

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T041 Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace konstrukce přírubových spojů vlnovce pro Vyvážecí zařízení reaktoru
EPR

Autor: **Bc. Václav LEPIČ**
Vedoucí práce: **Ing. Jan ZDEBOR, CSc.**

Akademický rok 2012/2013

Originální zadání

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Lepič	Jméno Václav		
STUDIJNÍ OBOR	2302T041 „Stavba jaderně energetických zařízení“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zdebor, CSc.	Jméno Jan		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKE			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace konstrukce přírubových spojů vlnovce pro Vyvážecí zařízení reaktoru EPR			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	110	TEXTOVÁ ČÁST	88	GRAFICKÁ ČÁST	22
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce je zaměřena na dvojici přírubových spojů speciálního vlnovce. Ten je důležitou součástí zařízení, které slouží v jaderných elektrárnách s reaktorem EPR pro vyvážení vyhořelého jaderného paliva. Cílem je optimalizovat horní a dolní přírubu vlnovce tak, aby byly odstraněny nedostatky již existujícího řešení společnosti ŠKODA JS, a.s. Součástí práce je návrh tří konstrukčních variant, výběr jedné z nich a potvrzení její funkčnosti MKP výpočtem.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>přírubový spoj, EPR, vyvážecí zařízení, použité jaderné palivo, těsnění, konstrukční návrh</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Lepič	Name Václav		
FIELD OF STUDY	2302T041 „Nuclear Power Equipment Design“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zdebor, CSc.	Name Jan		
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Optimization of bellow's flanges connection for spent fuel transportation facility in EPR nuclear power plants			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKE	SUBMITTED IN	2013
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	110	TEXT PART	88	GRAPHICAL PART	22
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis is focused on the two flanges belonging to the special bellow. Bellow is important part of the spent fuel transportation facility in EPR nuclear power plants. The aim of this thesis is optimization of upper and lower flanges of the bellow because flanges designed by SKODA JS a.s. have some serious deficiencies. There are three possible drafts of flanges in this thesis. The best flange has been chosen and it has been checked by FEM.
KEY WORDS	flange connection, EPR, spent fuel transportation facility, spent nuclear fuel, sealing, flange design

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:

.....
podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledku diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem pedagogům Západočeské univerzity v Plzni a zaměstnancům společnosti ŠKODA JS, a.s., kteří mi během studia předávali své znalosti a cenné zkušenosti. Poděkování patří především vedoucímu práce Ing. Janu Zdeborovi, CSc., který důležitými připomínkami pomohl při tvorbě této diplomové práce. Poděkování patří také Ing. Janě Burešové za významnou a vyčerpávající pomoc a poskytnutí veškerých potřebných materiálů. Stejně tak bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Jeníkovi, Ph.D., který mi předanými zkušenostmi ulehčil zpracování pevnostního výpočtu a Ing. Miloslavu Ruchařovi za podnětné nápady při tvorbě konstrukčních návrhů. Děkuji také rodině a přátelům za jejich podporu během studia.

Bc. Václav Lepič

Obsah

Obsah	7
Přehled použitých veličin.....	9
Seznam použitých zkratk	11
1 Úvod	12
2 Palivo v jaderných elektrárnách	14
2.1 Palivové články	14
2.2 Vyhořívání paliva	15
2.3 Výměna paliva	17
2.3.1 Transportně-technologická část JE s reaktorem typu VVER	18
2.3.2 Transportně-technologická část JE s reaktorem typu PWR.....	19
2.4 Nakládání s vyhořelým palivem.....	22
2.4.1 Otevřený palivový cyklus	26
2.4.2 Uzavřený palivový cyklus	27
3 Vyvážecí zařízení reaktoru EPR.....	29
3.1 Konstrukční části.....	29
3.1.1 Přepavní (vyvážecí) stroj.....	29
3.1.2 Prostup.....	31
3.2 Pracovní postup stroje	34
4 Horní příruba	38
4.1 Původní konstrukce ŠKODA JS a.s.	39
4.1.1 Těsnění.....	40
4.1.2 Montáž.....	40
4.1.3 Problémy.....	40
5 Optimalizace horní příruby	42
5.1 Těsnění.....	42
5.1.1 Kovové těsnění HELICOFLEX®	43
5.1.2 Těsnění typu PTFE	43
5.1.3 Pryžové těsnění EPDM.....	44
5.1.4 Jiná těsnění.....	44
5.2 Tuhost	44
5.3 Konstrukční řešení.....	45
5.3.1 Varianta 1.....	46
5.3.2 Varianta 2.....	51
5.3.3 Varianta 3.....	53
5.3.4 Porovnání variant	57

5.4 Pevnostní výpočet.....	58
5.4.1 Provozní zatížení	59
5.4.2 Výpočet předepnutí šroubů	59
5.4.3 Návrh hlavních šroubů.....	61
5.4.4 Výpočtový model	62
5.4.5 Materiály	62
5.4.6 Síť	64
5.4.7 Vazby a kontakty.....	65
5.4.8 Okrajové podmínky	66
5.4.9 Definice úlohy	66
5.4.10 Výsledky a jejich hodnocení	67
6 Spodní příruba	73
6.1 Původní konstrukce ŠKODA JS, a.s.	73
6.1.1 Těsnění.....	74
6.1.2 Montáž.....	74
6.1.3 Problémy	75
7 Optimalizace spodní příruby	76
7.1 Těsnění.....	76
7.2 Tuhost	76
7.3 Konstrukční řešení.....	77
7.3.1 Varianty 1 a 2.....	77
7.3.2 Varianta 3.....	79
8 Závěr	81
Seznam použité literatury	83
Seznam obrázků	86
Seznam grafů.....	87
Seznam tabulek	88
Příloha č. 1	89
Příloha č. 2	94

Přehled použitých veličin

Označení	Jednotky	Název
d	[mm]	průměr kolíku
d_3	[mm]	malý průměr závitu
D_j	[mm]	výpočtový průměr těsnění
D_m	[mm]	vnitřní průměr modelu těsnění
d_s	[mm]	průměr dřívku šroubu
D_v	[mm]	vnější průměr modelu těsnění
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
F_B	[N]	celkové předpětí všech šroubů
F_b	[N]	předpětí na jeden šroub
F_f	[N]	hydrostatická síla
F_j	[N]	síla pro stlačení těsnění v pracovním bodě
F_m	[N]	minimální síla pro stlačení těsnění nezatíženého spoje
F_o	[N]	síla působící na celý obvod těsnění
F_s	[N]	minimální síla pro stlačení těsnění zatíženého spoje
F_s^*	[N]	minimální síla pro stlačení těsnění zatíženého spoje při provozní teplotě
F_v	[N]	síla od vlnovce
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
h	[mm]	výška prostupu
k	[N/mm]	tuhost vlnovce
k	[-]	bezpečnost vůči mezi kluzu
l_t	[mm]	délka těsnění
m	kg	hmotnost
M_o	[Nmm]	ohybový moment
n	-	počet elementů
N	[N]	normálová síla
p	[MPa]	absolutní tlak
p_t	[MPa]	tlak působící na těsnění
p_u	[MPa]	maximální přetlak aplikovatelný na daný typ těsnění
R_e	[MPa]	mez kluzu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
S	mm ²	plocha průřezu

S_m	[MPa]	základní přípustná intenzita napětí
S_t	[mm ²]	stlačovaná plocha modelu těsnění
T	[°C]	teplota
W_o	[mm ³]	průřezový modul v ohybu
x	[mm]	laterální úchylka
Y_1	[N/mm]	minimální měrná síla pro stlačení těsnění při 20°C
Y_2	[N/mm]	měrná síla pro stlačení těsnění v pracovním bodě
Y_m	[N/mm]	minimální měrná síla pro zajištění těsnosti
z	[mm]	zdvih vlnovce
σ	[MPa]	normálové napětí
σ_c	[MPa]	celkové napětí
σ_D	[MPa]	dovolené napětí
σ_M	[MPa]	napětí od ohybového momentu
σ_m	[MPa]	membránové napětí
τ	[MPa]	smykové napětí
τ_D	[MPa]	dovolené smykové napětí
τ_{max}	[MPa]	maximální smykové napětí

Seznam použitých zkratk

BMP	bazén mokré přepravy
BOT	blok ochranných trub
BSVP	bazény skladování vyhořelého paliva
EPDM	Etylen-Propylen-Dien M-Class
EPR	European Pressurized Reactor
JE	jaderná elektrárna
MKP	metoda konečných prvků
MOX	Mixed-Oxide Fuel
NBR	Nitril Butadiene
NRC	Nuclear Regulatory Commission
PTFE	Polytetrafluoroethylen
PWR	Pressurized Water Reactor
VVER	vodo-vodní energetický reaktor

1 Úvod

Jaderná elektrárna pro svůj provoz používá palivo ze štěpitelného materiálu, jehož energetický potenciál se musí dříve nebo později vyčerpat. Takové palivo se obecně nazývá vyhořelé nebo také použité. Jelikož již není schopno dále udržet jaderný reaktor v provozu, je potřeba toto palivo z reaktoru vyjmout a nahradit novým. S použitým palivem je nakládáno způsobem, který se v každém typu jaderné elektrárny a dokonce v každém státu může lišit.

Obecně je palivo nejdříve skladováno tzv. mokrým způsobem v bazénu skladování vyhořelého paliva v areálu elektrárny. Po určité době nastane potřeba použité palivo uložit do přepravních kontejnerů a přemístit ho na místo dalšího zpracování.

Zajímavým způsobem, zcela odlišným od ostatních projektů, je tato problematika řešena v elektrárnách s reaktorem EPR. Zde je pro umístění použitého paliva do kontejnerů využíváno vyvážecí zařízení. To umožňuje minimum manipulací s kontejnerem. Kontejner se po celém areálu elektrárny pohybuje na speciálním podvozku, který ho dopraví pod bazén skladování vyhořelého paliva a prostřednictvím tzv. prostupu dojde k hermetickému spojení bazénu přímo s vnitřní dutinou kontejneru. Opakované těsné spojení kontejneru a bazénu skladování je umožněno díky významnému pružnému prvku, tzv. vlnovci. Vlnovec je k dalším částem vyvážecího zařízení připojen prostřednictvím přírub na svém horním a spodním konci, jejichž konstrukční optimalizace je hlavní náplní diplomové práce.

V současné době již existuje řešení přírub od společnosti ŠKODA JS, a.s., která je dodavatelem vyvážecího zařízení na elektrárnu Flamanville. Během zpracování projektu a výroby přírub se ovšem objevily některé nedostatky. Ty jsou pro již rozestavěnou elektrárnu Flamanville řešeny podle dostupných možností, ovšem pro budoucí nabídky vyvážecího zařízení musí být tyto nedostatky odstraněny. Vytvoření optimalizované konstrukce přírub, ve které budou odstraněny známé nedostatky původního řešení, má být výsledkem této diplomové práce. Optimalizace bude zaměřena především na tři důležité oblasti v rámci konstrukce přírub, a to zajištění hermetičnosti přírubových spojů, zvýšení tuhosti přírub a zjednodušení jejich montáže.

Hermetičnost přírubových spojů vlnovce je nejdůležitějším úkolem. Vnitřní prostor vlnovce je při provozu zaplněn chladivem z bazénů skladování vyhořelého paliva. Chladivo tvoří voda, která je v přímém kontaktu s palivem a obsahuje tak radioaktivní prvky. Tato voda se za žádných okolností nesmí dostat z vnitřního prostoru vlnovce, což by byla havárie spojená s únikem radioaktivity. Utěsnění přírubových spoje je tak provedeno hned dvojicí těsnění. Vzhledem k umístění horního přírubového spoje ve velice stísněném prostoru se složitou přístupností, bude snaha použít taková těsnění, která vydrží po celou životnost jaderné elektrárny bez nutnosti jejich údržby. Takovému těsnění se ovšem musí přizpůsobit spojovací prvky příruby, aby bylo zajištěno dostatečné stlačení obou kroužků. Zároveň umístění těchto spojů musí umožňovat co možná nejjednodušší montáž.

Ze vzniklých konstrukčních návrhů bude vybrána nejvhodnější kombinace obou přírub, která nejlépe vyhovuje daným vlastnostem. Pro vybrané řešení bude nutno MKP výpočtem prokázat, zda jsou splněny předpokládané požadavky. Zejména jestli je konstrukce horní příruby, při navrženém umístění spojovacích elementů, schopna zajistit hermetičnost přírubového spoje.

Práce ve své první části shrnuje základní poznatky týkající se problematiky nakládání s vyhořelým palivem. Zejména popisuje rozdíly mezi způsoby manipulace s vyhořelým palivem v jaderných elektrárnách typu PWR a VVER tak, aby čtenáři neznalému tohoto

tématu byla přiblížena daná problematika a vynikla tak zásadní odlišnost vyvážení použitého paliva z JE s reaktorem typu EPR. Je také nutno popsat vyvážecí zařízení jako celek a ukázat princip jeho činnosti tak, aby čtenář získal představu o přesné poloze vlnovce v rámci celého zařízení, jeho nenahraditelné funkci, o navazujících součástech a vlivech na něj působících.

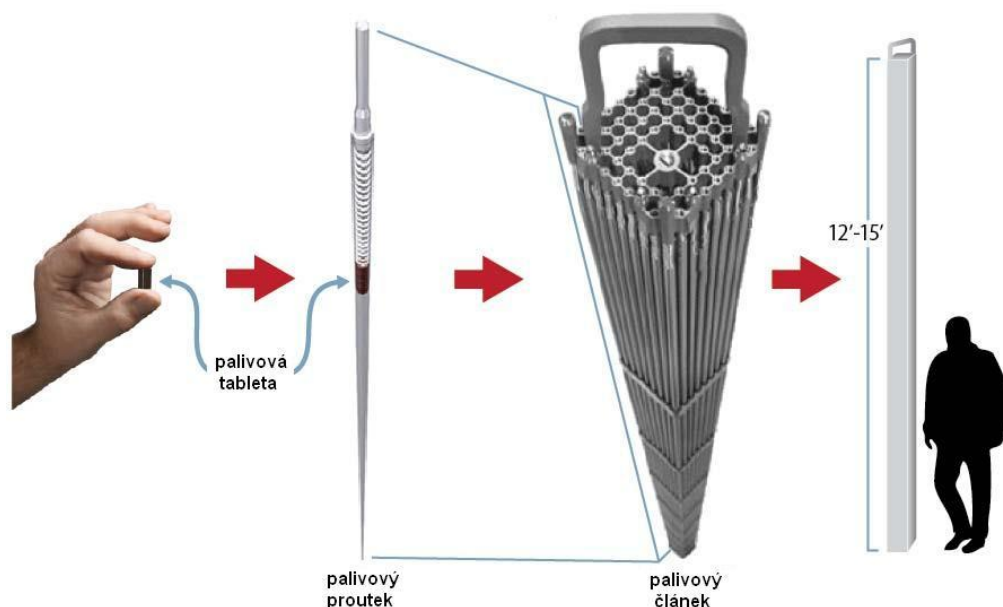
Ve druhé části práce jsou popsány jednotlivé navržené konstrukční varianty včetně popisu původního řešení a jeho nedostatků. Po vybrání vhodné varianty je zpracován MKP výpočet a na základě jeho vyhodnocení je rozhodnuto o naplnění či nenaplnění stanovených požadavků, jež musí vybraná příruba splňovat.

2 Palivo v jaderných elektrárnách

Palivo v jaderných elektrárnách, nejčastěji ve formě palivových tablet ze spékaného UO_2 , není nekonečný zdroj energie. V průběhu provozu JE se snižuje množství štěpitelného materiálu, což má za následek ovlivnění neutronové bilance a postupné snižování schopnosti palivové vsázky udržet řetězovou štěpnou reakci. Po určité době je proto nutné provést výměnu tzv. vyhořelého (lépe řečeno použitého) paliva za nové. Jelikož celé vyvážecí zařízení pro reaktor typu EPR pracuje s použitými palivovými články, bylo do této práce zařazeno základní pojednání o tom, jak palivový článek vypadá, v jakém stavu se po vyjmutí z reaktoru nachází a co se s palivem děje po vyvezení z aktivní zóny. Úvodní kapitoly budou věnovány popisu palivového souboru, vyhořívání jaderného paliva, jeho výměně a následnému nakládání s ním. Diplomová práce se zabývá pouze určitou částí vyvážecího zařízení, ovšem považuji za vhodné popsat pozici celého vyvážecího zařízení v rámci palivového cyklu a definovat tak jeho úlohu a vlivy na něj působící.

2.1 Palivové články

Každý typ reaktoru využívá pro svůj provoz vlastní druh paliva a vlastní uspořádání paliva v konstrukčních celcích zvaných *palivové články* (či palivové soubory, z anglického fuel assemblies). Základní součástí palivového článku je *palivový element* složený z jaderného paliva a pokrytí, které odděluje palivo od chladiva a zabraňuje tak úniku štěpných produktů. Palivo se může lišit chemickým složením, obohacením, geometrickým tvarem atd. Mimo typu reaktoru je určujícím kritériem pro výběr paliva především použitý palivový cyklus. [1] Stejně tak se liší konstrukční uspořádání palivových článků u jednotlivých výrobců, a to i pro reaktory stejného typu. Tato kapitola přiblíží konstrukční uspořádání palivové kazety určené pro tlakovodní reaktor EPR, pro něhož je určen vyvážecí stroj.



Obrázek 2.1 - Složení palivového článku [32, str. 10]

Koncepce a konstrukce palivových článků pro tlakovodní reaktory západoevropských (jako je francouzský EPR) a amerických výrobců (např. AP1000) se zásadně liší od provedení ruského (VVER), který známe z našich jaderných elektráren. Ruský soubor má šestihřanný tvar a palivové elementy, stejně tak jako palivové články v aktivní zóně, jsou uspořádány

v trojúhelníkové geometrii. Palivové soubory určené pro elektrárny západní koncepce jsou naopak typické svým čtvercovým tvarem i čtvercovou geometrií jak elementů, tak článků v aktivní zóně.

Palivové tablety jsou vytvořeny lisováním práškového UO_2 s následným spékáním v peci. Obsah štěpitelného izotopu ^{235}U v přírodním uranu je pouze 0,72 %. [2] Zbytek tvoří, vyjma stopového množství ^{234}U , uran izotopu 238. Pro provoz reaktoru je nutné palivo o štěpitelný izotop uranu obohatit, tzn. uměle zvýšit jeho procentuální zastoupení v palivu. Obohacení paliva o ^{235}U je až do výše 5 %. Tablety mají tvar válce, jehož čela jsou čokovitě vydutá. Skládají se na sebe tak, aby vytvořila souosý válec. Díky vydutí se jednotlivé tablety dotýkají pouze v úzké kruhové ploše po obvodu, tedy tam, kde je nejmenší teplota, a tím je omezena axiální teplotní dilatace sloupce paliva. [1] Sloupec je hermeticky uzavřen do trubky ze zirkoniové slitiny (obchodní název materiálu M5), která tvoří pokrytí. Jednotlivé tablety jsou k sobě přitlačovány pružinkou v horní části zirkoniového obalu. Tato soustava se nazývá *palivový proutek* a tvoří základní element palivového článku. Reaktor EPR je navíc schopen pracovat i s palivem typu MOX (Mixed-OXide, směsné palivo z oxidů uranu a plutonia).

Jednotlivé proutky jsou uspořádány do čtvercového pole 17x17, přičemž 24 pozic tohoto pole je určeno pro vodící trubky regulačního klastru či vnitroreaktorového měření. Celistvost souboru palivových elementů zajišťuje 10 distančních mřížek, dolní opěrná koncovka a hlavice článku. Palivový soubor nemá obálku, na rozdíl od souborů východního typu. [3]

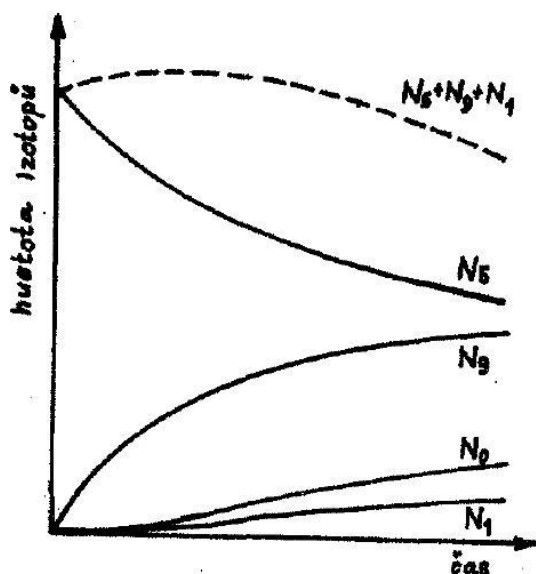


Obrázek 2.2 -
Palivový článek
reaktoru EPR [3]

2.2 Vyhořívání paliva

Základní jadernou reakcí, která zajišťuje uvolňování tepelné energie v reaktoru, je štěpení

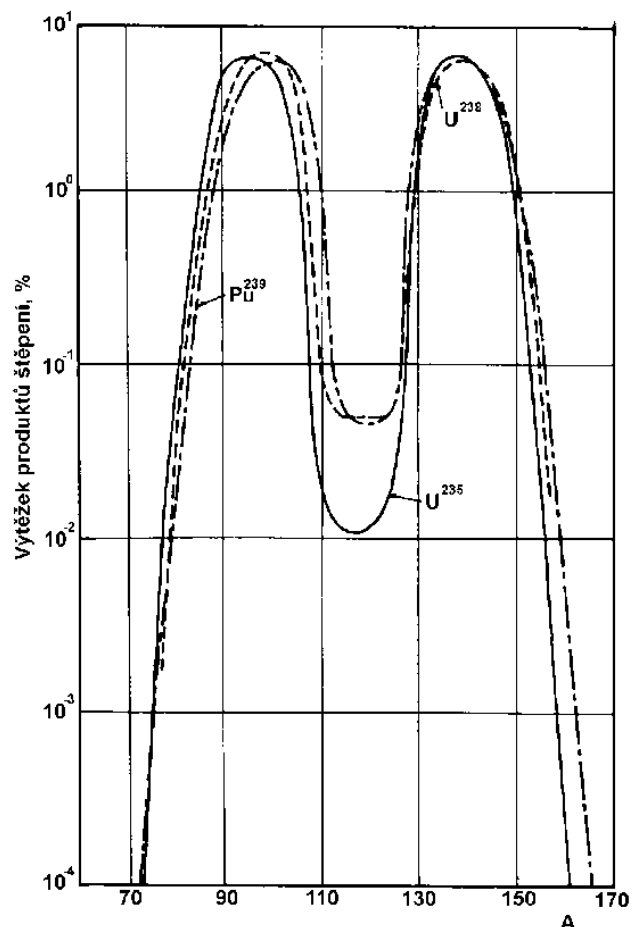
jaderných uranu při interakci s neutrony. Izotopem, který je nejvhodnější pro štěpení, je ^{235}U . Ten je obsažen v určitém množství již v přírodním palivu a pro provoz jeho koncentraci ještě zvyšujeme tzv. obohacováním. Dalšími izotopy, se kterými lze uskutečnit štěpnou řetězovou reakci, jsou ^{239}Pu a ^{241}Pu . Ty získáme procesy, které probíhají při provozu reaktoru (neštěpná absorpce neutronu, radioaktivní rozpady) z tzv. *plodivých materiálů*, kterými jsou ^{238}U a ^{240}Pu . (Pozn.: V některých typech reaktoru lze využít i thoriové palivo, kde je plodivým materiálem ^{232}Th a ^{234}Th a štěpitelnými izotopy uran 233 a 235). Při provozu reaktoru dochází vlivem jaderných reakcí v aktivní zóně ke změně hustoty jednotlivých izotopů obsažených v palivu. Především se snižuje množství ^{235}U , ale s časem se mění i koncentrace ostatních štěpných materiálů (viz Graf 1). Tento jev se



Graf 1 - Změna koncentrace štěpitelných izotopů při provozu reaktoru [4]

nazývá vyhořívání paliva. S ubývající koncentrací štěpitelných prvků se postupně zhoršuje rozmnožovací schopnost aktivní zóny (tedy schopnost štěpením uvolňovat dostatečné množství nových neutronů pro udržení štěpné reakce), což vede ke zhoršení neutronové bilance, a tím ke snižování schopnosti paliva udržet řetězovou štěpnou reakci. Jinými slovy, vyhoříváním se snižuje reaktivita, kterou se vyjadřuje míra odklonu reaktoru od kritického stavu (= stav, při kterém se štěpná reakce udrží samovolně). Změnou reaktivity se dá vyjádřit reakce palivového souboru na změnu jeho rozmnožujících schopností, vyvolanou, mimo jiné, právě vyhoříváním paliva. [4] Vyčerpáme-li možnosti kompenzovat úbytek neutronového toku v důsledku vyhořívání (tj. pokud vyčerpáme zásobu reaktivity kompenzující tento jev), tak reaktor již není schopen dlouhodobě se udržet na provozně a ekonomicky přípustných energetických hladinách a je tedy nutno ho odstavit a provést výměnu paliva.

Dalším nepříjemným efektem při vyhořívání paliva je vznik štěpných produktů. Štěpnou absorpcí neutronu v jádru těžkého prvku, jako je uran či plutonium, dojde k rozdělení jádra na, zpravidla, dvě lehčí jádra spolu s vyzářením několika dalších neutronů (2-3 pro uran). Štěpné produkty se liší hmotnostním číslem, přičemž jejich výtěžek (procentuální vyjádření poměru počtu štěpení, při nichž vznikne daný izotop, k celkovému počtu štěpení) [4] je dán grafem 2. Důležitou vlastností produktů štěpení je jejich radioaktivita. Štěpné produkty jsou po svém vzniku nestabilní, přičemž stabilnějšími se stanou vyzářením energie ve formě ionizujícího záření, po kterém se postupně mění v jádra jiných prvků. Tento tzv. *radioaktivní rozpad* trvá u různých izotopů různou dobu a díky velkému množství štěpných produktů, reprezentujícími prakticky celou Mendělejevovu periodickou tabulku prvků [5], způsobuje, že vyhořelé palivo je relativně dlouhou dobu silně radioaktivní i po vyjmutí z aktivní zóny reaktoru. Proto je nutno s palivem zacházet i s ohledem na tento fakt.



Graf 2 – Výtěžek ze štěpení [4]

Míra vyhoření paliva se nechá hodnotit hned několika přístupy. První z nich je na základě vydané tepelné energie. Hodnotí se jako celková tepelná energie získaná štěpením z celkového množství paliva v reaktoru = vyhoření [MWd = megawatt dny], popřípadě z jednotkového množství paliva = měrné vyhoření [MWd/kgU, častěji MWd/tU = megawatt dny na kg (tunu) uranu]. Další možností, jak vyjádřit míru vyhoření, je prostřednictvím poměrného úbytku štěpitelných prvků v palivu. Nazývá se „fractional burnup“ a definuje se jako počet štěpení v aktivní zóně k celkovému počátečnímu množství štěpitelných jader. Označuje se řeckým písmenem β a jako poměr se může vyjádřit v procentech. V neposlední řadě lze definovat vyhoření jako množství štěpných produktů v jednotkovém množství paliva. Jednotkou je tedy [kg/tU = kg štěpných produktů na tunu uranu]. [2,4]

Pojem *vyhořelé* palivo není úplně vhodný. Může navodit dojem, že palivo je po vyjmutí z reaktoru již úplně vyčerpáno. Ve skutečnosti v něm zůstává ještě podstatná část původní energie, kterou lze využít dále. Už se však nehodí pro použití v jaderném reaktoru. Výstižnější je proto označovat palivo jako *použité*. Na druhou stranu je definice vyhořelé jaderné palivo plnohodnotný a vžitý odborný výraz, a to i v mezinárodním měřítku (např. anglické slovo *burnup*). Z toho důvodu byl tento pojem respektován i v této práci.

2.3 Výměna paliva

Transportně – technologická část, tj. ta část jaderné elektrárny, zabývající se hospodářstvím čerstvého a vyhořelého paliva, je u tlakovodních reaktorů typu PWR a VVER dosti podobná. Rozhodně se ovšem nedá říct, že shodná. Mimo několika nepodstatných změn v konstrukci jednotlivých zařízení je hlavním rozdílem umístění bazénů skladování vyhořelého paliva, jehož účel bude popsán dále v této kapitole.

Pokud již palivová vsázka není schopná udržet reaktor kritický na přijatelných výkonových hladinách, popřípadě z jiných technologických či bezpečnostních důvodů, kdy je požadována manipulace s palivem v aktivní zóně, je nutno jednotlivá zařízení výrobního bloku postupně odstavit, vychladit a celý blok uvést do režimu odstávky na výměnu paliva. V tomto režimu se musí roztěsnit hlavní přírubový spoj reaktorové nádoby, sejmut horní blok a z vnitřku reaktoru vyjmout blok ochranných trub (BOT), který mimo jiné přidržuje palivové články v aktivní zóně na požadované vzájemné rozteči. Poté je možno palivo z aktivní zóny vyjmout. Palivo se vyjímá a zavází pomocí zavážecího stroje, přičemž je možno vyvést celou aktivní zónu (např. z důvodu revize vnitřních částí reaktoru a tlakové nádoby reaktoru) nebo pouze její část. Při každé výměně je k dispozici výpočet stavu paliva v aktivní zóně a na jeho základě se určí, které palivové články budou vyměněny za čerstvé a které v rámci aktivní zóny budou pouze přeskládány. Množství vyvezeného paliva se řídí tzv. *palivovou kampaní*, ve které je reaktor provozován. Typická je např. čtyřletá palivová kampaň, což znamená, že při každoroční odstávce na výměnu paliva je vyměněna přibližně ¼ palivové vsázky, za 4 roky provozu se tedy vymění veškeré palivo za nové. S využitím moderního paliva lze kampaň prodloužit až na pětiletou. Záleží samozřejmě nejen na palivu, ale také na projektovém řešení dané elektrárny. Vyhořelé palivo vyvezené z reaktoru se ukládá v bazénech vyhořelého paliva.

Hlavním problémem vyhořelého paliva je především velké množství štěpných produktů. Štěpné produkty mají za následek vysokou radioaktivitu a vývin zbytkového tepla v palivových člancích. Během transportu je proto nutné odstínit ionizující záření, vznikající v palivu, od okolního prostředí. Problém je řešen tak, že veškerá manipulace i samotné skladování paliva se děje pod vodou. Reaktor je umístěn v betonové šachtě reaktoru, přičemž v jejím těsném okolí se nachází další šachty a bazény, které se při vlastním transportu paliva zaplní vodou. Pokud to technologický postup výměny paliva dané elektrárny vyžaduje, je nutno zaplnit šachty a bazény již při vyjmutí BOT, který je v přímém kontaktu s palivem a je vysoce pravděpodobné, že bude „zářit“ také. V realizaci umístění a filozofii skladby bazénů a šachet, především bazénů vyhořelého paliva, je právě již zmiňovaný zásadní rozdíl mezi jadernými elektrárnami východního (VVER) a západního (PWR) typu.

Bazény skladování vyhořelého paliva, zkráceně BSVP, jsou jednou z důležitých součástí každé jaderné elektrárny z pohledu hospodářství s vyhořelým palivem. Palivové soubory jsou po vyjmutí z aktivní zóny vysoce radioaktivní. S intenzitou radioaktivity je pak spojen i vývin zbytkového tepla, které je nutno odvádět, jinak by mohlo dojít k nebezpečnému přehřátí palivových elementů v souboru. Z toho je patrné, že vyhořelé jaderné palivo, po vyvezení z aktivní zóny reaktoru, vyžaduje zvláštní pozornost. Proto jsou součástí transportně –

technologické části elektráren také bazény skladování vyhořelého paliva. Zde se do kompaktních mříží shromažďuje použité palivo a je zde uloženo po nezbytně nutnou dobu, během níž klesne jeho radioaktivita na únosnou mez, při které je možno s palivem dále nakládat. Počáteční vysoké hodnoty radioaktivity vyhořelého paliva se rozpadem štěpných produktů značně snižují. Proto již po 10-ti letech skladování je aktivita paliva asi jen 0,3 % původního stavu. [5] Maximální doba uložení použitých palivových souborů je dána především kapacitou bazénů. Pohybuje se v rozmezí 10 až 15 let v závislosti na velikosti bazénů, uspořádání kompaktních skladovacích mříží či bezpečnostních podmínek (např. u reaktoru VVER musí být v mřížích zachován prostor pro vyvezení aktivní zóny reaktoru). Během celé doby skladování je palivo udržováno pod vodou s přísadou kyseliny borité (H_3BO_3), čímž je zajištěno bezpečné odstínění od okolního prostoru, odvod zbytkového tepla a podkritičnost soustavy. Voda neustále cirkuluje, prochází přes chladiče, kterým předává zbytkové teplo uvolněné v kazetách a v případě nutnosti je čištěna.

V bazénech vyhořelého paliva se může najednou nacházet velké množství palivových článků. Přestože se jedná již o palivo použité, stále obsahuje určité procento štěpitelných prvků, a je proto nutné vždy (tzn. při všech provozních podmínkách a plném obsazení mříže palivem) zajistit tzv. podkritičnost dané soustavy, tj. nastolit takové podmínky, které znemožní jaderné štěpné reakci její samovolný rozběh. Toto je zajištěno vhodným rozmístěním palivových kazet a použitím absorbátorů neutronů, jimiž jsou jednak kyselina boritá v chladiči a jednak použití oceli legované borem (přesněji izotopem ^{10}B) na stěny skladovacích mříží. Po dovršení doby skladování je s palivem nakládáno podle typu palivového cyklu, ve kterém daná elektrárna pracuje (více viz 2.4 Nakládání s vyhořelým palivem).

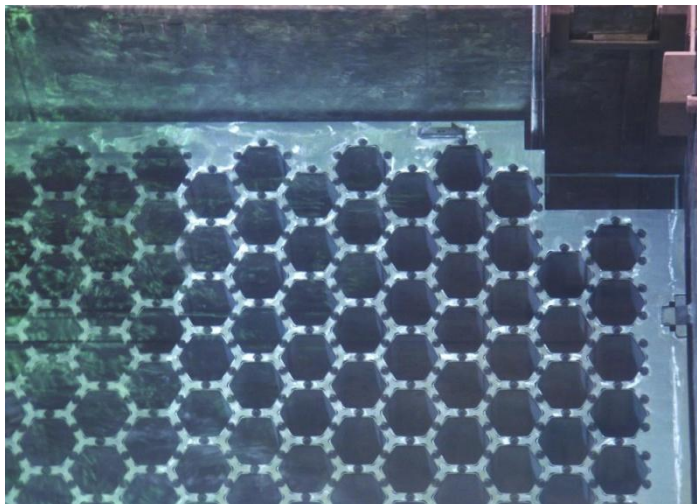
2.3.1 Transportně-technologická část JE s reaktorem typu VVER

Tlakovodní jaderné elektrárny ruského typu mají všechny bazény i šachty umístěny v kontejnmentu (nebo v budově reaktoru), hned vedle šachty, ve které je reaktor. Jedná se o



Obrázek 2.3 – Pohled na šachtu reaktoru (1), BSVP(2), šachtu pro transportní kontejner (3) a zavážecí stroj (4) v JE Dukovany [33]

bazén mokré přepravy (BMP), v něm umístěné šachty mokrých revizí, již zmiňovaný bazén skladování vyhořelého paliva (BSVP), šachtu pro transportní kontejner a šachtu pro kontrolu hermetičnosti palivových článků. K těmto systémům patří také transportní zařízení (jeřáby) a zařízení pro manipulaci s palivem (zavážecí stroj). Bazén skladování vyhořelého paliva je oddělen od bazénu mokré přepravy hradítkem. Při provozu výrobního bloku je hladina v BSVP pod úrovní hradítka, čímž se zamezí případným únikům chladiva z důvodu možných netěsností. Hradítko přesto umožňuje, aby BSVP mohl být zaplněn vodou nad svoji běžnou provozní hladinu, a to i při prázdném BMP. Tento stav se využívá například při manipulaci s vyhořelým palivem v rámci BSVP bez nutnosti naplnit BMP. Vyšší hladina je nutná z důvodu zachování dostatečného stínění i při zdvihu paliva z kompaktní mříže. Při odstávce na výměnu paliva se pak zaplní vodou i bazén mokré přepravy, aby bylo možno bezpečně manipulovat s palivem a vnitřními částmi reaktoru, které se umístí do šachet revizí. Při požadavku na výměnu paliva je hradítko odstraněno, čímž se vytvoří transportní kanál pro dopravu paliva z reaktoru do BSVP. Ještě před umístěním paliva zavážecím strojem do mříže v BSVP je potřeba provést kontrolu hermetičnosti. Princip kontroly se může v každé elektrárně lišit (např. JE Temelín používá systém Sipping, JE Dukovany používá speciální pouzdro kontroly hermetičnosti pokrytí (KHP)). Pokud nejsou palivové elementy v souboru označeny systémem za poškozené, zavážecí stroj je umístí do kompaktní mříže v BSVP. Pokud se při kontrole hermetičnosti zjistí poškození, musí se podniknout další kroky. Nejčastěji dochází k uložení poškozené palivové kazety do hermetického pouzdra, které se umístí do BSVP spolu s vyhořelým palivem a s jako takovým se s ním také nakládá. V systému Sipping jsme dokonce schopni identifikovat poškozený palivový proutek, vyjmout ho a nahradit maketou z nerezové oceli, díky čemuž můžeme drahý palivový článek i nadále využívat v aktivní zóně k provozu reaktoru. [6]



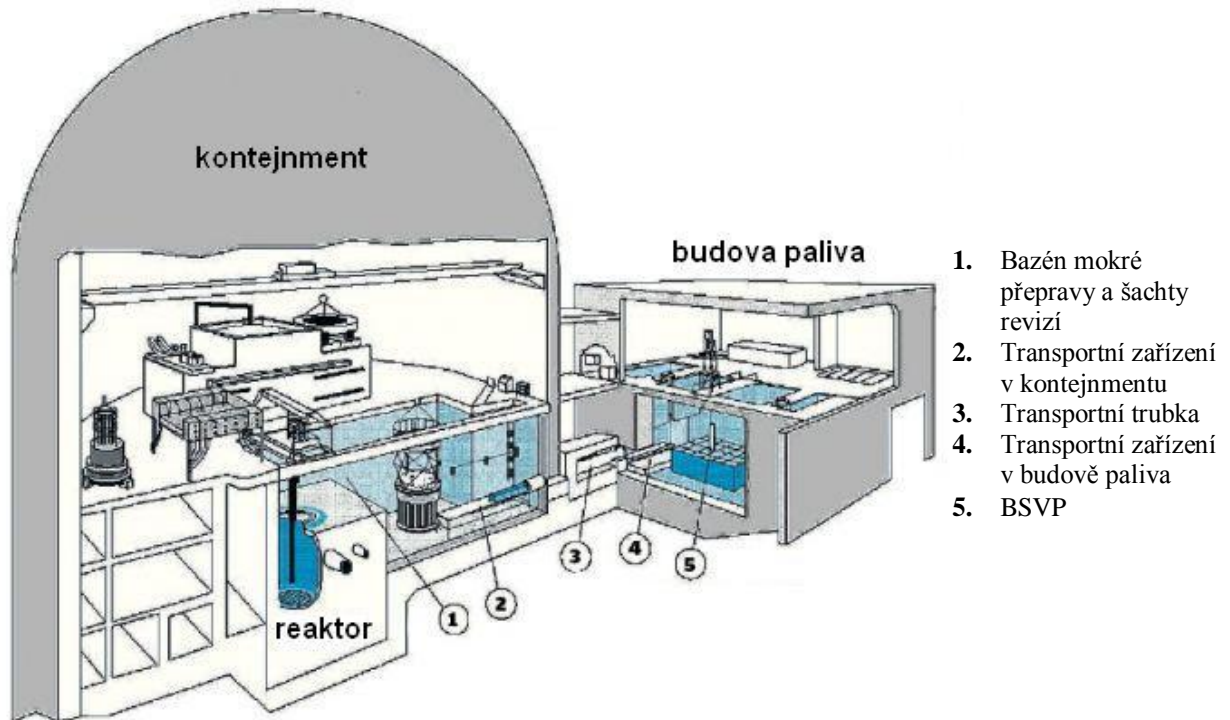
Obrázek 2.4 – Kompaktní mříž v BSVP [5]

Stejným, ale opačným postupem se zavází do reaktoru čerstvé palivo, které musí být před tím, samozřejmě po nezbytných kontrolách, přemístěno z místnosti čerstvého paliva do prostoru vyhrazeném pro něj v BSVP. Místnost čerstvého paliva může být umístěna buď přímo v budově reaktoru (JE Dukovany), či ve zvláštní budově v areálu elektrárny (JE Temelín). Je tedy patrné, že u ruského typu tlakovodního reaktoru se téměř veškerá manipulace s palivem děje uvnitř budovy reaktoru.

2.3.2 Transportně-technologická část JE s reaktorem typu PWR

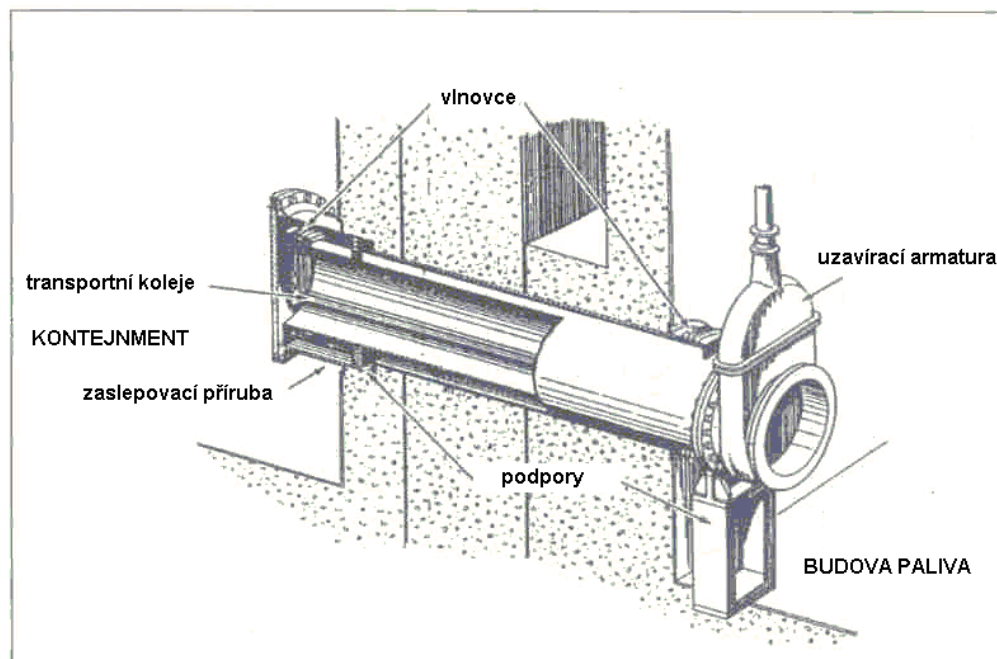
Jaderné elektrárny americké či západoevropské konstrukce mají v koncepci transportně-technologické části oproti východním typům významný rozdíl. Je jím umístění bazénů skladování vyhořelého paliva do budovy paliva (fuel building), která sice navazuje na kontejnment, v němž je umístěn reaktor, ale není jeho přímou součástí. V této budově pak probíhají veškeré manipulace s palivem, a to i s čerstvým. Samotná výměna paliva mezi kontejnmentem a budovou paliva je vcelku složitá technologická záležitost.

V budově reaktoru je umístěn bazén mokré přepravy a šachty revizí. O manipulaci s palivem se stará zavážecí stroj. Obě budovy jsou vzájemně propojeny pouze horizontální transportní trubicou, kterou se dopravuje palivo přímo mezi bazénem mokré přepravy a bazény systému skladování vyhořelého paliva (viz Obrázek 2.6). Transportní trubka (transfer



Obrázek 2.5 – Příklad uspořádání transportně-technologické části JE typu PWR [5]

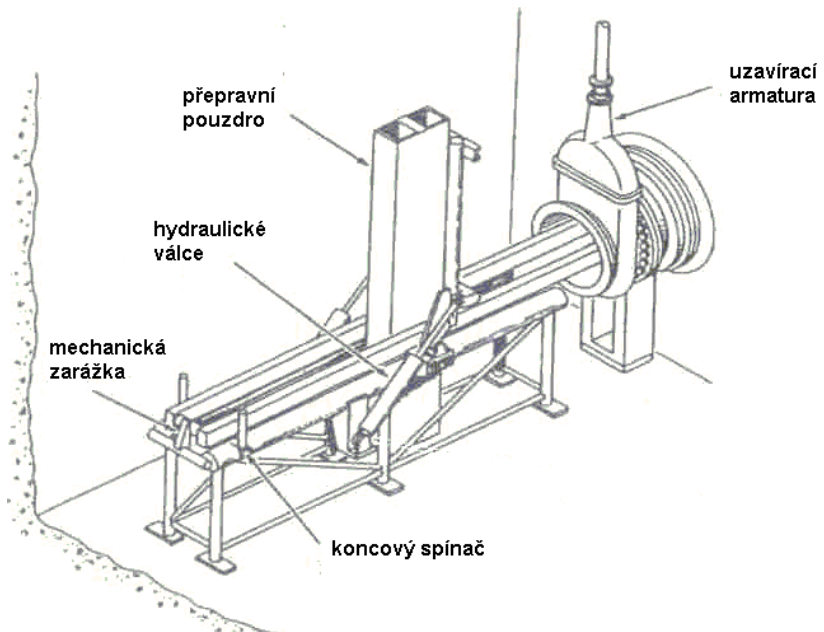
tube) je ze strany BSVP zajištěna uzavírací armaturou. Ze strany kontejnmentu je trubka uzavřena utěsněnou zaslepovací přírubou. Je to z toho důvodu, že BSVP jsou neustále zaplněny chladivem, přičemž BMP je při nominálním provozu prázdný, plní se pouze při



Obrázek 2.6 - - Příklad transportní trubky [8]

odstávce na výměnu paliva. Nesmíme tedy dopustit, aby při provozu reaktoru chladivo z BSVP pronikalo do prostoru BMP či šachty reaktoru, přičemž u uzavíracího ventilu si nemůžeme být tímto jisti. Proto je na straně budovy reaktoru umístěna příruba, kterou lze před samotným naplněním bazénů mokré přepravy relativně snadno demontovat. Jak již bylo zmíněno, transportní trubka je v horizontální poloze, ale palivový soubor je vyjímán z reaktoru v poloze vertikální. Nutná změna polohy je zajištěna tzv. transportním zařízením (fuel transfer device).

Transportní zařízení je složeno ze dvou stanic, přičemž na každé straně transportní trubky je jedna. Každá stanice je opatřena nosnou konstrukcí, k níž je rotační vazbou přichycen opěrný rám, který je možno za pomoci pohonu (hydraulické válce, elektrické navijáky (u EPR),...) sklápět z horizontální do vertikální polohy a naopak. V rámu je pak uloženo přepravní pouzdro, do kterého se umístí palivový soubor. Pouzder může být i více vedle sebe. Přepravní pouzdro je připevněno na



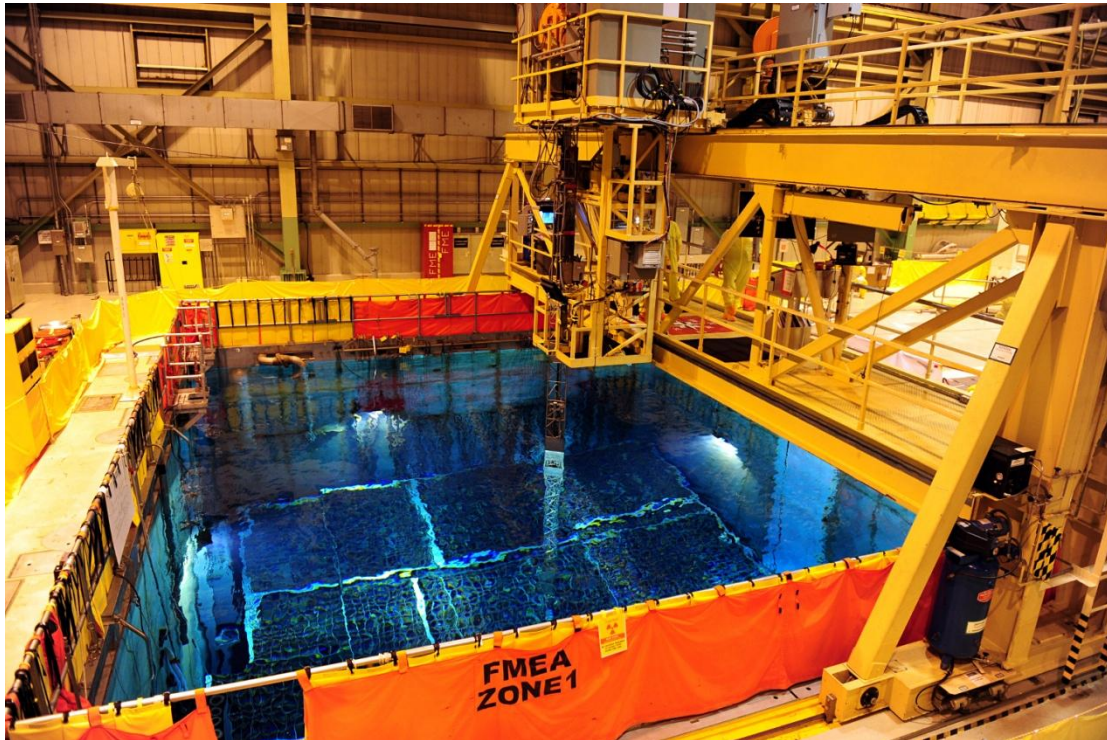
Obrázek 2.7 – Transportní zařízení [8]

dopravním vozíku, díky čemuž je schopno pohybovat se po kolejích, které jsou stálou součástí vnitřku transportní trubky. Vozíkem je manipulováno pomocí ocelového lana přes systém kladek, popřípadě pomocí speciálního tlačného řetězu, jako je tomu u francouzského EPRu. Pohony těchto tažně/tlačných prvků jsou umístěny mimo bazén na obslužné plošině. Na vozíku se vyhořelé palivo dostane do budovy paliva. [7, 8]

Součástí budovy paliva jsou bazény skladování vyhořelého paliva (spent fuel pool), transportní kanál (fuel transport canal), stanice pro kontrolu hermetičnosti palivových článků (spent fuel inspection station), šachta pro transportní kontejner (cask loading pit) a šachta dekontaminace transportního kontejneru (cask washdown pit). Poslední dvě zmiňované šachty u reaktoru EPR chybí. Jsou nahrazeny koncepčně jiným systémem vyvážení kontejnerů s vyhořelým palivem, který bude popsán dále v této práci. Jednotlivé bazény a šachty jsou spolu odděleny hradítky, proto neustále zaplněný vodou zůstává pouze BSVP a ostatní systémy se zaplňují podle potřeby. Dalším úkolem budovy paliva je i hospodářství čerstvého paliva. K tomuto účelu je budova vybavena také suchým zásobníkem čerstvého paliva (new fuel dry storage zone) a standem pro kontrolu čerstvých palivových souborů (new fuel inspection area). Část BSVP je proto vyhrazena pro mokré skladování čerstvého paliva před tím, než je zavezeno do aktivní zóny. O manipulaci s palivem pod vodou v jednotlivých bazénech se stará speciální mostový jeřáb (viz Obrázek 2.8). Čerstvé palivo je přemísťováno jeřábem pomocným. [7, 8]

V budově paliva pokračuje manipulace s vyhořelým palivem. Po výše popsaném průchodu transportní trubkou se palivový článek, umístěný v transportním pouzdře, ocitne v budově paliva, přesněji v transportním kanále. Ten je předem naplněn vodou a je odstraněno

hradítko mezi ním a BSVP. V transportním kanálu je umístěno prakticky totožné transportní zařízení, které má za úkol zastavit dopravní vozík a opět překloupat pouzdro s palivovým článkem do vertikální polohy. Palivový soubor je potom vyzvednut mostovým jeřábem a po kontrole přesunut do mříže skladování vyhořelého paliva v BSVP nebo, v případě nutnosti, do hermetického pouzdra. [8]



Obrázek 2.8 – Bazén skladování vyhořelého paliva a mostový jeřáb v budově paliva [34]

2.4 Nakládání s vyhořelým palivem

Oproti konvenčním palivům má jaderné palivo po použití odlišné vlastnosti. Základní vlastnost, kterou je potřeba vzít v úvahu pro zvažování dalšího nakládání s vyhořelým palivem je to, že po průchodu reaktorem ztrácí palivo svou energetickou hodnotu pouze částečně. V palivu zůstane část z původních štěpitelných prvků (^{235}U pro uranové palivo) a navíc v něm během provozu reaktoru vznikají další štěpitelné izotopy (viz kapitola 2.2), což způsobuje, že palivo má i po použití relativně vysokou energetickou hodnotu.

Cesta palivových materiálů od těžby, výroby paliva (separování štěpitelných prvků, obohacování apod.) přes použití v reaktoru a následné zpracování vyhořelého paliva se nazývá *palivový cyklus*. V zásadě se rozlišují dva základní druhy cyklu – *otevřený palivový cyklus*, kde po použití paliva v jaderném reaktoru dojde k jeho trvalému uložení a druhým je *uzavřený palivový cyklus*, kde se štěpitelné izotopy, po vyjmutí z reaktoru, z paliva chemicky separují a využijí se znovu, např. při výrobě čerstvého paliva. Práce se nezabývá těžbou a výrobou jaderného paliva. S ohledem na téma diplomové práce bude popsáno pouze nakládání s vyhořelým palivem po vyjmutí z reaktoru, protože v této fázi se uplatní (na reaktoru EPR) vyvážecí zařízení a bude tak definována jeho úloha a pozice v rámci cyklu jaderného paliva.

Ať už je palivo použito v jakémkoliv cyklu, vždy je potřeba ho před konečným uloženíím či zpracováním nějakou dobu pod kontrolou skladovat. Možnosti jsou dvě – *suché* a *mokrý skladování*. Mokrý způsob skladování je dnes ve světě v jaderných elektrárnách

nejrozšířenější, a to především u elektráren západního typu. [9] Principem je totiž dlouhodobé skladování v BSVP, přičemž většími možnostmi v tomto ohledu, kupříkladu kapacitními, disponují jaderné elektrárny západní konstrukce, kde je vyhořelé palivo umístěno ve speciální budově paliva vně kontejnmentu. To ovšem neznamená, že se mokré skladování neuplatňuje i u reaktorů VVER s BSVP umístěnými u reaktoru. Po celou dobu skladování je potřeba zajistit stálé chlazení, čištění vody, ve které vznikají kapalné radioaktivní odpady a vysokou koncentraci kyseliny borité zabezpečující podkritičnost soustavy (stále je v palivu určité množství štěpitelných izotopů). Tím jsou provozní náklady vyšší oproti skladování suchým způsobem, naproti tomu je mokré skladování méně náročné na prostor a umožňuje snadnější vizuální i technologickou kontrolu palivových článků. Doba skladování palivových souborů v BSVP je omezena především kapacitou bazénů. U západních typů elektráren je možnost skladovat použité palivo běžně 10 až 20 let (minimální doba skladování se uvádí 5 let). U některých reaktorů, zvýšením kapacity bazénů použitím kompaktních skladovacích mříží, je palivo uloženo již přes 40 let. [10]

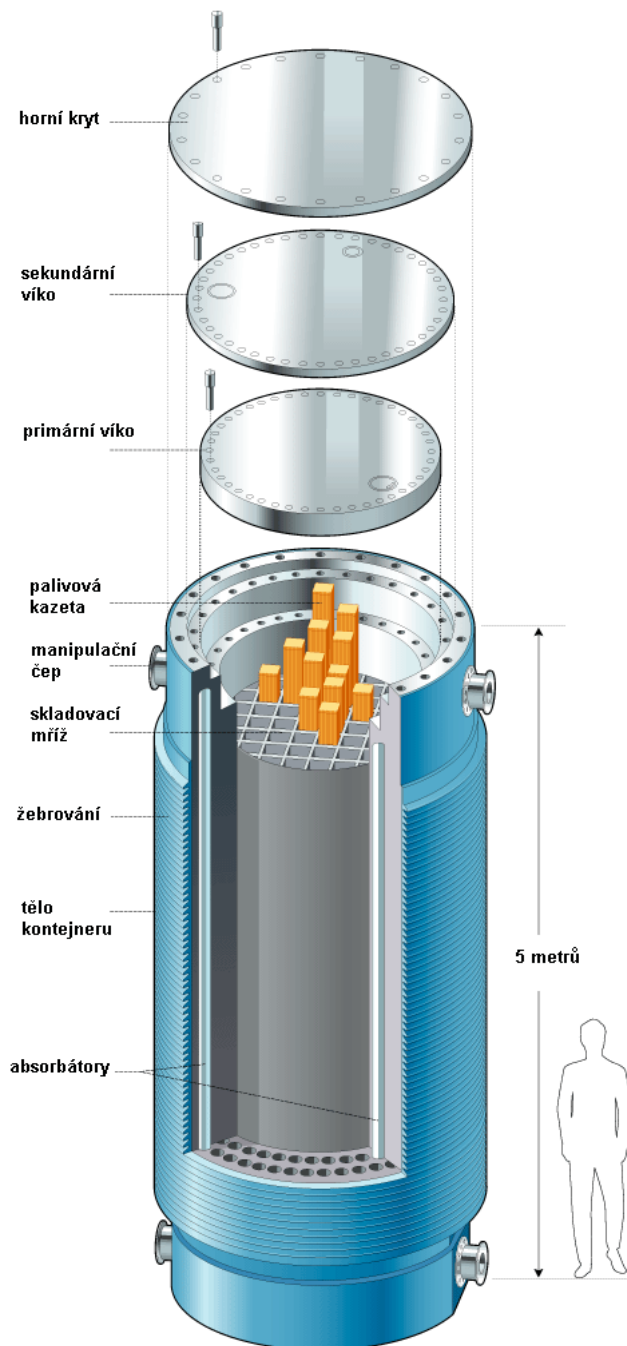
V případě, že bazény nemají dostatečnou kapacitu pro dlouhodobé uložení použitých palivových článků, využívá se suché skladování ve stíněných hermetických kontejnerech. To se týká například našich jaderných elektráren, ale i řady dalších. V tomto případě se v první

fázi vyvezou palivové kazety z reaktoru rovněž do bazénů skladování vyhořelého paliva, kde ovšem zůstanou pouze po nezbytně dlouhou dobu. Délka uložení kazet v BSVP je dána především vyhořením paliva. Platí, že čím více je palivo vyhořelé, tím více je v něm obsaženo radioaktivních prvků, jejichž rozpadem kazeta vykazuje vývin zbytkového tepla. Po uplynutí doby, kdy je bezpečné i ekonomické palivo z bazénu vyjmout, se umístí palivové soubory do speciálních kontejnerů na vyhořelé palivo (jiným názvem také tzv. *obalové soubory*). Doba skladování v BSVP musí být tedy dostatečně dlouhá na to, aby aktivita a s ní související vývin



Obrázek 2.9 – Suché skladování v meziskladu vyhořelého paliva [9]

tepla poklesl na úroveň, kterou je možno odvádět stěnou kontejneru přirozenou konvekcí vzduchu. Podle americké NRC (Nuclear Regulatory Commission) je nutné skladovat palivo v bazénech alespoň jeden rok, běžně se uvádí minimální doba uložení 5 let, ale v praxi, včetně našich elektráren, se palivo před suchým skladováním drží v BSVP po dobu až 10 let.



Obrázek 2.10 – Kontejner pro vyhořelé palivo [35]

Kontejner pro vyhořelé palivo (Obrázek 2.10) je zpravidla konstruován jako tlustostěnná ocelová nádoba, v níž je palivo uloženo v mříži. Má několik hermetických vík, jeho stěny jsou většinou opatřeny žebrováním pro zlepšení odvodu tepla a musí splňovat přísné bezpečnostní kritéria. [1] Existuje několik typů kontejnerů, nejčastěji rozdělených podle funkce na transportní, skladovací nebo univerzální, který spojuje obě předchozí možnosti (kontejner CASTOR® používaný i v našich elektrárnách). Kontejnery se následně uloží v tzv. meziskladu. Ten může být otevřený, uzavřený, v areálu JE či mimo něj. Kontejnery se v něm skladují buď vertikálně vedle sebe, nebo horizontálně v betonových sklípcích. [11, 12]

Z výše uvedeného je patrné, že ať už je využíváno mokré či suché skladování, dříve nebo později nastane doba, kdy je nutno palivo ze skladovacích prostor bazénu vyvést a umístit do suchých skladů, natrvalo uložit v úložištích radioaktivního odpadu, popřípadě přepravit do závodu na přepracování vyhořelého jaderného paliva (viz následující kapitoly). Způsobů přemísťování paliva z BSVP do obalového souboru je hned několik, přičemž jedním z nich, odlišujícím se od ostatních metod, je i využití speciálního vyvážecího zařízení u reaktoru EPR, jehož některé součásti jsou hlavním objektem zájmu v této diplomové práci. Ať už jsou bazény

skladování umístěny uvnitř kontejnmentu či mimo něj, vždy je jejich součástí tzv. šachta pro transportní kontejner. Ta se v případě potřeby vyvézt palivo z BSVP naplní vodou a odstraní se hradítko oddělující ji od prostoru skladování palivových souborů. Do šachty se umístí otevřený kontejner. Celá operace tak probíhá pod vodní hladinou, která stále zajišťuje stínění vyhořelých palivových článků. Následuje zavážení použitých palivových souborů do koše uvnitř kontejneru, což se děje po jednom pomocí zavážecího stroje v případě umístění BSVP vedle reaktoru, nebo mostovým jeřábem určeným pro manipulaci s palivovými články v případě provádění operace v budově paliva mimo kontejnment. Po úplném zaplnění koše se vršek kontejneru přiklopí vnitřním, tzv. primárním, víkem. Vnější povrch kontejneru se musí před další manipulací dekontaminovat. Děje se tak přesunutím kontejneru do speciální dekontaminační šachty (např. reaktor AP1000), či po vypuštění šachty pro transportní

kontejner u VVER. Dekontaminace je prováděna oplachem povrchu vysokotlakou demineralizovanou vodou. Následuje utěsnění primárního víka (šrouby nebo svařováním), drenážování a vysoušení vnitřních prostor kontejneru od vody, která zaplnila kontejner po ponoření do šachty, dále vakuování a v neposlední řadě se vnitřní prostor zaplňuje inertním plynem (nejčastěji He) s nižším než atmosférickým tlakem, díky čemuž zajistíme při případné netěsnosti nasávání vzduchu do kontejneru a ne naopak a kontrolním měřením podtlaku v dutině dokážeme v budoucnu tyto netěsnosti odhalit. Dalším krokem je kontrola hermetičnosti a montáž vnějšího, sekundárního víka. Předtím, než kontejner opustí budovu paliva, je nutno provést sérii několika měření. Kontroluje se dekontaminace, měří se radiace povrchu, zda nedochází k únikům ionizačního záření skrz stínění uvnitř kontejneru a v neposlední řadě se měří také teplota povrchu kontejneru pro případné odhalení nadměrného vývinu tepla v uložených použitých palivových souborech. Po splnění všech požadavků je možné kontejner s vyhořelým palivem dopravit z budovy paliva do destinace jeho následného umístění. [13, 14]

Jaderná elektrárna s reaktorem EPR má systém vyvážení paliva z BSVP podstatně odlišný od výše představených postupů (viz Obrázek 2.11). Základem metody je skutečnost, že se s obalovým souborem nemusí prakticky vůbec manipulovat u bazénů v budově paliva či v kontejnmentu. Obalový soubor se umístí na speciální kolejový vyvážecí stroj a tato soustava se přesune přímo do budovy paliva, konkrétně do tzv. *zakládací haly*, pod speciální prostup umístěný na dně jedné ze šachet bazénů skladování. Zde dojde k přitěsnění tzv. *penetrace* k obalovému souboru, zaplavení a postupnému zaplnění kontejneru palivem. Následně se kontejner drenáží, uzavře a převezé se opět na vyvážecím stroji k dalšímu zpracování. Celý postup je možné provádět na jednom místě (v zakládací hale), aniž by bylo nutné kontejner z vyvážecího stroje sejmout (samozřejmě vyjma počátku a konce celé operace). Značně se tedy snižuje počet manipulací v rámci vyvážení vyhořelého paliva, čímž se dá celá operace zjednodušit a urychlit. Bližší postup, včetně konkrétního popisu vyvážecího zařízení, je popsán v kapitole 3.



Obrázek 2.11 – Systém vyvážení paliva v JE s reaktorem EPR [36, str. 21]

U původem ruských projektů VVER je podle popisu patrné, že veškeré operace s použitým

palivem, tzn. zejména skladování v BSVP a vyvážení, jsou prováděny v blízkosti reaktoru, tedy uvnitř jeho ochranné obálky, tzv. kontejnmentu (vyjma starších projektů jako VVER 440 atd.). Ochranná obálka je tvořena konstrukcí z předepjatého betonu, což zajistí její pevnost v případě zemětřesení, pádu letadla či jiného vnějšího vlivu. Vnitřní prostor pak hermeticky uzavírá obálka z nerezové oceli, která zabraňuje případným únikům radionuklidů do okolí. Kontejnment tak vytváří bezpečnostní bariéru nejen s ohledem na životní prostředí, ale ochrání i důležité technologické celky potřebné pro bezpečnou manipulaci a skladování vyhořelého paliva. [15] Ven z hermetické ochranné obálky se dostane palivo již pouze v bezpečně uzavřeném a dekontaminovaném kontejneru, čímž se minimalizuje riziko úniku radioaktivních látek do okolí jaderné elektrárny v případě mimořádné události během manipulace s palivem. Řešení má ovšem i své nevýhody, a to zejména z provozního hlediska. Během provozu reaktoru je nemožné pohybovat se v hermetickém prostoru a provádět zde jakékoliv operace. Vyvážení použitého a stejně tak zavážení nového paliva je tedy možno provádět pouze během plánovaných odstávek reaktoru. Odstávka tak bude o tyto manipulace delší, než je tomu u projektů PWR.

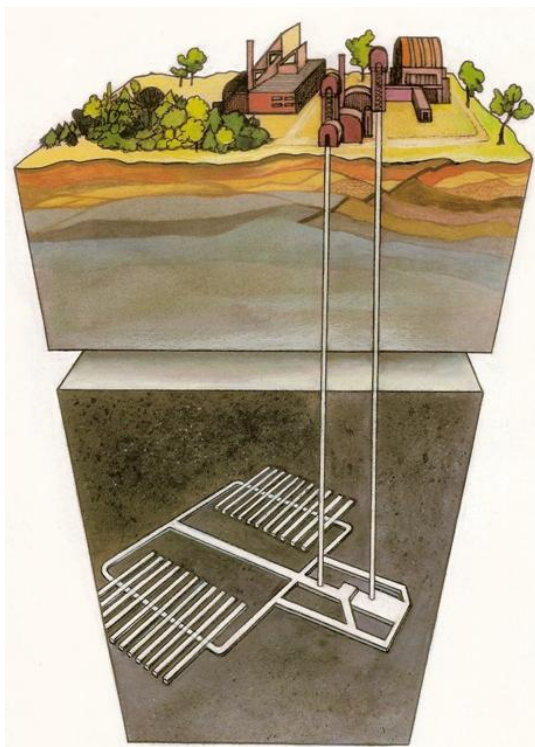
Umístěním palivového hospodářství do budovy paliva v obestavbě kontejnmentu byla v západních projektech typu PWR odstraněna nevýhoda reaktorů typu VVER, ovšem logicky se také přišlo o výhodu ruského řešení. Během odstávky se pouze musí použité palivo přemístit transportním kanálem z kontejnmentu do budovy paliva, kde je možno provádět požadované manipulace teoreticky kdykoliv i během provozu reaktoru. Cesta palivového souboru z reaktoru do skladovacích mříží bazénů skladování je sice časově i technologicky náročnější než u VVER, ale díky absenci nutnosti provádět během odstávky i operace spojené s vyvážením použitého paliva v kontejnerech mimo výrobní blok se tento rozdíl beze zbytku vytratí a odstávka tak může trvat ještě kratší dobu. Budova s palivem ovšem nezajišťuje takovou hermetičnost a ochranu před vnějšími vlivy jako kontejnment, což je jedna z nejvíce kritizovaných slabín projektů PWR. Umístění bazénů skladování do speciální budovy navíc umožňuje větší volnost při navrhování jejich kapacity. Na druhou stranu příliš velké množství použitého paliva se může při mimořádné události stát naopak značně velkou nevýhodou.

2.4.1 Otevřený palivový cyklus

Co se dále děje s použitým palivem po vyjmutí z aktivní zóny a předepsaném skladování? To záleží na aplikovaném palivovém cyklu. Nejjednodušší cyklus, který je ale neefektivní z hlediska plýtvání s využitelnou energií, je otevřený palivový cyklus, kde se s palivem po použití zachází jako s vysokoaktivním odpadem. Po vyjmutí z aktivní zóny se palivové soubory nějakou dobu skladují zejména mokřým způsobem, čímž dojde ke snížení počáteční vysoké radioaktivity a vývinu zbytkového tepla (viz kapitoly 2.2 a 2.3). Délka nutného pobytu paliva v BSVP je závislá na mnoha parametrech a je nutné ji určovat individuálně. Základem pro její stanovení je pokles radioaktivity použitého paliva pod přijatelnou mez a s tím související pokles zbytkového tepelného výkonu pod hodnotu, kterou je možno uchládit i přirozenou konvekcí, což je nutný předpoklad pro následnou možnost suchého skladování či trvalého uložení.

Otevřený palivový cyklus, který se anglicky nazývá *once-through fuel cycle*, což je mnohem výstižnější název, končí trvalým uložením jaderného paliva jako vysokoradioaktivního odpadu do úložišť, samozřejmě až po dostatečně dlouhé době, které palivové soubory stráví v mokřích, popřípadě suchých skladech. V úložišti vysokoradioaktivního odpadu by mělo dojít k takovému zabezpečení, aby již nebylo možné přijít s uloženým materiálem do kontaktu, jelikož se nepočítá s jeho dalším využitím. V úvahu bylo vzato uložení vyhořelého paliva na mořské dno, vystřelování do vesmíru či uložení do věčně zmrzlé země, ovšem jako nejvýhodnější se ukázalo ukládání paliva do tzv. *hlubinných úložišť*

(viz Obrázek 2.12). [16] Vzhledem k dlouhodobým skladovacím možnostem, které nabízejí



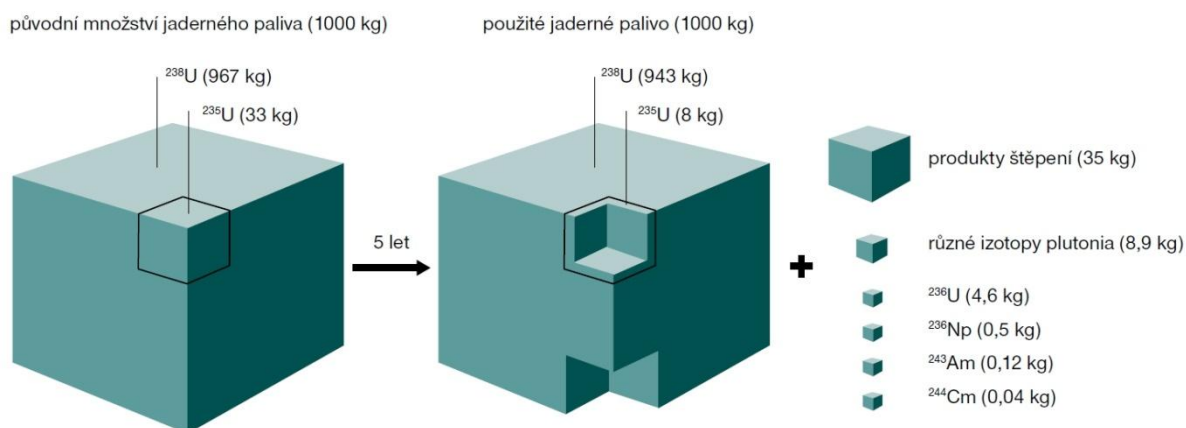
suché a mokré mezisklady, a částečně i odporem veřejnosti, nebylo dosud ve světě takové úložiště vybudováno. Navíc se neustále vyvíjí technologie přepracování vyhořelého jaderného paliva a spolu s ubýváním zásob uranových rud se postupně zvyšuje ekonomická výhodnost opětovného využití paliva po vyjmutí z reaktoru. Mnoho států, včetně České republiky, tak zvažuje možnost budoucího přechodu od otevřeného na uzavřený palivový cyklus, přičemž zatím je palivo uloženo v meziskladech a jeho budoucnost je stále otevřená. [9, 16]

2.4.2 Uzavřený palivový cyklus

Problematika přepracování paliva v uzavřeném palivovém cyklu je velmi obsáhlé téma a přesahuje zaměření této diplomové práce. Uvedeny budou alespoň základní informace pro kompletnost poznatků o nakládání s vyhořelým palivem.

Obrázek 2.12 – Hlubinné úložiště [37]

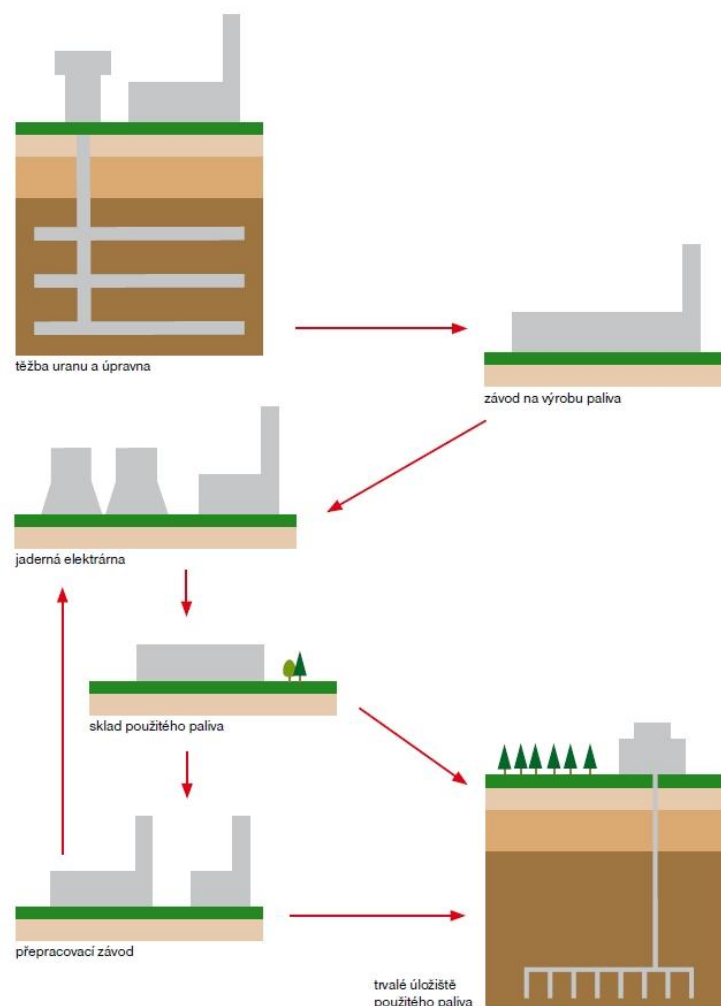
Použité palivo vyjmuté z reaktoru obsahuje nejen vzácné prvky vzniklé při štěpení a radioaktivních přeměnách, ale také ještě poměrně velké množství energie. Například palivo vyjmuté z lehkovodních reaktorů obsahuje, v závislosti na vyhoření, třeba i 95 % uranu, z toho 1 % izotopu ^{235}U , a 1 % štěpitelného ^{239}Pu . Štěpitelné prvky se z paliva chemicky oddělují. Mírně obohacený uran z vyhořelého paliva se dá znovu využít v procesu výroby nového paliva. Separované plutonium ve formě PuO_2 se smíchá s UO_2 , a tím se získá základní směs pro výrobu nového paliva typu MOX (mixed – oxide fuel). Možnost použití MOX paliva je již prakticky základní požadavek pro všechny nové typy lehkovodních reaktorů. Další z možností je využití paliva, které je pro lehkovodní reaktor nepoužitelné, v jiném typu reaktoru, jako je například rychlý množivý reaktor.



Obrázek 2.13 – složení vyhořelého paliva [9]

Odhaduje se, že využitím recyklace uranu a plutonia při provozu lehkovodního reaktoru se za dobu 30-ti leté životnosti elektrárny ušetří asi 40 % U_3O_8 . Tento oxid je základní surovina pro výrobu uranového paliva, kterou je jinak nutno získávat z vytěžené uranové rudy. Přepřacováním se tedy sníží nutnost těžby uranových rud a oddálí se tak vyčerpání jejich zdrojů. Další výhody, hovořící pro přepřacování jaderného paliva, jsou redukce původního množství použitého paliva a možnost získání izotopů pro lékařské, průmyslové či jiné využití (např. platiny, rhodia). Je tedy zřejmé, že v případě trvalého uložení použitého paliva v otevřeném palivovém cyklu se zbavujeme cenného materiálu. [2]

Naproti tomu je přepřacování ekonomicky náročné a přepřacované palivo je zatím stále dražší než nové, získané z přírodního uranu. Proto této možnosti využívají pouze ekonomicky vyspělé země a přepřacovává se tak jen 10 % celosvětové produkce vyhořelého paliva. S postupným ubýváním zásob uranových rud se ovšem možnost přepřacování může stát velice aktuální téma. Další negativní vlastností je, že i když se po přepřacování sníží množství vysokoaktivního odpadu přibližně na dvacetinu původního množství paliva, stále je potřeba počítat s nutností trvalého uložení tohoto odpadu do hlubinných úložišť. Navíc platné mezinárodní úmluvy nařizují, že zákazník, který si nechá ve speciálních závodech palivo přepřacovat, musí spolu s ním převzít také veškeré vysokoaktivní, středněaktivní i nízkoaktivní odpady vzniklé danou operací a musí se s nimi bezpečně vypořádat. Přepřacovací závody jsou dnes v provozu například ve Francii, Velké Británii, Číně, Japonsku či Rusku. [9]



Obrázek 2.14 – Palivové cykly [9]

3 Vyvážecí zařízení reaktoru EPR

Hlavním úkolem vyvážecího zařízení pro reaktor EPR je zajistit bezpečné a spolehlivé vyvezení použitého paliva mimo budovu s vyhořelým palivem. Je složeno ze dvou základních částí – z mobilního přepravního zařízení pro kontejnery na vyhořelé palivo a z konstrukčních celků, umístěných uvnitř budovy paliva. Ty tvoří systém prostupu mezi tzv. *zakládací šachtou* (spojenou s BSVP) a zakládací halou, ve které se pohybuje přepravní zařízení.

Přepravní zařízení pro kontejnery na vyhořelé jaderné palivo, jinak též vyvážecí stroj, slouží především pro přepravu kontejneru v areálu elektrárny, jeho přípravu před zavezením vyhořelého paliva a v neposlední řadě pro následnou přípravu kontejneru pro transport mimo budovu paliva. Pohybuje se po železniční trati pomocí tahače nebo vlastního pohonu. Koleje propojují dvě pracovní stanice vyvážecího stroje - zdvihací stanici, kde se na/z něj nakládají/vykládají kontejnery, a budovu s jaderným palivem.

Systém prostupu pro vyhořelé palivo je pak tvořen z tzv. *penetrace* (její součástí je vlnovec opatřený přírubami optimalizovanými v této práci), která zajišťuje hermetické spojení mezi zakládací šachtou a vnitřní dutinou kontejneru, a manipulační stanicí biologického víka, která má za úkol před zavážením paliva sejmut a po zaplnění zpětně usadit primární (biologické) víko u kontejneru na vyhořelé palivo.

3.1 Konstrukční části

V této kapitole budou popsány hlavní části vyvážecího stroje a vybavení závodu tvořící vstup, a to zejména penetrace, neboť její součástí je i vlnovec.

3.1.1 Přepravní (vyvážecí) stroj

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, vyvážecí stroj je zařízení zajišťující přepravu kontejneru na vyhořelé palivo ve svislé poloze mezi zvedací stanicí, manipulační stanicí biologického víka, penetrací a zpět. Pohyb je uskutečňován po kolejích položených na podlaze zakládací haly. Hlavní části vyvážecího stroje jsou dolní plošina, rám k plošině připevněný a podpěrný plášť v horní části rámu.

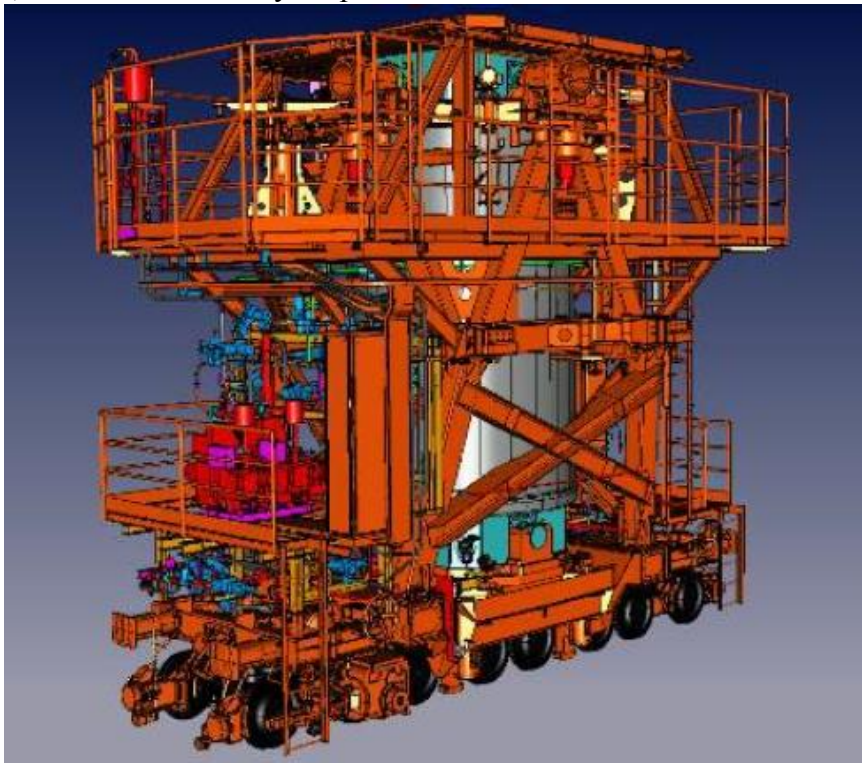
Plošina slouží jako podpěra kontejneru pro vyhořelé palivo. Je uložena na dvou čepích umístěných na posuvných podpěrách. Každý z čepů je pak připojen ke dvěma dvounápravovým podvozkům. Podpěry umožňují omezený boční pohyb, kolmý na směr pohybu plošiny. Tato vlastnost je nutná z důvodu možnosti doladění polohy kontejneru vzhledem k osám pracovních stanic, neboť vyvážecí stroj může být použit v rámci několika výrobních bloků, kde polohy stanic nemusí být totožné. Základní nastavení polohy kontejneru na přepravním stroji pak zajišťuje pohyblivá deska, na kterou je položen. Zde je možnost ustavit kontejner zejména do vodorovné polohy, ale také výškově, ve směru pohybu stroje i kolmo na něj. Plošina je ještě vybavena pojezdovým elektropohonem připojeným k nápravě, který dokáže pohybovat vyvážecím strojem mezi stanicemi (vně i uvnitř budovy paliva). Je zde i možnost připojit vyvážecí stroj k tahači. V tomto případě se pohon odpojí, aby se kola mohla volně otáčet.

K pohyblivé plošině je upevněn rám. Ten zahrnuje zejména horní obslužnou plošinu pro přístup k horní části kontejneru a dalším zařízením, kterými jsou podpěra biologického víka kontejneru, zdviž pro manipulaci se spodním víkem penetrace a podpěrný plášť. Na rámu jsou umístěny i další obslužné plošiny, zajišťující přístup k ventilům a měřicím zařízením. Boky jsou osazeny bočním vodícím zařízením, které se pohybuje po vodících kolejnicích

v zakládací hale, a které slouží k seřízení vodorovné polohy vyvážecího stroje při pobytu v pracovních stanicích. V případě zemětřesení se využívají také k uchycení přepravního stroje ke stěnám budovy, čímž dojde k zabránění jeho naklonění. Další zařízení na horní plošině je zdviž pro manipulaci se spodním víkem penetrace. Zdviž je opatřena deskou, jež je zvednuta až do kontaktu se spodním víkem penetrace. Na něm obsluha uvolní šrouby a víko je spuštěno dolů. Podobný úkol má i podpěra biologického víka kontejneru, která je sice nepohyblivá, ale opatřená odkládací deskou. Na ni speciální zařízení umístí biologické víko kontejneru a obsluha tak mimo jiné může provést jeho nutnou údržbu (např. výměna těsnění).

Nejdůležitější součástí dalšího prvku, tzv. podpěrného pláště, je spojovací zařízení penetrace. Má za úkol stáhnout penetraci směrem dolů tak, aby došlo k přilehnutí její těsnicí příruby na spojovací plochy kontejneru a vytvořilo se tak těsné spojení. Zařízení se skládá z několika závitových tyčí, uložených ve spodní části v ložiskách a poháněných elektrickým pohonem, což umožní jejich otáčení. Horní část závitové tyče zapadá do otočné matice krycí příruby penetrace. Otáčením tyče tedy dojde ke stažení penetrace a přitlačení těsnicí příruby na hrdlo kontejneru. Závitové tyče jsou do matic zavedeny pomocí pneumatických válců. K podpěrnému plášti je upevněn také chladicí plášť, který je důležitý z hlediska bezpečnosti. Obklopuje kontejner v době, kdy je umístěn na vyvážecím stroji a v případě detekce přehřátí chladicích žebek kontejneru je do vzniklého prostoru napuštěno chladivo. Součástí podpěrného pláště je také zařízení pro uchycení radiálních čepů kontejneru, horní biologická protiradiační ochrana stroje a samozřejmě různé potrubní a ventilové nástroje pro připojení kapalinových okruhů.

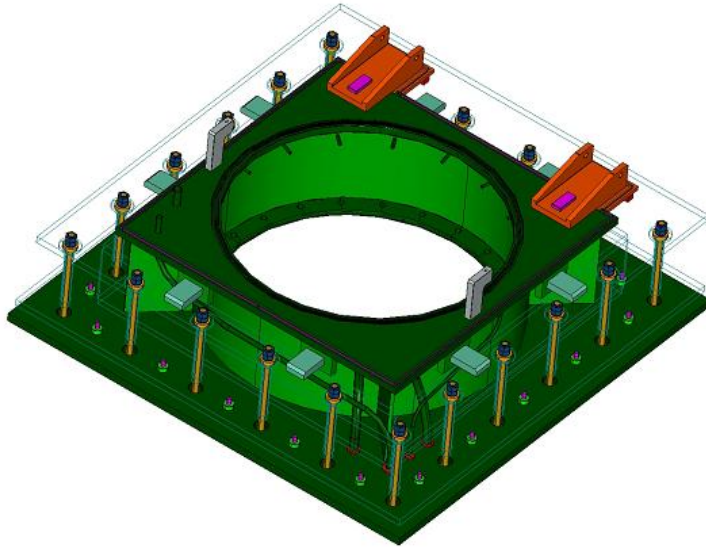
Kapalinové okruhy jsou totiž nedílnou součástí přepravního stroje. Slouží k zajištění manipulace s demineralizovanou vodou pro plnění a vyprázdnění kontejneru a penetrace a pro nouzové chlazení povrchu kontejneru. Dále musí zajistit sušení, odvzdušňování a vakuování vnitřní dutiny kontejneru, kontrolu hermetičnosti, k čemuž je potřebný přívod stlačeného vzduchu, popřípadě dusíku. V neposlední řadě je přepravní stroj vybaven polohovacím zařízením, které umožňuje dálkové řízení a přesné umístění stroje do pracovních stanic za pomoci kamer, detektorů a koncových spínačů. [39]



Obrázek 3.1 – Přepravní (vyvážecí) stroj [38]

3.1.2 Prostup

Penetrační stanice, která tvoří základ pro spojení zakládací šachty s dutinou kontejneru, se skládá z penetrace, spodního krytu na dolním konci penetrace a horního krytu na dně zakládací šachty.



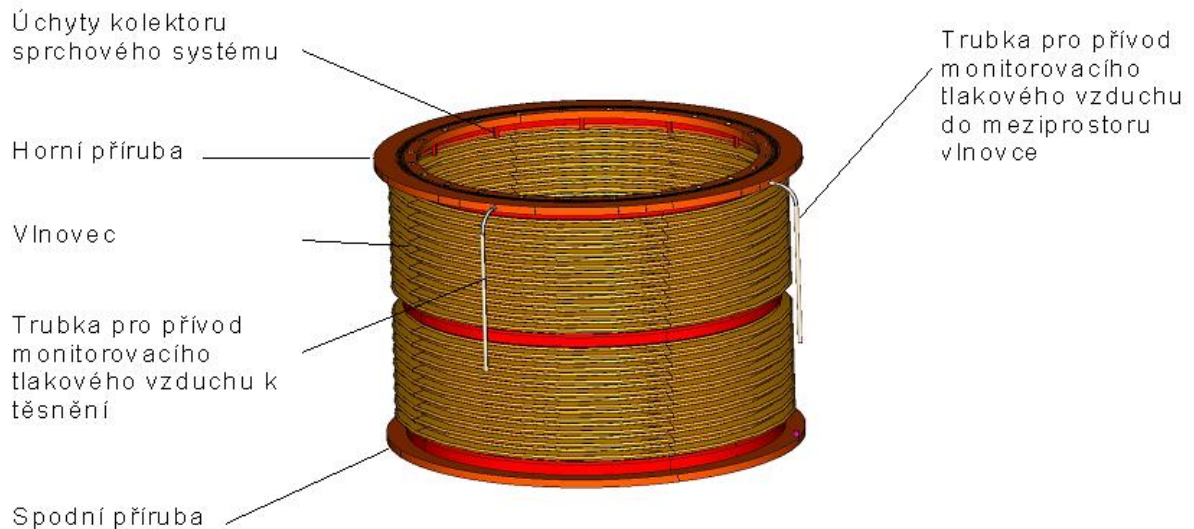
Obrázek 3.2 – Nosná konstrukce [39]

spolu s axiálními (působících v opačném směru tíhy) při seizmické události. Vrchní část nosné konstrukce je spojena s nerezovým vyložení zakládací šachty. Na nosnou konstrukci je ve směru od zakládací šachty umístěn horní kryt a spodní část, tedy ta ze strany zakládací haly, slouží mimo jiné k uchycení *horní příruby vlnovce*. Horní příruba vlnovce musí být k nosné konstrukci připevněna rozebíratelně a utěsněna dvojicí těsnění. Na opačném konci je *spodní příruba* vlnovce, na kterou budou uchyceny, stejně tak jako na horní přírubu, některé další části penetrace. Součástí přírub musí být i systém kontroly hermetičnosti pomocí přívodu stlačeného vzduchu mezi těsnění. Tato opatření, tedy dvojice bariér spolu s možností kontroly jejich hermetičnosti, platí pro všechny součásti prostupu, kde je potřeba zajistit těsnost. Princip nese označení „koncept dvojitých bariér (double barrier concept).“

Mezi přírubami jsou přivařeny dva shodné díly, tzv. *vlnovce*. Každý je složen z dvojice paralelních tenkých plechů vytvarovaných do tvaru vlnovce. Mezi nimi musí být dostatečná mezera pro kontrolu těsnosti. Ta je zajištěna vložením speciální tenké kovové tkaniny do vzniklého meziprostoru. Rozdělení na dvě části je nutné, protože technologicky lze zvládnout vyrobít pouze vlnovec určité délky. Příruby spolu s vlnovci se označují jako *kompensátor* prostupu (Obrázek 3.3). Vlnovce jsou z vnější i vnitřní strany chráněny krycími plášti, rozdělenými vždy na dvě překrývající se části – horní a dolní, z důvodu umožnění axiálního pohybu celé soustavy. *Vnitřní ochranný plášť* je tvořen dvojicí skružených nerezových plechů, které jsou pomocí šroubů uchyceny k nosné konstrukci, respektive k dolní přírubě vlnovce. Mezi plášti musí být dostatečná radiální mezera. Musí být zajištěno, aby nedošlo ke kontaktu obou plášťů, pokud vezmeme v úvahu výrobní tolerance, montážní tolerance mezi nosnou konstrukcí a dolní přírubou a radiální pohyb během provozu nebo při seizmické události. *Vnější ochranný plášť* taktéž sestává z horní a dolní části, které jsou přišroubovány k horní přírubě vlnovce, respektive přivařeny ke krycí přírubě v dolní části penetrace. Konce plášťů jsou opatřeny kuželovými plochami, které na sebe doléhají, pokud je prostup v horní poloze, čímž se zajistí jeho správná, vystředěná poloha.

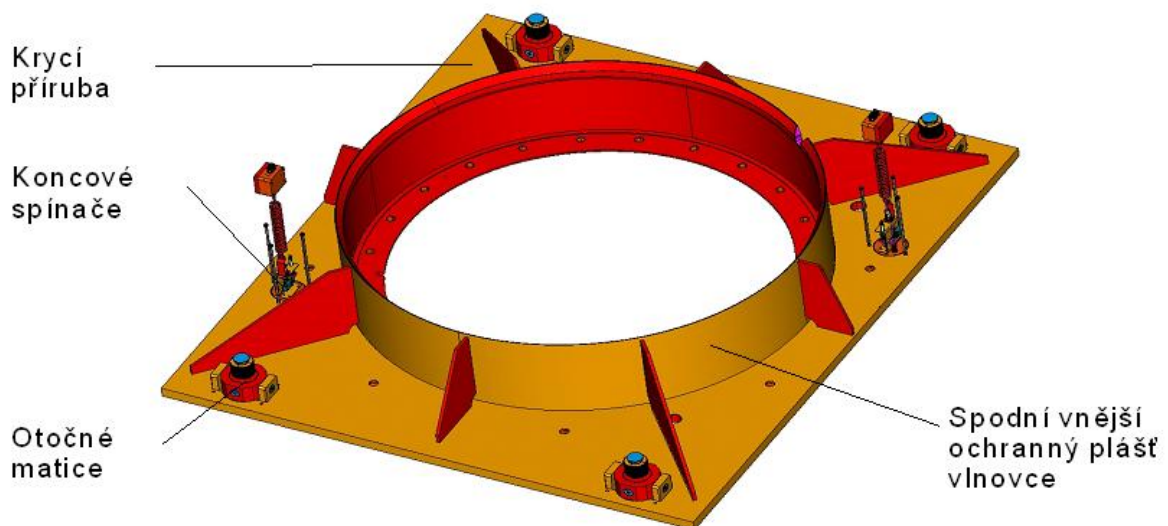
Základním podpůrným prvkem penetrace je svařovaná *nosná konstrukce* (viz Obrázek 3.2) z nerezové oceli, která je připevněna ke dnu zakládací šachty, respektive stropu zakládací haly, pomocí spojovacích svorníků. Svorníky jsou základní upínací prvek konstrukce a přenáší vertikální síly od vlastní tíhy, stejně tak jako dodatečné namáhání v tomto směru. Konstrukce je dále upevněna do betonového stropu prostřednictvím série

klínů a pomocných šroubů. To zajistí přenos radiálních sil



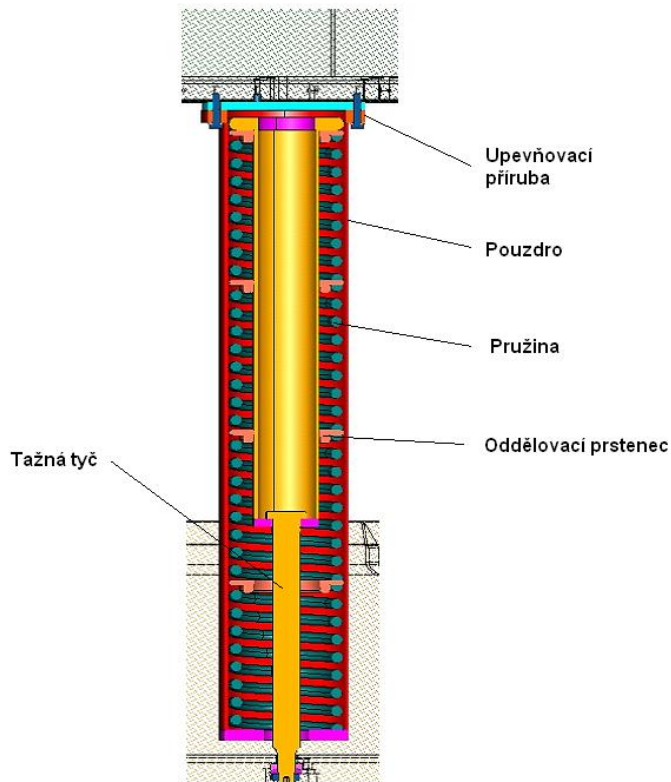
Obrázek 3.3 - Kompenzátor [39]

V dolní části penetrace se nachází již zmiňovaná *krycí příruba*. Je přišroubována k dolní přírubě vlnovce a navíc je ještě spojena s nosnou konstrukcí pomocí osmi pružinových závěsů. Příruba a její části jsou vyrobeny jako svařenec z uhlíkové oceli opatřené nátěrem. V přírubě je i osm otvorů pro uchycení tažných tyčí, které při pohybu penetrace směrem dolů zajistí stlačení pružin v závěsech. Tyče se uchytí pomocí matic přístupných odspodu příruby. Další významnou součástí příruby jsou 4 otočné matice, o nichž pojednává kapitola 3.1.1, pomocí kterých si vyvážecí stroj přitáhne penetraci směrem dolů a zajistí přilehnutí těsnící příruby na styčnou plochu kontejneru. V neposlední řadě se zde nachází také koncové spínače pro kontrolu dosažení krajních poloh penetrace a otvory pro upevnění aretačních tyčí, sloužící pro zajištění penetrace v horní poloze v případě, že není využívána, nebo v případě mimořádné události.



Obrázek 3.4 - Krycí příruba [39]

Velice podstatnou součástí prostupu jsou výše zmiňované *pružinové závěsy*. V každém závěsu je několik pružin řazených v sérii, uzavřených v pouzdře. Pouzdro je na jedné straně přišroubováno k nosné konstrukci, na opačném uchyceno není, přičemž popisované spojení



Obrázek 3.5 – Pružinový závěs [40]

s krycí přírubou zajišťuje tažná tyč vyvedená z pouzdra ven. Mezi pružinami jsou oddělovací prstence. Při pohybu penetrace směrem dolů jsou pružiny stlačovány tažnou tyčí a po odpojení spojovacího zařízení přepravního stroje od otočných matic pružiny zajistí návrat penetrace do horní polohy. Pružiny musí být schopny bezpečně unést tíhu všech pohyblivých částí prostupu a udržet ho v horní krajní poloze. Každý závěs je pak opatřen zádržkami, které slouží pro omezení maximálního natažení vlnovce v případě, že dojde k nečekanému zaplnění penetrace vodou z transportní šachty v době, kdy nejsou zajištěny aretační tyče, a pod penetrací se nenachází vyvážecí stroj.

K dolní přírubě vlnovce je připevněna tzv. *těsnicí příruba*. Ta přijde do přímého kontaktu se spojovací plochou kontejneru.

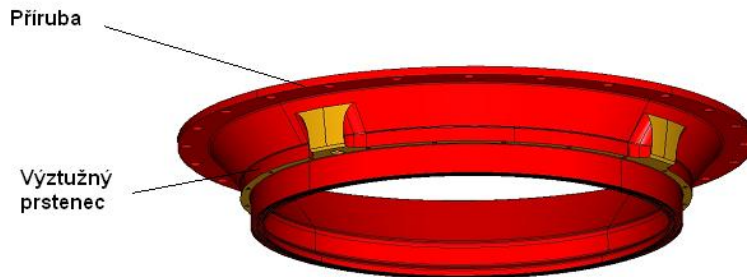
Hermetičnost spoje mezi těsnicí přírubou a spojovací plochou kontejneru zajišťuje opět dvojice těsnění. Drážky pro uložení těsnění musí zamezit vypadnutí těsnících kroužků při spouštění/zvedání penetrace ke/od kontejneru. Penetrace je využívána pro vyvážení paliva do dvou typů obalových souborů (typové označení TN13/2 a R72). Každý tento kontejner má odlišnou spojovací plochu pro přitěsnění příruby. Vedení, centrování a upevnění těsnicí příruby na kontejneru TN13/2 zajišťuje tzv. *vystředovací/upevňovací prsteneček*. Ten se pokládá na vršek kontejneru před zahájením operací přitěsnění penetrace. Je konstruován tak, aby umožnil zapadnutí těsnicí příruby do kontejneru a zabránil jejímu horizontálnímu posunu, a to i v případě zemětřesení. Spojení musí zůstat těsné také při očekávané teplotní dilataci kontejneru po zavezení vyhořelého paliva. Při aplikaci druhého typu kontejneru R72 by bylo nutné předem těsnicí přírubu vyměnit. Tato nepříjemná vlastnost byla společností ŠKODA JS a.s. vyřešena použitím speciálního adaptéru, který z vnější strany zajistí kontakt s těsnicí plochou kontejneru R72 a vnitřní strana je totožná se spojovací plochou kontejneru T13/2. Výměna přírub při běžném provozu tedy není nutná, čímž se zamezí časté manipulaci se spojovacími šrouby a minimalizuje se tak možnost jejich opotřebení či poškození. Totéž se týká i těsnění.



Obrázek 3.6 – Kontejner R72 [39]

Na vnějším povrchu těsnicí příruby je umístěn výztužný prsteneček se závitovými otvory (viz Obrázek 3.7), které slouží pro přišroubování spodního krytu. Ten tvoří silný ocelový disk, jenž uzavírá celou penetraci.

K těsnící přírubě je montován pomocí několika šroubů, které budou trvalou součástí krytu, a do správné pozice je veden prostřednictvím dvou kolíků. Součástí je také vypouštěcí ventil s rychlospojkou pro připojení na drenážní systém, jelikož se jedná o nejnižší část celého prostupu. Kryt je nadimenzován na tlak, který vyvodí kapalinu v případě nenadálého a nechtěného naplnění penetrace vodou ze zakládací šachty (např. při zaplnění zakládací šachty v době chybějícího horního krytu atd.).



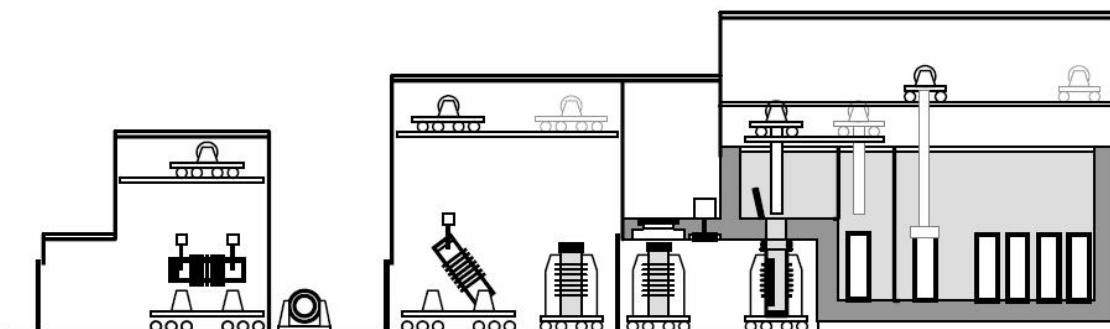
Obrázek 3.7 - Těsnící příruba [39]

systémů patří do vybavení závodu ještě manipulační stanice biologického víka, která má za úkol zdvihnout víko z kontejneru a umístit ho na podpěru v horní části přepravního stroje a zpět (viz předcházející kapitola 3.1.1). [39]

V příloze této diplomové práce jsou uvedeny další pohledy na celou sestavu penetrace. Obrázky byly dodány společností ŠKODA JS, a.s.

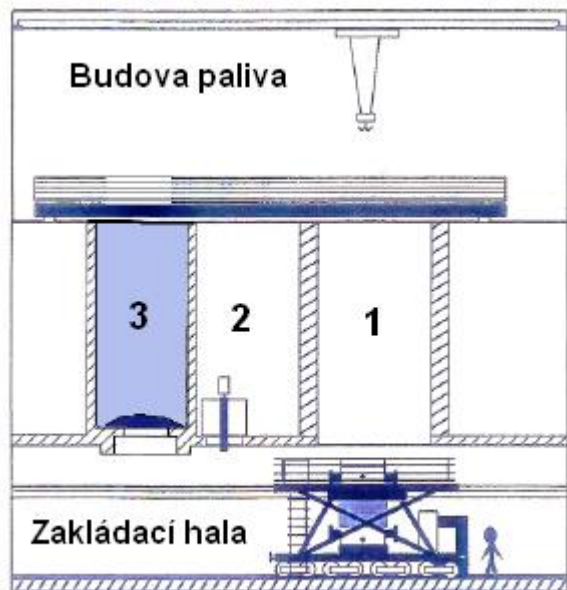
3.2 Pracovní postup stroje

V předchozích kapitolách byly popsány nejdůležitější části vyvážecího zařízení. V této kapitole budou uvedeny základní činnosti zařízení při operaci vyvážení použitého jaderného paliva tak, jak jdou technologicky za sebou.



Obrázek 3.8 – Zjednodušený náčrt pracovního postupu stroje [36, str. 19]

Celá operace začíná v tzv. *zvedací stanici* mimo budovu paliva. Zde je umístěn těžký jeřáb pro zvedání kontejnerů na vyhořelé palivo. Před začátkem jakékoliv manipulace je samozřejmě potřeba veškeré potřebné vybavení ve stanici zkontrolovat a připravit. Stejně tak se musí provést příprava u přepravního stroje, zakládací haly a budovy paliva (např. naplnění zakládací šachty vodou, kontrola hermetičnosti těsnění penetrace, ...). Prázdný kontejner je do stanice uvnitř areálu jaderné elektrárny přepraven na speciálním tahači. Po kontrole je kontejner zvednut těžkým jeřábem a vyvážecí stroj se buď samostatně, nebo pomocí svého tahače, přemístí přímo pod něj. Po spuštění je kontejner opatřen měřicí aparaturou a pomocí pohyblivé desky je ustavena jeho správná poloha. Následuje zablokování horních radiálních čepů, čímž dojde k fixaci kontejneru v nastavené poloze. Přesun do budovy paliva, konkrétně do zakládací haly, probíhá opět buď pomocí vlastního pohonu, nebo tahače.

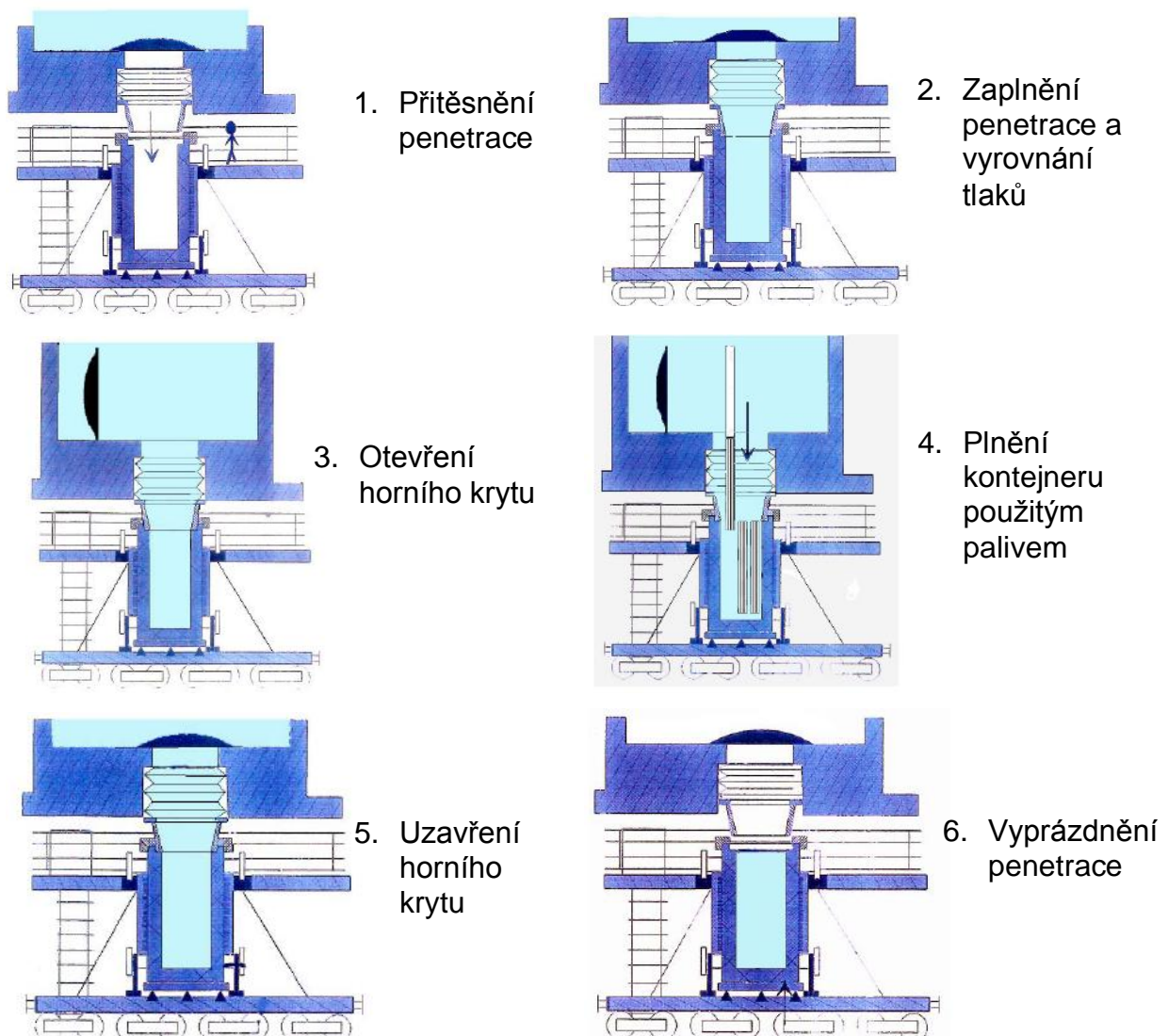


1. Manipulační otvor
2. Stanice biologického víka
3. Penetrace

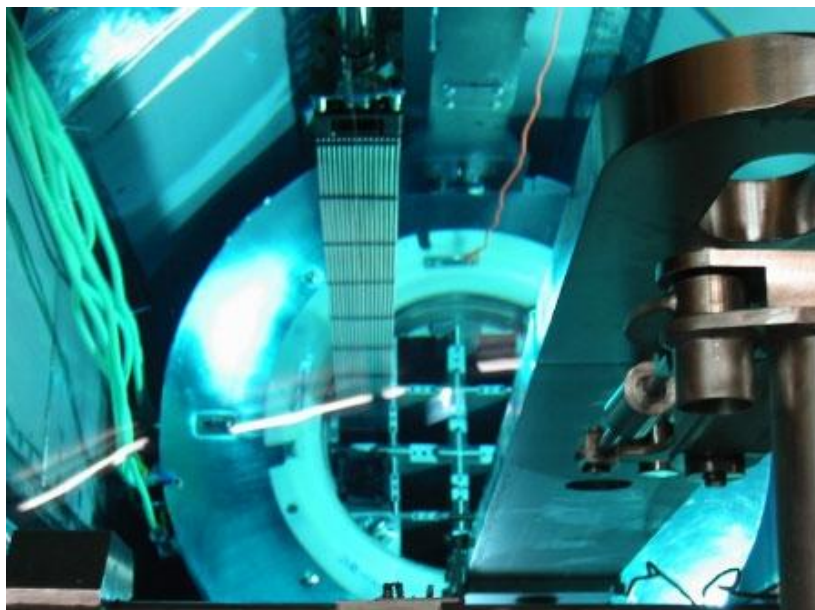
Obrázek 3.9 – Jednotlivé pracovní stanice [39]

V budově paliva dojde k vycentrování přepravního stroje proti vodícím lištám na nosnících budovy pomocí bočního vodícího zařízení. Pokud byl stroj do budovy tažen, tahač se musí odpojit a budovu opustit. Během pohybu přepravního stroje nesmí být v zakládací hale z důvodu bezpečnosti přítomny žádné osoby. Před přesunem do stanice biologického víka se provede příprava kontejneru pod manipulačním otvorem, který pro potřebné úkony zajišťuje dostatek prostoru. Například se na kontejner umístí vystředovací/upevňovací prstenec (popřípadě speciální adaptér dle použitého kontejneru), kontejner i přepravní stroj se připojí ke kapalinovým okruhům a důležitá je i kontrola těsnosti biologického víka, protože ta musí být po zavezení paliva do kontejneru bezpodmínečně dodržena. Závěrečnou operací je odšroubování příruby biologického víka a poté, co pracovníci opustí halu, dojde k přesunu přepravního stroje právě pod manipulační stanici tohoto biologického víka. Zde je navráťivší se obsluhou odšroubován a pomocí zdviže na přepravním stroji spuštěn spodní kryt penetrace a po opětovném opuštění haly pracovníky je manipulačním zařízením biologické víko zvednuto. Následně se dálkově, pomocí videokamery a měřicí aparatury, umístí přepravní stroj s kontejnerem přesně pod osu penetrace. Po zajištění stroje v požadovaném místě je spuštěno biologické víko na podpěry k tomu určené a obsluha je dovoleno, v případě potřeby, vstoupit do haly a provést údržbu těsnění biologického víka, pokud tato potřeba vznikla při předchozí kontrole těsnosti. To je jedna z posledních možností pohybu obsluhy okolo vyvážecího zařízení v zakládací hale, při dalších operacích je jakýkoliv vstup z bezpečnostních důvodů obsluhy zakázán.

Nyní přichází na řadu přitěsnění penetrace ke kontejneru. Pomocí pneumatických válců dojde k přiblížení závitových tyčí spojovacího zařízení k otočným maticím na krycí přírubě. Poté se tyče začnou otáčet a celá penetrace je stahována do dolní polohy, kde je navedena těsnící příruba vystředovací/upevňovací prstencem (adaptérem) na spojovací plochu kontejneru. Po dosednutí a dostatečném přitlačení příruba na plochu je pohyb zastaven. Následuje kontrola těsnosti spojení prostřednictvím stlačeného vzduchu. Po zkoušce dochází k napuštění kontejneru demineralizovanou vodou s určitou koncentrací kyseliny borité, což se děje při otevřeném systému odvodu. Plnění pokračuje, dokud nejsou vyrovnány tlaky nad (v zakládací šachtě) a pod (v kontejneru a penetraci) horním krytem penetrace. V ten moment je možno horní kryt zvednout a propojit tak kontejner se zakládací šachtou. Po propojení prostorů je možno zkontrolovat vizuálně (tzn. kamerovým systémem) vnitřní dutinu kontejneru, včetně koše pro umístění palivových článků. Pokud je vše v normě, odstraní se hradítko mezi bazény skladování vyhořelého paliva a zakládací šachtou a mostovým jeřábem, určeným pro manipulaci s palivovými články v rámci budovy paliva, je kontejner zaplněn použitým palivem (viz Obrázek 3.11).



Obrázek 3.10 – Harmonogram činností vyvážecího zařízení při zakládání paliva do kontejneru



Obrázek 3.11 – Zakládání paliva do kontejneru T13/2 [13]

Dalším krokem je odpojení penetrace od kontejneru. Nejdříve je potřeba uzavřít horní kryt penetrace a zkontrolovat jeho těsnost. Poté se samotná penetrace vyprázdní (kontejner zůstane zaplněn pod úroveň spojovací plochy), dojde k jejímu oplachu sprchovým systémem kvůli dekontaminaci a následuje vysušení stlačeným vzduchem. Manipulačním zařízením je z podpěr zvednuto biologické víko a opačnou rotací tyčí spojovacího zařízení je

postupně zvedána penetrace zpět do původní polohy. Další zvedání po uvolnění zařízení z otočných matic je zajištěno pružinami, přičemž ty jsou opatřeny mechanickými zarážkami, které zdvih dolní části penetrace zarazí v předepsané poloze. Přepravní stroj se poté dálkově přesune zpět do stanice manipulace s biologickým víkem, které je umístěno na kontejner. Po radiologické kontrole zakládací haly je opět povolen vstup obsluze, která přišroubuje zpět dolní kryt penetrace, zvednutý na místo pomocí zdviže.

Po přesunu přepravního stroje pod manipulační otvor je sešroubován biologický poklop a provede se další z kontrol těsnosti spoje. V kontejneru je stále přítomna voda, proto následuje drenážování vnitřní dutiny pomocí trasy v dolní části kontejneru. Nyní je možno kontejner tzv. kondicionovat, což obnáší odsátí vzduchu až do vytvoření podtlaku, opětovné zvýšení na úroveň atmosférického tlaku, což vede k částečnému zkondenzování vodní páry uvnitř kontejneru, odvodu kondenzátu, další vytvoření podtlaku a opakování těchto činností, dokud není kontejner vysušen na stanovenou mez. Uvnitř kontejneru je po vysušení vytvořeno vakuum a vnitřní dutina je zaplněna dusíkem. Na závěr přípravy kontejneru, před vyvezením z budovy paliva, se za pomoci ucpávek uzavřou vypouštěcí otvory, musí dojít k odpojení od kapalinových okruhů, pomocný jeřáb odstraní vystředovací/upevňovací prstenec (adaptér) a dojde k celkové kontrole hermetičnosti a radiační aktivity kontejneru. Na závěr již, stejně jako na začátku, přepravní stroj opustí zakládací halu, přesune se, popřípadě je odtáhnuto, do zvedací stanice, tam je kontejner umístěn na speciální tahač a dopraven do suchého skladu, hlubinného úložiště, popřípadě do přepravovacího závodu. [39]

4 Horní příruba

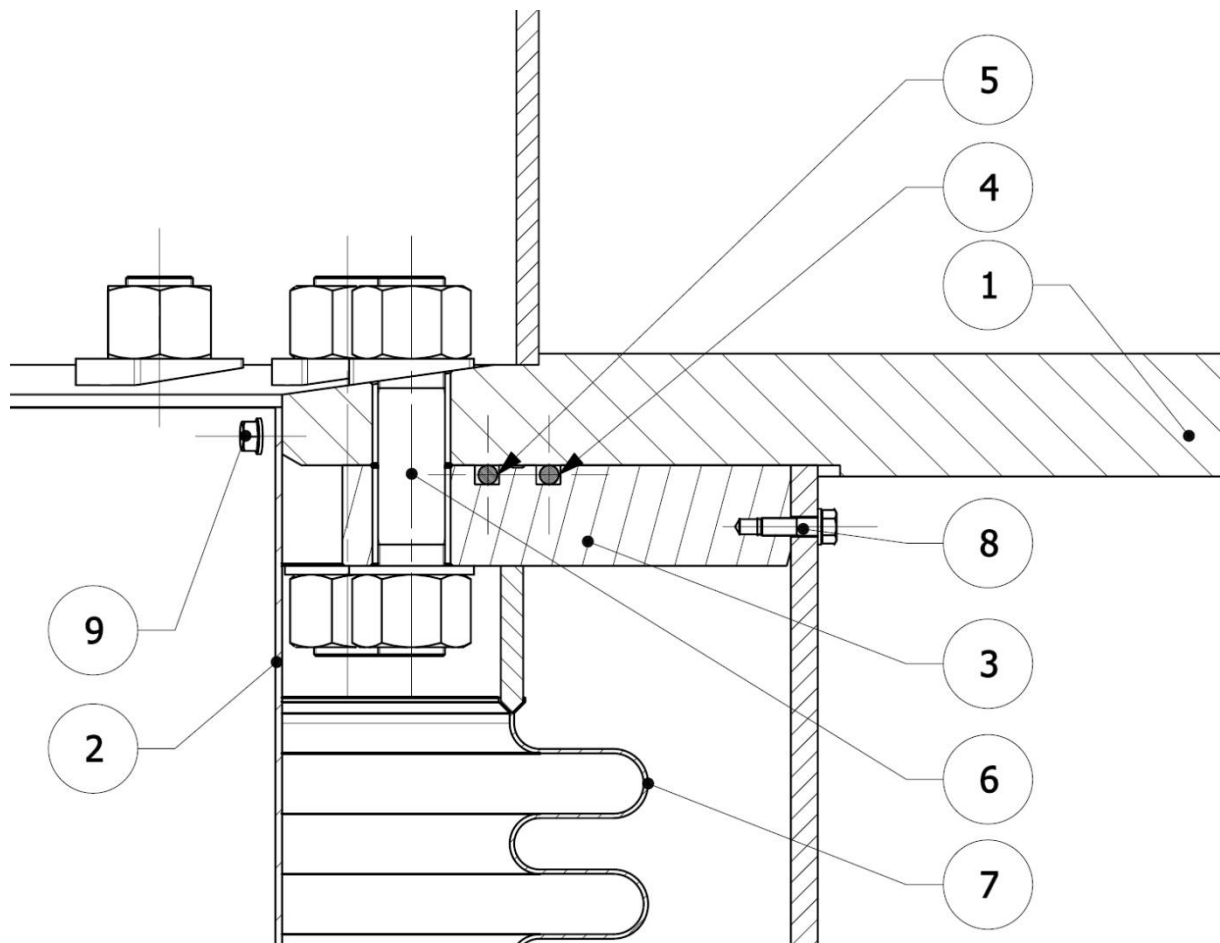
Horní příruba vlnovce vyvážecího zařízení musí zajistit spolehlivé spojení vlnovce s nosnou konstrukcí. Spojení musí být spolehlivé nejen z pevnostního hlediska, ale hlavně s ohledem na hermetičnost přírubového spoje, a to i během mimořádných událostí jako je například zemětřesení. Spoj musí být utěsněn hned dvojicí těsnění, přičemž výběr těsnění je jedním ze základních atributů pro úspěšnost realizovaného řešení přírubového spoje. Druh těsnění ovlivní zejména požadavek na životnost vlnovce 60 let. Přírubový spoj totiž podle poprávkové dokumentace musí být rozebíratelný, ale tato operace je velice složitá a proto je snaha omezovat ji pouze na případy mimořádných oprav. Buď tedy vybrané těsnění musí zajistit hermetičnost spoje po celých 60 let, nebo přírubový spoj musí být co nejlépe rozebíratelný pro ulehčení nutné údržby spojené s pravidelnou výměnou těsnění.

Jelikož těsnění odděluje od okolí prostor s radioaktivním chladivem, jeho spolehlivost je tak nutno pravidelně testovat. Nikdy nesmí dojít k úniku vody z prostoru zakládací šachty a penetrace. Monitorování se provádí pomocí stlačeného vzduchu, přiváděného do prostoru mezi těsněními. Dojde k natlakování prostoru vzduchem a po uzavření přívodu se zaznamená případný pokles tlaku, který by způsobila případná netěsnost. Stejně tak se kontroluje i hermetičnost meziprostoru vlnovce. Pro tyto účely je nutno v konstrukci příruby počítat s monitorovacími kanálky a přívodními trubkami pro stlačený vzduch.

Na přírubě musí být upevněny držáky kolektoru vstřikování demineralizované vody pro dekontaminaci vnitřního prostoru vlnovce včetně přívodního potrubí. Návrh musí obsahovat řešení upevnění horních ochranných pláštů, přičemž ty mohou být umístěny na nosné konstrukci, nebo mohou být i součástí horní příruby. Se všemi těmito prvky se musí při optimalizaci počítat, a to s ohledem na omezený prostor okolo příruby a pokud možno co nejjednodušší montáž do vymezeného prostoru.

Umožnění relativně snadné montáže horní příruby je po volbě správného těsnění a rozmístění konstrukčních prvků další důležitá vlastnost, kterou musí příruba splňovat. Celé zařízení penetrace je umístěno v prostoru ve stropě zakládací haly. Prostor je čtvercový, v dolní třetině obdélníkový a umožňuje „schování“ penetrace v době, kdy se nepoužívá. Stěny jsou obličovány nerezovou ocelí. Vznikne tak prostor o čtvercovém půdorysu 2580 mm x 2580 mm (v dolní třetině rozšířeno na 2580 mm x 3000 mm) a výškou prakticky danou tloušťkou stropu haly (dostatečnou pro schování podstatné části penetračního zařízení, jež má výšku cca 1600 mm). Montáž zařízení penetrace se provádí směrem odspodu, přičemž nejnižší bod nerezové obličovky (jejíž dolní hrana je o něco níže, než strop haly) je ve výšce 7355 mm od niverlačního bodu, který je umístěn na podlaze zakládací haly. Montáž horní příruby tedy probíhá ve výšce přibližně 9 m nad vlečkovým koridorem v relativně omezeném prostoru.

4.1 Původní konstrukce ŠKODA JS a.s.



Obrázek 4.1- Sestava původní konstrukce horní příruby

Původním návrhem společnosti ŠKODA JS a.s. je jednoduchá plochá příruba z nerezové oceli. Polotovarem je plech minimální tloušťky 50 mm opracovaný obráběním. Vnitřní průměr příruby je 1624 mm, vnější potom 2026 mm. Vlnovec (pozice 7 v Obrázku 4.1) je k přírubě (pozice 3) přivařen. Nejdříve se ale jedním svarem spojí se spojovacím prstencem, který se dalším svarovým spojem připevní na určené místo na přírubě. Příruba se k nosné konstrukci (pozice 1) uchyťí 24 spojovacími svorníky M30 na roztečném průměru 1686 mm, které jsou tak umístěny na vnitřním průměru příruby, tzn. ve vnitřním prostoru před vlnovcem (pozice 6). Zde je k nim prakticky neomezený přístup. Problematickou částí svorníků je horní zkosená plocha nosné konstrukce zabraňující nežádoucímu zadržování vody v těchto místech. Na této ploše je ovšem nutné zajistit utažení matic. To je řešeno použitím speciálních tvarových podložek z jedné strany kopírujících sklon povrchu. Dále je v přírubě vyvrtána dvojice monitorovacích kanálků $\varnothing 6$ mm vyvedených na vnější průměr, kde je na jejich výstupu přivařena trubka pro přívod vzduchu řady DN15. Pozice kanálků zohledňuje umístění vstupu přívodních potrubních tras vzduchu z budovy paliva do prostoru prostupu. V přírubě je vytvořeno i několik závitů pro přišroubování navazujících součástí. Jedná se zejména o 12 závitových otvorů M8 pro montáž vnějšího ochranného pláště na čelní plochu příruby (pozice 8) a o 12 otvorů se závitem M10 na spodní ploše příruby pro objímky sloužící pro uchycení kolektoru ostříku. K ostříku vede přívodní trubka, která prochází přírubou do horní části prostupu otvorem $\varnothing 28$ mm umístěným na roztečné kružnici spojovacích svorníků. Na

vnitřním průměru příruby je 12 šrouby M10 (pozice 9) uchycen vnitřní horní ochranný plech (pozice 2).

4.1.1 Těsnění

Kvůli požadavku životnosti vlnovce 60 let, velice nesnadné demontáži horní příruby a použití těsnění v radioaktivním prostředí je jeho výběr složitý a omezený. V zadávací dokumentaci zákazníka je požadováno gumové těsnění. Z toho ovšem vyplývá povinnost zajistit v pravidelných intervalech jeho výměnu, jelikož životnost takového těsnění je pouze několik let. Společnost ŠKODA JS a.s. se rozhodla předejít ve svém návrhu nutnosti rozebírat horní přírubový spoj a využila zkušeností s využitím speciálního kovového těsnění s obchodním názvem HELICOFLEX®, které je používáno například pro utěsnění jednotlivých vík kontejnerů CASTOR®, jež ŠKODA JS a.s. v licenci vyrábí. U tohoto těsnění je zaručena životnost po plánovanou dobu provozu vyvážecího zařízení a navíc je přímo určeno pro použití v jaderném průmyslu. Tomu odpovídá také jeho vysoká cena. V obrázku 4.1 jsou těsnění znázorněny na pozici 4 a 5.

4.1.2 Montáž

Pro objasnění problematiky dostupnosti jednotlivých prvků penetrace bude v této podkapitole jednoduše přiblížen postup jejich montáže, respektive pořadí, ve kterém se umísťují na svou pozici. Samozřejmě nejdříve musí být připraven prostor pro vlnovec v zakládací hale. Tím se rozumí usazení a připevnění nosné konstrukce a oblicovky prostoru. K nosné konstrukci se totiž většina základních částí penetrace montuje. Montáž probíhá ze zakládací haly, tedy zespodu. V první fázi se upevní na své místo na nosné konstrukci 8 pružinových závěsů, které při provozu zajišťují návrat penetrace do výchozí pozice (viz kapitola 3.1.2). Následuje nejsložitější část operace, kterou je montáž vlnovce. Vlnovec musí být před montáží přivařen k horní i dolní přírubě. Na čelo horní příruby musí být již před samotnou montáží přišroubován horní vnější ochranný plech, jelikož po připevnění příruby by byla jeho montáž velice ztížena, podle mého názoru až znemožněna, z důvodu omezeného prostoru mezi vlnovcem a oblicovkou montážního prostoru. K dolní přírubě pak musí být předem uchycen vnitřní ochranný plášť, jehož průměr pozdější umístění znemožňuje (průměr otvoru v nosné konstrukci je menší).

K celku se uchytí přípravek určený pro jeho zdvih (traverzový závěs) a pomocí jeřábu v budově paliva se vyzvedne k nosné konstrukci a spojovacími svorníky se k ní uchytí. Díky snadné přístupnosti svorníků směrem od osy prostupu není utažení téměř žádný problém. Následuje připojení kapalínových rozvodů k přívodnímu potrubí do přírub a montáž vnitřního horního ochranného pláště k nosné konstrukci. Téměř na závěr se k dolní přírubě vlnovce přišroubovuje krycí příruba a k ní pružinové závěsy. Krycí příruba uzavře vnější prostory vlnovce, do kterých již není možné zasahovat (samozřejmě bez opětovné demontáže příruby). Montáž penetrace končí umístěním těsnící příruby a spodního krytu. Těsnící i krycí příruba je každá připevněna dvanácti šrouby.

4.1.3 Problémy

Ukázalo se, že původní konstrukce horní příruby nespĺňuje požadavky na ní kladené. Nedostatky se objevily již při výrobě. S ohledem na velké průměry má příruba, vyrobená z jednoho kusu materiálu, relativně malou tloušťku, což způsobuje její nízkou tuhost. To ovlivňuje především těsnící schopnost přírubového spoje a problematické se stává i přivařování vlnovce. Přivařením vlnovce je příruba značně tepelně namáhána a vnitřní pnutí následně způsobí „zkroucení“ listu příruby. Přímým důsledkem je velmi vysoká pravděpodobnost, že nebude dodržena rovinnost kontaktní plochy příruby.

Zásadním problémem je ale utěsnění přírubového spoje. Těsnění typu HELICOFLEX® se vyznačuje značnou tuhostí. Spojovací svorníky, umístěné z důvodu přístupnosti blíže k vnitřnímu průměru příruby (dostupné tedy z vnitřku vlnovce), proto musí vyvodit dostatečnou sílu ke stlačení těsnění. Nízká tuhost příruby, její deformace po svařování a nevhodné umístění svorníků vůči těsnění způsobí, že utažením svorníků nemůže být zajištěno dostatečné stlačení obou těsnění. Důsledkem je snížení potřebného měrného tlaku pro stlačení vnějšího těsnícího kroužku, čímž se kroužek dostane mimo svůj optimální pracovní bod a nemůže tak být jednoznačně zaručena jeho těsnost. Prvotní možná náprava, tedy umístění dalších spojovacích šroubů na opačnou stranu těsnění, blíže k vnějšímu průměru příruby, je z hlediska montáže velice problematická. Šrouby budou totiž dislokovány vně prostupu, v úzkém prostoru mezi vlnovcem a ochranným pláštěm, přičemž přístup směrem shora není možný (je zde betonový strop zakládací haly) a odspodu nám přístup částečně zakrývá dolní příruba vlnovce. Jak bude popsáno i později, montáž by tak byla neúměrně složitá, nehledě na to, že by bylo potřeba vyrobit složité speciální přípravky a nástroje pro utažení matic.

5 Optimalizace horní příruby

Optimalizace horní příruby vlnovce prostupu byla zaměřena především na následující aspekty: přehodnocení výběru těsnění, zvýšení tuhosti příruby a konstrukční změny zajišťující těsnost spoje při zachování přijatelné smontovatelnosti. V následující části budou nejdříve popsány úpravy, které jsou společné pro všechny uvedené konstrukční varianty. Jednotlivé varianty pak budou rozebrány v další části práce.

5.1 Těsnění

Zajištění těsnosti je primární úkol problematiky návrhu většiny přírubových spojů. Požadavek těsnosti je o to větší, jedná-li se o utěsnění chladiva odvádějící teplo od palivových článků jaderné elektrárny. Každý únik tohoto chladiva je nežádoucí jev. Nebezpečný je nejen úbytek chladicí kapaliny, která zároveň slouží jako stínění ionizujícímu záření, ale hlavním rizikem při případné netěsnosti je kontaminace prostoru, kam uniká chladivo, radioaktivními izotopy.

Utěsnění horního přírubového spoje vlnovce má některá specifika, jež omezují výběr vhodného těsnění. Jeho vlastnosti musí být zachovány až do teploty 105°C, což jsou havarijní podmínky v bazénu skladování vyhořelého paliva. Těsněné medium je demineralizovaná voda s obsahem kyseliny borité. Těsnění přijde do styku s radioaktivními izotopy obsaženými v chladivu. Minimální požadavek na životnost je 2 roky, popřípadě 20 pracovních cyklů prostupu. Jak již ovšem bylo zmíněno dříve, demontáž horního přírubového spoje je vcelku nepříjemná záležitost. Probíhá v omezeném prostoru ve výšce několika metrů, přičemž pracovníci jsou navíc vystaveni určité dávce záření. Z tohoto důvodu je snaha omezit výměny těsnění horní příruby na minimum nebo úplně vyloučit.

Třída netěsnosti L	Dovolený stupeň úniku mg/(m.s) pro N ₂	Médium
L _{1,0}	1	voda bez radioaktivity
L _{0,1}	10 ⁻¹	a) radioaktivní voda b) vodní pára bez radioaktivity c) stlačený vzduch
L _{0,01}	10 ⁻²	d) radioaktivní vodní pára

Tabulka 1 – Třídy netěsnosti [17]

Pro těsnění použité v jaderném zařízení je definován minimální požadavek těsnosti. V tomto případě bude těsněným médium radioaktivní voda.

Z tabulky 1 převzaté z [17] vyplývá, že pro

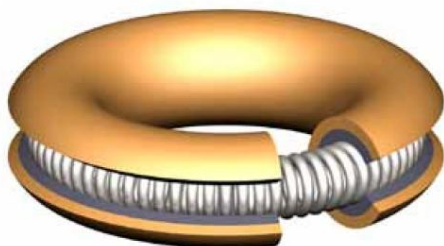
tento účel bude nutné zajistit těsnění o třídě těsnosti L_{0,1}. Tento požadavek splňují téměř všechny druhy těsnění v přehledu v tabulce 2 z téhož zdroje. S ohledem na nijak extrémní podmínky provozu přírubového spoje (vyjma radioaktivní vody), lze téměř vyloučit nákladné těsnění např. z expandovaného grafitu, kovová těsnění aj. Výjimkou může být výběr tohoto druhu těsnění z důvodu jeho dlouhodobé životnosti. Zaměřit se tak lze na běžná měkká těsnění z pryže, PTFE či jiných elastomerů, které ovšem musí splňovat odolnost proti chemickým a radiačním vlivům chladiva.

Tabulka 2 – Přehled těsnění [17]

Materiály	Specifikace	Netěsnost
vláknitopryžové	vlákna - aramid	0,1 – 0,6 mg/s.m
	vlákna – sklo, keramika, uhlík	0,1 mg/s.m a nižší
expandovaný grafit	čistota 98% C	0,1 mg/s.m
	čistota 99,75% C	až 0,001 mg/s.m
PTFE	čistý	0,01 mg/s.m a nižší
	expandovaný	0,01 mg/s.m
příklad kombinovaného materiálu	hřebenové těsnění s exp. grafitem	až 0,0001 mg/s.m
kovy	kovová plochá	10^{-4} až 10^{-5} mg/s.m
	kovová tvarová	10^{-6} až 10^{-8} mg/s.m

5.1.1 Kovové těsnění HELICOFLEX®

HELICOFLEX® je pružné kovové těsnění složené ze šroubovité pružiny uzavřené v kovovém pouzdře. Funkčnost těsnění je založena na plastické deformaci kovového pouzdra, jehož materiál musí mít větší tažnost, než má materiál příruby. Pouzdro se tak přizpůsobí přírubě a vyplní nerovnosti jejího povrchu. Dostatečný přítlak kovového pouzdra k přírubě je zajištěn pružinou, která nejen zajistí trvalý kontakt těsnění s povrchem, ale navíc jednotlivé závitů pružiny dokážou pracovat nezávisle na sobě a přizpůsobit se tak nedokonalostem povrchu těsněných ploch. Těsnění je samozřejmě korozivzdorné, odolává radiaci a není ani jinak omezeno jeho použití pro dané provozní i návrhové parametry prostupu (~3 bar, 105°C). [18]



Obrázek 5.1 – Těsnění HELICOFLEX® [18]

Těsnění bylo využito i v původním návrhu společnosti ŠKODA JS, a.s. Je to druh těsnění, jehož těsnost je garantována po celou dobu životnosti prostupu a odpadne tak složitá demontáž kvůli údržbě přírubového spoje. Při použití tohoto těsnění je ovšem nutné zajistit jeho spolehlivost dostatečným stlačením, přičemž těsnění má značnou tuhost. Konstrukční řešení a umístění spojovacích prvků se tedy musí zcela podřít požadavku na stlačení dvojice těsnění do požadovaného pracovního bodu. Nevýhodou je taktéž jeho značná cena.

5.1.2 Těsnění typu PTFE

Jako další možnost výběru těsnění bylo uvažováno použití O-kroužku z materiálu Polytetrafluoroethylen, známým také jako Teflon®. Jedná se o relativně hojně používaný polymer. Je možné jej použít v rozmezí teplot -200°C až 250°C. Vyznačuje se velkou chemickou odolností při velkém rozsahu teplot a také odolností proti stárnutí. Naproti tomu má značný sklon k tzv. studenému toku (nebo-li deformaci při zatížení). Těsnění z tohoto materiálu bylo ovšem vyloučeno z důvodu nízké odolnosti proti záření. Lze ho totiž použít

pouze pro nízké krátkodobé dávky, při vyšších dávkách prudce degraduje. [19] To s ohledem na využití prostupu pro transport použitého jaderného paliva vylučuje možnost jeho aplikace.

5.1.3 Pryžové těsnění EPDM

EPDM je zkratka vzniklá ze slov Etylen-Propylen-Dien a M-class (zařazení materiálu podle ASTM). Těsnění vyrobené z tohoto elastomeru má použití v teplotním rozmezí -45°C až 110°C , při použití speciálních aditiv -55°C až 155°C . V tomto ohledu tedy splňuje nároky pro použití v navrhovaném přírubovém spoji. O-kroužky vyrobené z pryže EPDM se vyznačují značnou odolností proti stárnutí, trvalé deformaci, teplé vodě a páře. Mají taktéž požadovanou chemickou odolnost, z které se hodí zdůraznit například odolnost proti zředěným kyselinám (H_3BO_3 v chladivu). [20] Oproti jiným podobným materiálům se taktéž vyznačuje zvýšenou odolností proti ionizujícímu záření. Vybrané typy těsnění z materiálu EPDM konkrétního složení jsou navíc certifikovány pro použití ve francouzských jaderných elektrárnách. Příkladem může být těsnění řady EP21/E/80 anglického výrobce JAMES WALKER®, kde 80 značí tvrdost podle mezinárodní stupnice tvrdosti pryžových materiálů IRHD. [21]

Z výše uvedených poznatků je patrné, že alternativní volbou těsnění, které je použitelné pro aplikaci na horní přírubový spoj, je O-kroužek z EPDM pryže. Životnost těsnění v daných podmínkách není však delší než 5 let. Bylo by proto nutno zajistit jeho pravidelnou údržbu, což s sebou nese všechny nepříjemné důsledky uvedené výše. Na druhou stranu je životnost těsnění větší než dvojnásobná oproti zadávací dokumentaci a pro přírubový spoj nebude nutno použít tak velkých utahovacích momentů, jako pro těsnění HELICOFLEX®, což je příznivější z konstrukčního i pevnostního hlediska.

5.1.4 Jiná těsnění

V technické praxi existuje celá řada dalších druhů těsnění z mnoha materiálů. Obecně platí, že polymery hůře snášejí vysoké dávky záření, které způsobují jejich degradaci. Proto se v jaderném průmyslu využívá spíše těsnění z kovových materiálů, popřípadě na bázi expandovaného grafitu. [22]

Další elastomer využitelný v radioaktivním prostředí je pryž NBR (Nitril Butadiene). U této pryže se využívá spíše její olejivzdornost a je použitelná pouze do 100°C , což vylučuje její použití u horní příruby. [20] Použití kombinovaných materiálů (např. pryž + kov) je v tomto případě neopodstatněné. Pokud plně dostačuje obyčejné gumové těsnění EPDM, je zbytečné nahrazovat jej jinými druhy dražších variant. Totéž se týká i kovového těsnění, které je určeno do mnohem extrémnějších podmínek a nahradit jimi zvolené těsnění HELICOFLEX® není ekonomické, jelikož nedokážou zastoupit jeho životnost, tudíž by bylo nutné je pravidelně měnit. Takže i v tomto případě opět postačuje mnohem levnější EPDM.

5.2 Tuhost

Prvním krokem pro zvýšení tuhosti horní příruby je změna způsobu výroby. Oproti původnímu řešení, kterým je obrobek z ocelového plechu, je preferována výroba příruby jako výkovku. Kováním budou zlepšeny výsledné mechanické vlastnosti výrobku (pevnost a houževnatost). Na konečný tvar bude příruha obrobena. Zůstal zachován původní materiál, tedy austenitická nerezová ocel. Ta musí mimo jiné splňovat podmínku svařitelnosti kvůli montáži vlnovce. Materiál je definován ve francouzské normě RCC-M s číslem M3301: *Austenitic stainless steel forgings and drop forgings*. Podle této normy nese označení Z2 CN 18-10. Vlastnosti materiálu jsou v tabulkách 3 a 4. [23]

Tabulka 3 – Chemické složení materiálu Z2 CN 18-10 [23]

Max. C	Max. Si	Max. Mn	Max. P	Max. S	Cr	Ni	Max. Cu
[%]							
0,03	1	2	0,03	0,015	17 - 20	9 - 12	1

Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti materiálu Z2 CN 18-10 [23]

20°C			350°C	
Rp0,2	Rm	A	Rp0,2	Rm
[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]
175	450	40	105	327

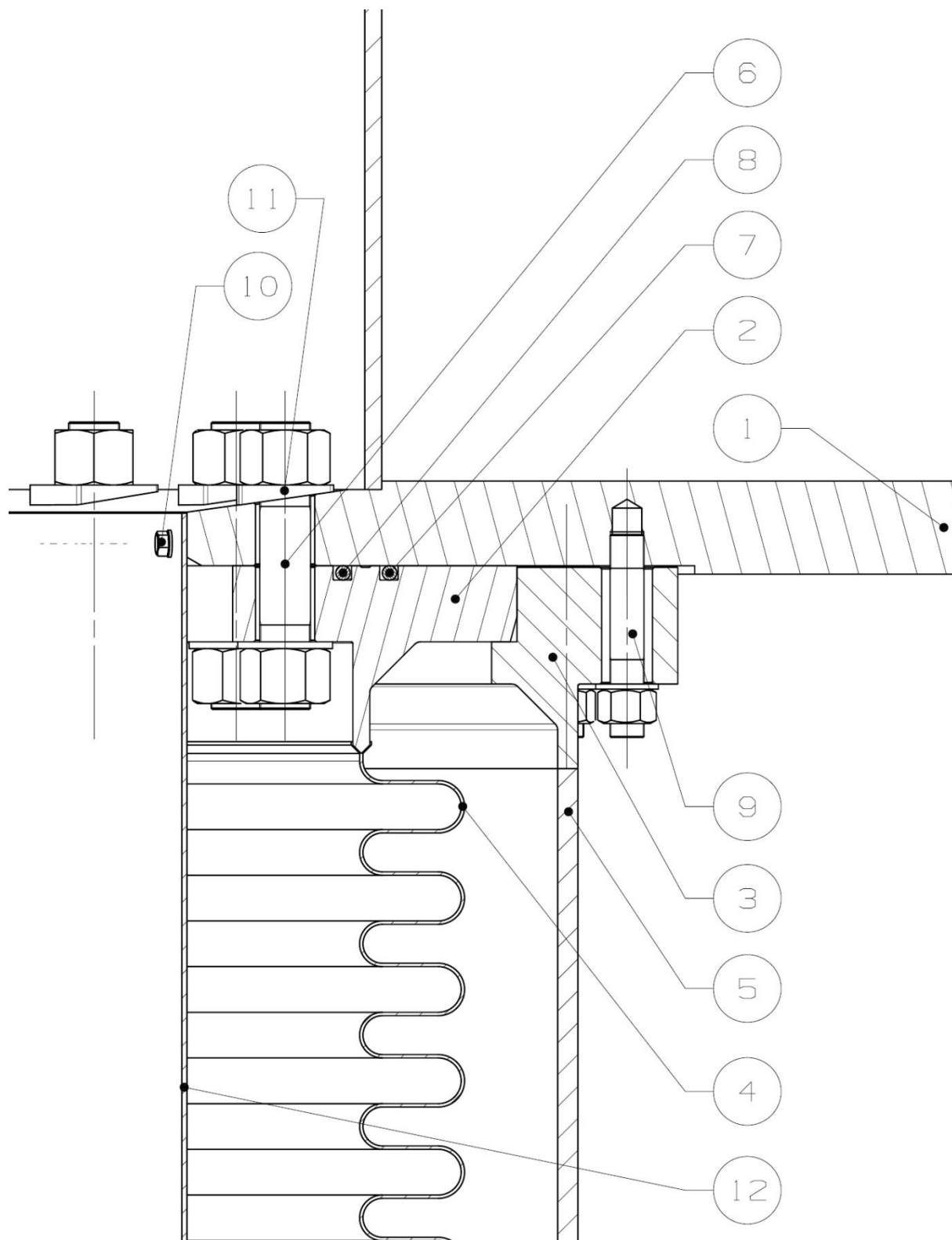
Díky tomu, že příruba bude vyráběna jako výkovek, horní spojovací prsteneček vlnovce se může stát přířadou součástí přírubu a omezí se tak svařování pouze na svař mezi vlnovcem a prstencem. Navíc tímto řešením může být konstrukčně zvýšena tuhost postupným rozšířením dolní části prstence.

5.3 Konstrukční řešení

Ke konstrukci horní přírubu vlnovce prostupu vyvážecího zařízení bylo přistupováno dvěma způsoby. Nejdříve byla v návrhu snaha zachovat co nejvíce z původního řešení, aby změny přírubu co nejméně ovlivnily již částečně vyrobený prostup a navazující konstrukční části. Při tom bylo potřeba odstranit zmiňované nedostatky a zachovat přijatelný postup montáže do daného prostoru, u kterého již není možnost změn. Ve druhém pohledu byla snaha oprostít se od současného řešení a pokusit se vytvořit přírubu rozdílné koncepce, samozřejmě při zachování všech prvků (ochranné plechy, rozvody kapalin atd.) a požadavků na přírubový spoj.

Výsledkem jsou tři konstrukční varianty. Společným prvkem je opuštění koncepce jednoduché ploché přírubu a nahrazení její části volnou přírubou, která zajišťuje potřebné dodatečné stlačení těsnění, zmenšuje plochu, na které je nutné dodržet rovinnost a umožňuje přístup ke šroubovým spojům, jak bude zřejmé z následujícího popisu jednotlivých variant.

5.3.1 Varianta 1

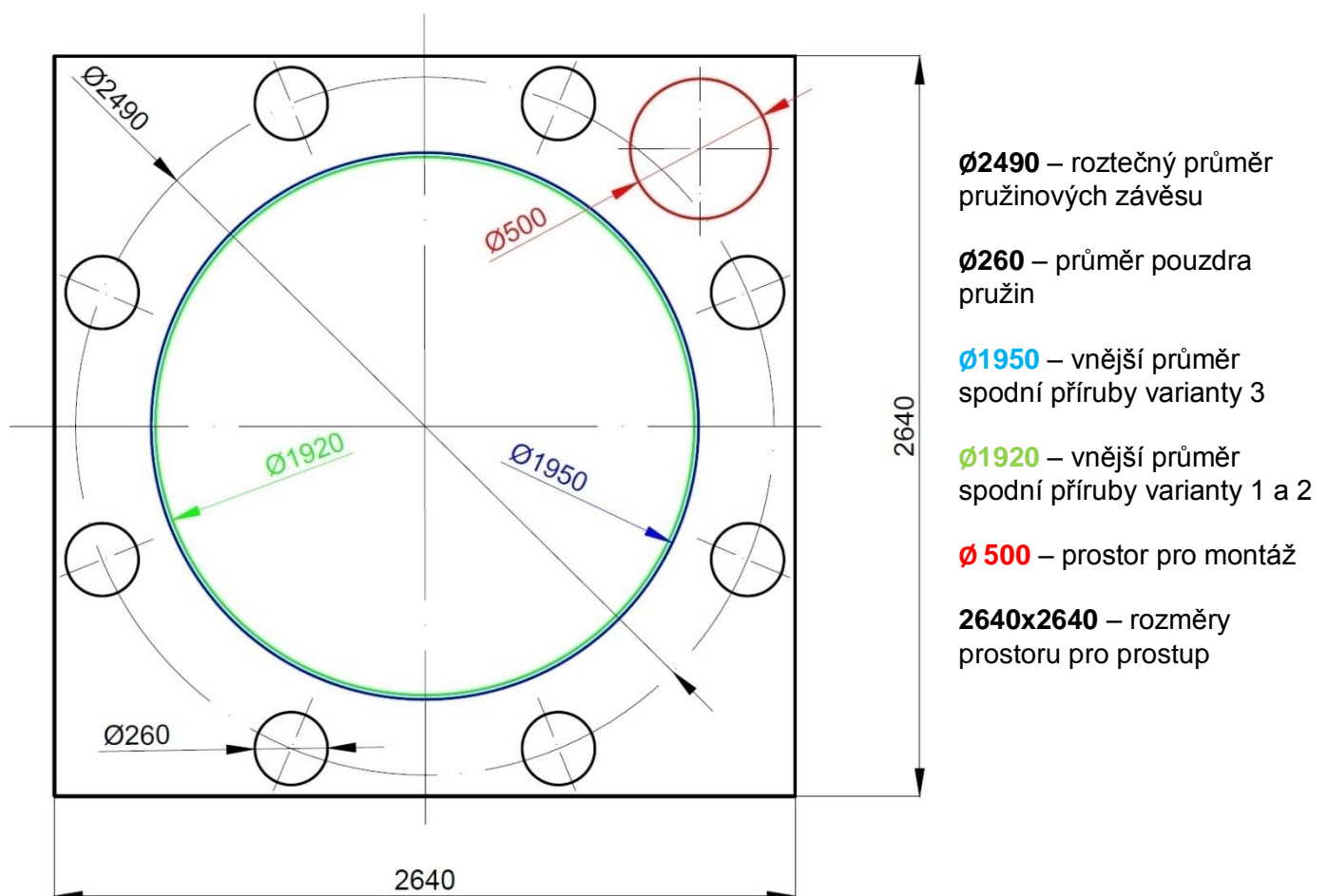


Obrázek 5.2 – Sestava návrhu 1 horní příruba

Pro zajištění dostatečného stlačení tuhého těsnění HELICOFLEX®, při snaze co nejvíce zachovat původní koncepci příruba pro její snadnou aplikaci na již existující zařízení, se nelze vyhnout použití dodatečného šroubového spoje umístěného tak, aby těsnění bylo stlačeno

z obou stran. Při pohledu na původní konstrukci je zřejmé, že jediný prostor, kam lze umístit dodatečné šroubové spoje, je do prostoru mezi vlnovcem a vnější horní ochranný plášť. Tato varianta byla také uvažována jako první řešení nastalého problému, jak je patrné z některých příložených obrázků (viz příloha) poskytnutých společností ŠKODA JS a.s. Řešení bude zcela jistě funkční, ovšem z montážního hlediska je tato alternativa nevhodná. Vlnovec musí být již před montáží na své místo přivařen k oběma svým přírubám. Stejně tak ochranný plášť musí být na místo připevněn ještě dříve, než dojde ke zdvihnutí celé sestavy vlnovce na své místo, jelikož pak se již nelze k upevňovacím šroubům pláště přiblížit tak, aby bylo možné je utáhnout. Pro utažení dodatečných šroubů horní příruby je tedy potřeba vyrobít speciální montážní nástroj do prostoru mezi vlnovcem a pláštěm, jež je tvořen mezikružím o šířce cca. 63 mm (pokud bude uvažován horní mezní rozměr průměru vlnovce). Nejbližší je schopen se pracovník provádějící montáž dostat ke spodní hraně vnějšího horního ochranného pláště, odkud jsou šrouby umístěny ještě o 820 mm výše a přístupu nepomáhá ani spodní příruba. Nejen tedy, že utažení šroubu se tak stává problematické, ale navíc při montáži hrozí určité riziko poškození vlnovce.

Návrh byl tedy primárně zaměřen na změnu umístění dodatečných spojovacích šroubů horní příruby. Využito bylo faktu, že i při umístění vlnovce k nosné konstrukci zůstane vně vlnovce (tzn. mezi ním a oblicovkou) dostatečný prostor, do něhož se dokáže dostat montážní dělník. Je to patrné z příloženého obrázku 5.3. Uvádí se, že minimální průměr montážního

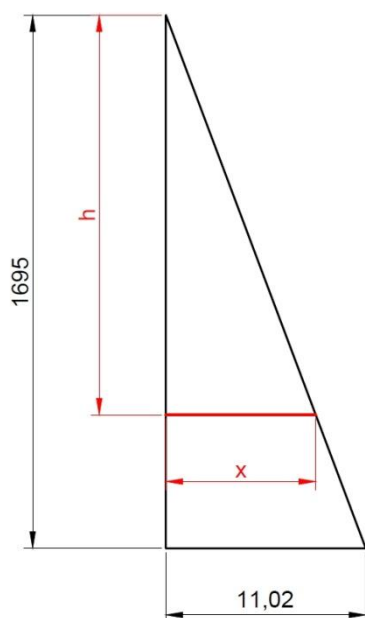


Obrázek 5.3 – Naznačení prostoru pro vstup obsluhy k horní přírubě

průlezu pro člověka má být alespoň 450 mm, což je zde i při zachování původních rozměrů dolní příruby splněno. Změna konstrukce si navíc vyžádá zmenšení průměru spodní příruby, což přístup ještě ulehčí (viz 7.3.1). Šrouby se umístí z vnější strany ochranného pláště, čímž se stanou mnohem lépe přístupné.

Tato změna si vyžádala přehodnocení způsobu upevnění vnějšího ochranného pláště (pozice 5 na obrázku 5.2). Aby nebyla ztracena přístupnost šroubů, musí se plášť umístit buď na své původní místo, ovšem až po utažení dodatečného šroubového spoje, nebo je nutno nalézt jiné místo a způsob upevnění. Umístění na původní místo, tedy na čelní plochu příruby by představovalo nový problém z hlediska montáže, kdy by bylo špatně zajistitelné utažení šroubů umístěných kolmo k ose prostupu v nejvyšším místě montážního prostoru. Plášť tak bylo nutno posunout blíže k vlnovci (před dodatečné šroubové spoje) a zvážit možnosti jeho uchycení ke spodní ploše listu příruby. Vzdálenost vlnovce a ochranných plášťů musí ovšem splňovat některé požadavky. Především za žádných okolností nesmí dojít ke kontaktu pláště a vlnovce, což by mohlo způsobit deformaci tvaru vlnovce a ztrátu jeho základní funkce či porušení jeho hermetičnosti. V úvahu se musí vzít tyto faktory:

- a) *vyosení prostupu (tzv. laterální úchylka)* – při spojování kontejneru pro vyhořelé palivo s prostupem může nastat situace, kdy osa kontejneru nebude totožná s osou vlnovce. Po spojení styčných ploch kontejneru a těsnicí příruby tak dojde k vyosení spodní části vlnovce, přičemž horní část je vždy pevně spojena s nosnou konstrukcí. Velikost této laterální úchylky je dána výpočtem získaným od ŠKODY JS a její maximální hodnota v oblasti těsnicí příruby je stanovena na 11,02 mm. Vychýlení vlnovce v oblasti horního vnějšího ochranného pláště lze poté jednoduše získat z podobnosti trojúhelníků (viz obrázek 5.4). Minimální hodnota vůle x je tak



Obrázek 5.4 - Podobnost trojúhelníků

$$\frac{x}{h} = \frac{11,02}{1695}$$

$$x = h \cdot \frac{11,02}{1695} = \frac{880 \cdot 11,02}{1695} = 5,7 \text{ mm}$$

kde h je vzdálenost od horní příruby vlnovce ke spodní hraně ochranného pláště a 1695 mm je výška celého prostupu od spodní plochy těsnicí příruby po nosnou konstrukci.

- b) *výrobní nepřesnosti* – musí být počítáno se značnou výrobní tolerancí vnějšího průměru vlnovce a taktéž s určitou „ovalitou“ zkruženého plechu, ze kterého je ochranný plášť vyroben. Maximální vnější průměr vlnovce definovaný jeho dodavatelem je pro původní řešení cca. 1900 mm.
- c) *umístění dalších prvků mezi vlnovcem a pláštěm* – pokud je v meziprostoru umístěna nějaká další součást penetračního zařízení z nepružného materiálu, musí pro ni platit stejná podmínka zákazu dotyku s vlnovcem jako pro ochranné pláště. Z tohoto pohledu je důležité, že v prostoru mezi vlnovcem a vnějším ochranným pláštěm je umístěna trubka přívodu stlačeného vzduchu do monitorovacích kanálků spodní příruby vlnovce, kterou není možno z montážních důvodů umístit jinak. Musí s ní tedy být počítáno do celkové hodnoty vůle mezi vlnovcem a vnějším pláštěm (více viz 7.3.1).

Po zvážení uvedených faktorů bylo určeno, že plech musí být od vlnovce ve vzdálenosti alespoň 50 mm, tzn. musí být na průměru o 100 mm větším, než je vnější průměr vlnovce.

Aby se dal ochranný plech umístit do dostatečné vzdálenosti od vlnovce a na přírubě mohly být šrouby utažitelné běžnými nástroji, bylo nutno zvětšit maximální průměr příruby. Tomu ovšem bránily pružinové závěsy prostupu. Konstrukce ovšem umožňovala jejich posunutí o 100 mm na průměr – tedy zvětšení jejich roztečné kružnice z $\varnothing 2390$ mm na $\varnothing 2490$ mm, a tím pádem je možné zvětšit i původní průměr příruby o 100 mm. V tomto případě navíc nebude na vnějším průměru umístěn ochranný plášť, jako tomu bylo u původního řešení. Plášť je vyroben z plechu tloušťky 12 mm, průměr příruby se tak může zvětšit o dalších 24 mm. Maximální průměr příruby po těchto změnách naroste až na 2150 mm. Takto zvětšenou přírubu bylo nevhodné ponechat jako jeden díl. Z hlediska výroby by bylo složité dodržení některých tolerancí, zejména pak geometrické tolerance rovinnosti horní zvětšené plochy příruby, která je nutná pro přilehnutí listu příruby k nosné konstrukci, což zajišťuje dostatečné stlačení těsnění. Usazování příruby vcelku během montáže také není vhodným řešením, z důvodu její zvýšené hmotnosti i větších rozměrů. Příruba je tedy rozdělena na dva díly – jednu plochou přírubu (pozice 2 v obrázku 5.2) a doplňující volnou přírubu (pozice 3) zajišťující dodatečné stlačení těsnění HELICOFLEX®.

Plochá příruba je navržena pro co největší shodu s původním řešením ŠKODY JS. Hlavním upevňovacím prvkem dílu zůstalo 24 svorníků M30 na stejném roztečném průměru 1686 mm (pozice 6). Taktéž zůstaly zachovány průměry drážek pro těsnění. Dá se tedy beze změny použít původní těsnění. U příruby byla snaha co nejvíce omezit plochu opracovávanou na požadovanou rovinnost. Její vnější rozměr byl snížen na $\varnothing 1960$ mm (oproti původní přírubě s $\varnothing 2026$ mm). Vnější průměr je kuželově zakončen pro snadnější navedení volné příruby. Při integraci spojovacího prstence do návrhu příruby bylo nutno zachovat především jeho délku. Celková délka vlnovce včetně přírub totiž musí zůstat stejná, aby nedošlo ke změnám vlastností vlnovce (zejména tuhosti a zdvihu), které by pak ovlivnily další části penetračního zařízení (např. pružinové závěsy).

Volná příruba je na své místo upevněna 24 závrtnými šrouby a maticemi M20 na roztečném průměru 2090 mm (pozice 9). Po utažení šroubů je prostřednictvím osazení stlačována plochá příruba a je tak zajištěno potřebné dodatečné stlačení těsnění HELICOFLEX®. Vzhledem k tomu, že osazení je na relativně velkém průměru, může být jeho šířka v porovnání s ostatními rozměry menší. I tak lze totiž předpokládat, že bude zajištěna dostatečná kontaktní plocha. V tomto případě je šířka osazení 15 mm. Aby bylo zaručeno, že nedojde k dosednutí volné příruby na nosnou konstrukci dříve, než nastane kontakt a stlačení příruby ploché, musí být konstrukčně zajištěna vůle mezi nosnou konstrukcí a volnou přírubou, tzn. že výška příruby nad osazením se nesmí rovnat tloušťce listu ploché příruby.

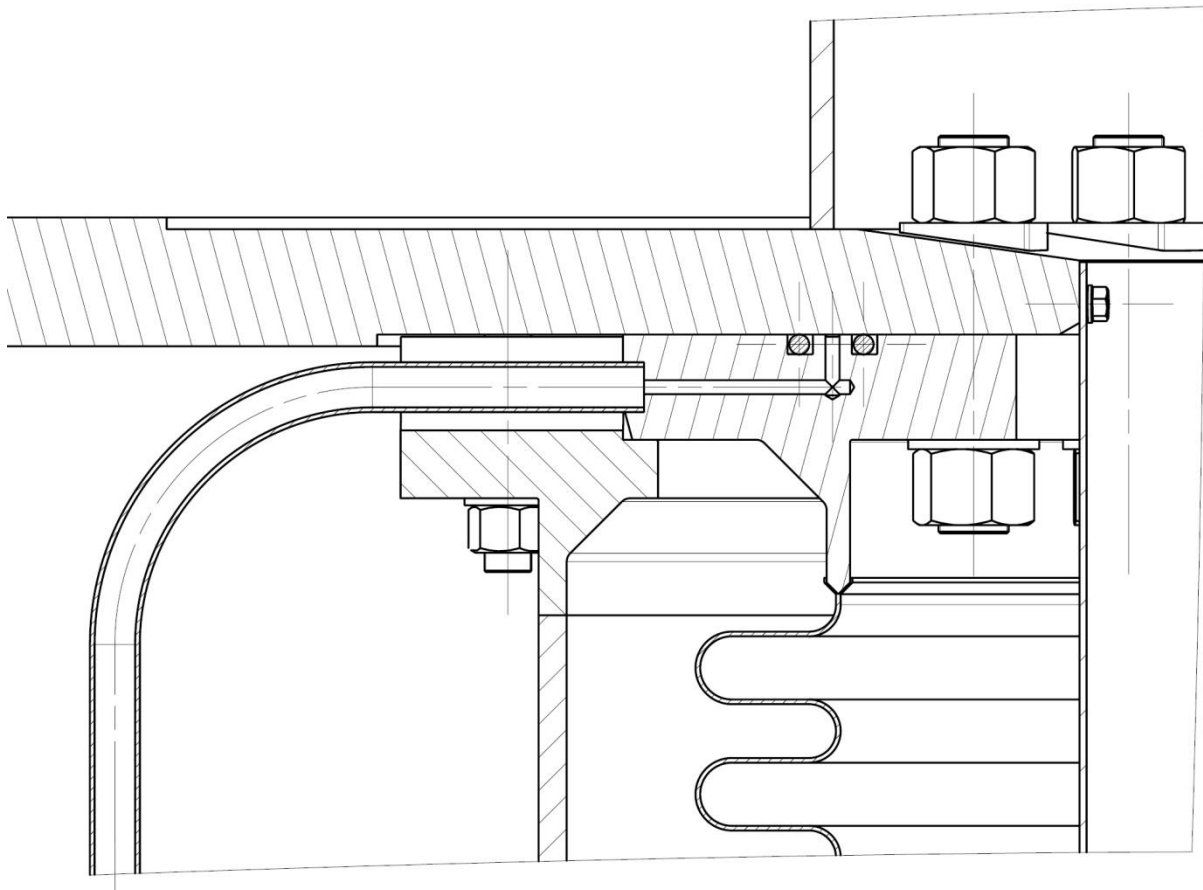
Před samotným usazením a montáží volné příruby k ní bude ještě připevněn vnější ochranný plášť (pozice 5). Z důvodu vyčerpání prostorových možností nelze ochranný plášť k přírubě upevnit pomocí šroubových spojů. Šrouby již nelze umístit tak, aby byly lehce dostupné a utažitelné. Plášť bude tedy k přírubě přivařen obdobným způsobem, jakým je přivařen vlnovec k přírubě ploché (viz Obrázek 5.2). Jsou respektovány všechny faktory definující vzdálenost mezi vlnovcem a tímto ochranným pláštěm. Plášť je umístěn tak, že jeho vnitřní průměr je 2008 mm, tzn. vůle mezi vlnovcem (pozice 4) a pláštěm (pozice 5) je 53 mm. Větší vzdálenost z praktického hlediska u této varianty možná není, jelikož z druhé strany pláště se nachází šroubové spoje a je nutno zachovat prostor pro jejich utažení. To bude pravděpodobně probíhat prostřednictvím průmyslových 6hranných hlavic, tzv. „GOLA (podle jednoho z výrobců)“ či hovorově „ořechů.“ Dle katalogu jednoho z výrobců má profesionální

hlavice pro šrouby či matice M20 vnější průměr 42 mm. [24] U této varianty řešení je vzdálenost od osy šroubů k ochrannému plášti 29 mm, což je sice více než minimálních 21 mm, ale pokud se vezmou v úvahu ještě různé tolerance a nepřesnosti, není zde už žádný prostor pro případné posunutí pláště, což s sebou nese určitý problém popsany dále v kapitole 7.3.1.

Jedním z posledních konstrukčních úkolů u této varianty bylo vyřešení přívodu stlačeného vzduchu k monitorovacím kanálkům v ploché přírubě. Přívodní potrubí musí být umístěno až za vnějším ochranným pláštěm, kvůli napojení na hlavní rozvody vyvedené do prostoru prostupu. Rozdělení příruby na dvě samostatné části pak vyžaduje uzpůsobit tomuto i přívod tlakového vzduchu. Není možné rozvádět vzduch monitorovacími kanálky přes obě příruby. Potrubí tak musí být přivařeno již k ploché přírubě a vyvedeno až za vnější průměr celé sestavy přírub. Volná příruha proto musí obsahovat vybrání pro vedení přívodního potrubí velikosti DN15 (viz Obrázek 5.5). Potrubí musí být na své místo přivařeno již před montáží volné příruby a kvůli pozdější nepřístupnosti místa svaru dokonce již před usazením příruby ploché.



Obrázek 5.6 – 6hranná průmyslová hlavice [24]

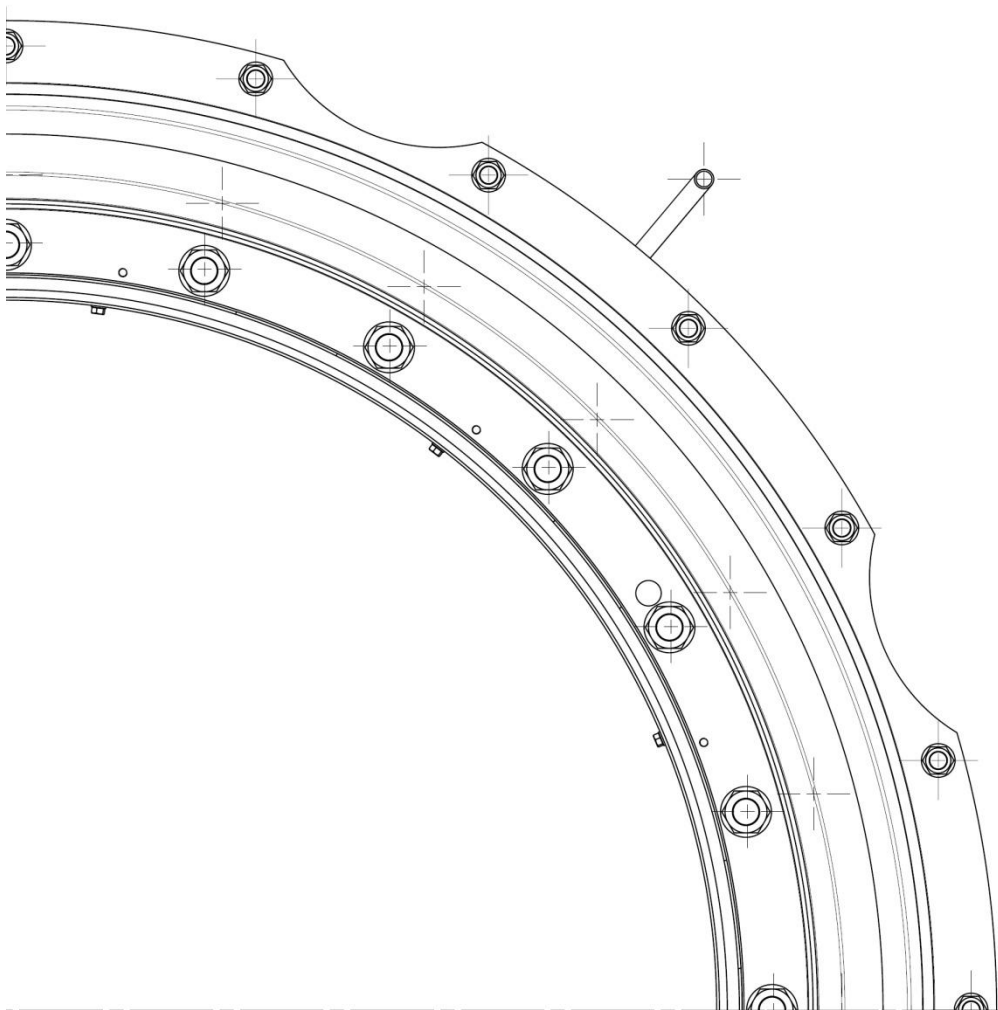


Obrázek 5.5 – Přívod kontrolního vzduchu mezi těsnění horní příruby pro variantu 2

Konstrukční varianta číslo 2 vychází koncepčně z varianty 1 a snaží se odstranit její nedostatky. Ty vznikají díky omezeným rozměrům příruby. Varianta 2 je tedy upravením předchozího návrhu s cílem získat více prostoru pro rizikové prvky. Těmi jsou především přírodní potrubí tlakového vzduchu do spodní příruby a jeho vzdálenost od vlnovce (podrobněji je popsáno v kapitole 7.3.1) a umístění spojovacích šroubů volné příruby v blízkosti ochranného pláště s minimální prostorovou rezervou, což by mohlo způsobit problémy při montáži a eventuálně omezit použití některých montážních nástrojů.

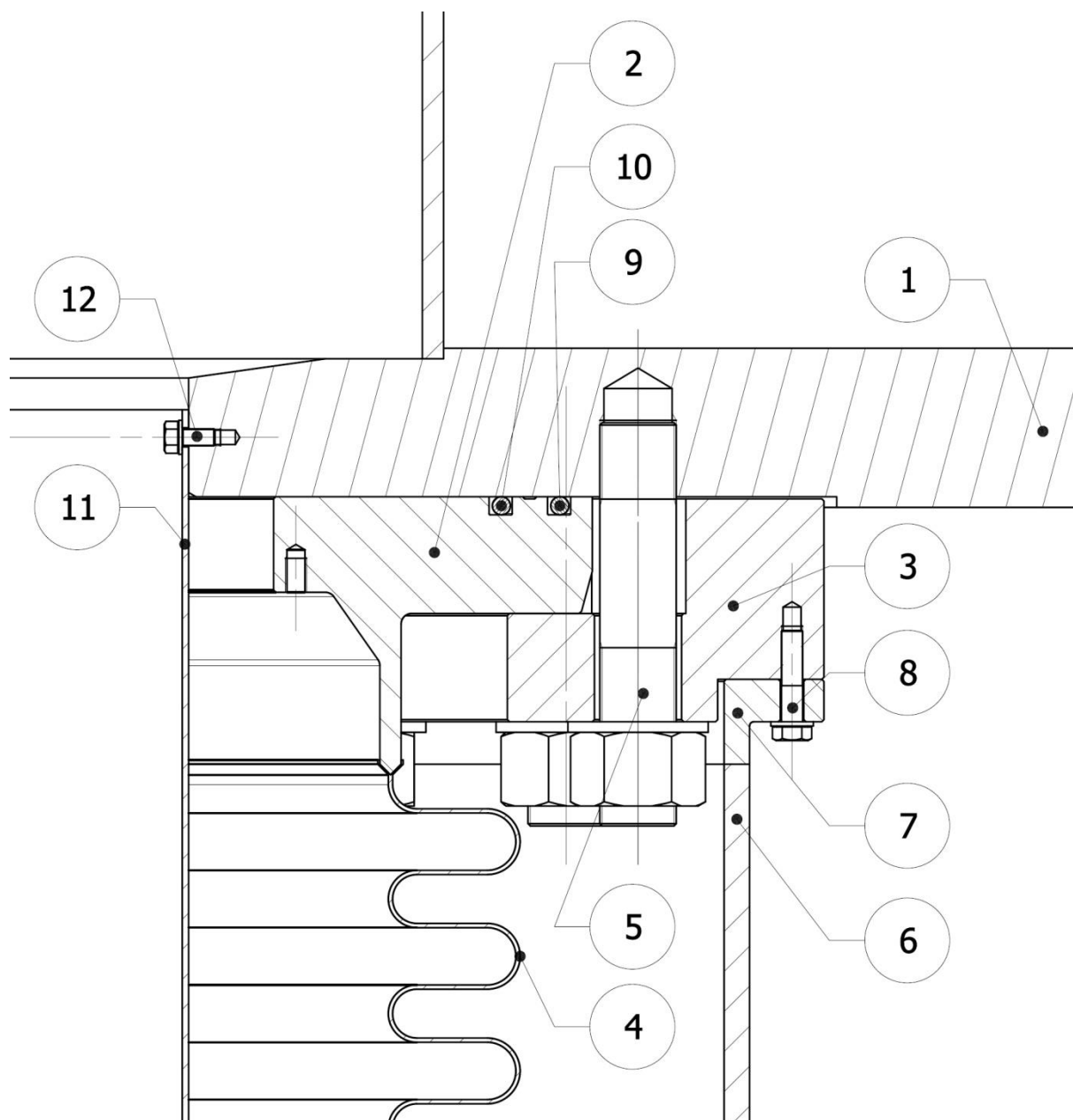
Řešením je zvětšení rozměrů volné příruby a posunutí ochranného plechu a spojovacích šroubů na větší průměr. Rozšíření příruby ovšem brání pružinové závěsy, jejichž roztečný průměr již nelze dále zvětšovat. Přizpůsobit se jim musí tedy tvar volné příruby. V místech, kde se na nosné konstrukci závěsy nachází, bylo vytvořeno vybrání kopírující válcový tvar pouzder pružin. Tímto způsobem se získá větší prostor na volné přírubě a lze tak zvětšit mezeru mezi vlnovcem a ochranným pláštěm na 60 mm. Stejně tak upevňovací šrouby volné příruby lze umístit na roztečný průměr 2124 mm a zvýšit tak vzdálenost osy šroubů od ochranného plechu na 41 mm.

Plochá příruba v tomto případě zůstane naprosto shodná s variantou 1.



Obrázek 5.8 – Vybrání na volné přírubě návrhu 2 (pohled odspodu)

5.3.3 Varianta 3



Obrázek 5.9 – Sestava horní příruby, návrh 3

Ke konstrukčnímu návrhu číslo 3 bylo přistupováno odlišným způsobem a cílem bylo vytvořit variantu zcela nové koncepce s využitím získaných poznatků od předchozích návrhů.

Jedna z nevýhod všech předchozích konstrukčních řešení je umístění hlavních spojovacích svorníků M30 uvnitř prostoru vlnovce. Z pohledu montáže je jejich poloha výhodná, ovšem z provozního hlediska je toto umístění nevhodné. Při provozu vyvážecího zařízení jsou totiž veškeré součásti spoje dlouhodobě vystaveny vodě s obsahem radioaktivních izotopů a H_3BO_3 . To klade zvýšené nároky na korozivzdornost materiálu, pravidelné kontroly a zejména omezuje použití maziva při jejich utahování.

Díky použití těsnění typu HELICOFLEX®, které potřebuje značné síly pro své stlačení, je vyžadováno dosažení vysokých hodnot předpětí ve šroubových spojích a tedy i utahovacích momentů. Proto je použití maziva při utahování šroubů během montáže více než vhodné. Správně použité mazivo snižuje namáhání svorníku na krut během utahování, snižuje místní špičky pnutí v závitech, dostatečné množství maziva pak zabraňuje zvýšenému tření a svařování materiálu za studena (= zadření závitu). Použití maziva během montáže tak celkově zvyšuje životnost celého spoje. [25] Vzhledem k následnému kontaktu šroubových spojů s chladivem BSVP během zavážení paliva je omezen výběr pouze na specializované a velice drahé pasty a tuhá maziva. Chladivo, které přijde do styku s palivovými kazetami, nesmí obsahovat některé vybrané chemické prvky (např. chlor). Mazivo tak musí splňovat některé parametry jako je například vysoká chemická čistota (tzn. minimální obsah kovových slitin, síry, chloru a fluoru) či odolnost proti vodě. Cena takového výrobku je pak několikanásobně vyšší, než u běžných maziv. Podle aktuálního ceníku některých výrobců (MOLYKOTE®, LOCTITE) se cena takto specializovaných past pohybuje v částkách 3 000 Kč – 3 500 Kč za 1 kg (výrobky Loctite 8013 či Molykote P-37), u běžných maziv je to cena více jak 3x nižší. [26, 27].

Výsledkem uvážení výše uvedených poznatků je postavení koncepce příruby tak, aby hlavní svorníky byly umístěny vně vlnovce, tedy v prostoru mimo dosah chladiva. Takovéto uspořádání svorníků znemožňuje použití dalších dodatečných spojovacích elementů na opačné straně těsnění, s čímž se muselo při návrhu počítat.

Zůstal zachován koncept rozdělení příruby na dvě samostatné části – plochou přírubu (pozice 2 v Obrázku 5.9) a volnou (pozice 3). Tím se zmenší plocha příruby, na které je nutno dodržet rovinnost a přířubový spoj jako celek získá větší tuhost. Díky odstranění svorníků na vnitřním průměru ploché příruby mohl být zmenšen vnitřní průměr vlnovce (pozice 4), a to konkrétně na $\varnothing 1738$ mm, oproti původnímu $\varnothing 1762$ mm. Zmenšení je limitováno nutností zachovat prostor na volné přírubě pro umístění držáků kolektoru sprchového systému a zachováním dostatečné mezery mezi vlnovcem a vnitřními ochrannými plášti. Pozice těchto prvků zase naopak musí respektovat, v zadávací dokumentaci předepsanou, minimální volnou šířku prostoru pro transport palivových kazet prostupem, jehož hodnota je stanovena na $\varnothing 1530$ mm. Přivaření vlnovce k volné přírubě je řešeno stejným způsobem jako u předchozích dvou variant.

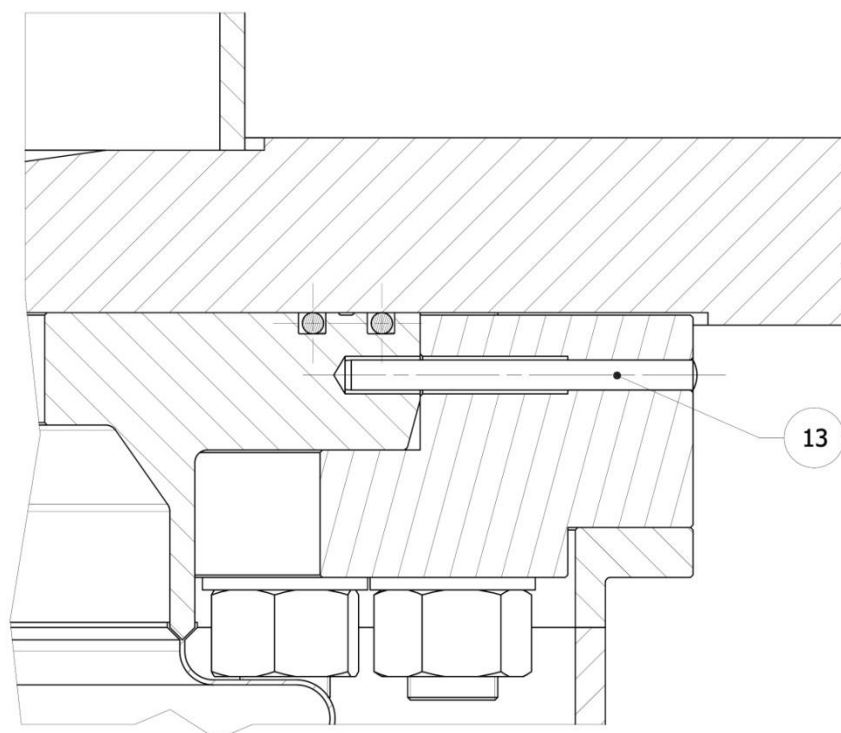
Úkolem volné příruby je uchycení ploché příruby k nosné konstrukci. To je uskutečněno pomocí 24 závrtných šroubů a matic (pozice 5). Volná příruba přitlačuje plochou přírubu prostřednictvím osazení.

Snahou bylo zachovat těsnění HELICOFLEX® (pozice 9 a 10). Přířubový spoj jako celek tak musí zajistit přenos silových účinků od spojovacích šroubů přes volnou přírubu do ploché tak, aby bylo zajištěno předepsané minimální stlačení těsnění a mohla být zaručena těsnost přířubového spoje podle požadavků výrobce těsnění. Volná příruba pro tento účel byla

zvolena proto, že při takovém řešení je možnost vhodnými konstrukčními úpravami zajistit umístění spojovacích elementů co nejbližše těsnění.

Těsnění bylo přemístěno do co největší možné blízkosti místa kontaktu obou přírub, tzn. do blízkosti vnějšího průměru ploché příruby. Tímto krokem vzrostly rozměry těsnících kroužků o 100 mm, tedy z průměrů 1745 mm x 1763,8 mm na 1845 mm x 1863,8 mm u vnitřního a z 1800 mm x 1818,8 mm na 1900 mm x 1918,8 mm u vnějšího kroužku. Byly také použity větší spojovací šrouby než u původních řešení, a to konkrétně závrtné šrouby M36. Zvětšení rozměrů těsnění si totiž vyžádá větší předpětí ve šroubech. Byla také snaha zvětšením šroubů zajistit vhodnější rozložení napětí, které je přenášeno přírubou na těsnění. Nutnost použití větších matic totiž znamená rozšíření jejich stykové plochy s listem příruby. Co největšímu stlačení tuhého těsnění je také přizpůsobena poloha spojovacích šroubů. Ty jsou umístěny co nejbližše tomuto těsnění v těsném sousedství ploché příruby. Šrouby proto neprochází volnou přírubou klasickými otvory (vyjma osazení), ale otvory jsou nahrazeny vybráním na samém okraji příruby (viz příložený výrobní výkres volné příruby). Šroubové spoje se tak mohou umístit až na roztečný průměr 1983 mm. Blíže je již prakticky posunout nelze. Použití závrtných šroubů M36 si vyžádá zvětšení tloušťky nosné konstrukce z původních 50 mm na nových 75 mm.

Pro zvýšení tuhosti bylo potřeba udržet co nejmenší možné průměry přírub při co největší tloušťce jejich listů. To s sebou přineslo nutnost řešit některé konstrukční a montážní problémy. Díky snaze o co nejmenší vnější průměr ploché příruby a umístění spojovacích šroubů na vhodné místo, vyjde vnitřní průměr volné příruby (= průměr osazení) na 1860 mm. To je méně, než je vnější průměr vlnovce (pozice 4), který činí 1872 mm. Je proto bezpodmínečně nutné obě příruby přiložit k sobě ještě dříve, než bude vlnovec přivařen na své místo. Příruby musí být také vzájemně zajištěny, aby po přivaření vlnovce bylo možné je jako celek zdvihnout k místu montáže (k nosné konstrukci). Při samotné montáži ovšem zvolený způsob zajištění nesmí nijak omezovat schopnost volné příruby prostřednictvím osazení přitlačovat plochou přírubu k nosné konstrukci a zajistit tak požadované stlačení těsnění.



Obrázek 5.10 – Zajištění přírub kolíkem

Vzájemné zajištění obou dílu je realizováno pomocí několika kolíků umístěných vodorovně, tedy kolmo k osám přírub. Každý kolík bude procházet volnou přírubou až do příruby ploché. Během manipulace při montáži pak bude volná příruba za tyto kolíky zavěšena na plochou přírubu a spolu s ní zvedána. Následné dotlačení volné příruby při utahování šroubů hlavních šroubových spojů bude zajištěno dostatečně velkými otvory pro kolíky v ploché přírubě, které zajistí možnost pohybu každého kolíku v tomto otvoru v řádech několika mm (viz Obrázek 5.10). Použit bude standardní válcový nezakalený kolík dimenzovaný na stříh podle [28]:

Válcový nezakalený kolík ČSN EN ISO 2338

Materiál: automatová ocel ČSN 11 110.0 s mezí kluzu $R_e = 216$ MPa.

Hmotnost volné příruby, kterou ponosou kolíky při montáži, je 600 kg.

Dovolené namáhání součásti (volena bezpečnost vůči mezi kluzu $k = 1,5$):

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k} = \frac{216}{1,5} = 144 \text{ MPa}$$

$$\tau_D = 0,6 \cdot \sigma_D = 0,6 \cdot 144 = 86,4 \text{ MPa}$$

Pro smyk (za současného ohybu) je pro kruhový průřez maximální smykové napětí rovno

$$\tau_{max} = \alpha \cdot \frac{F}{nS} \leq \tau_D$$

$$\frac{16 \cdot m \cdot g}{3 \cdot n \cdot \pi \cdot d^2} \leq \tau_D$$

$$d \geq \sqrt{\frac{16 \cdot m \cdot g}{3 \cdot n \cdot \pi \cdot \tau_D}}$$

kde n je počet kolíků (zvoleno $n = 4$). Minimální průměr kolíků tak musí být

$$d = \sqrt{\frac{16 \cdot 600 \cdot 9,81}{12 \cdot \pi \cdot 86,4}} = 5,4 \text{ mm}$$

Jelikož bude potřeba kolík dlouhý až 140 mm, tak této délce dle normy vyhovuje až kolík o průměru 12 mm. Díky použití více jak dvojnásobného průměru bude předpokládáno vyhovění kolíku na otláčení.

Vzhledem k nutnosti přivařit vlnovec k ploché přírubě až po sestavení a zajištění obou přírub, je potřeba zajistit přístupnost místa svaru. Aby nebylo nutno zmenšovat tloušťku listu některé z přírub, popřípadě obou, byl prodloužen prstenec, ke kterému se přivařuje vlnovec, o 20 mm. Pro zachování původní délky celého kompenzátoru byl naopak o 20 mm zmenšen střední prstenec mezi vlnovci.

Jako poslední součást je potřeba na přírubu upevnit vnější ochranný plášť (pozice 6 v Obrázku 5.9). Je nutno zachovat prostor pro matice hlavních šroubových spojů přírub, a proto je možné namontovat plášť až po jejich utahení. To vylučuje možnost přivaření ochranného pláště k volné přírubě, jako tomu bylo v předchozích variantách. Uchycení je tedy vyřešeno přivařením pláště k jednoduché malé přírubě (pozice 7) a upevnění celku na volnou přírubu prostřednictvím 16 šroubů M10 (pozice 8). Přístupnost šroubů je zde dobrá, prakticky totožná jako u variant 1 a 2. Opět se předpokládá, že utahování šroubů bude probíhat pomocí 6hranných hlavic upevněných do momentového klíče, proto je mezi hlavou šroubu a

ochranným pláště ponecháno dostatek prostoru pro nasazení hlavice i pro pohyb hlavy momentového klíče.

Přívod stlačeného vzduchu mezi těsnění a do meziprostoru vlnovce řešen stejným způsobem jako u variant 1 a 2.

Celkový průměr soustavy přírub vychází na 2158 mm, takže příruby se vejdu do stejného prostoru jako obě předchozí varianty.

5.3.4 Porovnání variant

Výhody či nevýhody jednotlivých konstrukčních variant již byly naznačeny v předchozích kapitolách. Zde budou shrnuty a vybrána bude optimální varianta, jež bude detailněji rozpracována dále v této práci (tzn. bude proveden pevnostní výpočet, vytvořen výkres sestavy a detailní výrobní výkres jednoho z dílů).

Výhody/nevýhody variant jsou následující:

- Varianta 1
 - + potenciál konstrukce zajistit dostatečné stlačení těsnění HELICOFLEX® (nutno výpočtově ověřit)
 - + přístupnost šroubových spojů
 - + umožnění montáže každého dílu přírubového spoje zvlášť
 - + zmenšení plochy opracovávané na přesnou rovinnost
 - + minimální úpravy navazujících částí prostupu
 - při provozu prostupu umístění svorníků v chladivu
 - použití drahého maziva při utahování šroubů
 - větší celkové rozměry přírubového spoje = vyšší náklady za materiál
 - potřeba použít speciální podložky pod horními maticemi hlavních spojovacích svorníků
 - umístění dodatečných šroubových spojů blízko ochranného pláště
 - minimální rezerva vzdálenosti mezi vlnovcem a přívodem tlakového vzduchu do spodní příruby způsobená umístěním vnějšího ochranného pláště
- Varianta 2

Výhody/nevýhody jsou prakticky totožné s předchozím seznamem, úpravy varianty 2 odstraňují pouze některé nevýhody varianty 1, a to:

- + zvětšení prostoru pro matici dodatečného šroubového spoje volné příruby
 - + zvětšení vzdálenosti mezi přívodem tlakového vzduchu do spodní příruby a vlnovcem posunutím vnějšího ochranného pláště na větší průměr
 - ještě více se zvětší celkové rozměry přírubového spoje
- Varianta 3

- + hlavní šroubové spoje mimo dosah chladiva
- + montáž celé sestavy pouze pomocí jedné sady upevňovacích šroubů
- + přístupnost hlavních šroubových spojů
- + oproti předchozím variantám menší plocha, u které je potřeba dodržet rovinnost
- + minimální úpravy navazujících částí prostupu
- + dostatek prostoru v okolí jednotlivých součástí (ať už z bezpečnostního či montážního hlediska) při zachování přijatelných celkových rozměrů přírubového spoje
- nutnost přivařovat vlnovec na své místo až po složení obou přírub
- použití těsnění větších rozměrů = větší cena a větší utahovací momenty aplikované na šroubové spoje
- obě příruby musí být zdvihnuty do prostoru montáže jako celek (= větší hmotnost montované sestavy)

Náklady na výrobu jednotlivých konstrukčních variant se budou, podle hrubého odhadu, pohybovat prakticky na stejné úrovni. Je použit stejný způsob výroby, stejný materiál, rozměry se u jednotlivých variant až tolik neliší a návrhy obsahují opakující se řešení některých konstrukčních detailů.

Na základě předchozího výčtu je vybrána jako nejvhodnější konstrukční varianta č. 3, která kombinuje výhody předchozích návrhů a eliminuje některé jejich nevýhody. Použitelným řešením je ovšem také varianta 2, která při minimálních změnách původního návrhu umožňuje relativně jednoduchou montáž i při přidání dodatečné sady spojovacích šroubů, které zajistí potřebné chybějící stlačení těsnění typu HELICOFLEX®.

Další kapitoly se budou věnovat pouze variantě 3. Ačkoliv při pohledu na jednotlivé návrhy vypadá jako nejvhodnější, je potřeba ověřit, jestli bude splňovat požadavky na ni kladené. Konkrétně se jedná o její schopnost zajistit dostatečné stlačení obou těsnících kroužků HELICOFLEX®. Tato schopnost bude muset být ověřena výpočtem.

5.4 Pevnostní výpočet

Pevnostní výpočet bude prováděn pro konstrukční variantu č. 3. Je potřeba zjistit, zda celková koncepce příruby a umístění hlavních spojovacích elementů zajistí požadované stlačení těsnění typu HELICOFLEX®. Důležité je prokázat schopnost přírubového spoje, zajistit správnou funkci těsnících kroužků při dodržení podmínek dovoleného namáhání příruby a šroubových spojů. Kritickým místem pro těsnost bude dodržení dostatečného stlačení vnitřního těsnícího kroužku v místě mezi dvěma šroubovými spoji, kam bude primárně zaměřena pozornost. V této práci bude předpokládáno, že u konstrukčních variant 1 a 2 budou požadované tlaky zajištěny použitím dvojice spojovacích svorníků na roztečných průměrech z obou stran těsnění. Tento předpoklad je ale nutné, v případě reálného použití kterékoliv z obou variant, výpočtově prokázat, což již není součástí této práce. Pevnostní výpočet se tak bude týkat pouze varianty číslo tři. Bude se jednat pouze o statický výpočet, seizmická odolnost přírubového spoje hodnocena nebude.

Hodnocení součásti bude provedeno na základě MKP výpočtu vytvořeném v softwaru Abaqus verze 6.12.

Bude proveden pouze statický výpočet horního přírubového spoje pro ověření míry stlačení těsnění.

5.4.1 Provozní zatížení

Během provozu je horní přírubový spoj zatěžován následujícími vlivy:

- 1) Vnitřní přetlak a teplota chladiva (viz Tabulka 5).

Tabulka 5 – Pracovní podmínky

Max. teplota	[°C]	105
Tlak media - nominální režim	[bar]	2,2
Tlak media - tlaková zkouška	[bar]	2,84

- 2) Tíha jednotlivých těles.
- 3) Síla, kterou vyvodí vlnovec na přírubu během stahování do pracovní pozice. Velikost této síly je dána jednoduchým výpočtem ze znalosti tuhosti a zdvihu vlnovce:

$$\text{tuhost } k = 200 \text{ N/mm}$$

$$\text{zdvih } z = 400 \text{ mm}$$

$$F_v = k \cdot z = 200 \cdot 400 = \mathbf{80000 \text{ N}}$$

- 4) Silové účinky působící na přírubový spoj během seizmické události

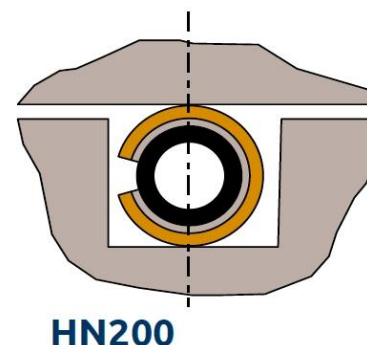
Pro pevnostní výpočet provedený v této diplomové práci nebudou uvažovány všechny tyto vlivy. Těsnění typu HELICOFLEX® je velice tuhé. Pro jeho dostatečné stlačení musí být ve spojovacích šroubech vyvozeno značné předpětí. Silové působení šroubů na příruby je tak mnohonásobně vyšší, než většina ostatních vlivů. Při výpočtu tak nebude uvažován vliv tíhy a vnitřního přetlaku, protože tyto hodnoty jsou v porovnání s předpětím šroubů zanedbatelné.

Výpočet bude informativní a má podat informaci o míře stlačení těsnění. Proto v dalších fázích nebude zjišťována ani odezva přírubového spoje na seizmickou událost.

5.4.2 Výpočet předepnutí šroubů

Výpočet potřebného předepnutí hlavních šroubů přírubového spoje pro těsnění HELICOFLEX® vychází z postupu publikovaného přímo společností Garlock, dodávající tento typ těsnění. Výpočet byl součástí nabídky těsnění pro společnost ŠKODA JS, a.s., také ho lze nalézt v katalogu k danému typu těsnění. [18] Postup převzala společnost Garlock z normy ASME sekce VIII.

Pro aplikaci HELICOFLEX® těsnění na variantu 3 bylo potřeba výsledek přepočítat, jelikož se oproti původnímu návrhu změnilo uložení těsnění (nyní uloženo na větším průměru).



Obrázek 5.11 – Použitý typ těsnění [18]

HN 200 určené pro axiální stlačení v klasické drážce (Obrázek 5.11). Parametry obou těsnění jsou v následujících tabulkách:

Tabulka 6 – Parametry menšího těsnícího kroužku

	Popis	Označení	Jednotky	
Rozměry	Typ			HN 200
	Průměr těsnění	d	[mm]	9,4
	Rozměry těsnění		[mm]	1845x1863,8
	Výpočtový průměr těsnění	D _{j1}	[mm]	1854,4
Materiál	Vnější plášť			stříbro
	Vnitřní plášť			nerezová ocel
	Pružina			Nimonic 90
Parametry	Pracovní bod	Y2	[N/mm]	320
	Minimální zatížení pro udržení těsnosti při 20°C a 1 bar	Y1	[N/mm]	80
	Maximální přijatelný tlak media pro dané těsnění	p _u	[MPa]	150

Tabulka 7 – Parametry většího těsnícího kroužku

	Popis	Označení	Jednotky	
Rozměry	Typ			HN 200
	Průměr těsnění	d	[mm]	9,4
	Rozměry těsnění		[mm]	1900x1918,8
	Výpočtový průměr těsnění	D _{j2}	[mm]	1909,4
Materiál	Vnější plášť			stříbro
	Vnitřní plášť			nerezová ocel
	Pružina			Nimonic 90
Parametry	Pracovní bod	Y2	[N/mm]	320
	Minimální zatížení pro udržení těsnosti při 20°C a 1 bar	Y1	[N/mm]	80
	Maximální přijatelný tlak media pro dané těsnění	p _u	[MPa]	150

Nejdříve je nutno vypočítat požadované zatížení pro těsnění v pracovním bodě:

$$F_j = \pi \cdot (D_{j1} + D_{j2}) \cdot Y_2 = \pi \cdot (1854,4 + 1909,4) \cdot 320 = 3783785 \text{ N}$$

Hydrostatická síla působící na těsnění

$$F_f = \frac{\pi \cdot D_{j1}^2 \cdot p}{4} = \frac{\pi \cdot 1854,4^2 \cdot 0,284}{4} = 767035 \text{ N}$$

Minimální měrná síla na těsnění pro zajištění těsnosti

$$Y_m = \max \left\{ Y_1; Y_2 \cdot \frac{p}{p_u} \right\} = \max \left\{ 80; 320 \cdot \frac{0,284}{93} \right\} = \max \{ 80; 0,98 \}$$

$$Y_m = 80 \text{ N/mm}$$

Pokud $p \cdot (D_{j1} + D_{j2}) \geq 32 \cdot Y_m \rightarrow Y_m = Y_2$; $0,284 \cdot (1854,4 + 1909,4) \geq 32 \cdot 80 \rightarrow 1069 \geq 2560 \rightarrow$ neplatí

Minimální síla pro udržení těsnosti

$$F_m = \pi \cdot (D_{j1} + D_{j2}) \cdot Y_m = \pi \cdot (1854,4 + 1909,4) \cdot 80 = 945946 \text{ N}$$

Celková síla pro zajištění těsnosti

$$F_s = F_f + F_m = 767035 + 945946 = 1712981 \text{ N}$$

Pro maximální teplotu media

$$F_s^* = F_s \frac{E_{20}}{E_t} = 1712981 \cdot \frac{195}{190} = 1758059 \text{ N}$$

$E_{20,t}$ – modul pružnosti materiálu šroubů pro 20°C a maximální provozní teplotu.

Požadovaná síla na šrouby

$$F_B = \max \{ F_s^*; F_j \} = \max \{ 1758059, 3783785 \} = 3783785 \text{ N}$$

5.4.3 Návrh hlavních šroubů

Šrouby jsou vyrobeny z materiálu, který je definován v normě RCC-M M 5110: *Rolled or Forged Bars for the Manufacture of Class 1, 2 and 3 Bolts and Drive Rods*. Jedná se o tvrzenou austenitickou ocel s označením X6 NiCrTiMoVB 25-15-2. Vybrané mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 8. [29]

Tabulka 8 – Mechanické vlastnosti materiálu šroubů [29]

20°C				350°C
Rp0,2	Rm	A	Z	Rp0,2
[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]
600	900	15	35	555

V návrhu bylo uvažováno 24 šroubů na roztečném průměru 1983 mm. Předpětí na jeden šroub se potom rovná

$$F_b = \frac{F_B}{n} = \frac{3783785}{24} = 157658 \text{ N}$$

Dovolené membránové napětí šroubu určuje norma RCC-M a jeho hodnota je stanovena na $\sigma_D = 380 \text{ MPa}$ (blíže viz kapitola 5.4.10). Výpočet minimálního průměru dřívku je tedy následující

$$\frac{F_b}{S_s} \leq \sigma_D$$

$$\frac{F_b}{\frac{\pi \cdot d_s^2}{4}} \leq \sigma_D$$
$$d_s \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F_b}{\pi \cdot \sigma_D}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 157658}{\pi \cdot 380}} = 22,98 \text{ mm}$$

Uvažované hlavní spojovací šrouby M36 ($d_3 = 33 \text{ mm}$) plně vyhovují a lze je tak zatížit potřebným předpětím.

5.4.4 Výpočtový model

Pro MKP výpočet byl vytvořen zjednodušený model přírubového spoje skládající se z ploché příruby, volné příruby, šroubových spojů (šroub, matice, podložka) a součástí nahrazující nosnou konstrukci.

Byla zanedbána dvojice vybrání ve volné přírubě, sloužící pro průchod přírodního potrubí stlačeného vzduchu (viz Obrázek 5.5, pro variantu 3 řešeno shodně) a model byl uvažován osově symetrický. Hodnocena tak byla pouze $\frac{1}{4}$ přírubového spoje se 6 spojovacími šrouby.

Šrouby byly modelovány jako hladký válec o průměru rovnému malému průměru závitu.

Kruhový průřez těsnění byl pro zjednodušení nahrazen čtvercovým o straně délky rovné průměru původního průřezu. Důvod této změny je uveden v následující podkapitole 5.4.5.

Pro zjednodušení modelu nebyly uvažovány ani tvarové detaily jako sražení či zaoblení hran.

Obrázky zobrazující vzhled modelu jsou uvedeny v příloze.

5.4.5 Materiály

Materiál byl definován pro jednotlivé součásti přírubového spoje takto:

1) Příruby a nosná konstrukce

Hodnocení těchto součástí probíhá pouze vůči mezi kluzu. Plně tedy postačí definovat modul pružnosti v tahu pro daný materiál.

Jelikož nebylo možno hodnotu pro konkrétní materiál přírub dohledat, použit byl standardní modul pružnosti pro ocel $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$.

2) Šrouby, podložky a matice

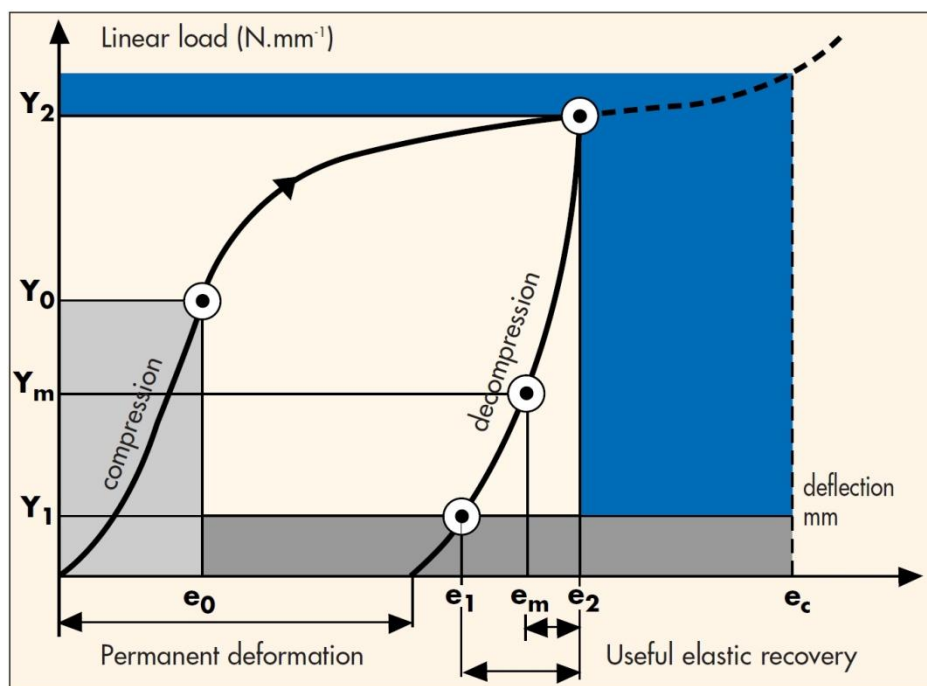
Součásti se opět hodnotí pouze k mezi kluzu. Modul pružnosti v tahu pro materiál šroubů je $E = 1,95 \cdot 10^5 \text{ MPa}$. [30]

3) Těsnění

Pro definici těsnění nelze použít lineární materiál, jako v předchozích případech. Je potřeba definovat chování materiálu těsnění jak během stlačování, tak během odlehčování, jelikož materiál těsnění se vyznačuje elasticko-plastickým chováním s hysterezí zatěžovací a odlehčovací větve. Chování těsnění typu HELICOFLEX® je zobrazeno v grafu č 3.

Pro precizní definici pracovní křivky by bylo potřeba provést měření na konkrétním těsnění. To probíhá například tak, že těsnění je umístěno do měřicího standu, přičemž z jedné strany těsnění je pevná podložka, z druhé strany působí pohyblivý píst. Píst působí na těsnění

v krocích se zvyšující silou, přičemž se v každém kroku měří posuv pístu (= stlačení těsnění). To samé se opakuje během odlehčování. Získá se tak konkrétní pracovní křivka těsnění.



Graf 3 – Pracovní křivka těsnění HELICOFLEX® [18]

To v rámci této práce nebylo samozřejmě možné, proto pár bodů křivky bylo získáno z údajů v katalogu pro daný typ těsnění. Bylo nutné je přepočítat pro danou aplikaci. V katalogu je totiž uvedeno zatížení těsnění ve tvaru měrné síly na jednotku jeho délky [N/mm], kdežto zadání v softwaru Abaqus vyžaduje přepočet na tlak, který danou deformaci těsnění vyvolá, tedy [N/mm²]. To je důvod, proč byl v modelu použit čtvercový průřez těsnění. U kruhového průřezu se totiž během stlačování mění plocha, na kterou působí síla vyvozující dané stlačení. Přepočet síly na tlak je proto složitý. U čtvercového těsnění lze stlačovanou plochu považovat stále stejnou. Po zadání správných hodnot se pak těsnění čtvercového průřezu bude chovat naprosto stejně, jako by se choval model reálného těsnění.

Přepočet jednoho bodu zátěžové křivky je následující (vybrán byl ideální pracovní bod charakteristiky):

Měrná síla na jednotku délky $Y_2 = 320 \text{ N/mm}$ vyvolá stlačení těsnění o 0,9 mm.

Délka těsnění na výpočtovém průměru pro oba „kroužky“:

$$l_{t1} = \pi \cdot D_{j1} = \pi \cdot 1854,4 = 5825,8 \text{ mm}$$

$$l_{t2} = \pi \cdot D_{j2} = \pi \cdot 1909,4 = 5998,6 \text{ mm}$$

Síla působící po celém obvodu těsnění:

$$F_{o1} = Y_2 \cdot l_{t1} = 320 \cdot 5825,8 = 1864256 \text{ N}$$

$$F_{o2} = Y_2 \cdot l_{t2} = 320 \cdot 5998,6 = 1919552 \text{ N}$$

Plocha použitého modelu těsnění (mezikruží):

$$S_{t1} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{v1}^2 - D_{m1}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (1863,8^2 - 1845^2) = 54762,2 \text{ N}$$

$$S_{t1} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{v2}^2 - D_{m2}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (1918,8^2 - 1900^2) = 56386,4 \text{ N}$$

Tlak na plochu těsnění způsobující deformaci 0,9 mm:

$$p_{t1} = \frac{F_{o1}}{S_{t1}} = \frac{1864256}{54762,2} = 34 \text{ MPa}$$

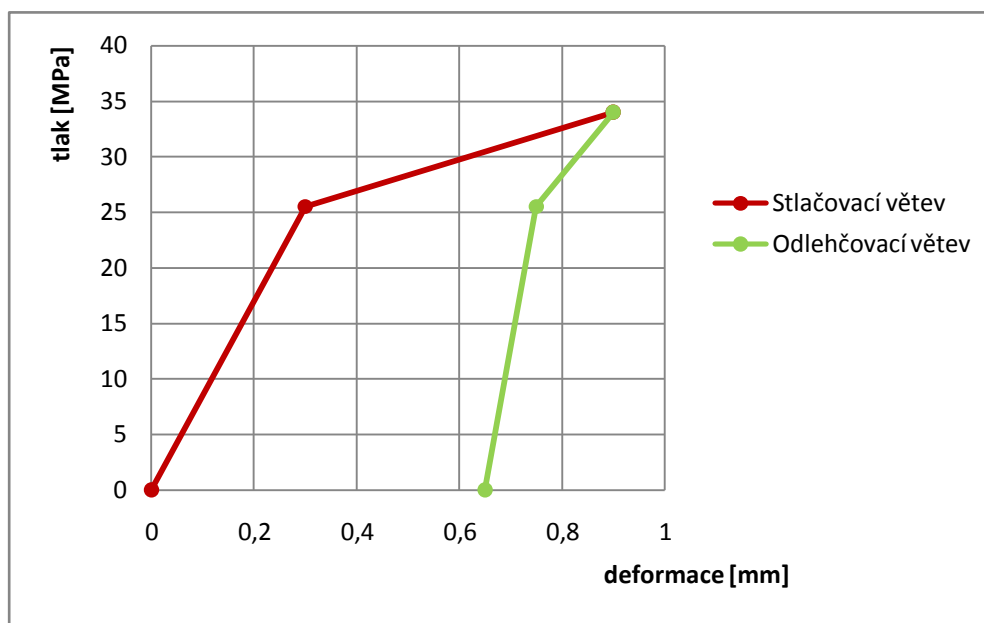
$$p_{t2} = \frac{F_{o2}}{S_{t2}} = \frac{1919552}{56386,4} = 34 \text{ MPa}$$

Výpočet pro obě těsnění měl potvrdit získanou hodnotu, jelikož tlak nutný ke stlačení o danou velikost musí být pro obě těsnění stejný, což se také potvrdilo. Zbylé hodnoty zadávané do Abaqusu byly počítány stejným způsobem a jsou uvedeny v následující Tabulce 9. Pracovní křivka těsnění, se kterou probíhal výpočet, je vykreslena v Grafu 4.

Tabulka 9 – Závislost deformace těsnění na tlaku

Stlačovací větev		
Bod křivky [-]	Tlak [MPa]	Stlačení [mm]
1	0	0
2	25,5	0,3
3	34	0,9

Odlehčovací větev		
Bod křivky [-]	Tlak [MPa]	Stlačení [mm]
1	34	0,9
2	25,5	0,75
3	0	0,65

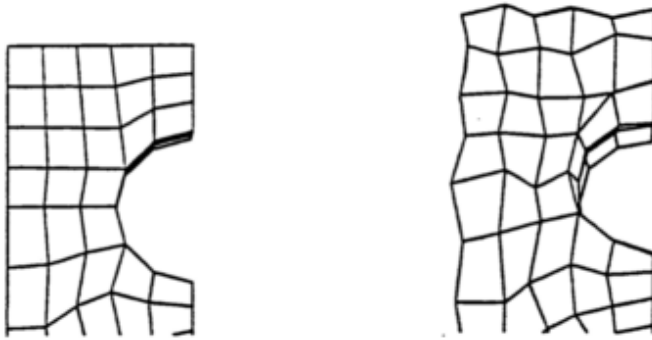


Graf 4 – Pracovní křivka těsnění zadávaná do výpočtu

5.4.6 Síť

1) Příruby a nosná konstrukce

Na síťování modelu přírub a nosné konstrukce byly použity lineární objemové prvky, označované v Abaqusu jako C3D8R. Přesněji se jedná o 8-uzlový lineární prvek s redukovanou integrací. Díky redukované integraci elementů konverguje výpočet k výsledku



Obrázek 5.12 – Hourglassing [41]

sice rychleji, ale může docházet u zdeformovaných elementů k tzv. hourglassingu. Ten způsobuje dodatečnou a nechtěnou deformaci jednotlivých elementů a může vést k nesprávným výsledkům (viz Obrázek 5.12). Pro zmírnění tohoto jevu je nutno dodržet pravidlo alespoň čtyř elementů po tloušťce jednotlivých dílů výpočtového modelu.

Také bylo dodržováno zjemnění sítě v místech kontaktů.

2) Šrouby, podložky a matice

Sít' těchto částí byla tvořena opět prvky C3D8R.

Pro dostatečně přesné výsledky postačuje použít šest prvků po průřezu šroubu.

Sít' matice může být vytvořena co nejjednodušší. Jsou použity normalizované šrouby. Lze tedy učinit předpoklad, že pokud pevnostně vyhoví šroub, matice určitě také.

3) Těsnění

Pro vytvoření sítě těsnění bylo použito prvků určených v Abaqusu přímo pro tento účel. Jedná se o 8-uzlový třírozměrný prvek pro těsnění, označení GK3D8.

Jelikož je již předchozím nastavením definováno, jak se tento prvek má deformovat (viz 5.4.5), postačí pouze jeden element po průřezu těsnění.

5.4.7 Vazby a kontakty

1) Vazby

Na modelu byly použity pevné vazby (tie) na následujících místech:

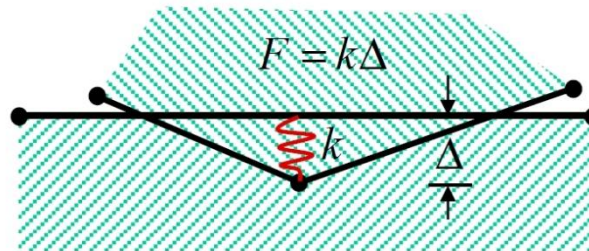
- Pevnou vazbou byly nahrazeny závity, tzn. byla použita mezi *maticí – šroubem* a *šroubem – otvorem v nosné konstrukci*.
- *Matice – podložky*.
- Spodní plocha *těsnění – drážka* v ploché přírubě.

2) Kontakty

- Horní plocha *ploché příruby* – spodní plocha *nosné konstrukce*.
- Horní plocha *volné příruby* – spodní plocha *nosné konstrukce*.
- Dotýkající se plochy přírub, tedy *osazení volné příruby – plochá příruba* a *čelní plochy* obou přírub.
- *Podložky – volná příruba*.
- Horní plocha *těsnění* – spodní plocha *nosné konstrukce*.

Kontakt byl definován jako „surface-to-surface.“

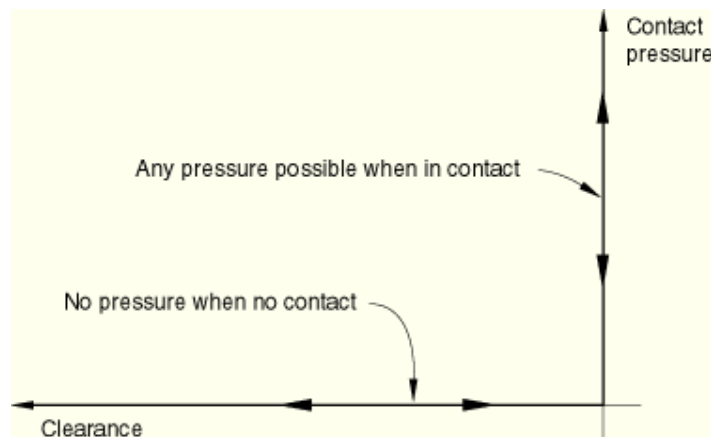
V tečném směru kontaktu byl nastaven koeficient tření na 0,1 a tzv. funkce Penalty. Definice kontaktu metodou Penalty zjednodušeně znamená, že pokud se v modelu vyskytne průnik či skluz dvou kontaktních ploch, je tento nahrazen skupinou lineárních pružin, které silou, ekvivalentní jejich definované tuhosti k a hloubkou průniku (či délkou skluzu) Δ , vrací tyto plochy do původní polohy jejich přímého kontaktu (viz Obrázek 5.13).



Obrázek 5.13 – Princip kontaktu s funkcí „penalty“ [42]

V normálovém směru je vzájemná interakce kontaktů nastavena na tzv. „Hard“ Contact, což jednoduše znamená, že pokud je mezi kontaktními plochami mezera, není přenášen vůbec žádný tlak, po odstranění vůle mezi kontakty může být plochami přenášén nekonečně velký tlak (Obrázek 5.14).

Zobrazení nastavení kontaktů je v příloze č. 2.



Obrázek 5.14 – „Hard“ kontakt [43]

5.4.8 Okrajové podmínky

Byly nastaveny následující okrajové podmínky:

- Nulový posuv ve všech směrech na horní ploše nosné konstrukce (simulace uchycení nosné konstrukce ke stropu zakládací haly).
- Podmínky symetrie jako nastavení nulového posuvu v normálovém směru k rovinám symetrie součástí.

Nastavení okrajových podmínek je graficky znázorněno v příloze 2.

5.4.9 Definice úlohy

Jedná se o statickou úlohu v názvosloví Abaqusu definovanou jako „General,“ tedy kompletní pevnostní MKP výpočet. Nastavení úlohy bylo ponecháno defaultní.

5.4.10 Výsledky a jejich hodnocení

Dle specifikace zákazníka má být hodnocení součásti prováděno podle normy KTA 3902 nebo dle normy RCC-M, v závislosti na provozním zatěžování součástí. Dle normy RCC-M se mají hodnotit ty součásti, jež jsou v kontaktu s chladičem BSVP nebo se nacházejí na tzv. hlavní zátěžné cestě. Podle normy KTA se pak hodnotí zbytek součástí.

Jelikož část hodnocených dílů je v kontaktu s vodou (nosná konstrukce, plochá příruba) a zbytek se nachází na hlavní zátěžné cestě (volná příruba, hlavní šroubové spoje), může být přírubový spoj hodnocen pouze podle normy RCC-M.

Přesněji se jedná o RCC-M: Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Island. Hodnocené součásti patří do Subsection „C“ : Class 2 Components a podle druhu zatěžování jsou zařazeny do Level A, kam patří součásti namáhané běžným způsobem (ohyb, tah, tlak, ...), ovšem při nestandardních podmínkách (tlaková zkouška, kontakt s kapalinou). Dovolené namáhání takovéto součásti je pak definováno v kapitole číslo C 3284.9. [31]

Stanovení dovoleného namáhání dle normy RCC-M probíhá tak, že pro každý materiál, který musí být taktéž definovaný v normách RCC-M, je známa hodnota tzv. základní přípustné intenzity napětí (Allowable Basic Stress Intensity) S_m [MPa]. Pro každou kategorii napětí je pak definována dovolená hodnota namáhání jako násobek této intenzity.

1) Příruby

Příruby jsou kované z materiálu Z2 CN 18-10 (viz kapitola 5.2). Hodnoty dovoleného namáhání jsou uvedeny v tabulce

Tabulka 10 – Dovolené namáhání přírub

Příruby			
veličina	jednotky	limit	hodnota
S_m	[MPa]	-	114
σ_D membránové	[MPa]	$2 \cdot S_m$	228
σ_D membránové + ohybové	[MPa]	$3 \cdot S_m$	342

Maximální vypočtená hodnota napětí přírub:

Tabulka 11 – Maximální napětí v přírubách

Příruby	
díl	σ_{max} [MPa]
plochá příruba	162,2
volná příruba	268

2) Nosná konstrukce

Nosná konstrukce bude vyrobena z plechu ze shodného materiálu jako příruby. Hodnoty dovoleného namáhání jsou potom:

Tabulka 12 – Dovolené namáhání nosné konstrukce

Nosná konstrukce			
veličina	jednotky	limit	hodnota
S_m	[MPa]	-	115
σ_D membránové	[MPa]	2·Sm	230
σ_D membránové + ohybové	[MPa]	3·Sm	345

Maximální napětí:

Tabulka 13 – Maximální napětí v nosné konstrukci

Nosná konstrukce	
díl	σ_{max} [MPa]
nosná konstrukce	161

3) Šrouby

Materiál šroubů nese označení X6 NiCrTiMoVB 25-15-2 (viz 5.4.3). Hodnoty dovoleného namáhání pro tento materiál:

Tabulka 14 – Dovolené namáhání šroubů a přírub

Šrouby + podložky				
veličina	jednotky	limit	hodnota	
T	[°C]	-	50	100
S_m	[MPa]	-	194	190
σ_D membránové	[MPa]	2·Sm	388	380
σ_D membránové + ohybové	[MPa]	3·Sm	582	570

Vyhodnocením modelu bylo zjištěno, že šrouby jsou namáhány nejen membránovým napětím, ale v relativně velké míře i ohybem. Vzniká tak kombinované namáhání tah-ohyb, přičemž výsledná hodnota napětí je rovna

$$\sigma_c = \sigma_m + \sigma_{My} + \sigma_{Mz}$$

Kde σ_m = membránové napětí, σ_M = napětí od ohybového momentu ve směru osy z a y.

$$\sigma_m = \frac{N}{S} = \frac{N}{\frac{\pi \cdot d_3^2}{4}}$$

N – normálová síla v [N]

d_3 – malý průměr závitu v [mm]

$$\sigma_{M_{y,z}} = \frac{M_{oy,z}}{W_o} = \frac{M_{oy,z}}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{32}}$$

$M_{oy,z}$ – ohybový moment ve směru osy y a z v [Nmm]

W_o – modul průřezu v ohybu v [mm³]

Hodnoty získané z MKP výpočtu pro všechny šrouby jsou uvedeny v následující tabulce 15. Velikosti momentů a sil byly odečteny v oblasti nad místem uložení šroubu v nosné konstrukci, která je namáhána nejvíce.

Tabulka 15 – Zatížení šroubů

Šrouby									
díl	N [N]	S [mm ²]	σ_m [MPa]	M_{oy} [Nmm]	M_{oz} [Nmm]	W_o [MPa]	σ_{My} [MPa]	σ_{Mz} [MPa]	σ_c [MPa]
šroub 1	157663	855,3	184,336	826480	109353	3528,1	234,256	30,9949	449,588
šroub 2	157663	855,3	184,336	768336	318120	3528,1	217,776	90,1675	492,28
šroub 3	157663	855,3	184,336	661705	507623	3528,1	187,553	143,88	515,769
šroub 4	157663	855,3	184,336	657664	501976	3528,1	186,407	142,279	513,023
šroub 5	157664	855,3	184,338	768880	316617	3528,1	217,93	89,7415	492,009
šroub 6	157667	855,3	184,341	828832	107934	3528,1	234,923	30,5927	449,857

4) Podložky

Podložky jsou zhotoveny ze stejného materiálu jako šrouby. Dovolené namáhání je tedy s nimi shodné (viz Tabulka 14) a hodnoty napětí získané výpočtem jsou potom:

Tabulka 16 – Maximální napětí v podložkách

Podložky	
díl	σ_{max} [MPa]
podložka 1	252,8
podložka 2	249,2
podložka 3	249
podložka 4	250
podložka 5	249,7
podložka 6	249,8

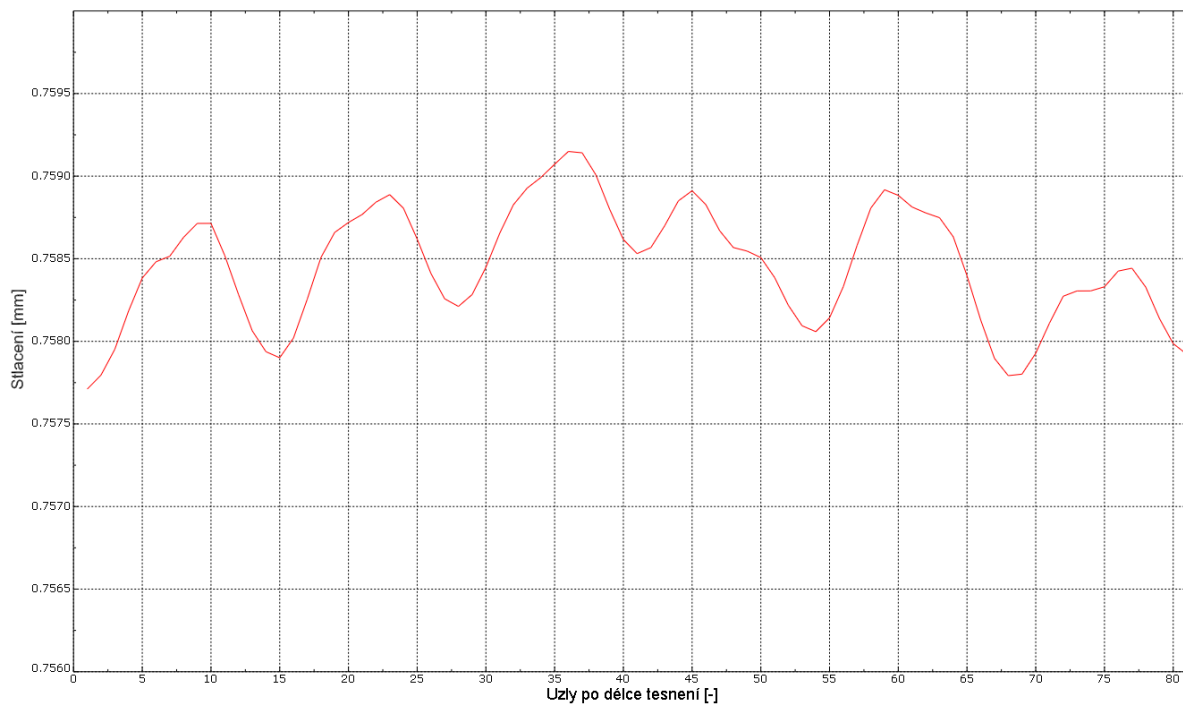
Vyhodnocení jednotlivých dílů přírubového spoje je shrnuto v následující tabulce:

Tabulka 17 – Vyhodnocení pevnostního výpočtu

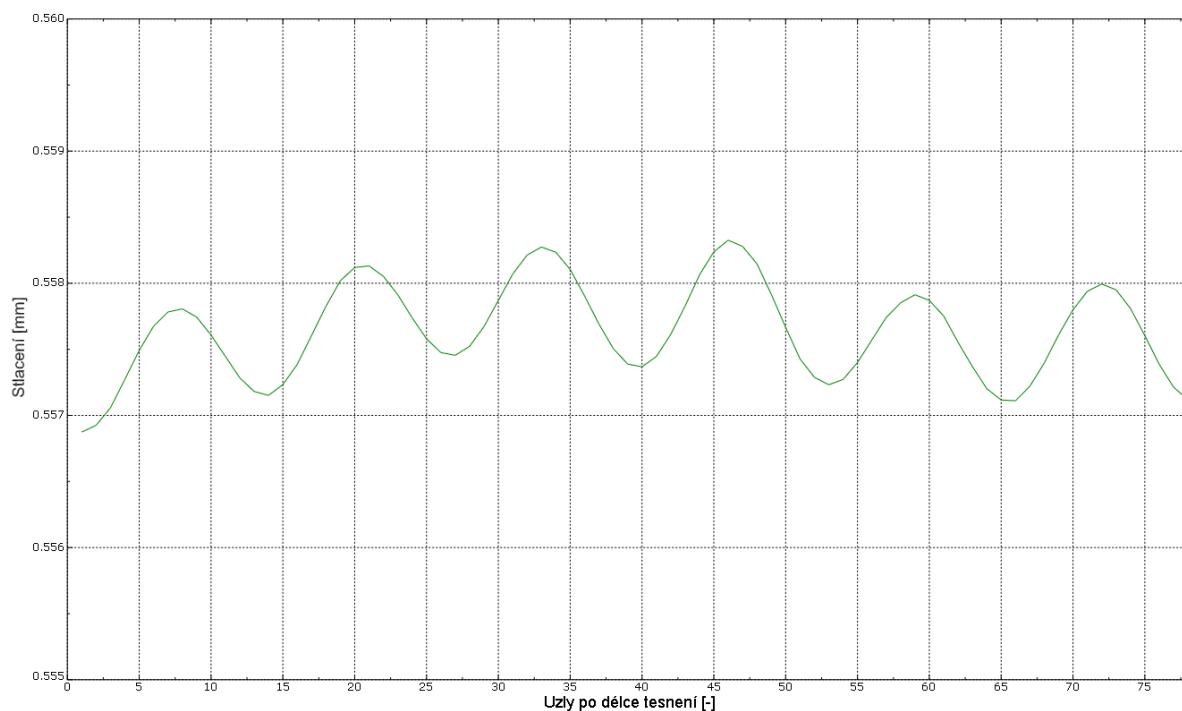
díl	σ_{max} [MPa]	σ_D [MPa]	vyhodnocení
plochá příruba	162	342	vyhovuje
volná příruba	268	342	vyhovuje
nosná konstrukce	161	342	vyhovuje
šroub 1	450	570	vyhovuje
šroub 2	492	570	vyhovuje
šroub 3	516	570	vyhovuje
šroub 4	513	570	vyhovuje
šroub 5	492	570	vyhovuje
šroub 6	450	570	vyhovuje
podložka 1	253	380	vyhovuje
podložka 2	249	380	vyhovuje
podložka 3	249	380	vyhovuje
podložka 4	250	380	vyhovuje
podložka 5	250	380	vyhovuje
podložka 6	250	380	vyhovuje

Kategorizace napětí pro jednotlivé díly nebyla prováděna. Maximální hodnoty napětí, uvedené v tabulce, byly odečítány ze špiček v dané součásti. Tyto špičky mohou být způsobeny například chybějícím sražením hran v modelu apod. V reálné součásti by se takto vysoké napětí nevyskytovalo. Ve výpočtu je však toto špičkové napětí vždy pod limitem pro danou součást, proto lze vyvodit předpoklad, že součást nepřekročí povolenou mez ani v žádné jiné kategorii napětí.

Nejdůležitějším výsledkem MKP výpočtu je zhodnocení stlačení těsnění pro danou konstrukční variantu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v grafech 5 a 6 pro oba těsnící kroužky.



Graf 5 – Stlačení těsnění 1 (blíže ke šroubům)



Graf 6 – Stlačení těsnění 2

Z MKP výpočtu vyplývá, že díky značné tuhosti těsnění HELICOFLEX® dojde při utažení šroubových spojů k podobnému jevu, jako u původního řešení. Sestava přírub není stlačena rovnoměrně, ale odporem těsnění dochází k jejímu ohybu. Oba těsnící kroužky tak také nejsou stlačovány rovnoměrně, jak je patrné na přiloženém obrázku deformace těsnění (Obrázek 5.15). Pro graf byly vybrány hodnoty posuvu na méně stlačené straně těsnění. Osa x

6 Spodní příruba

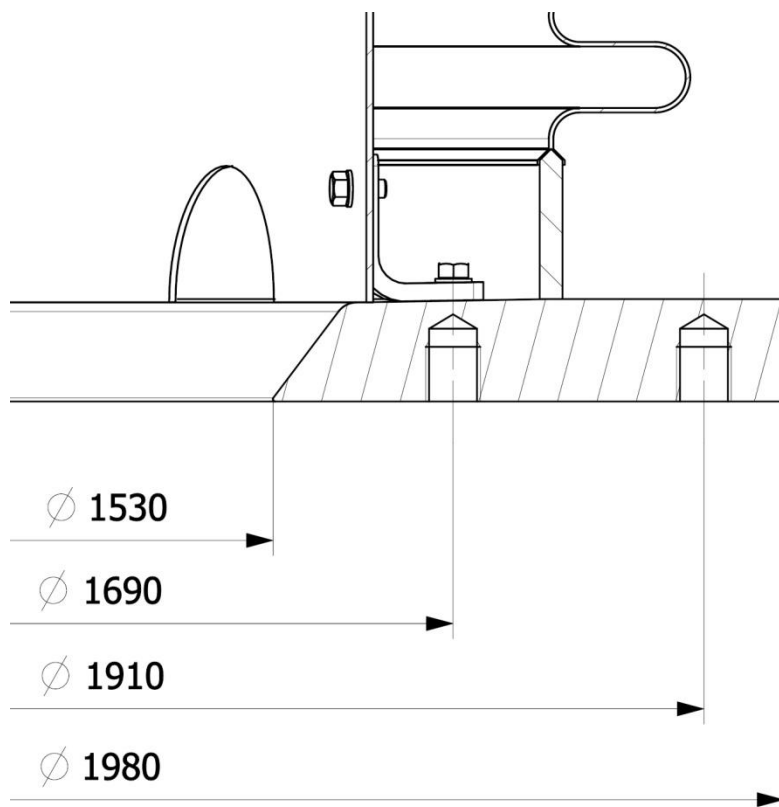
K dolnímu konci vlnovce je přivařena spodní příruba. Je důležitá především proto, že jsou k ní uchyceny navazující části prostupu. Pro spodní přírubu vlnovce platí stejné provozní podmínky jako pro horní a jsou tak na ní kladené i totožné nároky. To znamená především zajištění hermetičnosti všech spojů, které přijdou do kontaktu s chladivem, a to při zachování konceptu dvojitéch bariér včetně umožnění kontroly těsnosti stlačeným vzduchem.

Spodní příruba musí umožnit montáž dvou důležitých součástí – těsnicí a krycí příruby. Obě jsou klíčové s ohledem na funkčnost prostupu. Těsnicí příruba musí zajistit spolehlivé spojení prostupu a všech používaných typů kontejnerů pro vyhořelé palivo. Krycí příruba pak obsahuje prvky sloužící k zachycení a stažení vlnovce vyvážecím strojem. Více informací lze zjistit v podkapitolách 3.1.2 a 3.2 v této práci. Součástí příruby musí být taktéž monitorovací kanálky pro přívod kontrolního stlačeného vzduchu do meziprostoru vlnovce a ke dvojici těsnění zajišťující hermetičnost spoje spodní a těsnicí příruby. Posledním prvkem návrhu příruby musí být řešení uchycení spodního vnitřního ochranného pláště vlnovce.

Spodní příruba je mnohem lépe přístupná, tudíž se eliminují problémy vyskytující se u příruby horní. Stále je sice umístěna ve výšce několika metrů od podlahy zavážecí haly, ovšem téměř o 1,5 metru níže (výška vlnovce včetně přírub je 1295 mm), ale hlavně již není umístěna v nepřístupném prostoru. Dispozičně je sice také umístěna uvnitř prostoru pro vlnovec, ovšem pouze několik centimetrů od jeho dolního okraje (cca 20 cm). Navazující prvky se pak montují na spodní plochu příruby. Příruba je tak pro všechny montážní operace perfektně přístupná a není zde žádné významné omezení, jako tomu je u příruby horní.

6.1 Původní konstrukce ŠKODA JS, a.s.

Původní konstrukce dolní příruby se v mnoha ohledech přibližuje přírubě horní. Jedná se



Obrázek 6.1 – Původní konstrukce spodní příruby

opět o plochou přírubu, jejíž polotovár je plech z nerezové oceli tloušťky 50 mm. Vnější průměr příruby je 1980 mm, vnitřní pak 1530 mm. Vlnovec je k přírubě přivařen, a to stejným způsobem jako u příruby horní, tzn. prostřednictvím spojovacího prstence. Součástí příruby je také několik desítek otvorů, určených zejména pro montáž dalších součástí. Nejdůležitější je 2x24 závitových otvorů M24 na dvou roztečných kružnicích o $\varnothing 1690$ mm a $\varnothing 1910$ mm sloužící k uchycení krycí a těsnicí příruby. Dále jsou zde opět monitorovací kanálky. Jedním z nich je kanálek $\varnothing 6$ mm pro přívod monitorovacího vzduchu do prostoru mezi dvojicí těsnění na těsnicí přírubě (jež zajišťují těsnost mezi spodní a krycí přírubou). Zajímavostí je, že do tohoto prostoru ústí další kanálek procházející těsnicí přírubou až k její dolní části, k místu spojení této příruby a spodního krytu penetrace. Jedním přívodem kontrolního média do spodní příruby je tak kontrolována hned dvojice těsněných ploch. Dalším typem kanálek o $\varnothing 5$ mm je pak na dvou protilehlých místech přiváděno do meziprostoru vlnovců helium. Tyto kanálky ústí na spodní ploše příruby a oba jsou zakončeny trubkovým závitem G1/8. Vstupy se závitem G1/8 a rozváděcí kanálky jsou využívány pouze během prokazování těsnosti kompenzátoru, při provozu jsou trvale zaslepeny.

V přírubě je vyvrtáno 12 závitových otvorů M8 pro uchycení držáků vnitřního spodního ochranného plechu. Plocha, na kterou se otvory zhotovují, pak bohužel musí být skloněna o určitý úhel (zde 1°), aby v těchto místech nedocházelo k zadržování chladiva z bazénu skladování po drenáži vnitřního prostoru vlnovce. Ze stejného důvodu jsou na spodní hraně ochranného plechu zhotoveny půlkruhové otvory.

6.1.1 Těsnění

Těsnění není přímou součástí spodní příruby, ale je nutné pro zajištění hermetičnosti spoje s navazující součástí. Jak již bylo zmíněno, montáž probíhá na zařízení ve svislé poloze a těsnění tak musí být logicky uloženo v drážkách na horní ploše spodního protikusy, který tvoří příruba těsnicí. V původní konstrukci jsou respektovány požadavky zákazníka a použity jsou O-kroužky z EPDM pryže. Vzniká tak ale povinnost jejich pravidelné výměny.

6.1.2 Montáž

Pokud je příruba charakterizována s hlediska složitosti montážních operací, tak se tato charakteristika netýká přímo montáže příruby, ale montáže navazujících prvků na tuto přírubu. Příruba je totiž přivařena přímo k vlnovci, který je v tuto dobu již upevněn pomocí horní příruby k nosné konstrukci. Poloha a konstrukční řešení spodní příruby pak musí umožnit montáž veškerých potřebných součástí.

Již před montáží celého vlnovce k nosné konstrukci musí dojít k upevnění dolního vnitřního ochranného pláště na spodní přírubu. Z důvodu bezpečnosti musí být tento umístěn až za horním vnitřním pláštěm. Je to z toho důvodu, že kdyby během spouštění palivové kazety do kontejneru na vyhořelé palivo došlo k vychýlení prostupu či samotné kazety mimo původní osu, tak ani v tomto případě se nesmí spouštěné kazetě v cestě vyskytnout žádná překážka. Jelikož je vnější plášť umístěn přímo na nosné konstrukci a spodní musí být „schovaný“ za ním, po montáži vlnovce by již nebyla žádná možnost dostat spodní vnitřní krycí plášť na své místo.

V další fázi je pomocí 24 šroubů M24 usazena na své místo krycí příruba, k níž jsou následně upevněny tažné tyče pružinových závěsů pomocí závitů na jejich konci a matic. Tím je celý vnější prostor vlnovce uzavřen. Prostup je pak zabezpečen zajištěním aretačních tyčí v místech k tomu určených (na krycí přírubě). Všechny úkony jsou prováděny směrem odspodu, kde nic nebrání přístupu personálu k důležitým uzlům. Jedna z posledních součástí se montuje těsnicí příruba, a to stejným způsobem jako předchozí krycí (tzn. odspodu pomocí

čtyřicet šroubů M24). Na závěr se celý prostup uzavře spodním krytem uchyceným právě k těsnicí přírubě.

6.1.3 Problémy

Vzhledem ke shodné koncepci obou přírub vyskytují se i zde problémy podobného rázu jako u příruby horní. Přivařením spojovacího prstence k listu příruby dochází opět k její deformaci. Navíc požadovaná rovinnost je zde potřeba dodržet na ještě větší ploše, než je tomu u příruby horní (původní horní příruba má rozměry $\varnothing 1624$ mm x $\varnothing 2026$ mm, spodní $\varnothing 1530$ mm x $\varnothing 1980$ mm). Na druhou stranu zde již není na tuto rovinnost tak přísný požadavek.

Deformace příruby následkem tepelného namáhání při svařování je prakticky jediná nepříjemnost původního řešení společnosti ŠKODA JS a.s. Problém utěsnění spoje s těsnicí přírubou se zde nevyskytuje. Použitím pryžových O-kroužků se značně eliminovali předepínací síly šroubů a potřebné stlačení těsnících elementů není pro konstrukci problém. Výměna těsnění po určité době provozu je, díky snadnému přístupu a nutnosti demontáže pouze těsnicí příruby, úkon bez větších problémů zvládnutelný a nijak tedy neomezuje použití zvoleného typu těsnění.

7 Optimalizace spodní příruby

Jako již mnohokrát při popisu původního konstrukčního řešení spodní příruby i zde je potřeba zdůraznit, že spodní příruba je nedílnou součástí vlnovce stejně jako horní. Pracuje tak v totožných podmínkách, tudíž požadavky na její konstrukci nebudou nijak odlišné a budou sledovat vývoj příruby na opačném konci vlnovce.

Pokud se zohlední nedostatky příruby shrnuté v podkapitole 6.1.3, je zřejmé, že stávající konstrukční řešení nevyžaduje mnoho úprav a změn. Mimo změn v tuhosti příruby bylo původní konstrukční řešení shledáno jako vyhovující a jeho optimalizace je tak chápána ne jako provedení změn ke zdokonalení stávajícího řešení, ale spíše jako provedení nutných úprav pro přizpůsobení příruby změnám konstrukčního řešení příruby horní. V prvních kapitolách budou opět popsány změny shodné pro všechny varianty.

7.1 Těsnění

Možnosti výběru těsnění byly již shrnuty ve stejnojmenné kapitole týkající se horní příruby (5.1). Z analýzy vyplynulo, že použitelné jsou dva druhy těsnění - HELICOFLEX® a pryžový O-kroužek z EPDM. Poznatky v kapitole uvedené jsou plně aplikovatelné i na problematiku utěsnění spoje mezi spodní přírubou a těsnící přírubou.

V případě spodní příruby je ovšem z praktických a ekonomických důvodů vyloučené i použití těsnění typu HELICOFLEX®. Těsnění by sice umožnilo omezit jeho výměny, či úplně se jim vyhnout, to ovšem nemá v tomto případě žádný praktický význam. Pravidelná údržba těsnění nepředstavuje v případě spodní příruby žádný problém a je relativně lehce zvládnutelná. Demontáž se týká totiž pouze 24 šroubů držící těsnící přírubu, které jsou přístupné okamžitě přímo ze základací haly. V poprávkové specifikaci se dokonce uvažovalo s použitím rozdílných těsnících přírub pro různé typy kontejnerů. Příruby se pak měly před každou vyvážecí operací měnit (ŠKODA JS, a.s. výměny použitím speciálního adaptéru omezila pouze na údržbu těsnění – viz 3.1.2). Z toho je patrné, že výměna těsnění po uplynutí jeho životnosti je naprosto běžná a zvládnutelná operace. Použití těsnění typu HELICOFLEX® by navíc znamenalo provést konstrukční změny pro zajištění jeho dostatečného stlačení, což je evidentně velice nelehký úkol (viz optimalizace horní příruby). Proti použití tohoto speciálního kovového těsnění hovoří v neposlední řadě taktéž velmi vysoká cena, přičemž získané výhody v porovnání s touto částkou nejsou v tomto případě ani zdaleka ekvivalentní.

Použití těsnění z EPDM pryže je tedy naprosto dostačující a odůvodněné a v tomto ohledu již není nutné hledat jinou variantu.

7.2 Tuhost

Jak vyplynulo z úvodu této části, změny s ohledem na tuhost budou naprosto totožné jako u příruby horní. Spojovací prstenec se stává přířímou součástí příruby, použit je stejný materiál a stejná bude i technologie výroby. Více informací je uvedeno v podkapitole 5.2.

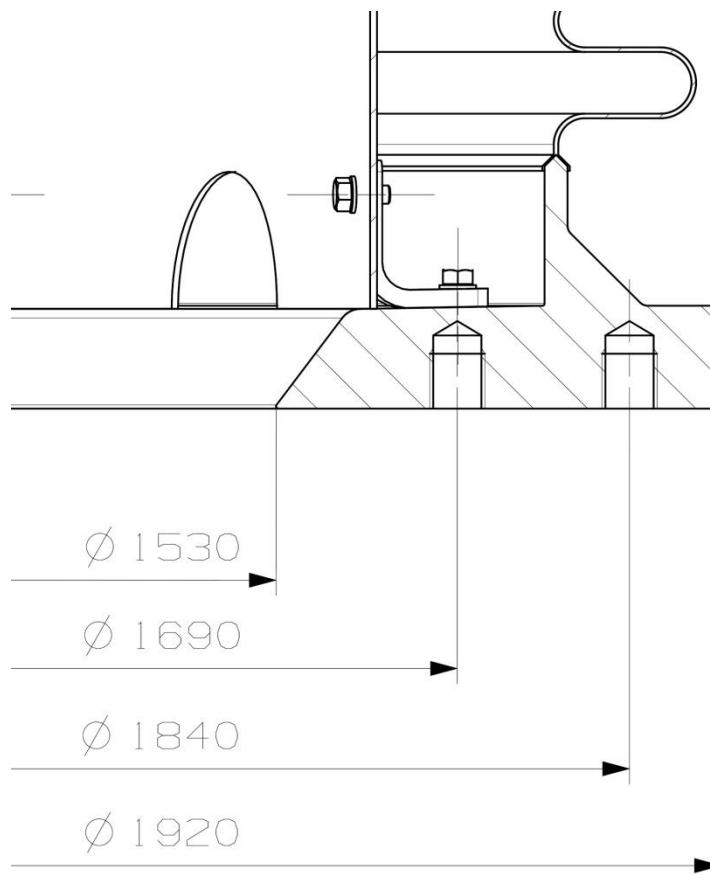
Při návrhu úprav zvyšujících tuhost příruby, a nejen při nich, je nutno dbát na to, aby byla zachována přibližně stejná hmotnost spodní příruby. Je to důležité s ohledem na pružinové závěsy. Zvýšená hmotnost spodní příruby a navazujících částí by mohla ovlivnit schopnost pružin vrátit kompenzátor zpět do své výchozí pozice a zde ho udržet. Hmotnost původní příruby, včetně spojovacího prstence, činí 440 kg. V případě, že by tato hodnota u nového

návrhu nebyla přibližně dodržena, bylo by nutno provést přepoččet pružinových závěsů na hmotnost novou.

7.3 Konstrukční řešení

Změny v konstrukci příruby se týkají především tvarových a rozměrových úprav. Již v úvodu bylo zdůrazněno, že původní řešení zcela odpovídá požadavkům a koncepci příruby není nutno měnit. Přizpůsobit se musí pouze změnám příruby horní, a to zejména její montáži, jak bude zřejmé dále. Číslování jednotlivých variant odpovídá jejich příslušnosti k variantám příruby horní.

7.3.1 Varianty 1 a 2



Obrázek 7.1 – Spodní příruba pro návrh 1 a 2

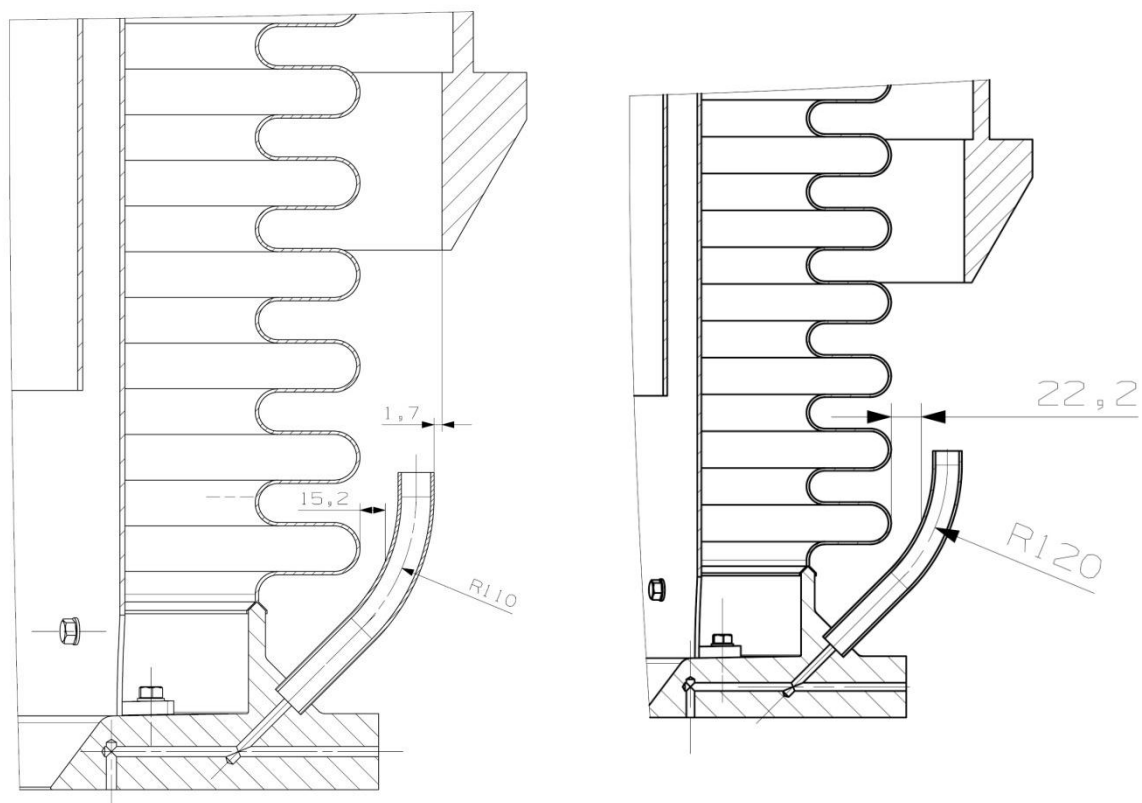
Vedle úprav pro zvýšení tuhosti je hlavní změnou konstrukce spodní příruby vlnovce úprava jejich rozměrů. Nutnost této změny vyvolalo rozdělení horní příruby na dvě samostatné části. Montáž pak probíhá tak, že nejdříve je k nosné konstrukci uchycen svařenec složený z horní ploché příruby, vlnovců a spodní příruby a následně je provedena montáž volné příruby, která zajistí potřebný dodatečný přitlak příruby ploché. Volnou přírubu je nutno nasunout na své místo směrem odspodu a musí tedy být schopná projít přes spodní přírubu.

Původní spodní přírubu tak nelze zachovat. Nejmenší průměr volné příruby totiž činí 1930 mm, kdežto původní spodní příruba má vnější průměr 1980 mm. Bylo tedy nutné tento průměr o více jak 50 mm zmenšit. Pro zaručení toho, že volná příruba projde okolo spodní příruby a pro zjednodušení montáže musí být samozřejmě příruba v konečném důsledku zmenšena o větší hodnotu. Konečný vnější průměr spodní příruby je tak 1920 mm. Zmenšení

vnějšího průměru pozitivně ovlivní hmotnost příruby, která tak určitě nepřekročí původní hodnotu 440 kg. Hmotnost nového návrhu příruby činí 405 kg. Zásah do rozměru příruby si ovšem vyžádá změny některých konstrukčních prvků příruby.

Bylo nutno změnit roztečné průměry závitových otvorů M24, určených pro připojení těsnící a krycí příruby. Otvory pro spojovací šrouby těsnící příruby na roztečné kružnici $\varnothing 1690$ mm byly zachovány podle původního návrhu. Není totiž možné, s ohledem na zachování prostoru pro dvojici těsnění na těsnící přírubě, posunout je blíže k ose příruby. Přesunuty tedy byly pouze otvory pro upevnění krycí příruby, a to z $\varnothing 1910$ mm na $\varnothing 1840$ mm. I takto razantní zmenšení stále zajišťuje dostatečnou montážní vzdálenost mezi hlavami šroubů na jednotlivých roztečných kružnicích. Stejná změna průměru roztečné kružnice se samozřejmě musí týkat i krycí příruby.

Snížením průměru spodní příruby již také nebylo možno zachovat původní řešení přívodu tlakového vzduchu pro kontrolu těsnění. Potrubí je totiž vedeno ze spodní příruby prostorem mezi vlnovcem a spodním vnějším ochranným pláštěm a tento prostor opouští k tomu určeným otvorem vyfrézovaným na horní hraně spodního ochranného pláště (viz Obrázek 3.4). Je to z toho důvodu, že montáží krycí příruby se uzavře celý vnější prostor prostupu, a je proto nutno ještě před tímto krokem zajistit připojení všech kapalínových okruhů na hlavní přívody. Jinou cestou přívodní potrubí do spodní příruby vést nelze. Po zmenšení průměru příruby se přívod dostane dokonce částečně pod vlnovec a minimální dovolený radius ohybů potrubí je stanoven na R110, tudíž trubku nelze ani vhodně tvarovat a z tohoto prostoru ji „vyvést.“ Nemůže tak být zajištěna bezpečná vzdálenost potrubí od vlnovce. Bylo zvažováno i použití pružných kovových hadic, čemuž se ale, podle informací získaných ze ŠKODY JS, a.s., zákazník snaží vyhnout. Přívod tlakového vzduchu byl tedy upraven podle následujících obrázků.



Obrázek 7.2 – Porovnání řešení přívodu tlakového vzduchu do spodní příruby

Tvar zobrazené vstupní části přívodní trubky pak tvoří rozdíl mezi spodní přírubou určenou pro konstrukční varianty 1 a 2. V případě varianty č. 1 je vzdálenost potrubí od vlnovce, jak již bylo zmíněno při popisu konstrukčních variant horní příruby, téměř limitní. V kritickém místě je vzdálenost mezi trubkou a vlnovcem cca. 15 mm. Pokud se od této hodnoty odečte maximální možná výchylka vlnovce v tomto místě, která činí (podle již uvedené podobnosti trojúhelníků – viz Obrázek 5.4)

$$\frac{x}{h} = \frac{11,02}{1695}$$

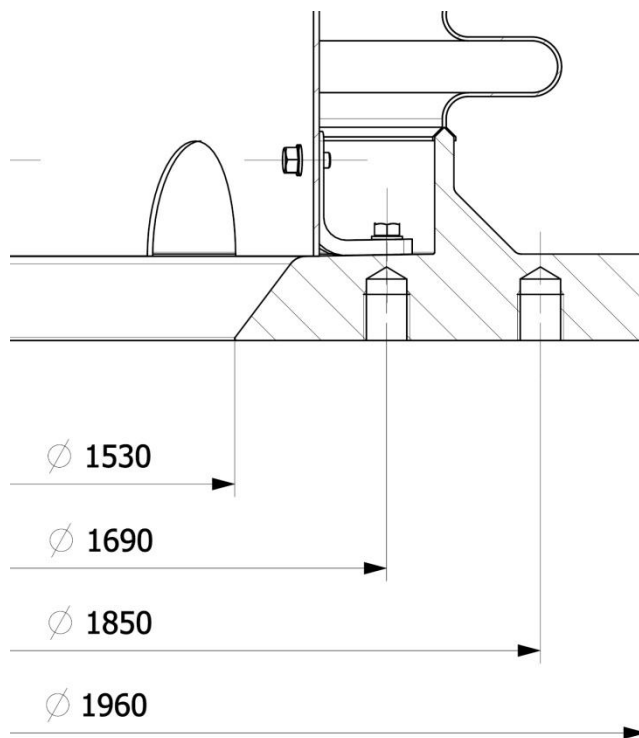
$$x = h \cdot \frac{11,02}{1695} = \frac{1195 \cdot 11,02}{1695} = 7,8 \text{ mm}$$

získá se rezerva přibližně 7 mm, což není mnoho. Pokud se přičtou další vlivy, jako jsou výrobní tolerance (tvaru trubky; otvoru v přírubě, ve kterém je potrubí přivařeno atd.), změna polohy trubky vůči vlnovci po svaření nebo dodatečné výchylky vlnovce během zemětřesení, nemusela by být tato rezerva dostatečná.

Posunutím horního ochranného pláště díky konstrukčním změnám druhé varianty se mohla zvýšit vzdálenost mezi trubkou a vlnovcem v kritickém místě. Zvýšení pomohlo také zvětšení rádiusu ohybu trubky na R120. Hodnota po těchto změnách činí 22 mm, po odečtení laterální úchytky je rezerva vzdálenosti mezi trubkou a vlnovcem 14 mm, což je dvojnásobek předchozí hodnoty.

Veškeré ostatní konstrukční detaily spodní příruby zůstaly zachovány podle původního návrhu konstruktérů společnosti ŠKODA JS, a.s.

7.3.2 Varianta 3



Obrázek 7.3 – Spodní příruba pro návrh 3

Pro konstrukční variantu číslo 3 nebylo nutno spodní přírubu nijak zvlášť upravovat. Obě horní příruby jsou spojeny již během přivařování vlnovce, tudíž zajistit průchod volné příruby přes spodní není potřeba. Nutnost změny některého z konstrukčních prvků si také nevyžádalo ani zmenšení průměru vlnovce na 1738 mm.

Jediná provedená změna je zmenšení vnějšího průměru vlnovce na 1960 mm a s tím spojená nutnost zmenšení roztečného průměru závitových otvorů pro upeňovací šrouby krycí příruby na 1850 mm. Zmenšení rozměrů příruby pozitivně ovlivnilo její hmotnost, která je tak, i po změnách zvyšujících tuhost příruby, rovna 431 kg. Snížení

vnějšího průměru také zlepšilo možnosti přístupu pracovníků do prostoru montáže a zjednodušilo přístupnost hlavních spojovacích šroubů horní příruby. Vnější průměr je snížen

na takovou míru, aby byla dodržena bezpečná vzdálenost mezi vlnovcem a přívodním potrubím tlakového vzduchu.

Vyjma popsanych změn tvaru a rozměrů zůstala kompletně zachováno řešení všech částí příruby podle původního návrhu ŠKODY JS, a.s.

8 Závěr

Výsledkem diplomové práce je návrh tří možných konstrukčních variant horní příruby a jim odpovídající příruby spodní. Všechny tři varianty jsou, dle mého názoru, teoreticky použitelné pro reálnou aplikaci, každá ale s větším či menším omezením. Hlavní cíl práce tak nebyl v plném rozsahu naplněn, jelikož z návrhů, jak se později ukázalo, nevzešla žádná příruba beze zbytku splňující všechny stanovené požadavky.

U konstrukce spodní příruby nebyl zjištěn žádný výrazný nedostatek, který by omezoval použití původního návrhu ŠKODY JS, a.s. Byly tedy provedeny pouze určité změny, které mají za úkol zvýšit její tuhost. Příruba byla dále upravována jen rozměrově (vyjma některých detailů) v závislosti na provedení horní příruby.

Provedení horní příruby je pro prostup mnohem podstatnější, jelikož ta musí zajistit spolehlivé upevnění vlnovce. Pro zvýšení tuhosti, zjednodušení montáže a zajištění dostatečného stlačení použitého těsnění byl horní přírubový spoj v této práci od začátku navrhován s dvojicí přírub – ploché příruby, na niž je umístěno těsnění a z volné příruby, která má zajistit dostatečné stlačení těsnění, či umožnit konstrukčně přiblížit šroubové spoje co nejlíže tomuto těsnění.

Rozdělením horní příruby bylo možné vhodně zkombinovat umístění prvků, které jsou součástí příruby, spolu s upevňovacími šrouby. Byla tak zajištěna přístupnost šroubových spojů příruby pro montážní operace. Oba díly horní příruby rozdělením také získaly větší tuhost. Jako hlavním problémem se nakonec ukázalo použití těsnění typu HELICOFLEX®, jež sice zaručuje hermetičnost spoje po celou dobu plánované životnosti (60 let) bez nutnosti výměny, ovšem také se vyznačuje značnou tuhostí. To klade vysoké nároky na konstrukci přírub. Celý prostup je navrhován s principem „dvojitých bariér,“ proto i těsnost přírubového spoje musí být zajištěna hned dvojicí těsnění. Stlačit dvojici tak tuhých těsnění, jako jsou těsnění typu HELICOFLEX®, se ukázalo jako velice nesnadný úkol.

Navržená varianta 2, jež je ve své podstatě vylepšeným návrhem 1, je sice teoreticky schopna dosáhnout dostatečného stlačení obou kroužků HELICOFLEX®, ovšem to s sebou nese několik nevýhod. Aby byla zajištěna jednoduchost montáže příruby a všech jejích součástí, dosahuje přírubový spoj relativně velkých rozměrů. Nevýhodou je také umístění hlavních spojovacích svorníků do vnitřního prostoru vlnovce, kde jsou v přímém kontaktu s chladivem bazénů skladování vyhořelého paliva. V rámci práce byla vybrána varianta 3 jako vhodnější pro horní přírubový spoj. Výpočtové ověření vysloveného předpokladu, že přírubový spoj dle návrhu 2 dokáže spolehlivě stlačit těsnění HELICOFLEX®, již proto není součástí práce.

Varianta 3 byla navržena tak, aby z konstrukce byly odstraněny svorníky umístěné ve vodě a současně bylo zajištěno dostatečné stlačení těsnění. Byla snaha umístit hlavní upevňovací šrouby co možná nejlíže těsnění. I přesto ověřovací MKP výpočet ukázal, že příruba vykazuje podobné chování jako původní návrh a není schopná zajistit požadované stlačení obou kroužků těsnění HELICOFLEX®. Těsnící kroužek umístěný blíže ke spojovacím šroubům by sice bylo možné považovat za dostatečně stlačený, ovšem druhý kroužek je stlačen prokazatelně nedostatečně. Ohýbání přírub v důsledku tuhosti těsnění navíc nevhodně namáhá na ohyb také hlavní spojovací šrouby.

Přírubový spoj tak nelze použít spolu s těsněním typu HELICOFLEX®, což byl jeden z hlavních cílů diplomové práce.

Na druhou stranu lze v přírubovém spoji použít alternativní těsnění, vyrobené z EPDM pryže, které bude touto variantou zaručeně stlačitelné. Těsnění ovšem vyžaduje pravidelné výměny v intervalu pěti let, které s sebou nesou riziko ozáření pracovníků provádějících výměnu a nutnost upravit stávající řešení přívodů kapalinových okruhů do přírub. Ty jsou dosud řešeny svařovaným potrubím, které je v případě demontáže přírubového spoje nutno jediné odřezat. Bylo by tak zapotřebí, v případě použití pryžových O-kroužků, zajistit rozebíratelnost rozváděcího potrubí od přívodního.

Během hodnocení konstrukčních návrhů se ukázalo, že stlačení těsnění HELICOFLEX® pouze za pomoci spojovacích šroubů na jediném roztečném průměru bude velice složité a prakticky nemožné. Přesto je vybraná konstrukční varianta číslo 3, po provedení několika nezbytných zásahů, v budoucnu použitelná pro upevnění vlnovce na svou pozici.

Seznam použité literatury

- [1] BEČVÁŘ, Josef et al. *Jaderné elektrárny*. 2. oprav. vyd. Praha: SNTL, 1981.
- [2] LAMARSH, John R. a Anthony J. BARATTA. *Introduction to Nuclear Engineering*. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001. ISBN 0-201-82498-1.
- [3] FRAMATOME ANP. *EPR*. [s.l.]: Framatome ANP, 2005.
- [4] HEZOUČKÝ F., P. KAŇOVSKÝ, J. NAŇO. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03324-4.
- [5] ZDEBOR, Jan. *Primární okruh jaderné elektrárny* [přednášky]. Plzeň: ZČU, 2012.
- [6] ANDRLÍK, Michal a Martin PŘEČEK. Jak se zjišťují a odstraňují netěsnosti palivových souborů v jaderných elektrárnách?. In: *Česká nukleární společnost* [online]. 2006 [cit. 2013-03-03]. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/cns/news06/060112s.htm>
- [7] AREVA NP & EDF. *UK – EPR: Fundamental safety overview*. [s.l.]: Areva NP & EDF, ©2007. Dostupné z: <http://www.epr-reactor.co.uk>.
- [8] KIM, In-Yong. Fuel Storage and Handling System. In: *Nuclear Power Reactor Technology* [online]. [s.l.]: Korea Atomic Energy Research Institute, [2000] [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.kntc.re.kr/openlec/nuc/NPRT>.
- [9] ČEZ. *Radioaktivní odpady a skupina ČEZ*. [s.l.]: Skupina ČEZ, [b.r.].
- [10] STORAGE OF SPENT NUCLEAR FUEL IN THE USA. *Wet Storage* [online]. www.storenuclearfuel.com, 2012 [cit. 2013-03-11]. Dostupné z: <http://www.storenuclearfuel.com/wet-storage>.
- [11] U.S. NRC. Dry Cask Storage. *NRC* [online]. March 25, 2013 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: <http://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/dry-cask-storage.html>.
- [12] UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. Safer Storage of Spent Nuclear Fuel. *UCS* [online]. June 27, 2012 [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: http://www.ucsusa.org/nuclear_power/nuclear_power_risk/safety/safer-storage-of-spent-fuel.html.
- [13] IAEA. *Operation and Maintenance of Spent Fuel Storage and Transportation Casks/Containers*. Vienna: IAEA, January 2007. ISBN 92-0-115006-7. Dostupné také z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1532_web.pdf.
- [14] YANKEE ATOMIC ELECTRIC COMPANY. *Dry Fuel Storage at Yankee Rowe* [online]. USA: A Waterman Studios Production, [b.r.]. Dostupné z: http://www.yankeerowe.com/assets/multimedia/Dry_Fuel_Storage.wmv.
- [15] SKUPINA ČEZ. Technické provedení JE Temelín. *Skupina ČEZ* [online]. [b.r.] [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderna-elektrarna-cez/ete/technologie-a-zabezpeni/8.html>.
- [16] SÚRAO. Úložiště radioaktivních odpadů. *SÚRAO* [online]. [b.r.] [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu>.

- [17] VOLDŘICH, Josef. *Návrh přírubových spojů horního bloku tlakové nádoby jaderného reaktoru, podklady pro předmět „Semestrální projekt“ studijního oboru Stavba jaderně energetických zařízení*. Plzeň, 2011.
- [18] GARLOCK. *Helicoflex®*. [s.l.]: Garlock, [b.r.].
- [19] MACH – TĚSNĚNÍ. PTFE – teflon. *Mach – těsnění spol. s.r.o.* [online]. [b.r.] [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.mach-tesneni.cz>.
- [20] HENNLICH. *O- kroužky: Konstrukční údaje*. Litoměřice: Hennlich s.r.o., [b.r.]. Dostupné také z: http://www.hennlich.cz/uploads/Materiály_OR.pdf.
- [21] JAMES WALKER. *Sealing in the Nuclear Power sector*. [s.l.]: James Walker UK Ltd, ©2012. Dostupné také z: [http://www.jameswalker.biz/system/pdf_docs/fichiers/223/original Nuclear Guide.pdf](http://www.jameswalker.biz/system/pdf_docs/fichiers/223/original_Nuclear_Guide.pdf).
- [22] ROBERTS, Terry. *Materials Used in a Nuclear Fuel Reprocessing Plant*. In: *AZoM.com* [online]. July 31, 2001 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=627# Polymers>.
- [23] RCC-M M 3301. *Class 1, 2 and 3 Austenitic Stainless Steel Forgings and Drop Forgings*. Paris: afcen, 2007.
- [24] TONA. *Profesionální nářadí pro průmysl a autoservisy 2012*. [s.l.]: Tona Expert, ©2012. Dostupné také z: <http://www.tona.cz>.
- [25] WALD F., L. ROZLÍVKA, Z. SOKOL, H. ŠERTLER. *Vliv maziva na utahování šroubů třecích spojů*. Praha: ČVUT, 2002. Dostupné také z: [http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Clanky%20v%20Adobe%20\(Pdf\)/Vliv_maziva_na_VP_srouby.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Clanky%20v%20Adobe%20(Pdf)/Vliv_maziva_na_VP_srouby.pdf).
- [26] MOLYKOTE. MOLYKOTE® P-37. *Molykote®* [online]. [b.r.] [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.molykote.cz/?s=P-37>.
- [27] LOCTITE E-SHOP. *Loctite 8013. Loctite* [online]. [b.r.] [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.loctite-shop.cz/loctite-8013-454g-nater-anti-seize-n-7000-p1137?js=1>.
- [28] HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. *Průručka strojního inženýra: Obecné strojní části I*. 1. vydání. Brno: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3.
- [29] RCC-M M 5110. *Rolled or Forged Bars for the Manufacture of Class 1, 2 and 3 Bolts and Drive Rods*. Paris: afcen, 2007.
- [30] SAUVINET, Frédéric. *Výpočtový formulář z nabídky těsnění HELICOFLEX® pro ŠKODU JS*. [s.l.]: Garlock, September 29, 2008.
- [31] RCC-M. *Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands*. Edition 2000 – Addendum June 2002. Paris: afcen, 2002.
- [32] WERNER, James D. *U.S. Spent Nuclear Fuel Sotrage*. [s.l.]: CRS Report for Congress, May 24, 2012.
- [33] http://oizp.cz/wp-content/uploads/dukovany_reaktor1.jpg.
- [34] http://carlwillis.files.wordpress.com/2012/05/fuel_twk_2788_ps.jpg
- [35] <http://spectrum.ieee.org/img/nwastef1-1323708814540.gif>

- [36] AREVA NP & EDF. *UK – EPR: Pre-Construction Safety Report, Sub-Chapter 11.5 – Interim Storage Facilities and Disposability for UK EPR*. [s.l.]: Areva NP & EDF, ©2012. Dostupné z: <http://www.epr-reactor.co.uk>.
- [37] http://www.blatno-lounsko.cz/data/editor/66cs_big.jpg.
- [38] ZDEBOR, Jan. *ŠKODA JS v r. 2011* [přednáška]. Ostrava: VŠB TU, listopad 2011.
- [39] Technická dokumentace poskytnutá společností ŠKODA JS, a.s.
- [40] ROBATEL INDUSTRIES. *Robatel Industries: 50 years devoted to the nuclear industry* [prezentace]. [s.l.]: Robatel, ©2012. Dostupné z: <http://www.robatel.fr/downloads/957013.pdf>.
- [41] ANSYS. *Release 11.0 Documentation for ANSYS*. [s.l.]: ANSYS, [b.r.]. Dostupné z: http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp_L_hour1.html.
- [42] ABAQUS. *ABAQUS/Explicit: Advanced Topics, Lecture 4: Contact Modeling*. [s.l.]: Abaqus Inc., ©2005.
- [43] SIMULIA. *Abaqus 6.12 SE User's manual*. [s.l.]: Simulia, ©2012.

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 - Složení palivového článku [32, str. 10].....	14
Obrázek 2.2 - Palivový článek reaktoru EPR [3].....	15
Obrázek 2.3 – Pohled na šachtu reaktoru (1), BSVP(2), šachtu pro transportní kontejner (3) a zavážecí stroj (4) v JE Dukovany [33]	18
Obrázek 2.4 – Kompaktní mříž v BSVP [5].....	19
Obrázek 2.5 – Příklad uspořádání transportně-technologické části JE typu PWR [5].....	20
Obrázek 2.6 - – Příklad transportní trubky [8]	20
Obrázek 2.7 – Transportní zařízení [8]	21
Obrázek 2.8 – Bazén skladování vyhořelého paliva a mostový jeřáb v budově paliva [34]	22
Obrázek 2.9 – Suché skladování v meziskladu vyhořelého paliva [9].....	23
Obrázek 2.10 – Kontejner pro vyhořelé palivo [35]	24
Obrázek 2.11 – Systém vyvážení paliva v JE s reaktorem EPR [36, str. 21]	25
Obrázek 2.12 – Hlubinné úložiště [37]	27
Obrázek 2.13 – složení vyhořelého paliva [9].....	27
Obrázek 2.14 – Palivové cykly [9]	28
Obrázek 3.1 – Přepravní (vyvážecí) stroj [38].....	30
Obrázek 3.2 – Nosná konstrukce [39].....	31
Obrázek 3.3 - Kompenzátor [39]	32
Obrázek 3.4 - Krycí příruba [39]	32
Obrázek 3.5 – Pružinový závěs [40]	33
Obrázek 3.6 – Kontejner R72 [39].....	33
Obrázek 3.7 - Těsnící příruba [39].....	34
Obrázek 3.8 – Zjednodušený nákres pracovního postupu stroje [36, str. 19].....	34
Obrázek 3.9 – Jednotlivé pracovní stanice [39].....	35
Obrázek 3.10 – Harmonogram činností vyvážecího zařízení při zakládání paliva do kontejneru	36
Obrázek 3.11 – Zakládání paliva do kontejneru T13/2 [13].....	37
Obrázek 4.1- Sestava původní konstrukce horní příruby	39
Obrázek 5.1 – Těsnění HELICOFLEX® [18].....	43
Obrázek 5.2 – Sestava návrhu 1 horní příruby	46
Obrázek 5.3 – Naznačení prostoru pro vstup obsluhy k horní přírubě	47
Obrázek 5.4 - Podobnost trojúhelníků	48
Obrázek 5.5 – Přívod kontrolního vzduchu mezi těsnění horní příruby pro variantu 2.....	50
Obrázek 5.6 – 6hranná průmyslová hlavice [24].....	50
Obrázek 5.7 – Sestava horní příruby, návrh 2	51
Obrázek 5.8 – Vybrání na volné přírubě návrhu 2 (pohled odspodu).....	52
Obrázek 5.9 – Sestava horní příruby, návrh 3	53
Obrázek 5.10 – Zajištění přírub kolíkem	55
Obrázek 5.11 – Použitý typ těsnění [18].....	59
Obrázek 5.12 – Hourglassing [41]	65
Obrázek 5.13 – Princip kontaktu s funkcí „penalty“ [42]	66
Obrázek 5.14 – „Hard“ kontakt [43].....	66
Obrázek 5.15 – Deformace těsnícího kroužku	72
Obrázek 6.1 – Původní konstrukce spodní příruby.....	73
Obrázek 7.1 – Spodní příruba pro návrh 1 a 2.....	77
Obrázek 7.2 – Porovnání řešení přívodu tlakového vzduchu do spodní příruby.....	78
Obrázek 7.3 – Spodní příruba pro návrh 3	79

Seznam grafů

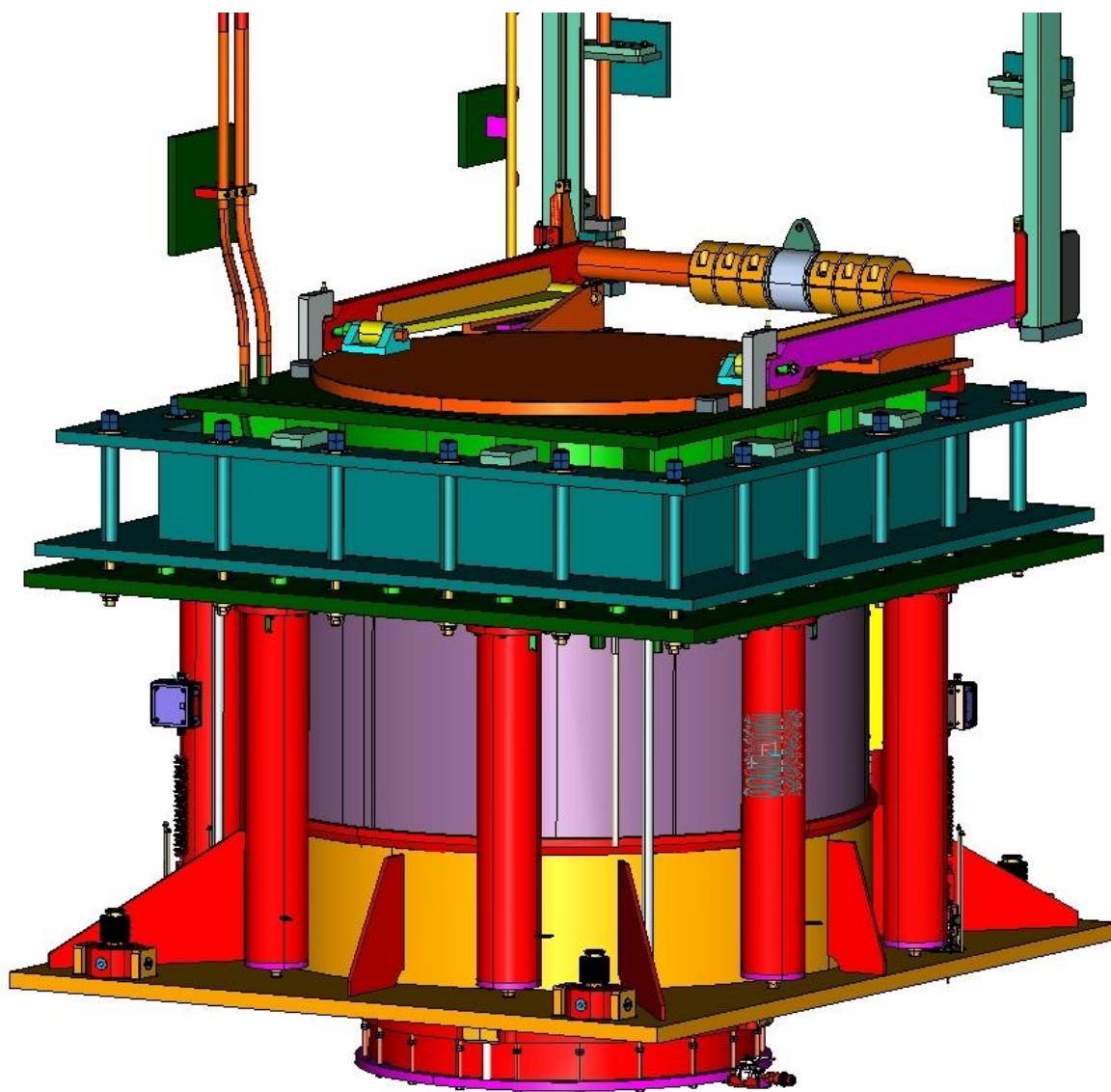
Graf 1 - Změna koncentrace štěpitelných izotopů při provozu reaktoru [4]	15
Graf 2 – Výtěžek ze štěpení [4].....	16
Graf 3 – Pracovní křivka těsnění HELICOFLEX® [18].....	63
Graf 4 – Pracovní křivka těsnění zadávaná do výpočtu	64
Graf 5 – Stlačení těsnění 1 (blíže ke šroubům)	71
Graf 6 – Stlačení těsnění 2	71

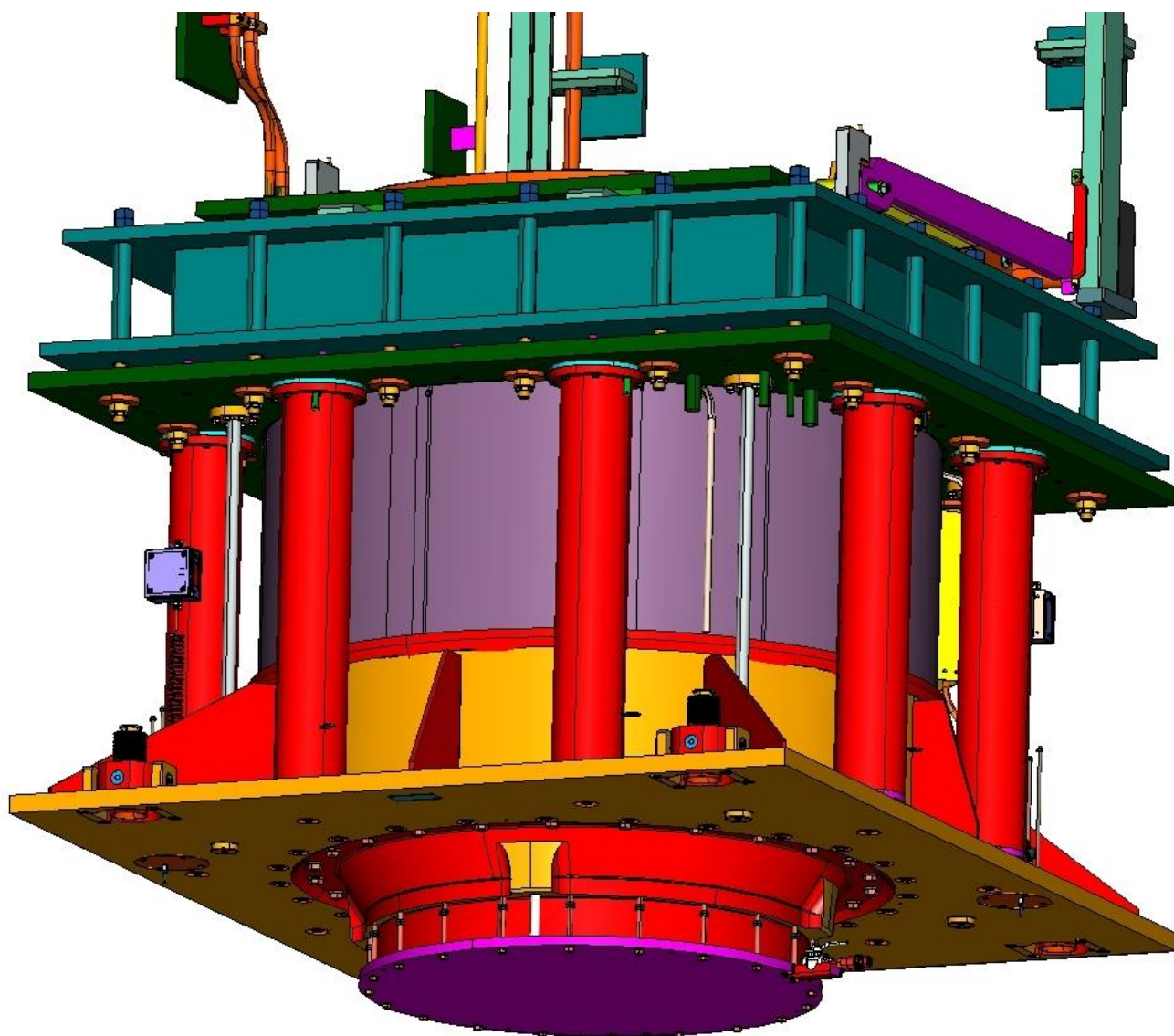
Seznam tabulek

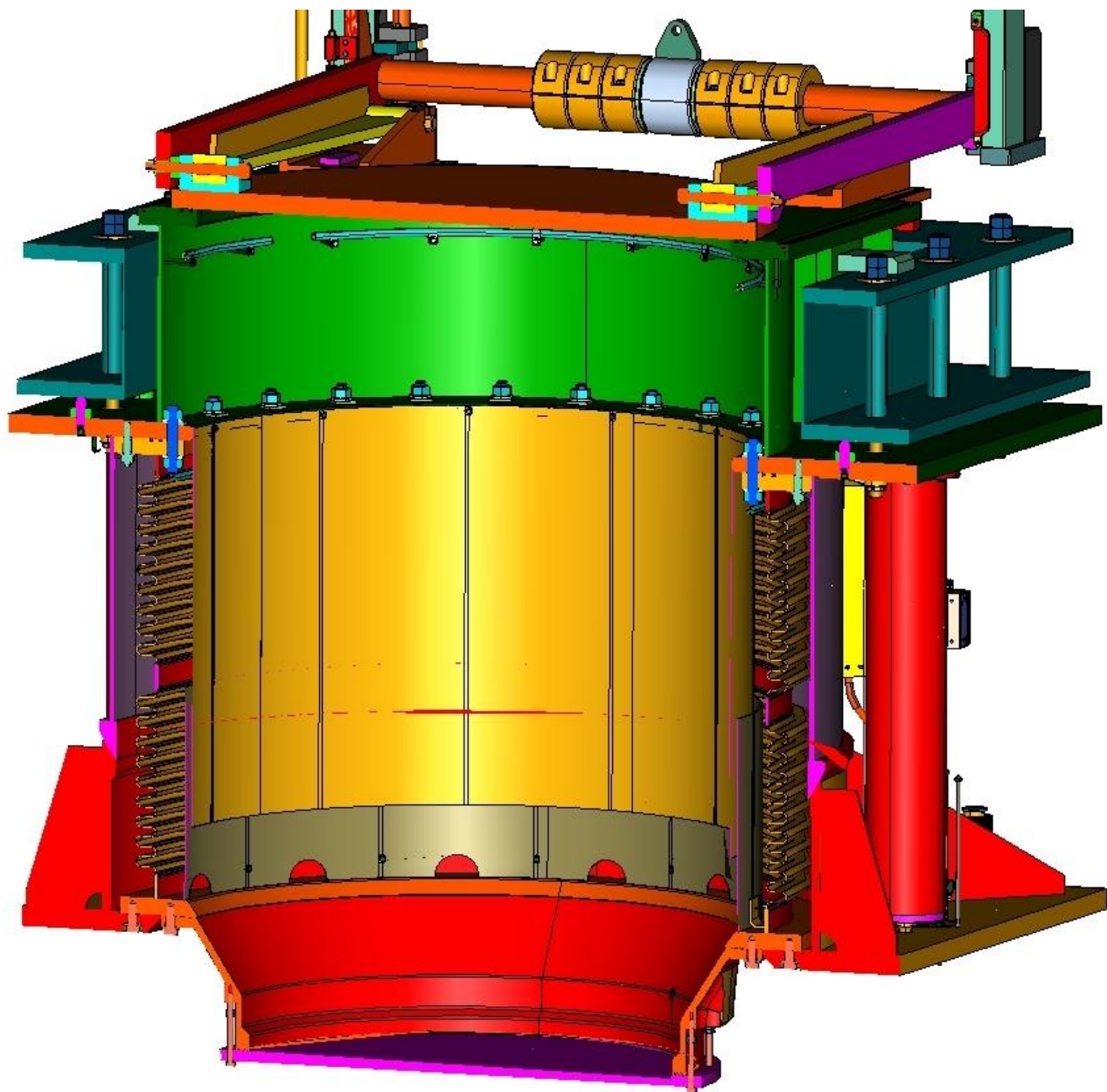
Tabulka 1 – Třídy netěsnosti [17]	42
Tabulka 2 – Přehled těsnění [17].....	43
Tabulka 3 – Chemické složení materiálu Z2 CN 18-10 [23].....	45
Tabulka 4 – Mechanické vlastnosti materiálu Z2 CN 18-10 [23].....	45
Tabulka 5 – Pracovní podmínky	59
Tabulka 6 – Parametry menšího těsnícího kroužku	60
Tabulka 7 – Parametry většího těsnícího kroužku	60
Tabulka 8 – Mechanické vlastnosti materiálu šroubů [29].....	61
Tabulka 9 – Závislost deformace těsnění na tlaku	64
Tabulka 10 – Dovolené namáhání přírub	67
Tabulka 11 – Maximální napětí v přírubách.....	67
Tabulka 12 – Dovolené namáhání nosné konstrukce	68
Tabulka 13 – Maximální napětí v nosné konstrukci	68
Tabulka 14 – Dovolené namáhání šroubů a přírub	68
Tabulka 15 – Zatížení šroubů.....	69
Tabulka 16 – Maximální napětí v podložkách.....	69
Tabulka 17 – Vyhodnocení pevnostního výpočtu.....	70

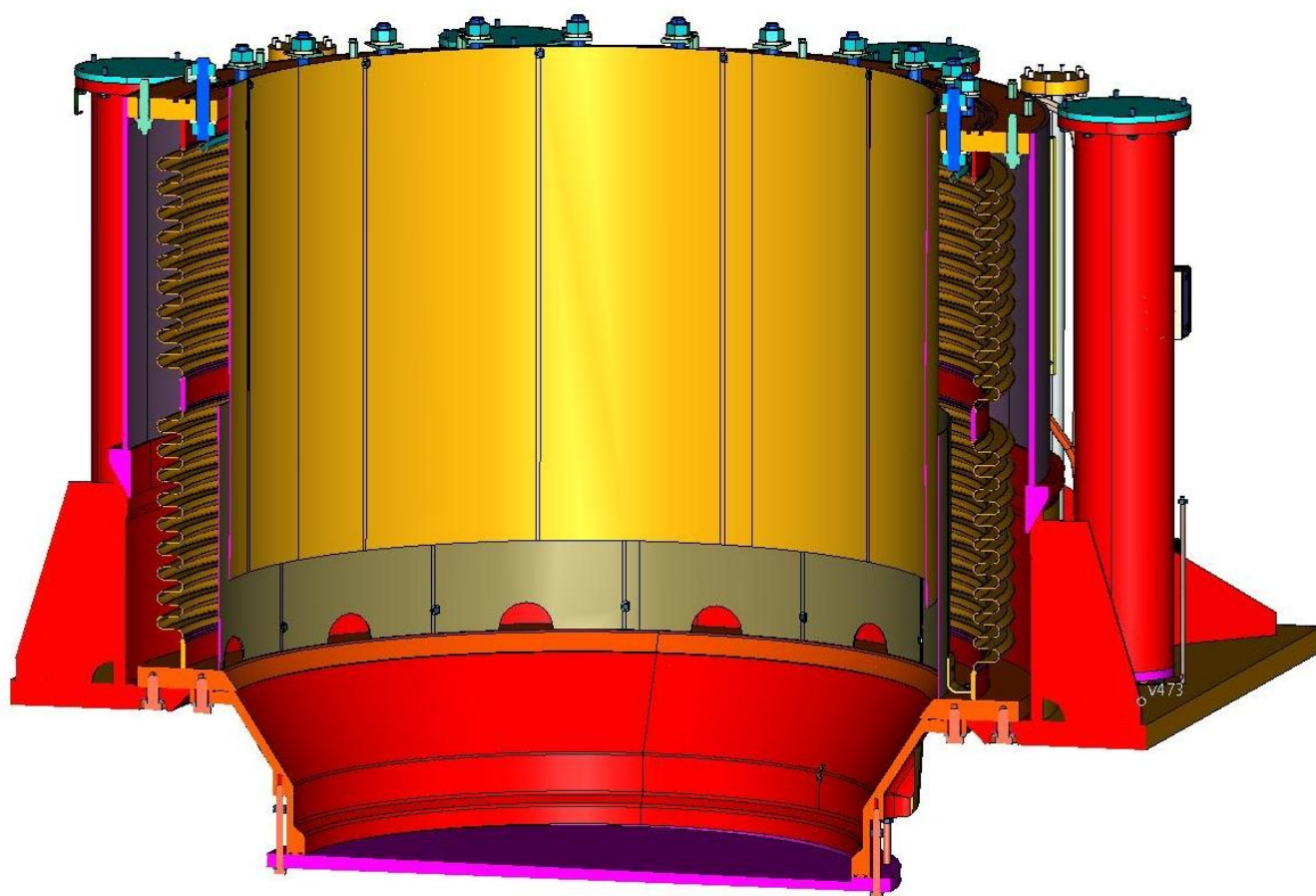
Příloha č. 1

3D model prostupu dle konstrukce ŠKODA JS





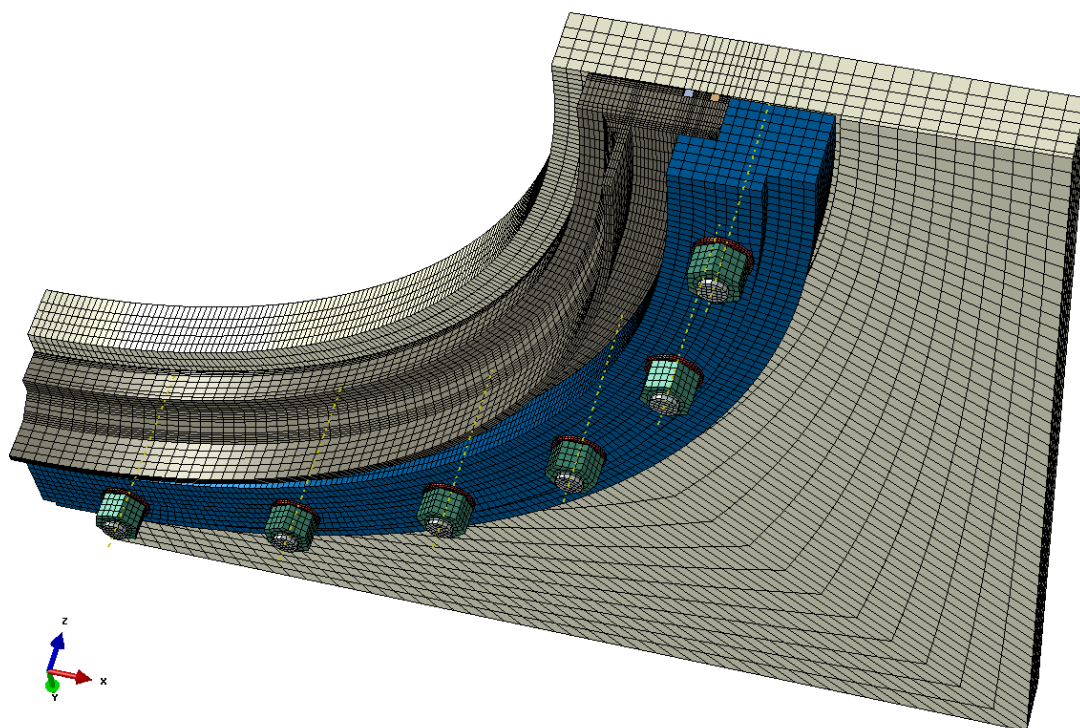
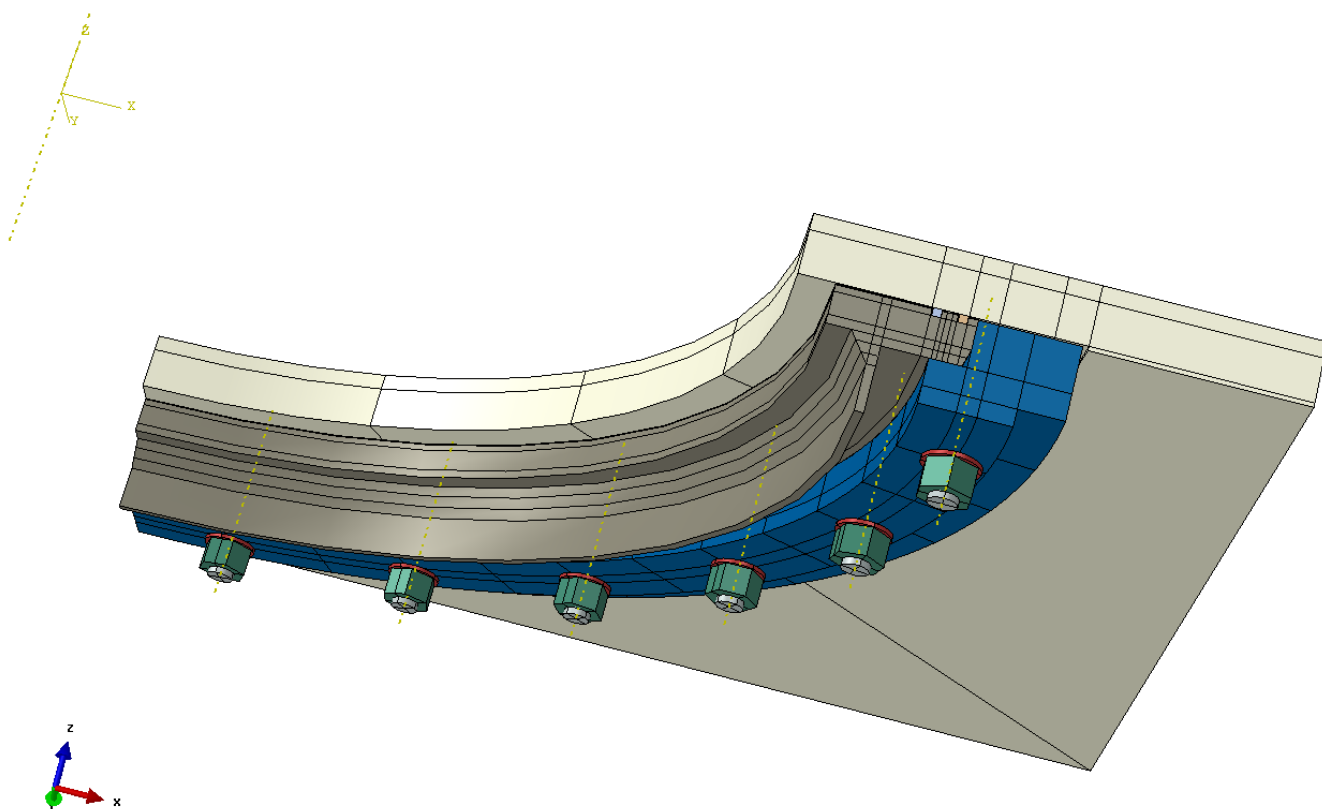




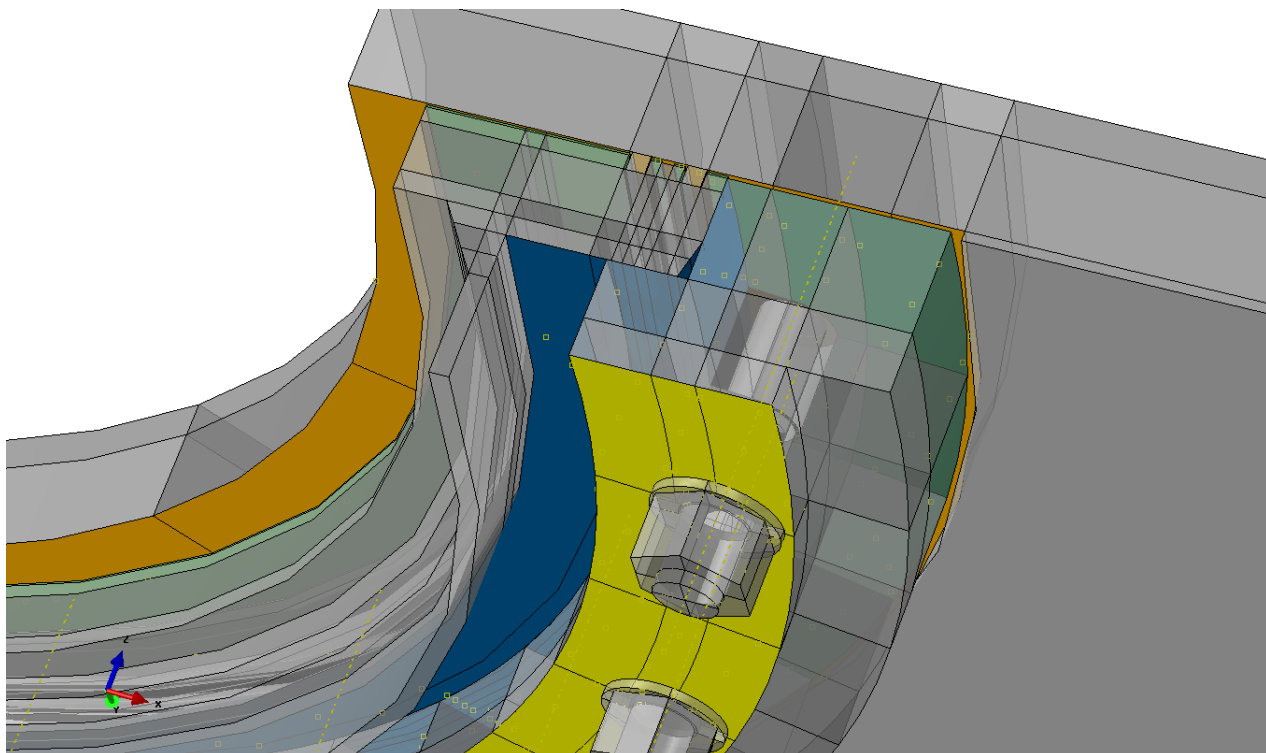
Příloha č. 2

Výpočtový model

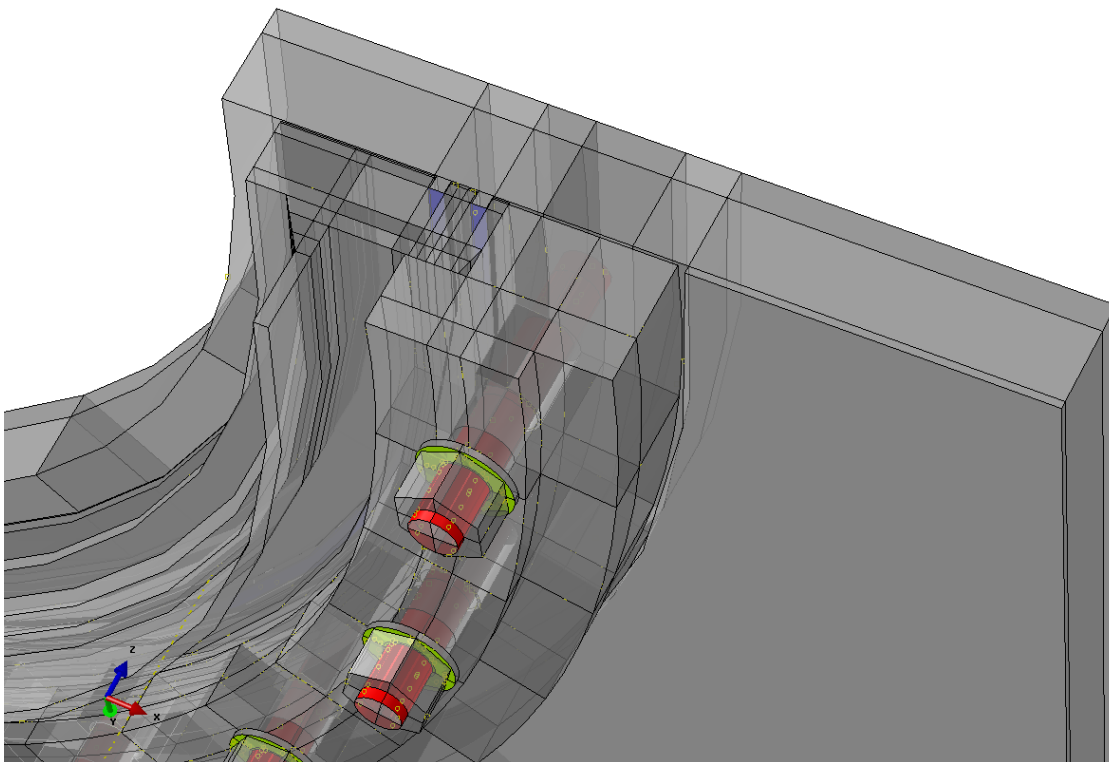
Sestava použitá pro výpočet



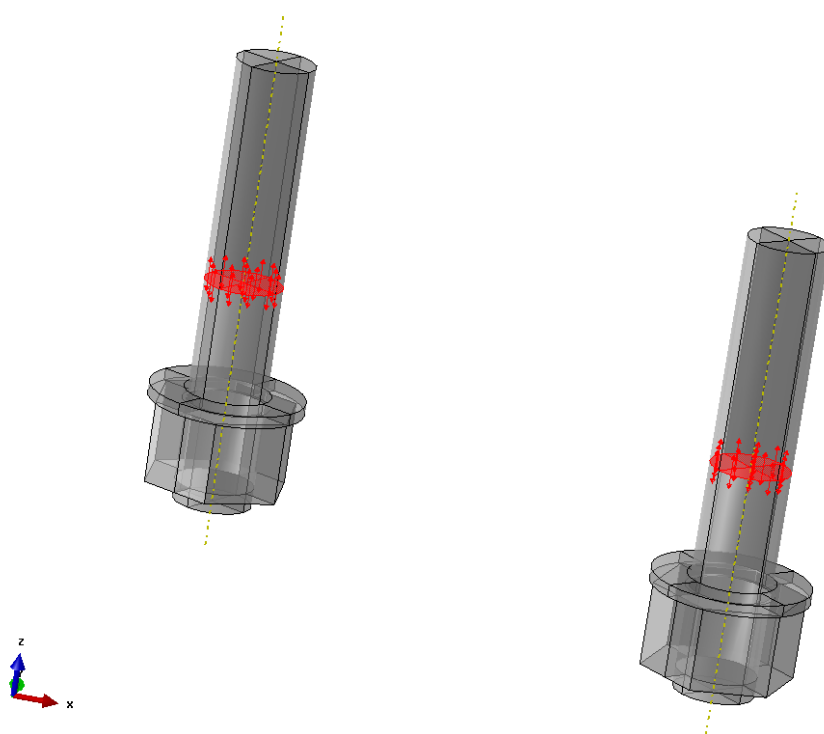
Nastavení kontaktů



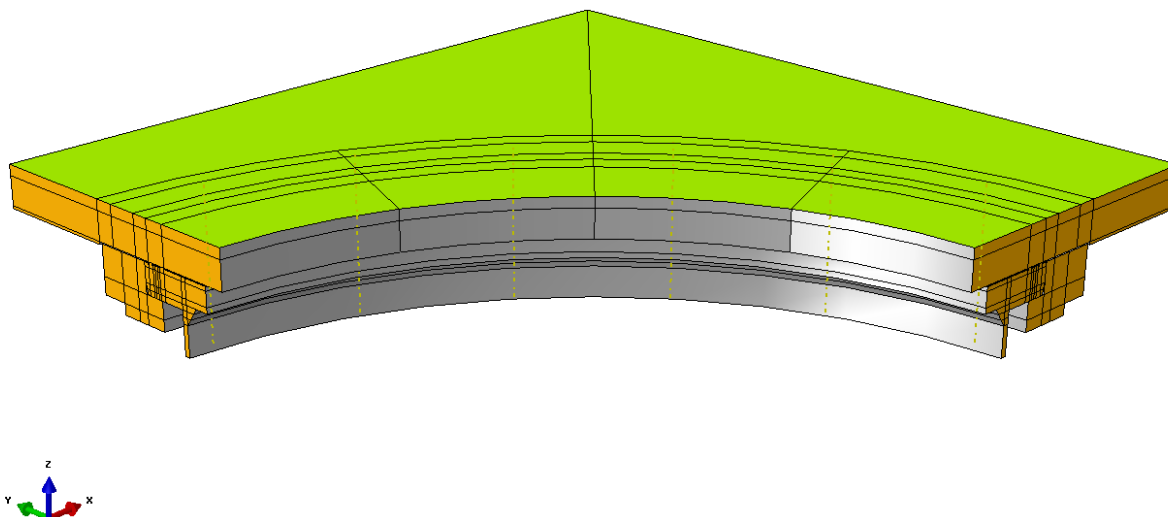
Pevné vazby



Zadání předpětí šroubů

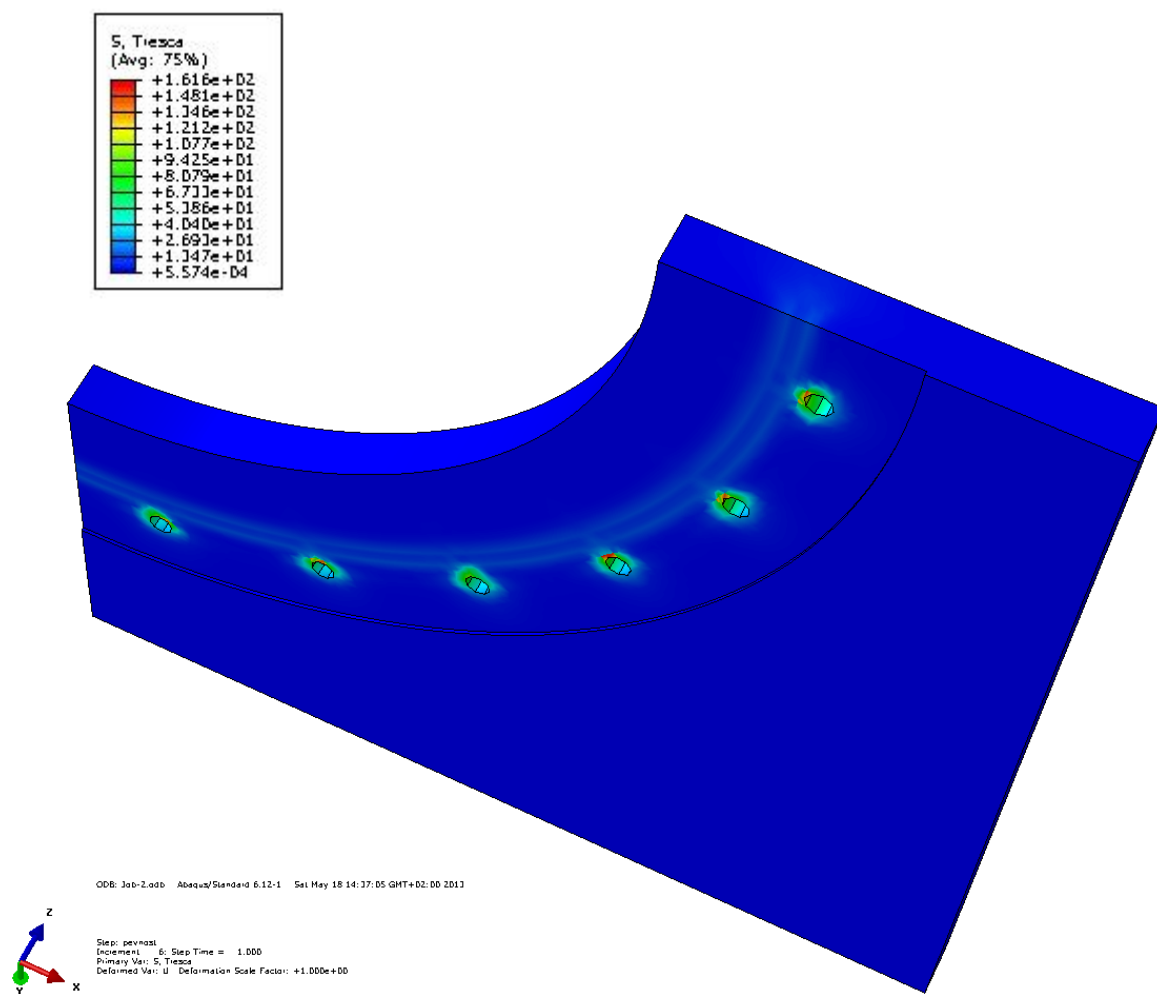


Okrajové podmínky

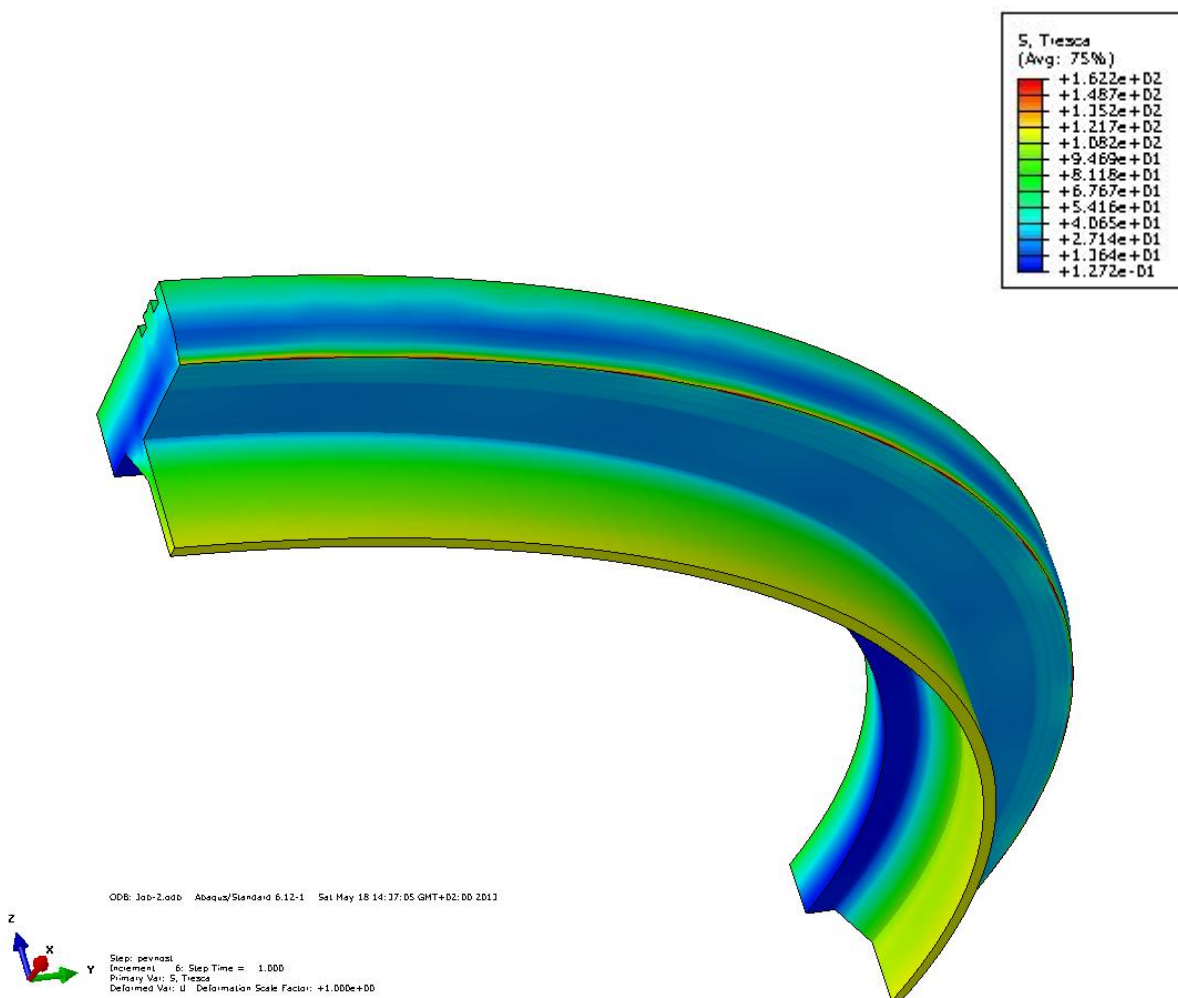


Vypočtené napětí v jednotlivých dílech

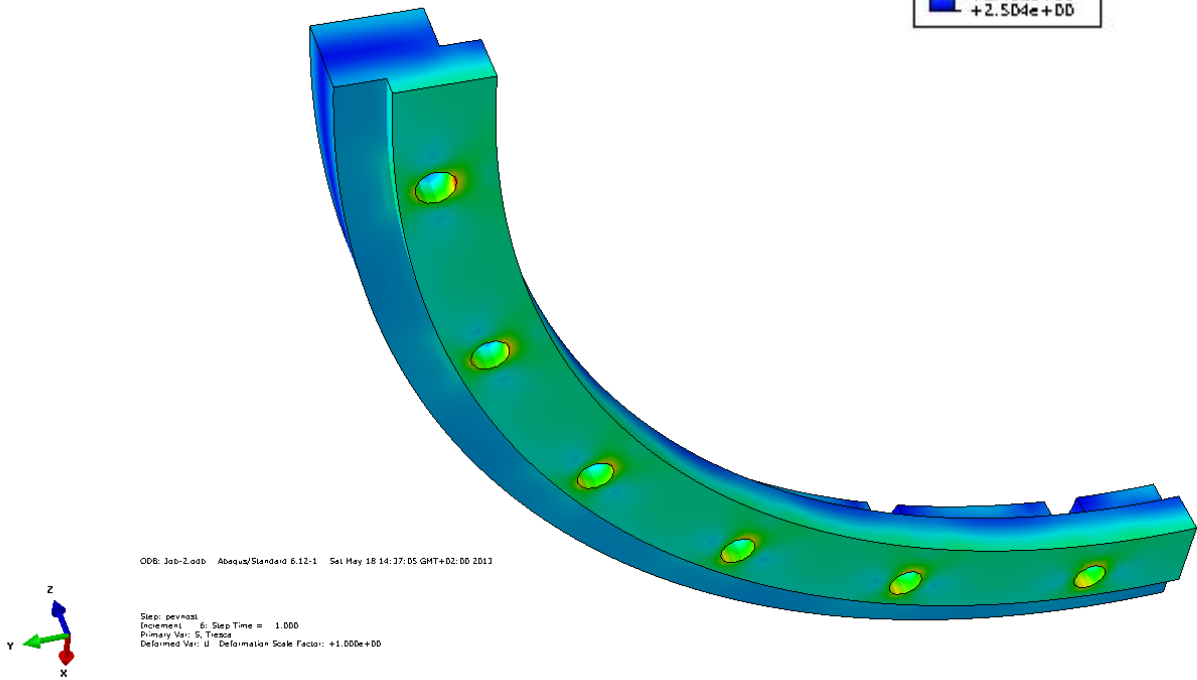
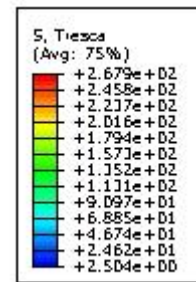
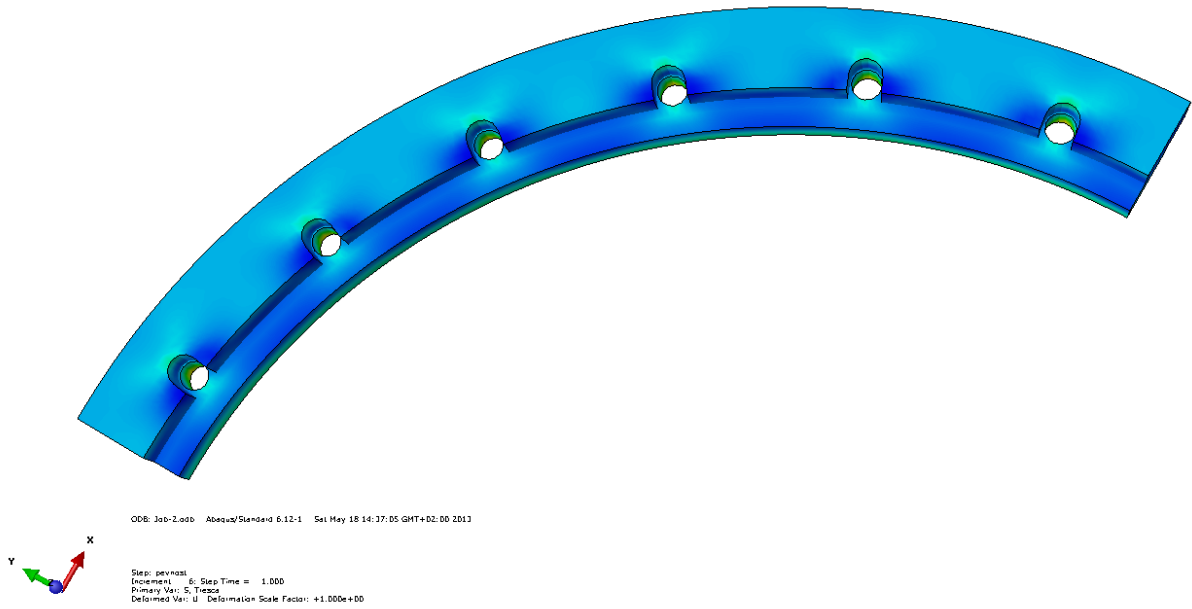
Nosná konstrukce



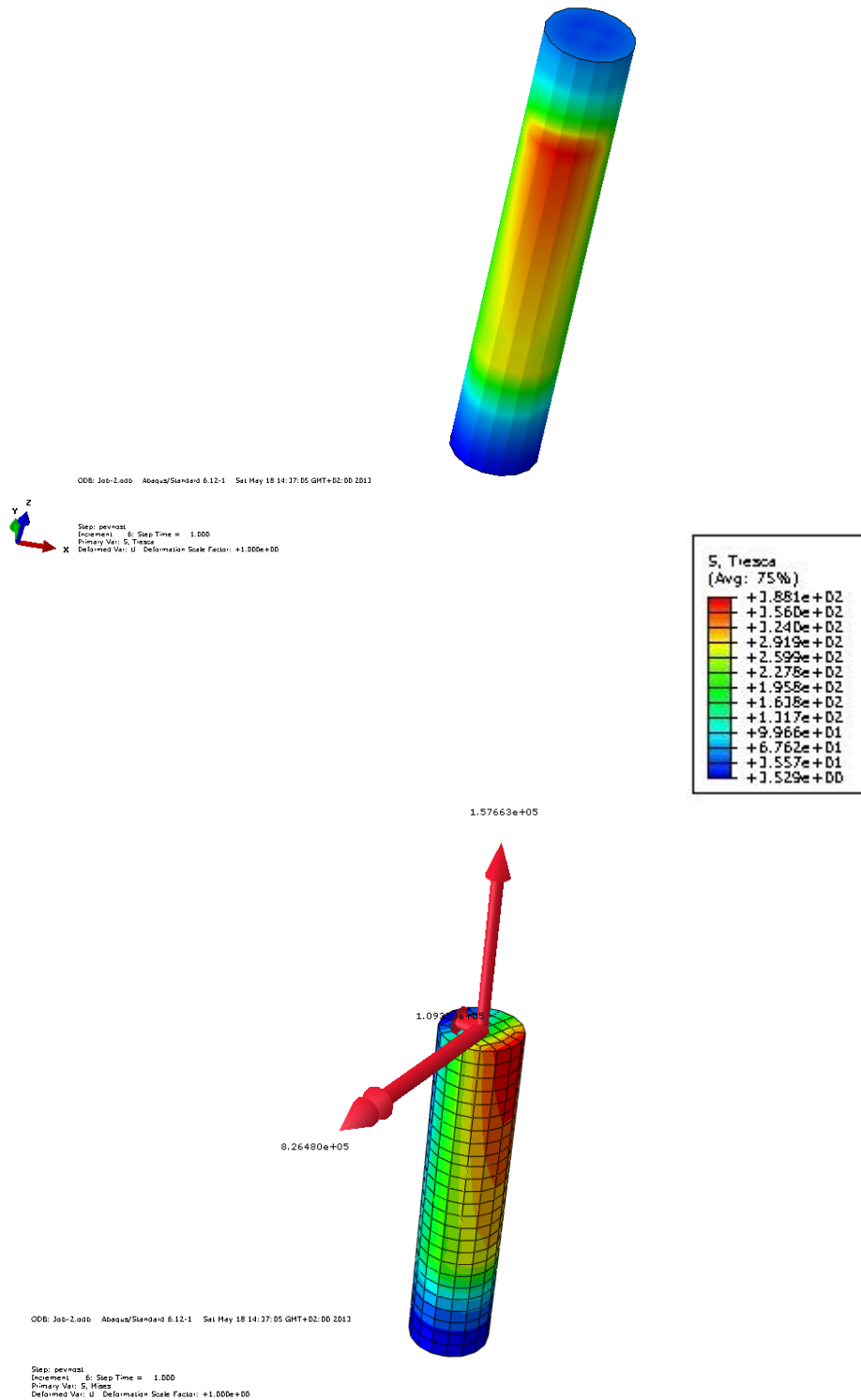
Plochá příruba



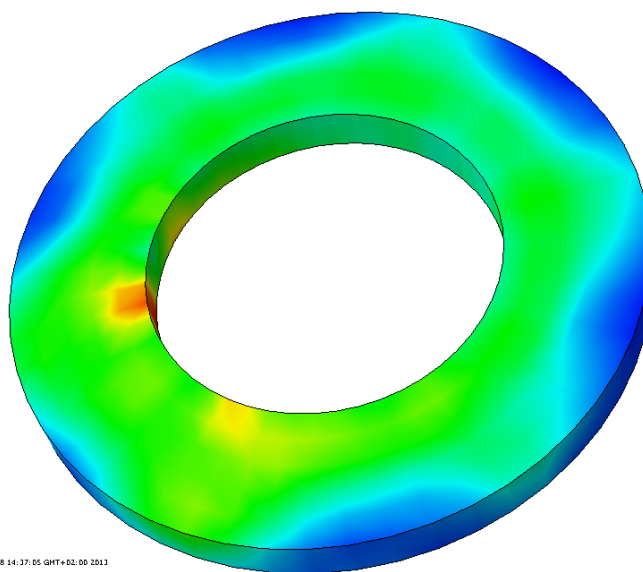
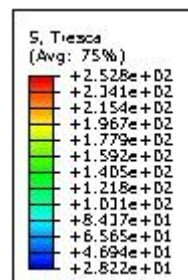
Volná příruba



Šrouby



Podložky



ODB: Job-2.odb Abaqus/Standard 6.12-1 Sat May 18 14:37:05 GMT+02:00 2013

Y Z X

Step: prevzat
Increment: 8; Step Time = 1.000
Primary Var: S, Tresca
Deformed Var: U; Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Porovnání zdeformovaného stavu s počátečním

