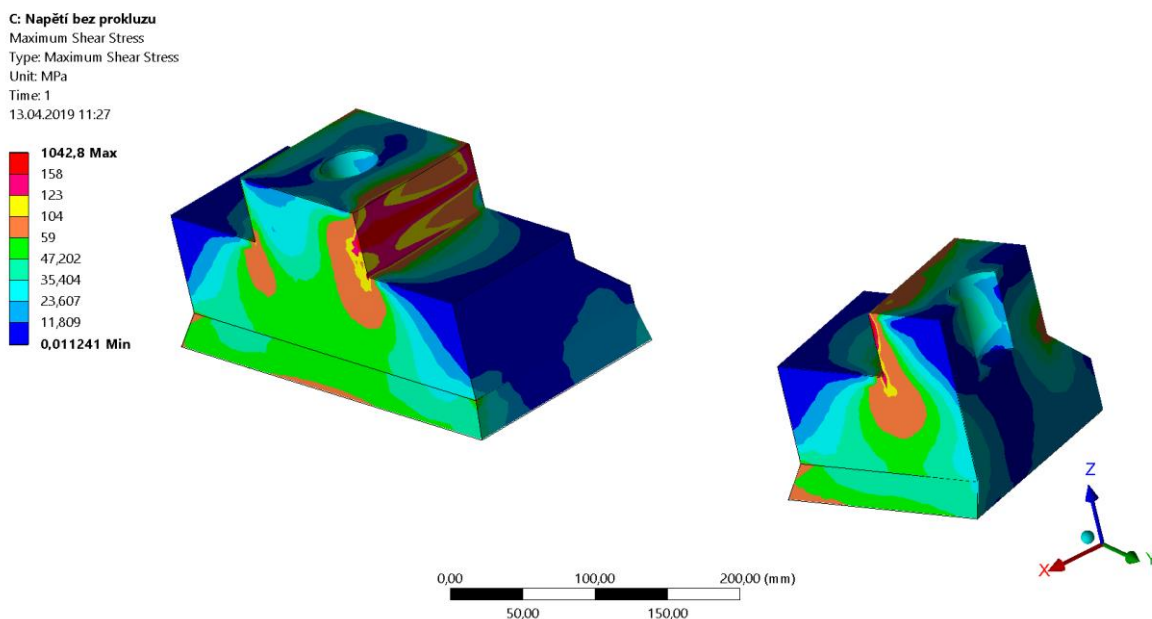
Obrázek 32 Napětí v příložce



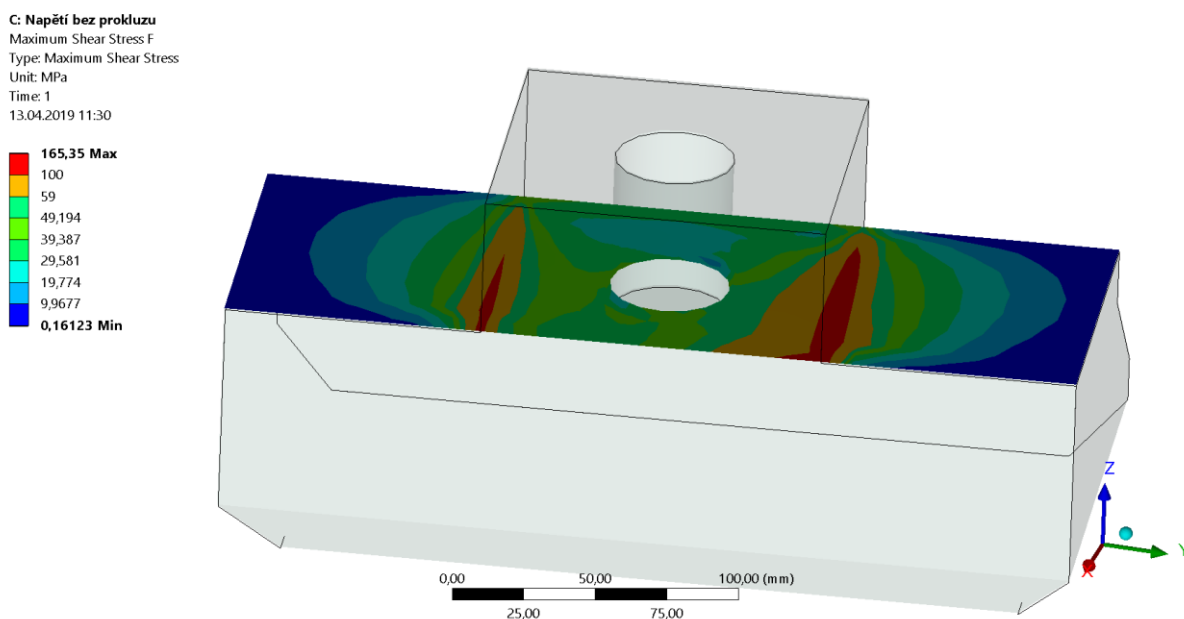
Obrázek 33 Napětí v příložce v rovině namáhané na smyk

- 5) Dalším místem vyžadujícím oddělené hodnocení jsou pera II. Světlé barvy na Obrázek 34 naznačují překročení nejvyšších dovolených napětí (59 MPa). Jedná se ale převážně o napětí kontaktního charakteru v lokálně omezených oblastech, v rovině zatížené na smyk je dovolené napětí překročeno jen v malých plochách (oranžová a červená barva na Obrázek 35).





Obrázek 34 Napěťové pole per II

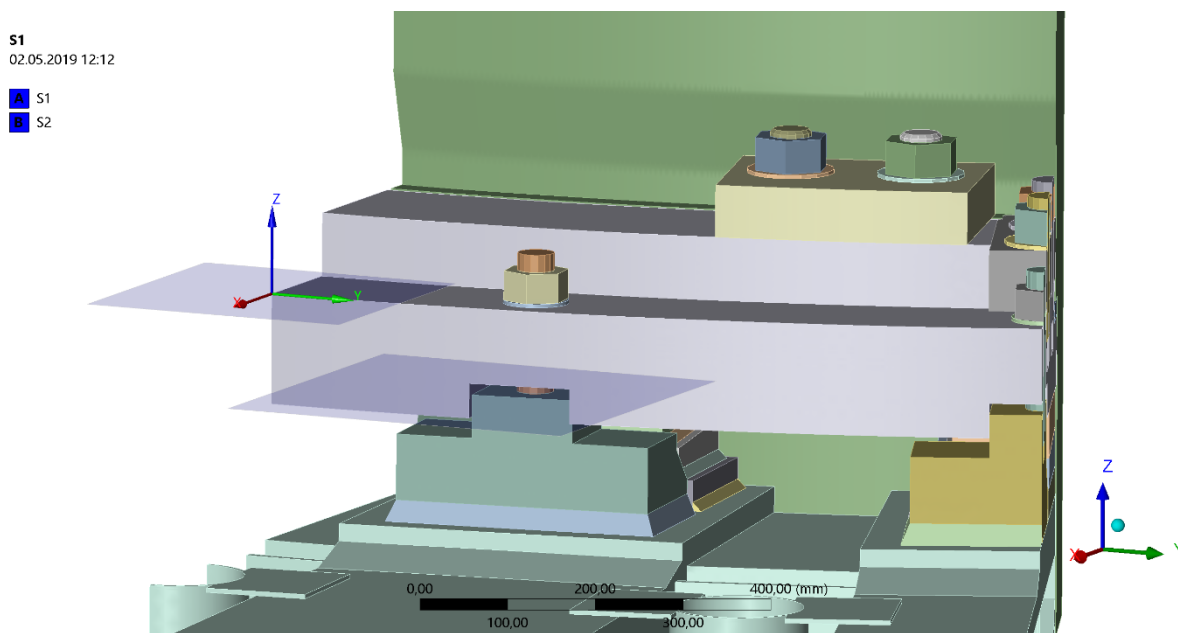


Obrázek 35 Řez perem II

- 6) Poslední zvláště posuzovanou oblastí jsou šrouby spojující pero II s opěrným prstenem. Šrouby v tomto místě byly posouzeny podle vztahu [5]:

$$(\sigma) = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \quad (5.16)$$

Neboť z obrázků napěťových polí není jednoznačná poloha nejvíce zatížené roviny šroubů, byly šrouby posuzovány ve dvou rovinách (nad opěrným prstenem a pod opěrným prstenem, viz Obrázek 36 – roviny S1 a S2).



Obrázek 36 Posuzované roviny u šroubů

V následující Tabulka 5 označuje  $\sigma$  normálové napětí ve šroubu,  $\tau$  smykové napětí ve šroubu,  $(\sigma)$  redukované napětí ve šroubu a  $[\sigma]$  dovolené napětí pro daný materiál.

Šroub	Rovina	$\sigma$ / MPa	$\tau$ / MPa	$(\sigma)$ / MPa	$[\sigma]$ / MPa
Celý	Pod prstenem	104	3,46	104	246
Celý	Nad prstenem	104	4,32	105	246
Rozpůlený	Pod prstenem	72,3	12,3	76,4	246
Rozpůlený	Nad prstenem	73,3	1,35	73,4	246

Tabulka 5 Vyhodnocení napětí ve šroubech

Jak Tabulka 5 jasně prokazuje, redukované napětí ve šroubech je velmi vzdálené dovolenému napětí.

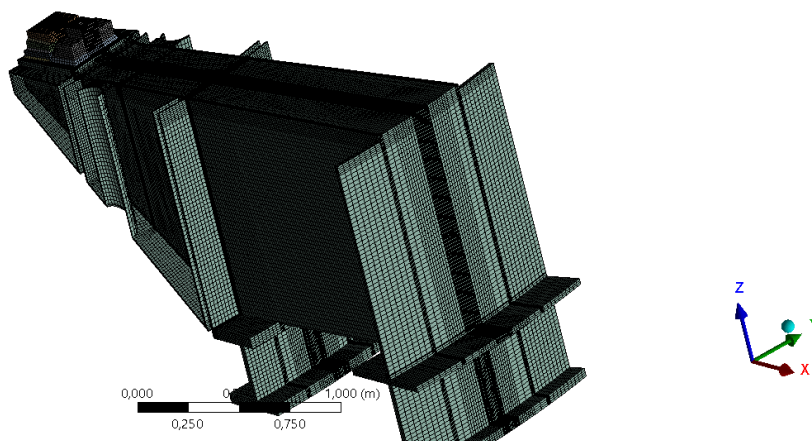
## 6 Statický výpočet

### 6.1 Určení tuhosti segmentu

Kontakt mezi opěrným prstenem a nosníkem je zprostředkován třemi vazbami. Jednak přes klíny směrem svisle dolů (tímto směrem lze předpokládat velké zatížení vlivem váhy tlakové nádoby reaktoru s vodou a vnitřními částmi), jednak přes pera II v tečném směru (24 per II po 15° zachytí všechny síly ve vodorovných směrech), jednak šrouby mezi opěrným prstenem a pery II (zachycující síly svisle vzhůru). Po určení tuhosti těchto třech prvků je bude možné nahradit pružinami a velikost celkového modelu velmi zjednodušit.

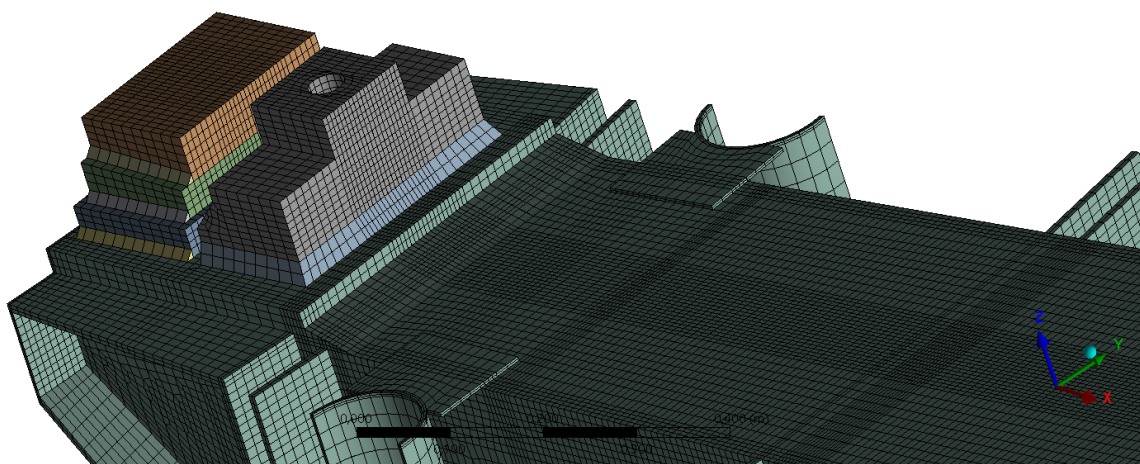
Síť (Obrázek 37 a Obrázek 38) má 1 310 249 uzlů a 268 652 prvků převážně krychlového tvaru. Veškeré kontakty mají charakter pevného spojených (*Bonded*), neboť v žádném z nich není předpoklad nějakého výrazného pohybu.

Mesh  
04.02.2019 13:21



Obrázek 37 Výpočtová síť tuhostní úlohy

Mesh  
04.02.2019 13:22

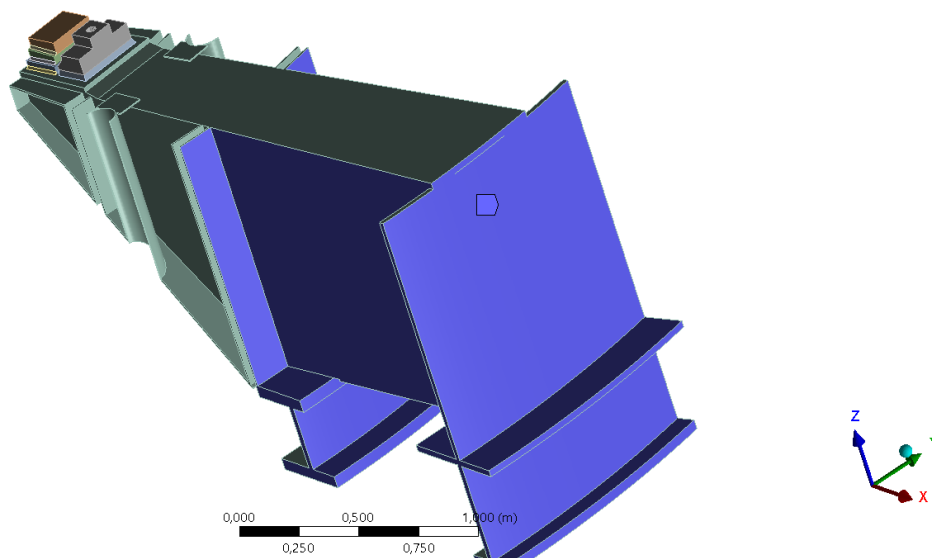


Obrázek 38 Detail výpočtové sítě tuhostní úlohy

Ve všech případech bylo využito okrajové podmínky pevné podpěry (*Fixed Support*) na částech segmentu, které jsou zalité do betonu (Obrázek 39).

D: Jeden segment dolů RP  
Fixed Support  
Time: 1, s  
04.02.2019 13:36

■ Fixed Support



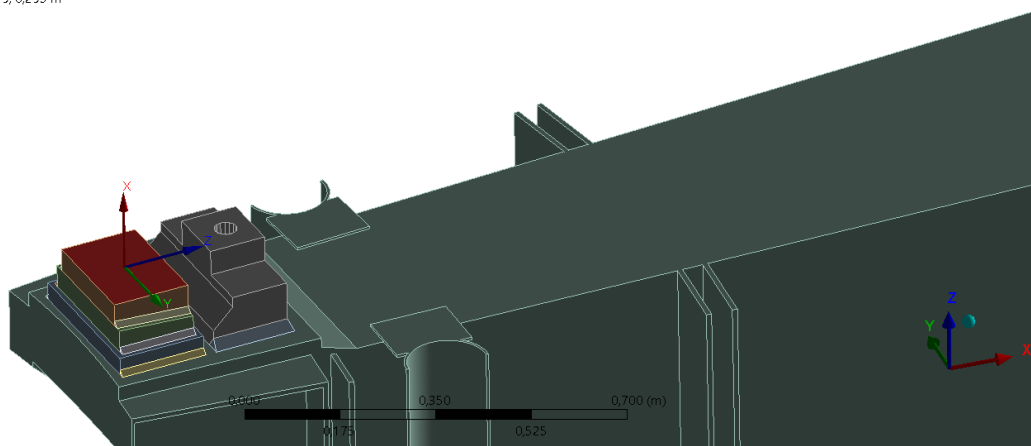
Obrázek 39 Plochy, které mají okrajovou podmínku pevné podpěry

Působící síly a jim odpovídající posuvy (poddajnosti, tuhosti) jsou značeny stejnými indexy. Jejich značení je předesláno už v tomto odstavci. V tečném směru se jedná o písmeno F. Posuvy klínu a pera II (v oblasti závitů) ve svislém směru při zatížení klínu taktéž svislým směrem jsou označeny KK (síla působí na Klín a posouvá se Klín) a KŠ (síla působí na Klín a posouvá se Šroub). Posuvy klínu a pera I (v oblasti závitů) při zatížení pera II jsou označeny ŠK (síla působí na Šroub a posouvá se Klín) a ŠŠ (síla působí na Šroub a posouvá se Šroub). Dřík šroubu spojující pero I a opěrný prsten není modelována, ale počítána analyticky. Jeho posuv označuje index D.

V radiálním směru má opěrný prsten oproti opěrnému rámu neomezenou možnost pohybu. Model je rotačně symetrický, tedy radiální posuv na jednom segmentu zachycují ostatní segmenty v tečném směru. Další posuvy lze považovat za zanedbatelné.

Jednotková síla o velikosti 1 kN působí na vyznačenou plochu klínu svisle dolů (Obrázek 40) a jsou sledovány posuvy klínu a šroubu ve směru působící síly (Obrázek 41). Ty jsou samozřejmě na celé ploše nestejně, ale tuhost je stanovena z průměrného posuvu (vygenerované programem ANSYS).

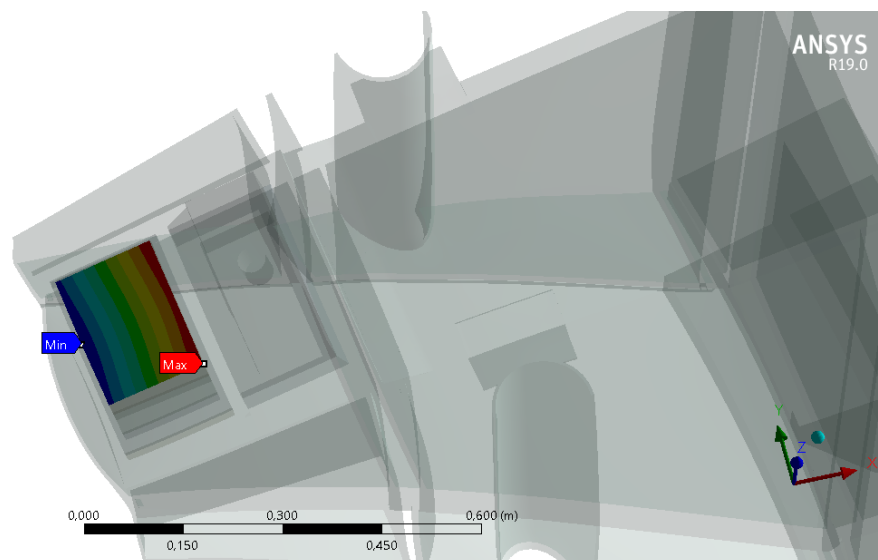
D: Jeden segment dolů RP  
 Remote Force  
 Time: 1, s  
 04.02.2019 13:53  
 Remote Force: 1000, N  
 Components: -1000,0,0, N  
 Location: 2,0295, 0,26719, 0,295 m



Obrázek 40 Plocha klínu, na kterou působí svislá síla

D: Jeden segment dolů RP  
 Directional Deformation  
 Type: Directional Deformation(Z Axis)  
 Unit: m  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 04.03.2019 11:57

-7,3572e-7 Max  
 -7,5817e-7  
 -7,8061e-7  
 -8,0306e-7  
 -8,255e-7  
 -8,4795e-7  
 -8,704e-7  
 -8,9284e-7  
 -9,1529e-7  
 -9,3773e-7 Min

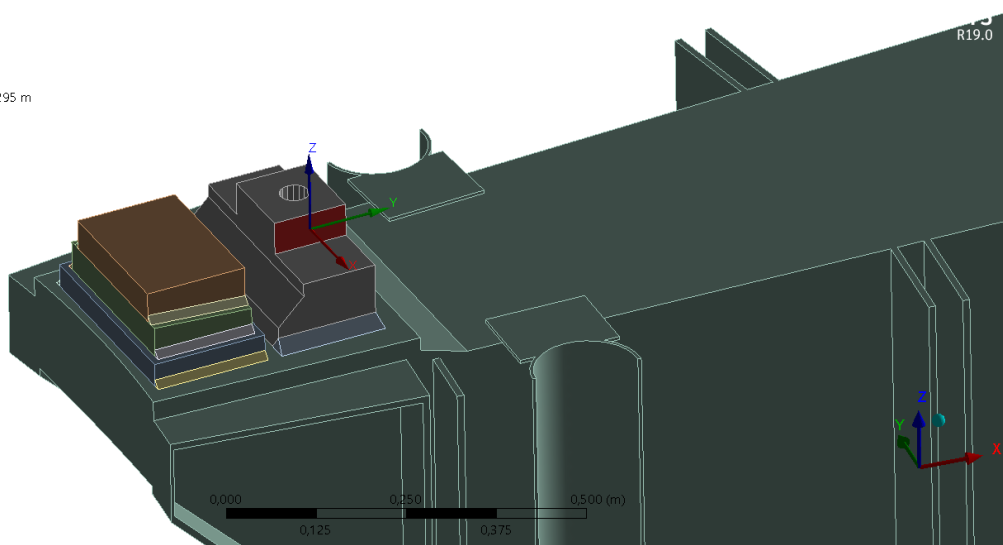


Obrázek 41 Posuvy v oblasti klínu ve směru svislé osy při zátěži silou

Průměrná hodnota posuvu na ploše klínu je  $u_{KK} = -8,3658 \cdot 10^{-7}$  m. Nejvyšší absolutní hodnota posuvu je  $-9,3773 \cdot 10^{-7}$  m a nejnižší  $-8,3658 \cdot 10^{-7}$  m. Pro další výpočty jsou odečteny i posuvy v oblasti šroubu (plocha je znázorněna na Obrázek 45, ale s jinými hodnotami). Průměrný posuv ve vyznačené oblasti je  $u_{KŠ} = -5,1104 \cdot 10^{-7}$  m. Nejvyšší absolutní hodnota je  $-5,2053 \cdot 10^{-7}$  m a nejnižší  $-5,0290 \cdot 10^{-7}$  m.

Obdobným způsobem je postupováno i u další tuhosti v tečném směru. Platí předpoklad, že posuv při zatížení zleva i zprava je stejný (segment opěrného prvku je osově souměrný).

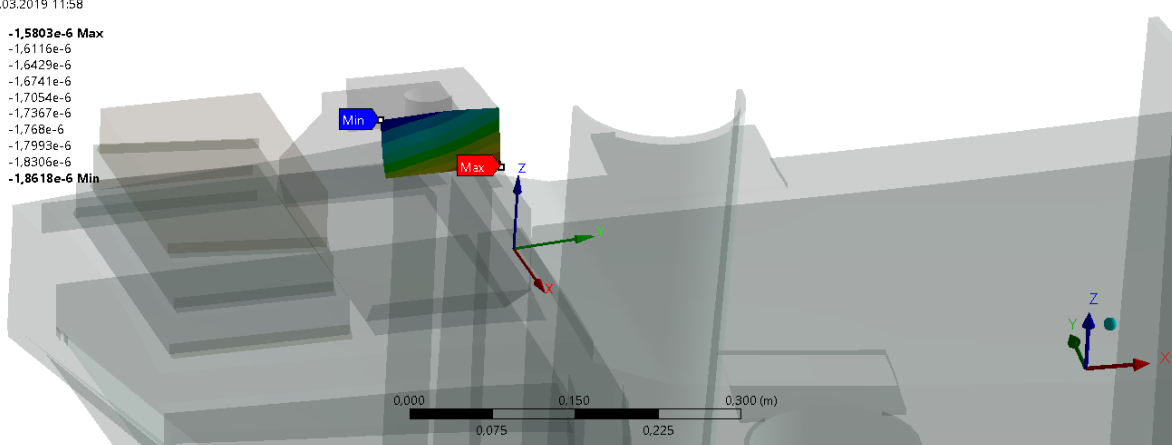
E: Jeden segment tečně RP  
 Remote Force  
 Time: 1, s  
 04.02.2019 14:06  
 Remote Force: 1000, N  
 Components: -1000,0,0, N  
 Location: 2,2366, 0,23394, 0,295 m



Obrázek 42 Plocha, na kterou působí síla v tečném směru

E: Jeden segment tečně RP  
 Directional Deformation Plocha  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: m  
 Coordinate System Pero  
 Time: 1  
 04.03.2019 11:58

-1,5803e-6 Max  
 -1,61116e-6  
 -1,6429e-6  
 -1,6741e-6  
 -1,7054e-6  
 -1,7367e-6  
 -1,768e-6  
 -1,7993e-6  
 -1,8306e-6  
 -1,8618e-6 Min



Obrázek 43 Posuvy plochy v tečném směru

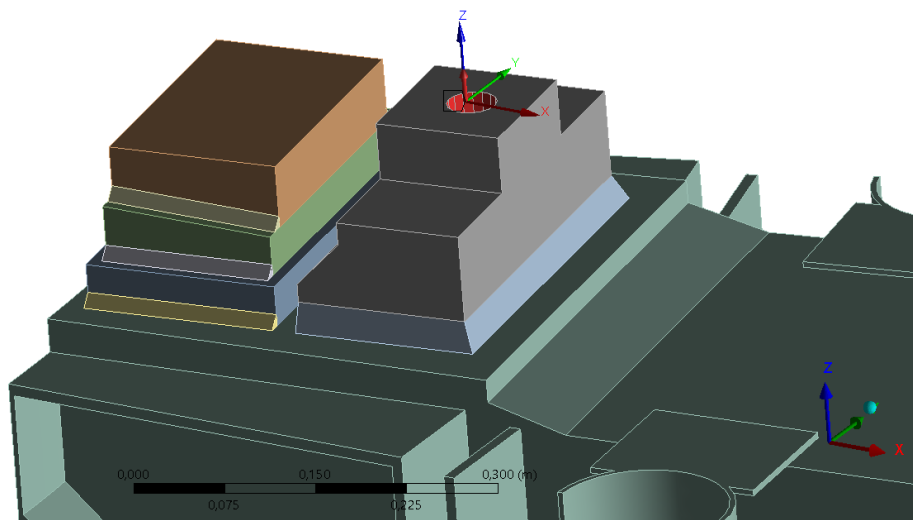
Průměrná hodnota posuvu v tečném směru na ploše klínu je  $u_F = 1,7442 \cdot 10^{-6}$  m. Maximum je  $1,8618 \cdot 10^{-6}$  m a minimum  $1,5803 \cdot 10^{-6}$  m.

Tuhost tedy bude:

$$k_F = \frac{F}{u_F} = \frac{1000}{1,7442 \cdot 10^{-6}} \cong 5,73 \cdot 10^8 Nm^{-1} \quad (6.1)$$

A následuje třetí případ, kterým je zatížení ve svislém směru na plochu závitů.

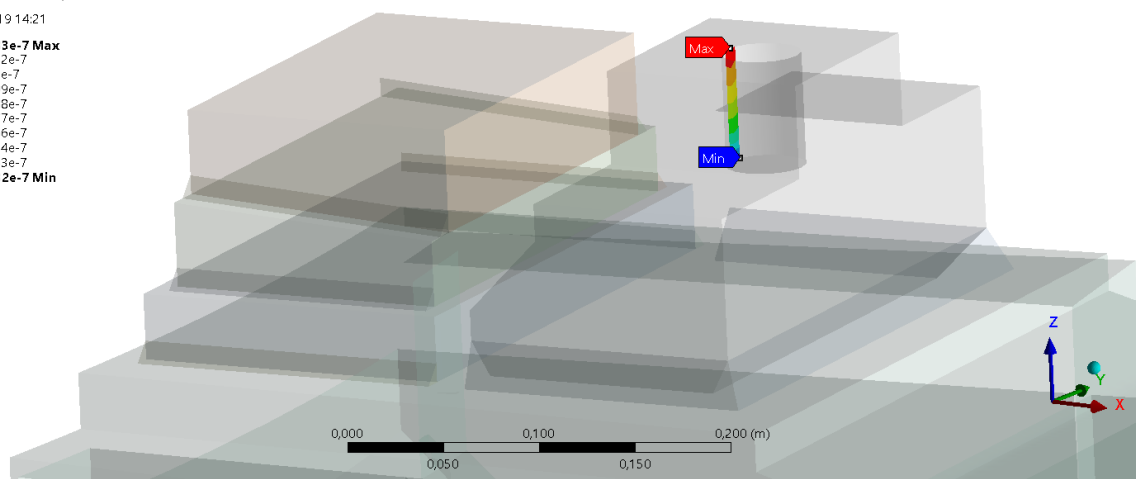
E: Šroub  
Remote Force  
Time: 1, s  
04.02.2019 14:21  
Remote Force: 1000, N  
Components: 0,0;1000, N  
Location: 0, 0, 0, m



Obrázek 44 Síla působící na závit

E: Šroub  
Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Z Axis)  
Unit: m  
Global Coordinate System  
Time: 1  
04.02.2019 14:21

5,7833e-7 Max  
5,7322e-7  
5,681e-7  
5,6299e-7  
5,5788e-7  
5,5277e-7  
5,4766e-7  
5,4254e-7  
5,3743e-7  
5,3232e-7 Min



Obrázek 45 Posuv v oblasti závitů

Průměrný posuv plochy závitů je  $u_{\text{š}} = 5,6062 \cdot 10^{-7}$  m. Maximum je  $5,7833 \cdot 10^{-7}$  m a minimum  $5,3232 \cdot 10^{-7}$  m. Průměrný posuv v oblasti klínu (plocha je znázorněna na Obrázek 41, ale s jinými hodnotami) je  $u_{\text{K}} = 5,3204 \cdot 10^{-7}$  m a maximum je  $53828 \cdot 10^{-7}$  m a minimum je  $5,2503 \cdot 10^{-7}$  m.

Posuv šroubu lze poměrně snadno určit analyticky. Při zadaných parametrech:

Průměr dříku:

$$d = 41 \text{ mm} = 0,041 \text{ m} \quad (6.2)$$

Délka dříku mezi závity:

$$l = 184 \text{ mm} = 0,184 \text{ m} \quad (6.3)$$





Modul pružnosti materiálu šroubu (oceli):

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa} = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa} \quad (6.4)$$

Napínací síla:

$$F = 1000 \text{ N} \quad (6.5)$$

Deformace šroubu vychází ze vztahů:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.6)$$

$$\frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2} = E \cdot \frac{u}{l} \quad (6.7)$$

$$u_D = \frac{F \cdot l}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot E} = \frac{1000 \cdot 0,184}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,041^2 \cdot 2,1 \cdot 10^{11}} \cong 6,64 \cdot 10^{-7} \text{ m} \quad (6.8)$$

Zjištěné posuvy jsou zapsány do matice posuvů U:

$$U = \begin{pmatrix} u_{KK} & u_{\check{S}K} \\ u_{K\check{S}} & u_{\check{S}\check{S}} + u_D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8,37 & 5,32 \\ -5,54 & 5,61 + 6,64 \end{pmatrix} \cdot 10^{-7} = \quad (6.9)$$

$$= \begin{pmatrix} -8,37 & 5,32 \\ -5,54 & 12,25 \end{pmatrix} \cdot 10^{-7} \text{ m} \quad (6.9)$$

Můžeme určit matici poddajnosti:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{u_{KK}}{F_K} & \frac{u_{\check{S}K}}{F_{\check{S}}} \\ \frac{u_{K\check{S}}}{F_K} & \frac{u_{\check{S}\check{S}} + u_D}{F_{\check{S}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-8,37}{-1000} & \frac{5,32}{1000} \\ \frac{-5,54}{-1000} & \frac{12,25}{1000} \end{pmatrix} \cdot 10^{-7} = \quad (6.10)$$

$$= \begin{pmatrix} 8,37 & 5,32 \\ 5,54 & 12,25 \end{pmatrix} \cdot 10^{-10} \quad \text{m} \cdot \text{N}^{-1} \quad (6.10)$$

Výsledná matice tuhosti je inverzí matice poddajnosti:

$$K = A^{-1} = \begin{pmatrix} 8,37 \cdot 10^{-10} & 5,32 \cdot 10^{-10} \\ 5,54 \cdot 10^{-10} & 12,25 \cdot 10^{-10} \end{pmatrix}^{-1} = \quad (6.11)$$

$$= \begin{pmatrix} 1,6780 \cdot 10^9 & -7,2903 \cdot 10^8 \\ -7,5898 \cdot 10^8 & 1,1463 \cdot 10^9 \end{pmatrix} = \quad (6.11)$$

$$= \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{ZK} + k_{K\check{S}} & -k_{K\check{S}} \\ -k_{K\check{S}} & k_{\check{S}Z} + k_{K\check{S}} \end{pmatrix} \quad (6.11)$$

Členy označené KŠ představují vzájemnou tuhost mezi šroubem a klínem, člen ZK mezi nehybným základem a klínem a ŠZ mezi šroubem a nehybným základem (označení indexů shrnuje **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Pro zadání pružin do softwaru ANSYS je nezbytné tyto hodnoty určit. Byla stanovena standardní hodnota  $k_{K\check{S}}$  jako absolutní hodnota průměru mimodiagonálních prvků:

$$k_{K\check{S}} = \left| \frac{k_{21} + k_{12}}{2} \right| = \left| \frac{-7,5898 \cdot 10^8 - 7,2903 \cdot 10^8}{2} \right| \cong \quad (6.12)$$

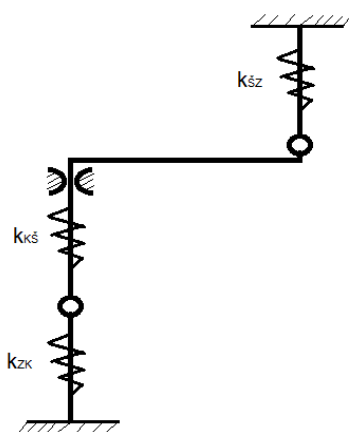
$$\cong 7,44 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.12)$$

Členy označené KŠ představují tuhostní vazbu spojující zkoumané plochy v oblasti klínu a šroubu, členy označované ZK představují tuhostní vazbu mezi nehybným základem a zkoumanou plochou v oblasti klínu a ŠZ označuje členy, které zprostředkovávají tuhostní vazbu mezi nehybným základem a zkoumanou plochou na šroubu.

A dále je možné snadno určit hodnoty  $k_{ZK}$  a  $k_{SZ}$ :

$$k_{ZK} = k_{11} - k_{KŠ} = 1,6780 \cdot 10^9 - 7,44 \cdot 10^8 = 9,3403 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.13)$$

$$k_{SZ} = k_{22} - k_{KŠ} = 1,1463 \cdot 10^9 - 7,44 \cdot 10^8 = 4,0232 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.14)$$



Obrázek 46 Schéma tuhostních vazeb

Pro další výpočet byly využity tyto hodnoty:

Tuhost ve směru fixátoru:

$$k_F = 5,73 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.15)$$

Tuhost mezi klínem a rámem:

$$k_{ZK} = 9,3403 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.16)$$

Vzájemná tuhost mezi klínem a šrouby:

$$k_{KŠ} = 7,44 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.17)$$

Tuhost mezi šroubem a rámem:

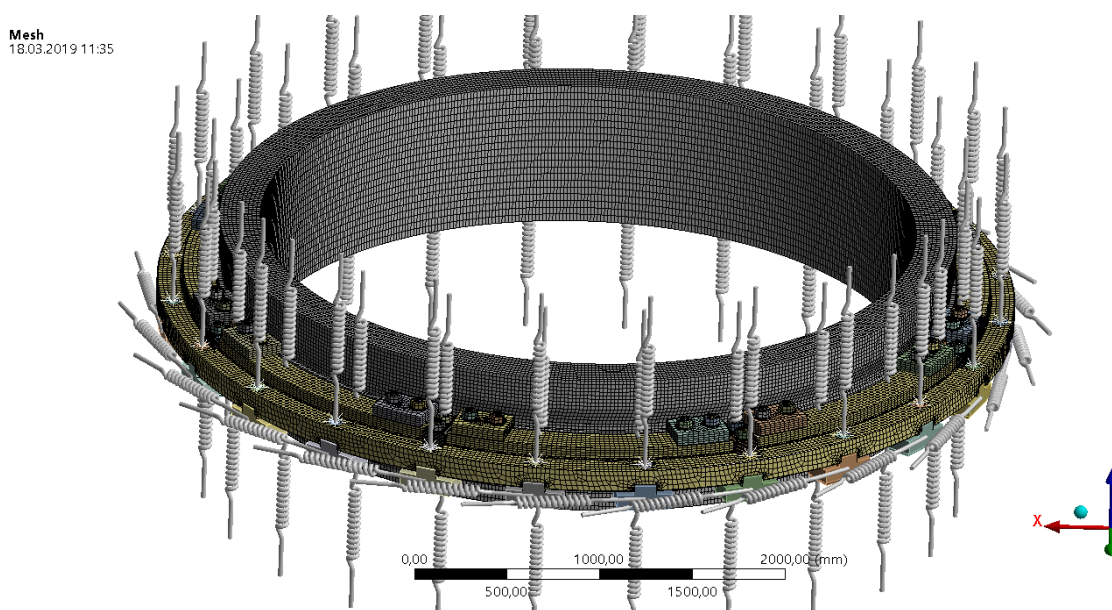
$$k_{SZ} = 4,0232 \cdot 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.18)$$

## 6.2 Výpočet namáhání opěrného prstenu bez zatížení LOCA

Dalším výpočtem je řešení namáhání opěrného prstenu. Z důvodu stability řešení byl rozdělen do dvou částí (7 běžných zátěžných stavů v první a zátěžný stav LOCA v druhé). Výsledkem obou z nich jsou napěťová pole v opěrném kruhu a síly přenášené do segmentu.

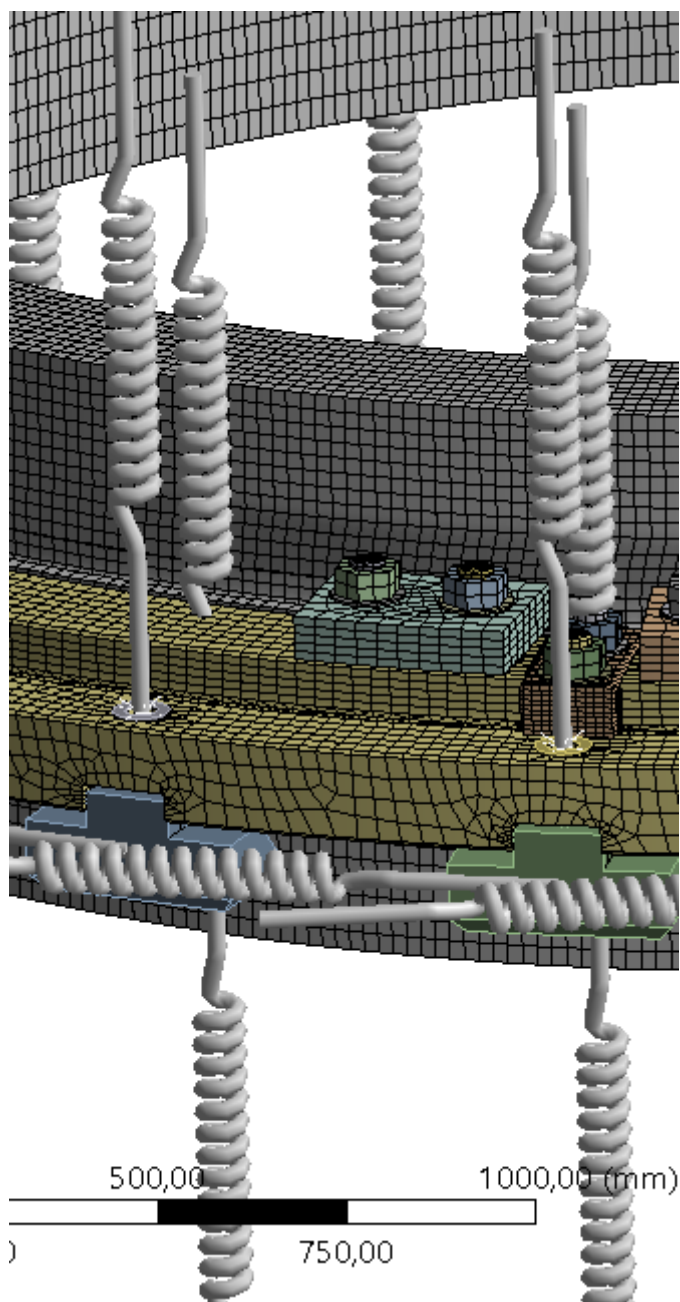
Byl využit model opěrného kruhu dostupný ve VZÚ Plzeň. Skládá se z těles dvou typů – klasických poddajných těles (většina opěrného kruhu) a z těles ideálně tuhých (*Rigid Body*), jejichž zatížení není v tomto výpočtu stanovováno (jsou součástí opěrného segmentu) a slouží k přesnému vymezení polohy pružin nahrazujících opěrné segmenty. Jedná se o klíny (zatěžovány směrem svisle dolů), podložky (zatěžovány směrem svisle nahoru) a fixátory (zatěžovány tečně).

Síť (Obrázek 47) má 1 402 192 uzlů a 364 522 prvků převážně hexagonálního tvaru (s řadou výjimek).



Obrázek 47 Výpočtová síť opěrného prstenu

Kontakty v modelu lze rozdělit do dvou skupin. Jednak na kontakty mezi poddajnými částmi (vnitřní kontakty), jednak mezi poddajnými a ideálně tuhými částmi (vnější kontakty). Kontakty s nepohyblivým rámem jsou realizovány pomocí pružných vazeb. Vnější kontakty jsou všechny charakteru pevně spojené (*Bonded*). Byla uvažována i možnost kontaktů s prokluzem, ale výpočet nesměřoval ke konvergenci. Bylo prokázáno, že případný posuv těchto částí by byl zanedbatelný. Vnitřní kontakty byly zvoleny podle jejich smyslu buď pevně spojené (*Bonded*), nebo třecí (*Frictional*) s koeficientem  $f = 0,1$  (odpovídá doporučeným hodnotám pro styk dvou ocelových povrchů).

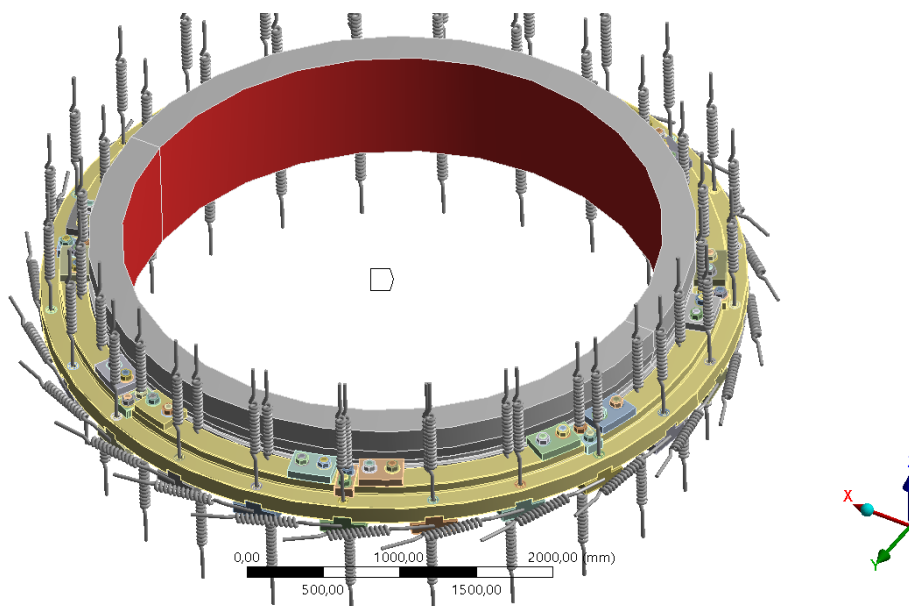


Obrázek 48 Detail pružin

Spojení mezi opěrnými segmenty a kruhem je realizováno pomocí pružin (na modelu mezi opěrným kruhem a rámem). Pružiny jsou znázorněny na Obrázek 48. Pružina pod kruhem nahrazuje tuhost ve směru klínu ( $k_{ZK}$ ), pružina nad kruhem vpředu tuhost ve směru šroubu ( $k_{SZ}$ ) a pružina vzadu vzájemnou tuhost mezi šroubem a klínem ( $k_{KŠ}$ ). Vodorovné pružiny představují tuhosti ve vodorovném směru ( $k_F$ ).

Zatížení působí na vnitřní stranu tlakové nádoby (Obrázek 49 a Tabulka 3). Vychází z uvedených zátěžných stavů a přepočítání na působící síly a momenty je dostupné ve VZÚ Plzeň [4]. Bylo aplikováno v 7 časových krocích (jedná se o statiku, ne o dynamiku).

ZatíženíSíla  
18.03.2019 11:56  
■ ZatíženíSíla



Obrázek 49 Oblast zatížení opěrného prstenu

Výsledkem výpočtu jsou síly v pružinách, kterými bude zatížen model segmentu. Z nich byly nalezeny ty nejvyšší pro každý zátěžný stav a využity. V případě svislých pružin se jednalo o sílu ve svislém směru (globální souřadnice z, směr viz směry souřadnicových os na Obrázek 49), síly ve směrech globálních souřadnic x a y byly zanedbatelné (všechny menší než 0,1 % síly ve směru z). V případě vodorovných pružin se jednalo o sílu v tečném směru (ve směru nedeformované pružiny), v radiálním a osovém směru byly zanedbatelné (všechny menší než 0,1 %).

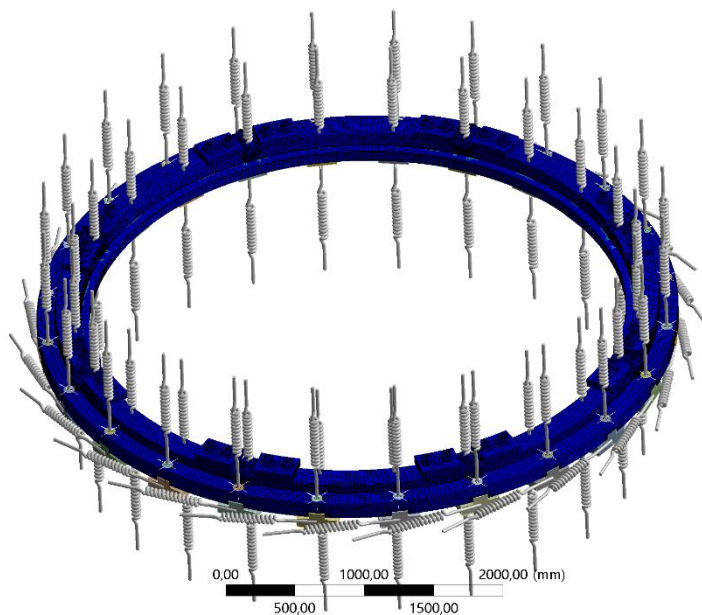
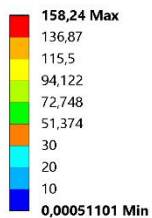
V Tabulka 6 jsou vypsány přenášené síly v N pro zátěžné stavy 1 – 7.

Zátěžný stav	1	2	3	4	5	6	7
$F_F / N$	12 396	10 113	4 122	6 623	8 824	356	493
$F_{ZK} / N$	278 430	278 150	274 430	276 060	277 540	250 700	29 688
$F_{ŠK} / N$	47 758	47 571	56 901	47 206	47 444	42 872	5 156

Tabulka 6 Vypočtené síly v pružinách

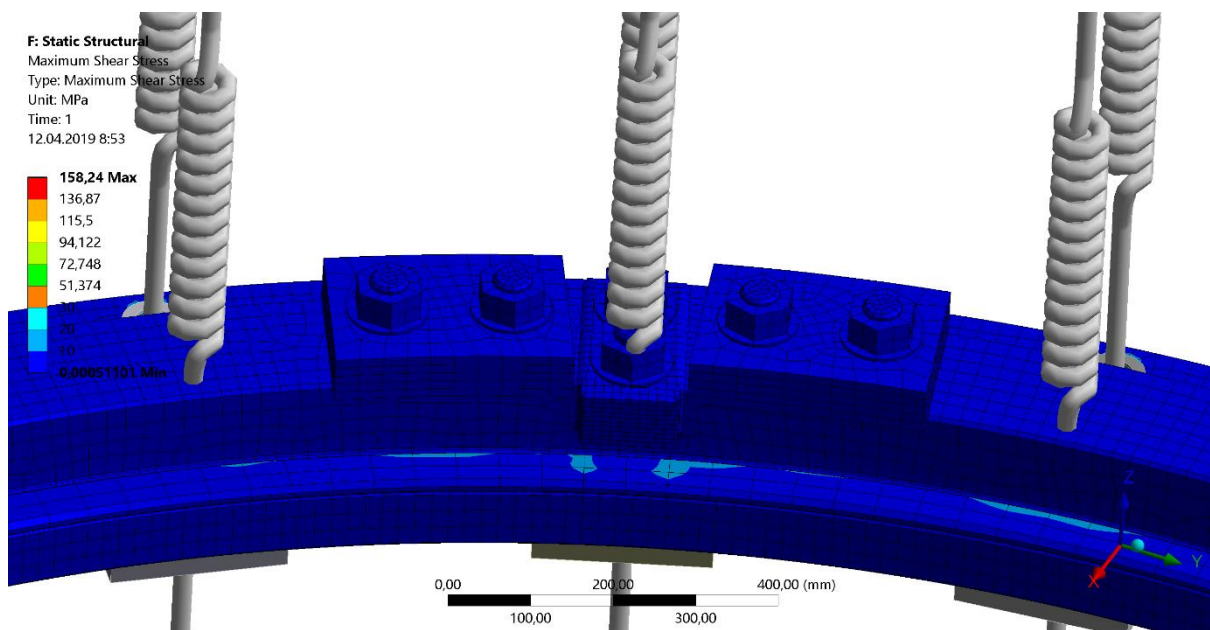
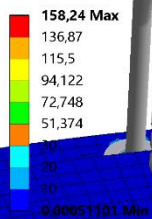
Ve všech sedmi případech byly výsledné hodnoty maximálního smykového napětí relativně nízké, jak dokazují Obrázek 50 a Obrázek 51 zobrazující nejméně příznivý výpočtový stav 1. V žádném větším objemu nepřekračovaly 30 MPa (dovolené napětí je 59 MPa). Žádná část opěrného kruhu nevyžaduje podrobnější vyhodnocení.

F: Static Structural  
 Maximum Shear Stress  
 Type: Maximum Shear Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 12.04.2019 8:50



Obrázek 50 Napěťová pole opěrného kruhu pro zátěžný stav 1

F: Static Structural  
 Maximum Shear Stress  
 Type: Maximum Shear Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 12.04.2019 8:53



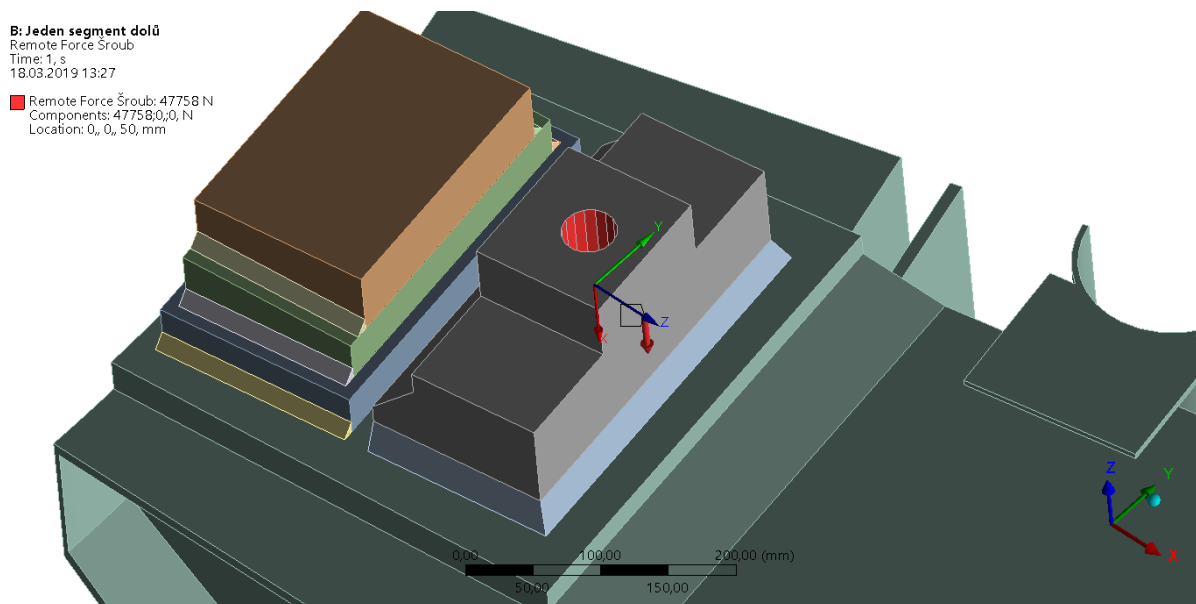
Obrázek 51 Detail napěťových polí pro zátěžný stav 1

Napětí v opěrném kruhu je dostatečně nízké z pohledu statické pevnosti.

### 6.3 Výpočet namáhání segmentu bez zatížení LOCA

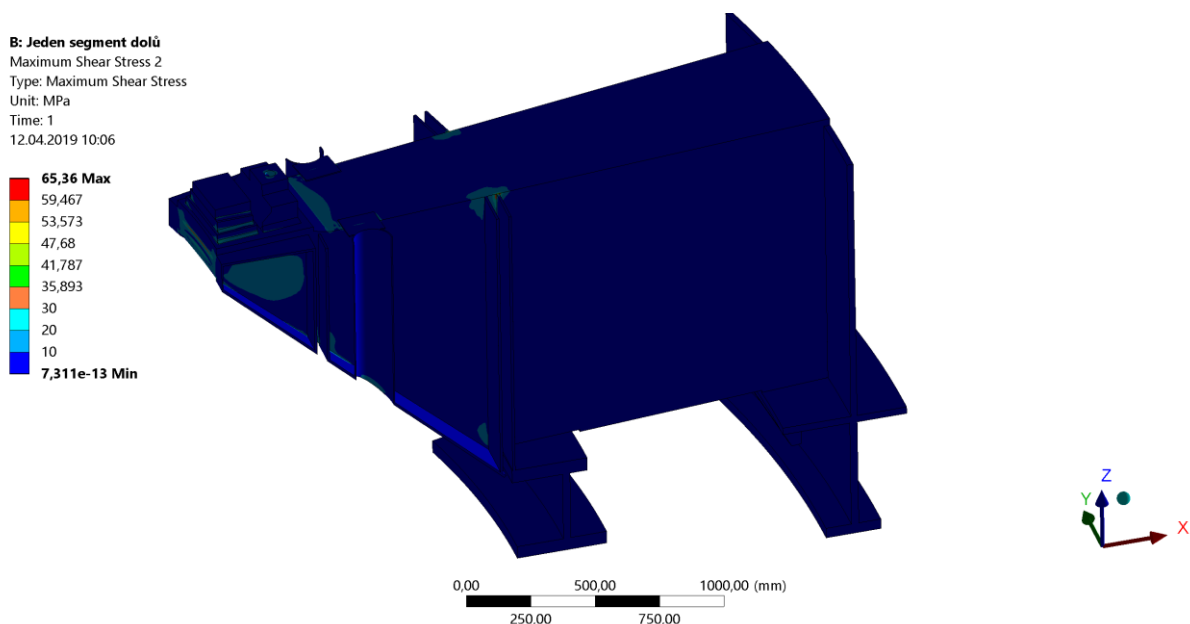
Model, zasíťování i kontakty segmentu byly využity stejné jako v případě výpočtů tuhosti. Bylo opět užito pevné podpěry (*Fixed Support*) na zadní části segmentu, které jsou zalité do betonu (Obrázek 39).

Model byl zatížen třemi silami (oblast klínu, pera II a šroubu), každá síla měla průběh v sedmi časových krocích podle sedmi zátěžných stavů (jedná se ale o statický výpočet). Oblasti zatížení na klínu a peru II jsou stejné jako v případě výpočtu tuhosti (viz Obrázek 40 a Obrázek 42), na šroubovém spoji mírně změněné (Obrázek 52).



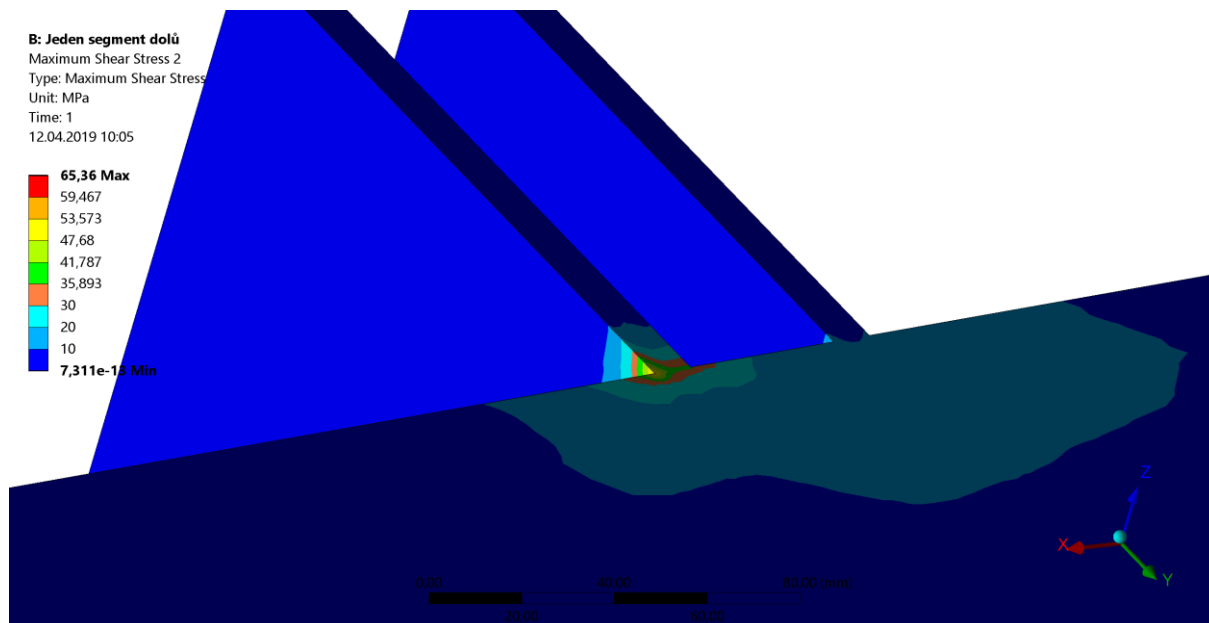
Obrázek 52 Zatížení segmentu v oblasti šroubu

Výstupem výpočtu je určení napětových polí v segmentu, které jsou na Obrázek 53.



Obrázek 53 Napětová pole segmentu

Ve všech 7 případech jsou hodnoty napětí relativně nízké, jen ve velmi malých objemech překračuje dovolené napětí 59 MPa. Jedná se místa na přechodu do oblasti pevné podpory, maximální určené napětí je 65 MPa (Obrázek 54).



Obrázek 54 Segment detail napětového pole na přechodu k pevné podpoře

Lze říci, že objemy součástí, které překročily dovolené napětí, jsou zanedbatelné a není nutné je vyhodnocovat speciálními postupy.

Nemodelované šrouby budou posouzeny pouze ve dvou zátěžných stavech (číslo 1 a číslo 3). Zátěžný stav 1 byl zvolen, protože je využíván v dalších výpočtech, a zátěžný stav 3, neboť v něm působí maximální síla a je tedy nejméně příznivý.

$$(\sigma_s^1) = \frac{F_{SK}^1}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{47\,758}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,0412^2} \approx 3,582 \cdot 10^7 Pa = 35,82 MPa \quad (6.19)$$

$$(\sigma_s^3) = \frac{F_{SK}^3}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{56\,901}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,0412^2} \approx 4,268 \cdot 10^7 Pa = 42,68 MPa \quad (6.20)$$

Jak z obou předchozích vztahů vyplývá, normálové napětí ve šroubu je pod napětím dovoleným (246 MPa).



## 6.4 Výpočet namáhání opěrného prstenu pro zatížení LOCA

Schéma upevnění a zatížení segmentu opěrného kruhu je shrnuto v kapitole 6.3 a je i v tomto případě shodné.

Model týkající se LOCA havárie je počítána zvláště, neboť její zatížení je značně odlišné od ostatních sedmi zátěžných stavů. Při nich převládá zatížení ve svislém směru (od vlastní váhy reaktoru), při LOCA havárii mají síly ve všech směrech přibližně stejné hodnoty.

Schéma upevnění a zatížení opěrného prstenu je shrnuto v kapitole 6.2 a je až na hodnoty sil a momentů shodné.

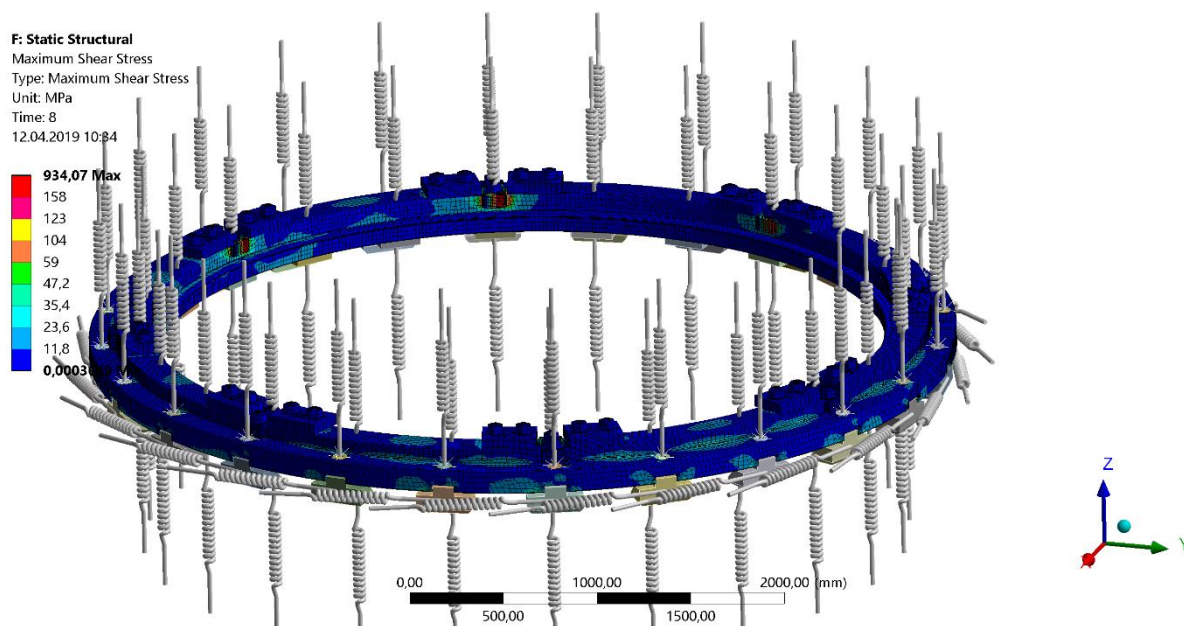
Výsledné síly, které byly přeneseny na model segmentu, jsou shrnuty v Tabulka 7.

Zátěžný stav	8 (LOCA)
$F_F / N$	407 440
$F_{ZK} / N$	637 050
$F_{\check{S}K} / N$	128 710

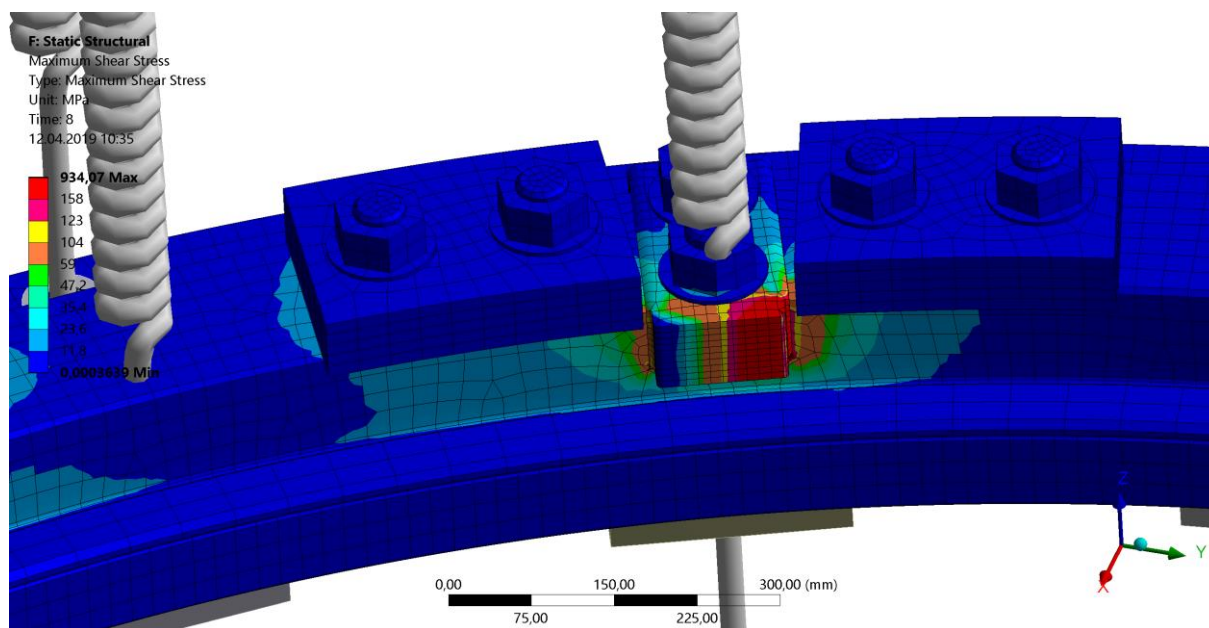
Tabulka 7 Výpočtové síly v pružinách pro zátěžný stav LOCA

V tomto výpočtovém stavu vycházejí napětí vyšší, ale předpokládá se, že nastane jen jedenkrát v průběhu provozu. Překročení dovolených zatížení pro jednotlivé materiály je vyznačeno světlými výraznými barvami. Červená představuje překročení dovoleného napětí pro materiál 5 (158 MPa), růžová překročení u materiálu 2 (123 MPa), žlutá překročení u materiálu 1 (104 MPa) a oranžová překročení u materiálů 3 a 4 (pro oba 59 MPa).

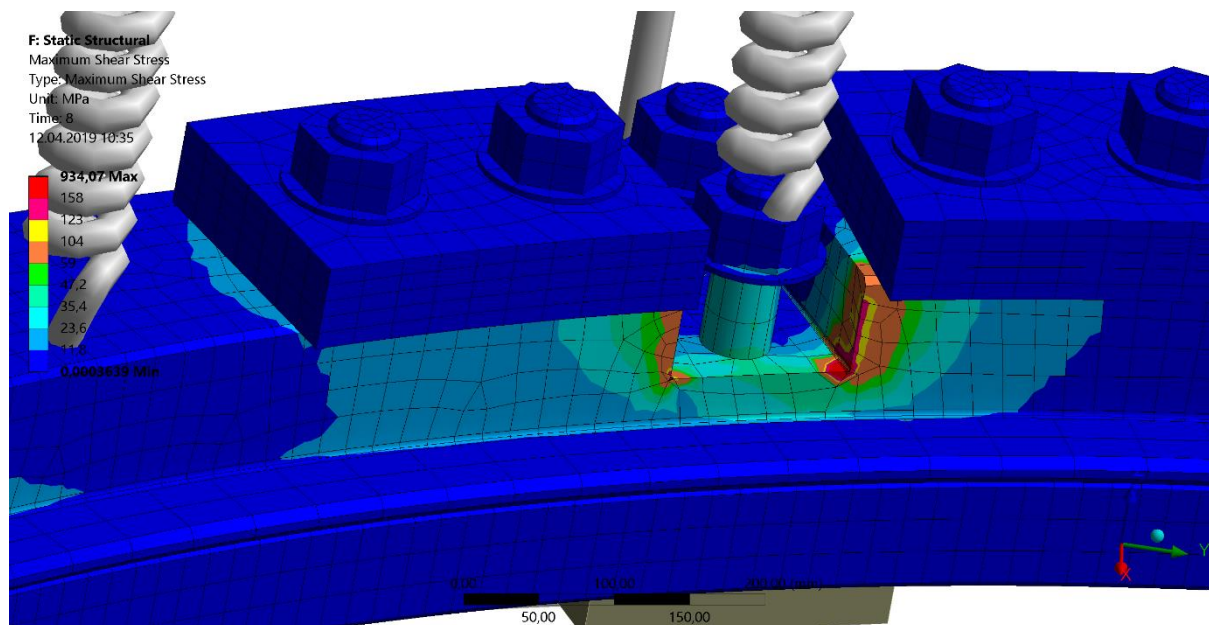
Jak dokládají Obrázek 55, Obrázek 56 a Obrázek 57, nejvíce zatížená je oblast pera I (samotné pero i drážka pro něj). Jeho vyhodnocení je nezbytné zpracovat.



Obrázek 55 Pole napětí v opěrném prstenu

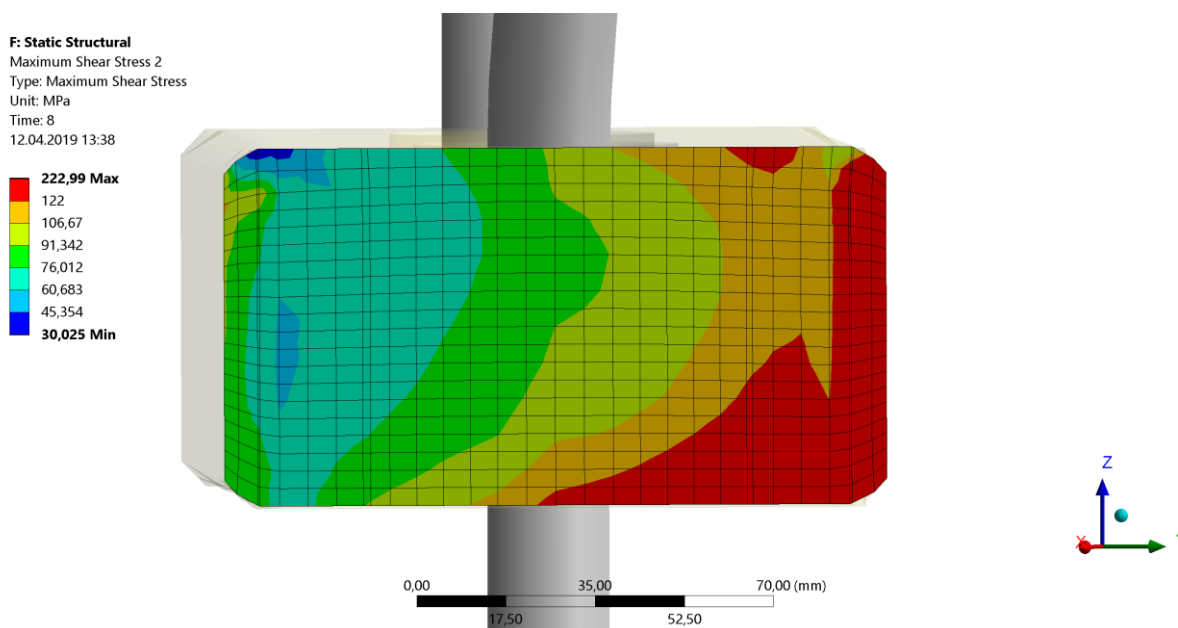


Obrázek 56 Detail pole napětí



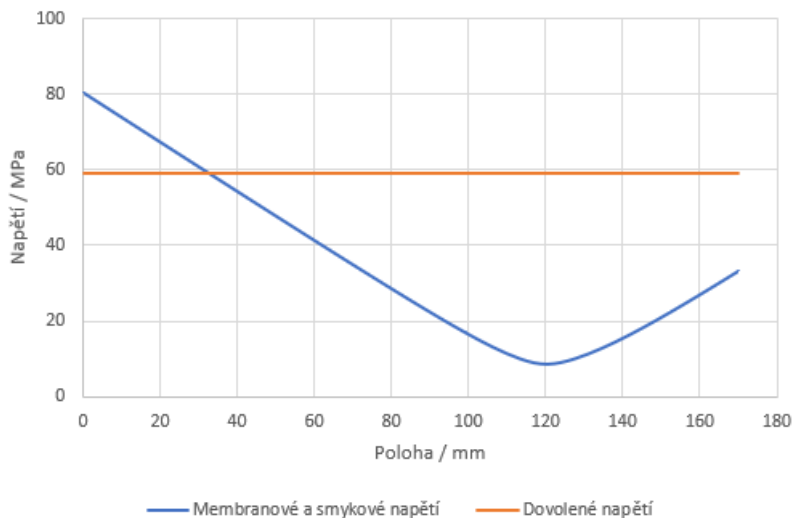
Obrázek 57 Detail pole napětí se skrytým modelem pera I

Řez perem v rovině nejvíce namáhané na smyk je na Obrázek 58 a potvrzuje bezpečnost použití pera. Plochy, ve kterých napětí překročilo dovolenou hodnotu 122 MPa, jsou označeny červeně. V případě plastické deformace přední části jednoho pera je možné předpokládat, že síly působící na tlakovou nádobu reaktoru přejdou z nejvíce zatížených per na další pera rovnoměrně rozložená podél jejího obvodu.



Obrázek 58 Napětí v peru I v rovině namáhané na smyk

Namáhání v drážce pro pero (Obrázek 57) je nejvyšší na její vnitřní straně a klesá ke straně vnější. Jak moc dokládá Obrázek 59 (vnitřní strana drážky je vlevo a vnější vpravo).



Obrázek 59 Linearizace napětí podél drážky pro pero I

Lze předpokládat, že drážka přeneše namáhání i v případě LOCA havárie.

Nemodelované šrouby budou posouzeny také pro tento zátěžný stav.

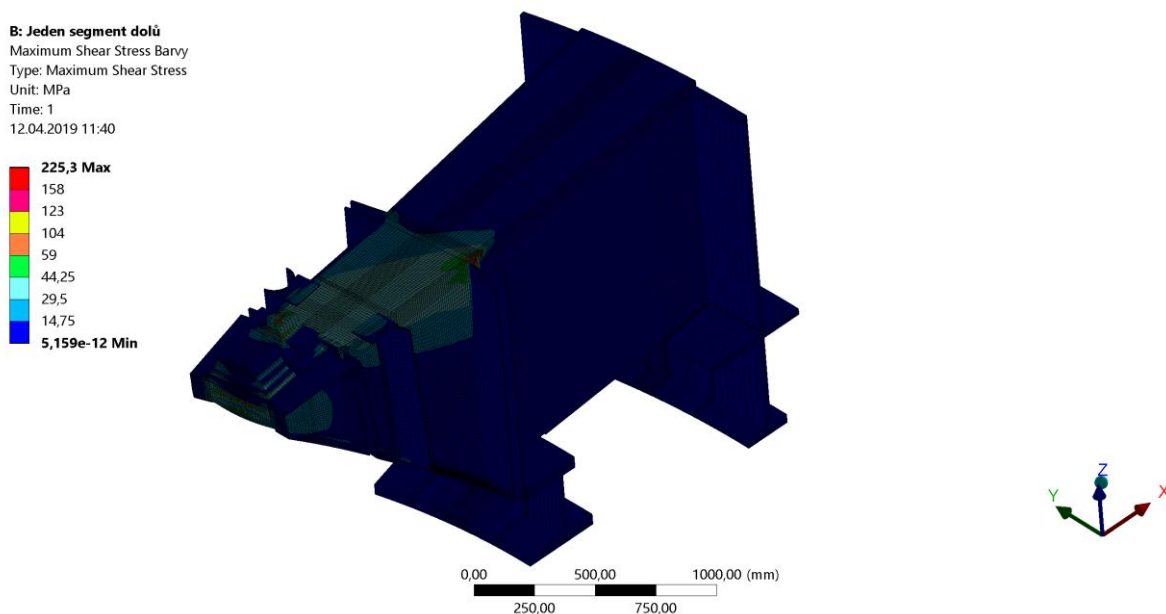
$$(\sigma_s^8) = \frac{F_{SK}^8}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{128\,710}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,0412^2} \approx 7,583 \cdot 10^7 Pa = 75,83 MPa \quad (6.21)$$

Jak z předchozího vztahu vyplývá, normálové napětí ve šroubu je nižší než dovolené napětí (246 MPa).

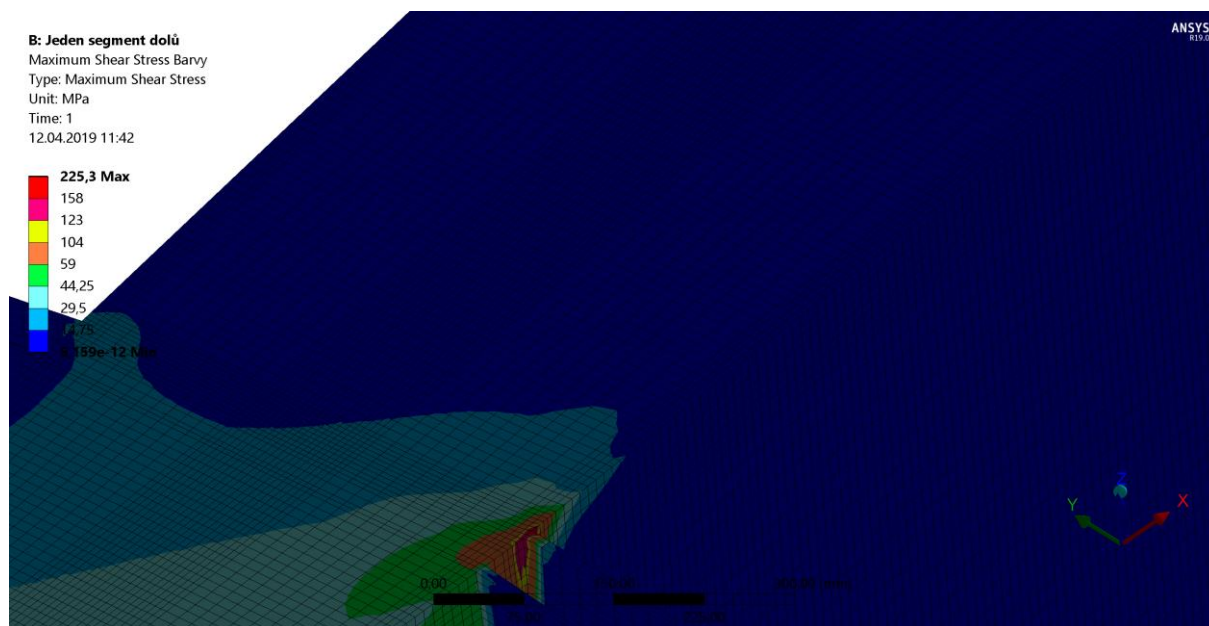
## 6.5 Výpočet namáhání segmentu pro zatížení LOCA

Schéma upevnění a zatížení segmentu opěrného systému je shrnuto v kapitole 6.3 a je i v tomto případě shodné.

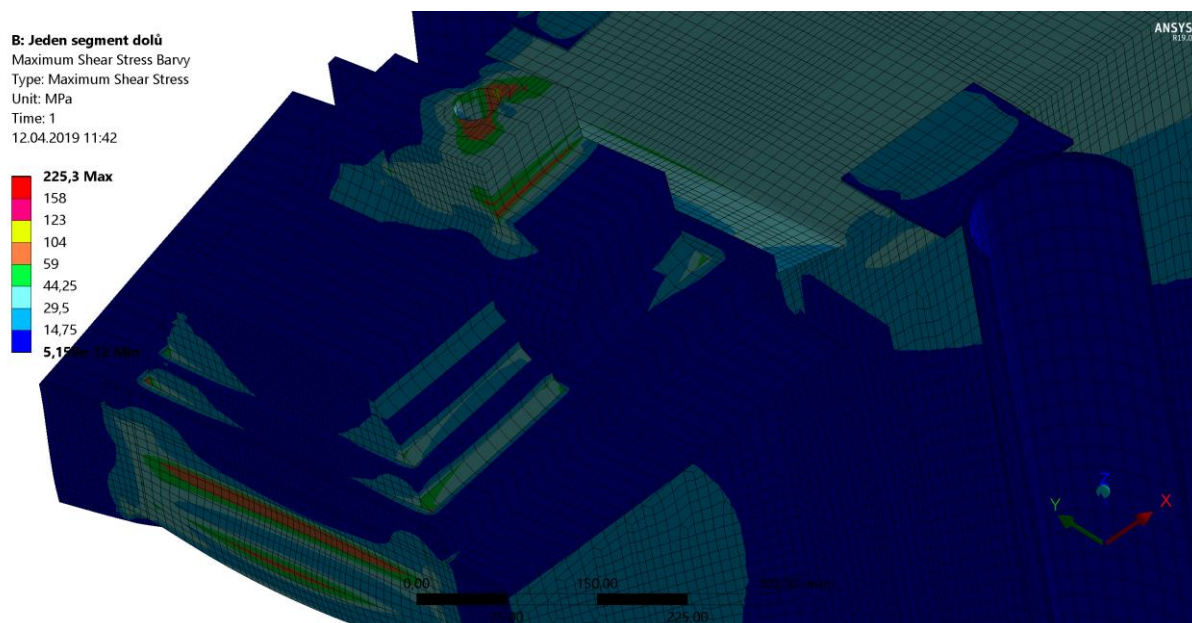
Pro zátěžný stav LOCA vycházejí napětí vyšší, ale předpokládá se, že nastane jen jedenkrát v průběhu životnosti opěrného prvku. Překročení dovolených zatížení pro jednotlivé materiály je na Obrázek 60, Obrázek 61 a Obrázek 62 vyznačeno světlými barvami. Červená představuje překročení dovoleného napětí pro materiál 5 (158 MPa), růžová překročení u materiálu 2 (123 MPa), žlutá překročení u materiálu 1 (104 MPa) a oranžová překročení u materiálů 3 a 4 (pro oba 59 MPa).



Obrázek 60 Napěťové pole segmentu pro zátěžný stav 8



Obrázek 61 Detail napěťových polí pro zátěžný stav 8

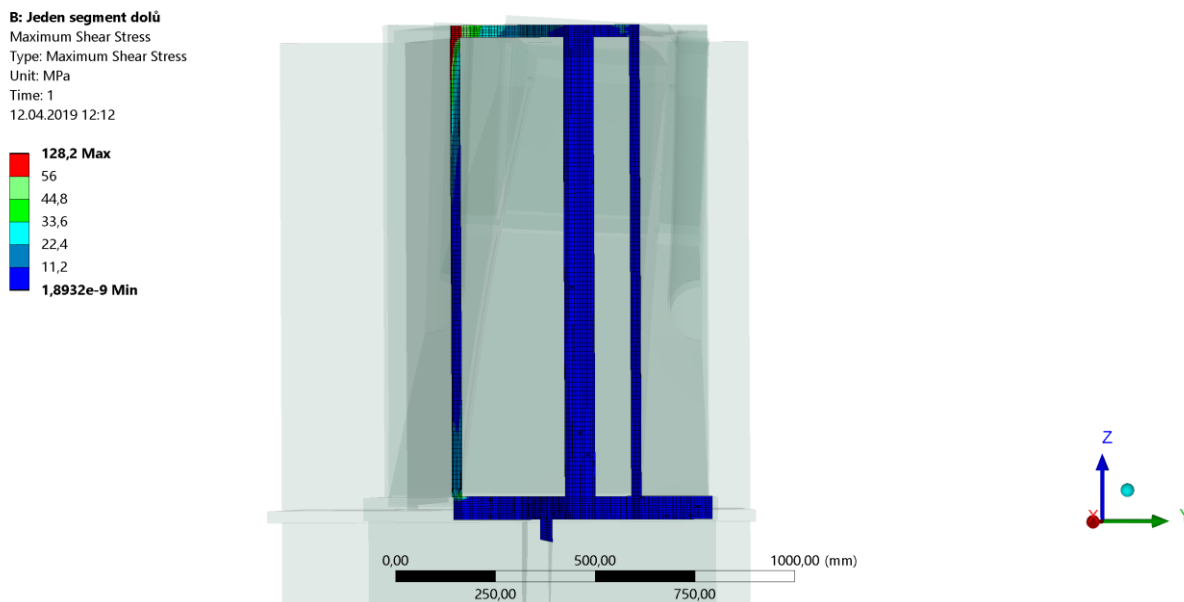


Obrázek 62 Detail napěťových polí pro zátěžný stav 8

Podrobnější vyhodnocení vyžadují hlavně tři oblasti.

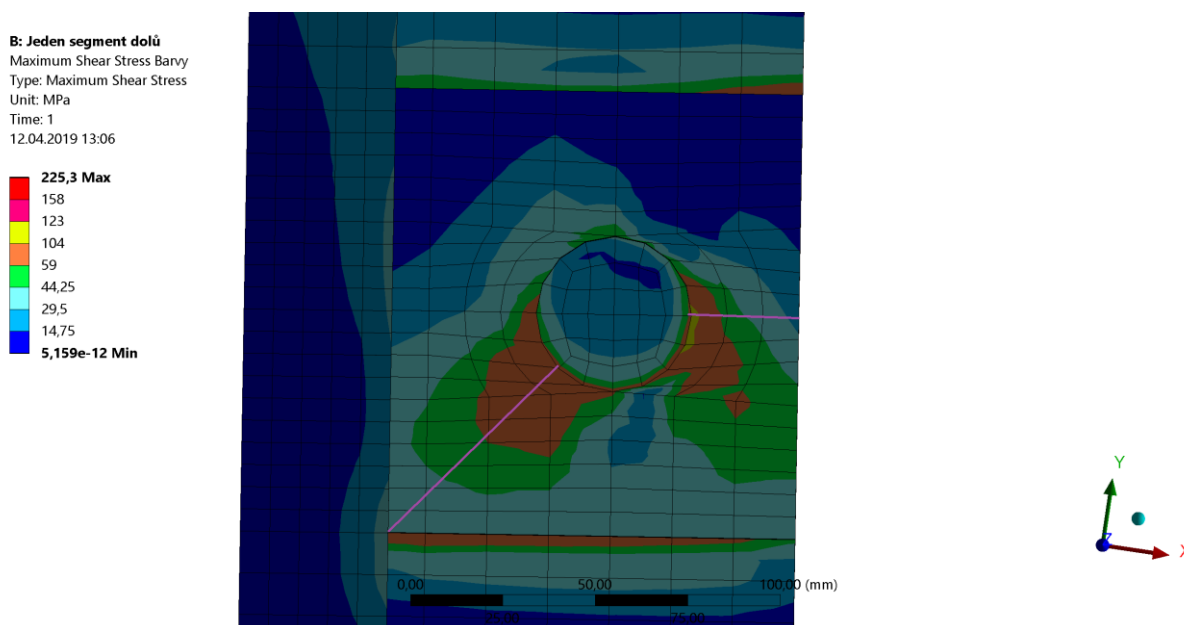
1. První z nich je přední část opěrného systému (Obrázek 62). Napětí zde sice překračuje nejvyšší dovolené napětí pro daný materiál (59 MPa), ale s ohledem na výkresovou dokumentaci a tloušťku plechu [13] lze předpokládat, že tato oblast nemá nosnou funkci.

2. Další oblastí je přechod mezi pevně uchycenými částmi a částí volnější (Obrázek 61). V tomto případě je situace složitější, ale Obrázek 63 jasně ukazuje, že plocha, která přenáší vyšší napětí, než je dovolené napětí (také 59 MPa) je velmi malá (pouze roh vlevo nahore).

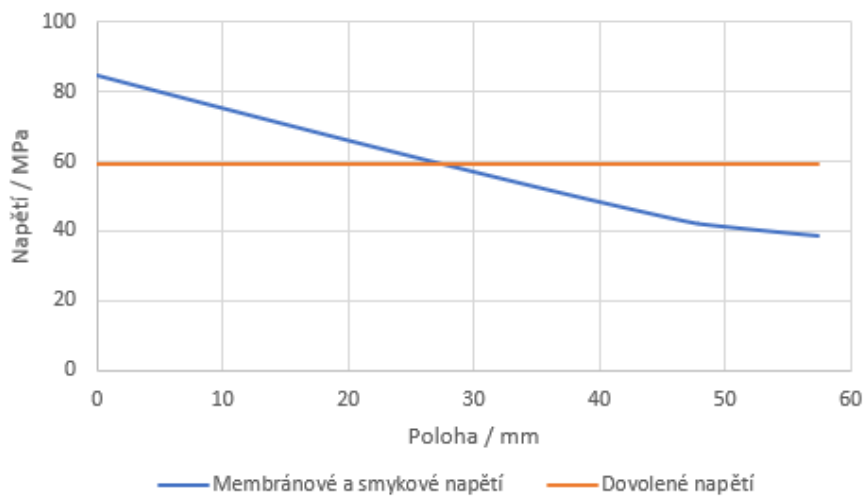


Obrázek 63 Průřez opěrným prvkem v rovině nejvyššího smykového namáhání

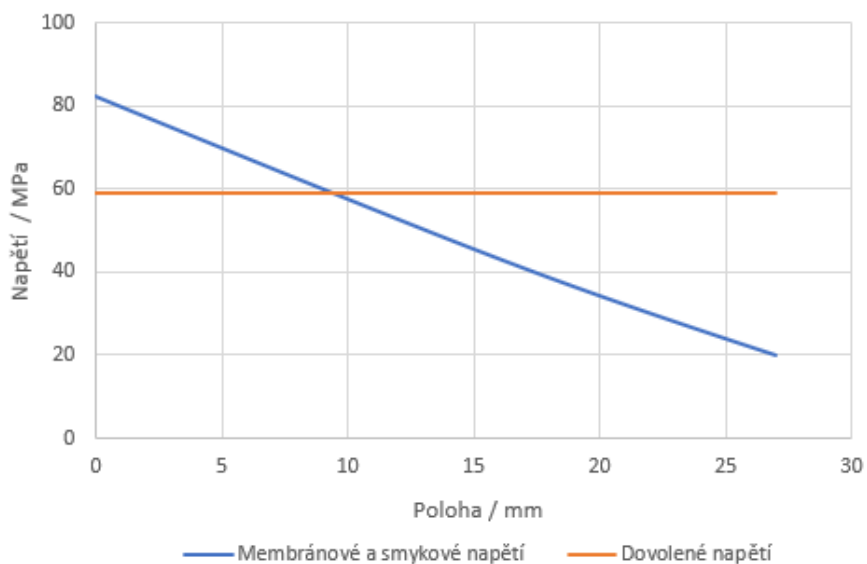
3. Poslední obtížnou oblastí je závit v peru II (Obrázek 62). Prvky s větším napětím, než je napětí dovolené, představují pouze menší procento plochy pera II (Obrázek 64; oblasti se stanoveným průběhem napětí podél úsečky jsou označeny fialovou barvou), navíc napětí směrem k vnějšku pera II klesá (dokládají Obrázek 65 pro vodorovnou čáru na Obrázek 64 a Obrázek 66 pro šikmou čáru na Obrázek 64).



Obrázek 64 Napěťové pole na vrchní ploše pera II



Obrázek 65 Průběh napětí podél vodorovné linie



Obrázek 66 Průběh napětí podél svislé linie

Je možné předpokládat, že segment opěrného kruhu je bezpečný i v případě LOCA havárie.

## 7 Vyhodnocení výsledků

Celkové namáhání opěrného systému je součtem namáhání od teplotních dilatací a od statického zatížení. Protože napětí od statických zátěžných stavů 1 – 7 jsou nízká, lze předpokládat, že provoz opěrného prvku bude bezpečný.

Poněkud odlišná je situace v případě současného namáhání od teplotních dilatací a namáhání od zátěžného stavu 8 (LOCA). V tomto případě totiž vzniká stav, kdy zvlášť hodnocené součásti (tedy ty s vyšším vypočítaným napětím) se v obou zátěžných stavech překrývají. Jedná se o dva případy.

1. Prvním případem je přední část opěrného prvku (viz Obrázek 28 a Obrázek 62), která zajišťuje vylití vnitřních prostor. S ohledem na to, že nemá nosný význam [13], nemělo by dojít ke snížení bezpečnosti celé konstrukce opěrného systému.
2. Dalším případem je pero I, které zajišťuje polohu tlakové nádoby reaktoru proti pootočení a přenáší do opěrného systému síly v tečném směru a (s ohledem na cyklickou symetrii) i v radiálním směru od tlakové nádoby. Situace zde je složitější, ale lze předpokládat, že namáhání od tepelných dilatací má pouze kontaktní charakter (Obrázek 30) a v rovině namáhané na smyk již nedosahuje příliš vysokých hodnot (Obrázek 31). Napětí od zátěžného stavu LOCA tyto předpoklady nesplňuje, ale s ohledem na nesymetričnost takového zatížení (uvažuje se porušení jednoho hlavního cirkulačního potrubí) lze předpokládat, že by při lokálním zplastizování jednoho pera I přenesla zatížení další pera. I s ohledem na značně konzervativní předpoklady (viz kapitola 4.2) lze tedy pero I považovat za bezpečné.



## 8 Výpočet únavového poškození

Několik stěžejních částí opěrného systému bylo hodnoceno z pohledu nízkocyklové únavy vyvolané přechody mezi jednotlivými zátěžnými stavy. Hodnocení z pohledu vysokocyklové únavy provedeno nebylo, neboť nejsou dostupné podklady pro její vyhodnocení.

Podle programu [11] bylo určeno únavové poškození nejvíce zatíženého šroubu, který spojuje pero II a opěrný prsten. Zátěžný blok představoval předepnutí statickým zátěžným stavem 1 a změnu napětí při ochlazení z provozní teploty na teplotu výchozí. Byl určen úbytek únavové životnosti za jeden takový cyklus a ten je:

$$p = 0,000\ 000\ 5 = 5 \cdot 10^{-7} \quad (8.1)$$

Stejným způsobem bylo určeno únavové poškození téhož šroubu s odlišným zátěžným blokem. Ten zahrnoval předepnutí statickým zátěžným stavem 3 a změnu napětí při ochlazení z provozní teploty na teplotu výchozí. Byl opět určen úbytek únavové životnosti na jeden takový cyklus a ten je také:

$$p = 0,000\ 000\ 5 = 5 \cdot 10^{-7} \quad (8.2)$$

Tyto hodnoty únavového poškození jsou velmi nízké. I při zvolení velmi konzervativního přístupu lze předpokládat proběhnutí pouze několika stovek cyklů během životnosti opěrného prvku, takže šrouby můžeme považovat z pohledu únavy za bezpečné.

## 9 Závěr

Diplomová práce se věnuje analýze namáhání opěrného systému tlakové nádoby jaderného reaktoru typu VVER 440/213 pomocí metody konečných prvků v softwaru ANSYS. První část analýzy (pátá kapitola práce) studuje zatížení opěrného systému dilatací teplot a porovnává několik variant okrajových podmínek. Ukazuje se, že mezi zvolenými typy okrajových podmínek nejsou žádné velké rozdíly. Následuje výpočet napěťových polí vlivem teplotních dilatací a jejich vyhodnocení.

Druhá část analýzy (šestá kapitola práce) se zabývá výpočtem namáhání opěrného systému zatíženého vnějšími silami a momenty. Z důvodu výrazného snížení velikosti výpočtového modelu byl tento rozdělen na dvě části, jejichž spojení je modelováno pomocí tuhostních vazeb. Na základě vypočtených teplotních a napěťových polí je provedeno hodnocení pevnosti nejvíce namáhaných komponentů, a to dle Normativní technické dokumentace Asociace strojních inženýrů [5]. Pro provozní zátěžné stavy jsou napětí v konstrukci velmi nízká, pro zátěžný stav LOCA vyšší, a proto je nutné jejich komplexnější vyhodnocení. V sedmé kapitole je posouzena kombinace namáhání od teplotních dilatací a od zátěžných stavů.

Závěrečná část stručně naznačuje hodnocení vybraných šroubů z pohledu nízkocyklové únavy vlivem přechodu mezi jednotlivými statickými zátěžnými stavy. Výsledky tohoto hodnocení jsou při zadaných parametrech velmi uspokojivé.

Problematika výpočtu opěrných prvků jaderného reaktoru tohoto typu není předloženou prací ještě vyčerpána. Je možné pokračovat ve zpřesňování jejich výpočtových modelů, především pak v dalším upřesnění okrajových podmínek nebo podrobnějším modelováním kontaktů mezi jednotlivými komponenty. V případě dostupnosti podkladů a softwarového vybavení by bylo možné řešit i otázky vysokocyklové únavy či zhoršování vlastností použitých materiálů vlivem radiace.

## 10 Reference

- [1] ČERMÁK, L. *Algoritmy metody konečných prvků*. 1. vyd. Brno: VUT 2000
- [2] KALČÍK, J., SÝKORA, K. *Technická termomechanika*. Praha: Academia, 1973
- [3] KINDELMANN, P., ČERVENÁ, O., HAJŽMAN, M., LAZAR, J. *Hodnocení pevnosti a únavy opěrných prvků reaktoru JE Dukovany*. Plzeň: VZÚ Plzeň, 2018 (neveřejná výzkumná zpráva)
- [4] KINDELMANN, P., ČERVENÁ, O., HAJŽMAN, M., LAZAR, J. *Metodika výpočtového modelování opěrných prvků reaktoru JE Dukovany pro hodnocení pevnosti a únavy*. Plzeň: VZÚ Plzeň, 2018 (neveřejná výzkumná zpráva)
- [5] KOL. AUTORŮ *Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*, sekce III. Normativně technická dokumentace ASI. Praha a Brno: ASI, 1996
- [6] KONOP, R., MACÁK, P., TANZER M., VÍT, J. *Provozní diagnostika na jaderných elektrárnách*. Plzeň: ZČU, 2019 (neveřejné podklady k přednáškám stejnojmenného předmětu)
- [7] LAŠOVÁ, V. *Metoda konečných prvků ve výpočtech obráběcích strojů*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2011. ISBN 978-80-261-0008-9
- [8] LINHART, J. *Přestup tepla a hmoty* Plzeň: ZČU, 2017 (neveřejné podklady k přednáškám stejnojmenného předmětu)
- [9] NĚMEC, J., DVOŘÁK, J., HÖSCHL, C. *Pružnost a pevnost ve strojírenství*. (Technický průvodce sv. 69) 1. vyd. Praha: SNTL 1989
- [10] VOLDŘICH, J. *Pevnostní analýza v energetice* Plzeň: ZČU 2016 (neveřejné podklady k přednáškám předmětu Semestrální projekt M)
- [11] VOLDŘICH, J. *Výpočetní program pro hodnocení únavy* Plzeň: NTC ZČU [nedat.]
- [12] ZDEBOR, J. *Primární okruh jaderné elektrárny* Plzeň: ZČU, 2018 (neveřejné podklady k přednáškám stejnojmenného předmětu)
- [13] *Geometrie a kótování opěrného prvku jaderného reaktoru VVER 440*. Plzeň: VZÚ Plzeň, 2018
- [14] CS.WIKIPEDIA: VVER [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/VVER>
- [15] EN.WIKIPEDIA: VVER [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/VVER>
- [16] HEJZLAR, R. *Sdílení tepla*. Praha: ČVUT, 2004
- [17] KOL. AUTORŮ. *ANSYS Structural Analysis Guide*. B. m.: ANSYS Inc, 2004

## Přehledy

### Seznam symbolů

Značky veličin jsou užívány v souladu s normou [5], popřípadě s běžnými zvyklostmi.

$R_{p0,2}$	zaručovaná hodnota smluvní meze kluzu pro výpočtovou teplotu
$R_m$	zaručovaná hodnota smluvní meze kluzu pro výpočtovou teplotu
$[\sigma]$	jmenovité dovolené napětí
$[\sigma]_w$	jmenovité dovolené napětí pro šroub
$[\tau]$	jmenovité dovolené smykové napětí (v Trescově hypotéze)
$F_x; F_y; F_z$	síla ve směru osy x; y; z
$M_x; M_y; M_z$	moment ve směru osy x; y; z
$S_{\text{beton}}; S_{\text{ocel}}$	plocha segmentu, kterou prochází tepelný tok a je vyrobena z betonu; ocelí
$\lambda_{\text{beton}}; \lambda_{\text{ocel}}$	tepelná vodivost betonu; ocelí
$\dot{Q}_{\text{celkové}}$	celkový tepelný tok segmentem opěrného systému
grad T	teplotní gradient
$S_{\text{TNR}}$	plocha v modelu segmentu zasahující vnitřní stěnu tlakové nádoby reaktoru
$\overline{q_{pl}}$	průměrný tepelný tok v ploše segmentu představující vnitřní stěnu tlakové nádoby reaktoru
$q_{pl}$	celkový tepelný tok jedním segmentem
$\sum q_{pl}$	celkový tepelný tok všemi segmenty
$\dot{Q}_R$	tepelný výkon reaktoru
$\sigma$	normálové napětí
$\tau$	smykové napětí v zatíženém šroubu
$k_F$	tuhost segmentu v tečném směru
$u_F$	posuv segmentu v tečném směru
F	jednotková zátěžná síla
d	nejmenší průměr dřívku šroubu
l	délka dřívku šroubu
E	Youngův modul pružnosti v tahu při výpočtové teplotě
U	matice posuvů segmentu
A	matice poddajnosti segmentu
K	matice tuhosti segmentu

$F_F$ ;  $F_{ZK}$ ;  $F_{\text{ŠK}}$  síly přenášené z opěrného prstenu na segmenty v tečném směru; na klín; na pero II

$(\sigma_{\xi}^1)$ ;  $(\sigma_{\xi}^3)$ ;  $(\sigma_{\xi}^8)$  redukované napětí ve šroubu pro zátěžný stav 1; 3; 8

$n_{0,2}$  součinitel bezpečnosti vůči mezi kluzu

$n_m$  součinitel bezpečnosti vůči pevnosti v tahu

$p$  úbytek únavové životnosti

$f$  součinitel smykového tření

## Seznam zkratk

Jsou využívány jen velmi běžné zkratky.

LOCA z anglických slov *loss-of-coolant accident*, zkratka užívaná pro havárii jaderné elektrárny způsobenou porušením potrubí na primárním okruhu (zde výhradně porušení hlavního cirkulačního potrubí, které je pro jadernou bezpečnost nejzávažnější)

VVER z ruských slov *vodo-vodyanoj energetičeskij reaktor (vodo-vodyanoj energetičeskij reaktor)*, zkratka užívaná pro ruskou konstrukční školu tlakovodních energetických reaktorů

VZÚ Plzeň z českých slov Výzkumný a zkušební ústav Plzeň, s. r. o.

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled jaderných reaktorů typu VVER 440 .....	9
Tabulka 2 Základní vlastnosti ocelí .....	13
Tabulka 3 Síly a momenty působící na opěrný systém.....	14
Tabulka 4 Porovnání teplot ve vybraných uzlech.....	27
Tabulka 5 Vyhodnocení napětí ve šroubech .....	34
Tabulka 6 Vypočtené síly v pružinách .....	45
Tabulka 7 Výpočtové síly v pružinách pro zátěžný stav LOCA.....	49

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Označení jednotlivých komponentů opěrného systému [4].....	10
Obrázek 2 Detaily opěrného systému [4].....	11
Obrázek 3 Řez opěrným systémem [4].....	11
Obrázek 4 Přehled materiálů [4] .....	12
Obrázek 5 Souřadnice zadaných sil .....	15

Obrázek 6 Geometrie využitá pro model teplotní úlohy.....	16
Obrázek 7 Geometrie využitá pro model opěrného kruhu .....	17
Obrázek 8 Geometrie využitá pro model segmentu .....	18
Obrázek 9 Výpočtová síť teplotní úlohy .....	20
Obrázek 10 Okrajová podmínka na vnitřní stěně tlakové nádoby .....	20
Obrázek 11 Okrajová podmínka na vnější straně opěrného segmentu .....	21
Obrázek 12 Okrajová podmínka sálání číslo 1.....	21
Obrázek 13 Okrajová podmínka sálání číslo 2.....	22
Obrázek 14 Okrajová podmínka sálání číslo 3.....	22
Obrázek 15 Okrajová podmínka sálání číslo 4.....	23
Obrázek 16 Teplotní pole po průřezu modelu (teplota studeného konce 40°C) .....	23
Obrázek 17 Teplotní pole v nadhledu (teplota studeného konce 40°C) .....	23
Obrázek 18 Plocha, která přenáší stejný tepelný tok jako celý segment .....	24
Obrázek 19 Teplotní pole po průřezu modelu (teplota studeného konce 60°C) .....	25
Obrázek 20 Teplotní pole v nadhledu (teplota studeného konce 60°C) .....	25
Obrázek 21 Teplotní pole po průřezu modelu (bez vlivu sálání).....	26
Obrázek 22 Teplotní pole v nadhledu (bez vlivu sálání).....	26
Obrázek 23 Umístění posuzovaných uzlů.....	27
Obrázek 24 Umístění posuzovaných uzlů.....	27
Obrázek 25 Okrajová podmínka bránící pohybu tlakové nádoby reaktoru .....	28
Obrázek 26 Napětí od teplotního pole.....	29
Obrázek 27 Napětí od teplotního pole.....	29
Obrázek 28 Detail přední části segmentu .....	30
Obrázek 29 Méně zatížené šrouby .....	30
Obrázek 30 Zatížení pera I od teploty (oblast roviny stříhu ukazuje černá čára).....	31
Obrázek 31 Řez rovinou s nejvyšším smykovým napětím (její polohu ukazuje Obrázek 30).....	31
Obrázek 32 Napětí v příložce.....	32
Obrázek 33 Napětí v příložce v rovině namáhané na smyk .....	32
Obrázek 34 Napěťové pole per II.....	33
Obrázek 35 Řez perem II .....	33
Obrázek 36 Posuzované roviny u šroubů .....	34
Obrázek 37 Výpočtová síť tuhostní úlohy .....	35
Obrázek 38 Detail výpočtové sítě tuhostní úlohy .....	35

Obrázek 39 Plochy, které mají okrajovou podmínku pevné podpěry .....	36
Obrázek 40 Plocha klínu, na kterou působí svislá síla .....	37
Obrázek 41 Posuvy v oblasti klínu ve směru svislé osy při zátěži silou .....	37
Obrázek 42 Plocha, na kterou působí síla v tečném směru .....	38
Obrázek 43 Posuvy plochy v tečném směru.....	38
Obrázek 44 Síla působící na závit .....	39
Obrázek 45 Posuv v oblasti závitu .....	39
Obrázek 46 Schéma tuhostních vazeb .....	42
Obrázek 47 Výpočtová síť opěrného prstenu.....	43
Obrázek 48 Detail pružin .....	44
Obrázek 49 Oblast zatížení opěrného prstenu .....	45
Obrázek 50 Napěťová pole opěrného kruhu pro zátěžný stav 1.....	46
Obrázek 51 Detail napěťových polí pro zátěžný stav 1 .....	46
Obrázek 52 Zatížení segmentu v oblaci šroubu .....	47
Obrázek 53 Napěťová pole segmentu .....	47
Obrázek 54 Segment detail napěťového pole na přechodu k pevné podpoře .....	48
Obrázek 55 Pole napětí v opěrném prstenu .....	49
Obrázek 56 Detail pole napětí.....	50
Obrázek 57 Detail pole napětí se skrytým modelem pera I .....	50
Obrázek 58 Napětí v peru I v rovině namáhané na smyk.....	51
Obrázek 59 Linearizace napětí podél drážky pro peru I .....	51
Obrázek 60 Napěťové pole segmentu pro zátěžný stav 8.....	52
Obrázek 61 Detail napěťových polí pro zátěžný stav 8 .....	53
Obrázek 62 Detail napěťových polí pro zátěžný stav 8 .....	53
Obrázek 63 Průřez opěrným prvkem v rovině nejvyššího smykového namáhání .....	54
Obrázek 64 Napěťové pole na vrchní ploše pera II .....	54
Obrázek 65 Průběh napětí podél vodorovné linie.....	55
Obrázek 66 Průběh napětí podél svislé linie .....	55

## Příloha - Tabulky vlastností materiálů

Vlastnosti materiálů jsou dostupné ve VZÚ Plzeň [4].

Materiál	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	Z [%]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	Z [%]
	T = 20 °C				T = 350 °C			
15Ch2MFA	490	608	15	55	441	539	14	50
25Ch1MF	640	785	12	50	491	638	11	55
25L	216	432	16	35	176	343	11	31
22K	216	432	16	35	176	343	11	31
40Ch	785	981	10	45	638	824	13	50

Materiál	T	E	$\alpha^t$	$\nu$	$\lambda$	$c_p$	$\rho$
	[°C]	[10 <sup>3</sup> MPa]	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	[-]	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[kgm <sup>-3</sup> ]
15Ch2MFA	20	210	11,3	0,3	35,0	447	7830
	50	207	11,5	0,3	35,5	459	7822
	100	205	11,9	0,3	36,1	479	7809
	150	202	12,2	0,3	36,6	500	7795
	200	200	12,5	0,3	36,8	520	7780
	250	197	12,8	0,3	36,6	541	7765
	300	195	13,1	0,3	36,2	562	7750
	350	190	13,4	0,3	35,6	585	7733
25Ch1MF	20	215	11,3	0,3	40,2	462	7800
	100	210	11,9	0,3	41,0	536	7780
	200	205	12,5	0,3	40,0	574	7750
	300	200	13,1	0,3	39,0	607	7720
	400	190	13,6	0,3	38,0	632	7680



Materiál	T	E	$\alpha^t$	$\nu$	$\lambda$	$c_p$	$\rho$
	[°C]	[10 <sup>3</sup> MPa]	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	[-]	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[kgm <sup>-3</sup> ]
25L	20	200	11,3	0,3	51,7	460	7859
	50	197	11,5	0,3	51,4	464	7847
	100	195	11,9	0,3	51,0	470	7834
	150	192	12,2	0,3	49,8	477	7819
	200	190	12,5	0,3	48,5	483	7803
	250	185	12,8	0,3	46,5	494	7787
	300	180	13,1	0,3	44,4	504	7770
	350	175	13,4	0,3	43,6	515	7753
22K	20	200	11,3	0,3	51,7	460	7859
	50	197	11,5	0,3	51,4	464	7847
	100	195	11,9	0,3	51,0	470	7834
	150	192	12,2	0,3	49,8	477	7819
	200	190	12,5	0,3	48,5	483	7803
	250	185	12,8	0,3	46,5	494	7787
	300	180	13,1	0,3	44,4	504	7770
	350	175	13,4	0,3	43,6	515	7753

Materiál	T	E	$\alpha^t$	$\nu$	$\lambda$	$c_p$	$\rho$
	[°C]	[10 <sup>3</sup> MPa]	[10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	[-]	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[kgm <sup>-3</sup> ]
40Ch	20	215	11,3	0,3	51,7	460	7859
	50	212	11,5	0,3	51,4	464	7847
	100	210	11,9	0,3	51,0	470	7834
	150	207	12,2	0,3	49,8	477	7819
	200	205	12,5	0,3	48,5	483	7803
	250	202	12,8	0,3	46,5	494	7787
	300	200	13,1	0,3	44,4	504	7770
	350	195	13,4	0,3	43,6	515	7753
Serpentinový beton	20	18,2	4,2	0,2	0,91	1090	1700
	450	6,8	4,2	0,2	0,74	1090	1700