

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270017 - Konstruování strojů a
technických zařízení

Studijní specializace: Konstruování výrobních strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Návrh polohovacího stolu pro fragmentaci radioaktivních částí
reaktoru v rámci projektů vyřazování provozovaných elektráren z
provozu**

Autor: Bc. Vít HORÁČEK

Vedoucí práce: prof. Ing. Václava LAŠOVÁ, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vít HORÁČEK**
Osobní číslo: **S19N0113P**
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**
Studijní obor: **Konstruování výrobních strojů a zařízení**
Téma práce: **Návrh polohovacího stolu pro fragmentaci radioaktivních částí reaktoru v rámci projektů vyřazování provozovaných elektráren z provozu**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Cílem práce je návrh jednoúčelového polohovacího stolu schopného pracovat při ponoru v hloubce 10m

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

- 1) *Popis jednotlivých dílů určených pro fragmentaci*
- 2) *Rešerše zaměřená na dostupné polohovací stoly na trhu či na způsob provedení polohovacích stolů*
- 3) *Konstrukční návrh variant polohovacího stolu včetně jeho pohonu*
- 4) *Výkres sestavy stolu a vybrané skupiny dílů*

Rozsah diplomové práce: **40-60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

[1] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. Příručka strojního inženýra: obecné strojní části. Praha: Computer Press, 1999.
ISBN 80-7226-055-3

Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Konzultant diplomové práce: **Ing. Martin Prokš**
ŠKODA JS a.s., Plzeň

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

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

Poděkování

Rád bych poděkoval všem lidem, kteří mě během psaní této práce podporovali, pomáhali mi a stáli při mně. Chtěl bych zde vyzdvihnout pomoc všech, kteří mi pomáhali s realizací jednotlivých částí diplomové práce. Jmenovitě pak jde hlavně o prof. Ing. Václavu Lašovou, Ph.D. za vedení práce, odbornou pomoc a rady ke zpracování práce a pana Martina Prokše – konzultanta z Škoda JS a.s. – za pomoc, rady a uvedení do problematiky. V neposlední řadě bych nerad opomenul svoji rodinu, která mne rovněž podpořila v maximální možné míře.

Vít Horáček

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Horáček	Jméno Vít	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270017 – Konstruování strojů a technických zařízení		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Lašová, Ph.D.	Jméno Václava	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU – FST – KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh polohovacího stolu pro fragmentaci radioaktivních částí reaktoru v rámci projektů vyřazování provozovaných elektráren z provozu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	196	TEXTOVÁ ČÁST	64	GRAFICKÁ ČÁST	132
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	-----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce pojednává o návrhu otočného stolu pro fragmentování částí jaderného reaktoru v rámci projektů vyřazování jaderných elektráren z provozu. V práci je provedena rešerše otočných stolů různých světových firem a součástí určených k fragmentaci. Na základě těchto poznatků pak byl navržen otočný stůl nové koncepce využívající hydraulické válce
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	vyřazování jaderných elektráren, otočný stůl, fragmentace, reaktor

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Horáček	Name Vít	
STUDY PROGRAMME	N0715A270017 – Design engineering of machines and technical devices		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Ing. Lašová, Ph.D.	Name Václava	
INSTITUTION	ZČU – FST – KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of a positioning table for fragmentation of reactor's radioactive parts within decommissioning projects of nuclear power plants		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	196	TEXT PART	64	GRAPHICAL PART	132
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	-----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis is focused on the design of a positioning table for fragmentation of a reactor's parts within the decommissioning projects of nuclear power plants. The new design is based on studies on the reactor's parts and currently used turntables. Thanks to hydraulic cylinders bring the next variant of a drive and smaller and more compact solution.
KEY WORDS	nuclear decommissioning, turntable, reactor, segmentation process

Obsah

1	Úvod	15
2	Účel navrhovaného zařízení	16
2.1	Projekty vyřazování jaderných zařízení z provozu.....	16
2.1.1	Budoucnost odstavených elektráren ve světě.....	16
2.1.2	Metodika vyřazování elektráren.....	17
2.1.3	Materiály a odpady získané při demontáži	18
2.2	Fragmentace součástí	20
2.2.1	Metodika fragmentace.....	20
2.2.2	Součásti ke fragmentování na otočném stole	23
2.2.3	Metody dělení součástí.....	26
3	Otočné stoly – popis a současná řešení	29
3.1	Otočné stoly ostatních dodavatelů	30
4	Návrh variant otočného stolu	35
4.1	Varianta A – stávající řešení.....	36
4.2	Varianta B.....	37
4.3	Varianta C.....	38
4.4	Varianta D.....	39
4.5	Výběr nejvýhodnější varianty	40
5	Návrh dílčích celků vybrané varianty	41
5.1	Vrchní otočná deska	41
5.1.1	Vrchní deska	41
5.1.2	Svařovaný rám.....	43
5.1.3	Axiální uložení otočné části	45
5.1.4	Pevnostní kontrola vrchní desky.....	48
5.2	Návrh a výpočet pohonů.....	51
5.2.1	Koncepce.....	51
5.2.2	Výpočet valivého odporu při pohybu kuželíků.....	53
5.2.3	Moment desky s fragmentovaným tělesem.....	56
5.2.4	Celkový potřebný moment pro otočení	56
5.2.5	Potřebná síla pohonu	57
5.2.6	Volba pohonu	57
5.2.7	Pevnostní kontrola.....	58
5.2.8	Radiální zachycení sil.....	59
5.3	Pevný rám	59
6	Zhodnocení	62

6.1	Celkový pohled	62
6.2	Maximální zátěž	63
6.2.1	Otočná deska	63
6.2.2	Pevná část	65
7	Závěr	67
8	Seznam použité literatury	68

Seznam příloh

Příloha 1	3D model otočného stolu s částí reaktoru se základními kótami	1xA4
Příloha 2	Výkres sestavy otočného stolu včetně kusovníku (v deskách)	1xA0 2xA4
Příloha 3	Výkres podsestavy rámu včetně kusovníku (v deskách)	1xA0 2xA4
Příloha 4	Výkres svařovaného rámu – podsestava (v deskách)	2xA0 1xA4
Příloha 5	Výkres svařované konstrukce – podsestava (v deskách)	2xA0 1xA1 1xA4
Příloha 6	Výkres kuželíkové otoče – sestava včetně kusovníku	1xA0

Seznam obrázků

Obr. 1	– životní cyklus elektrárny.....	18
Obr. 2	– skladiště nízko radioaktivního odpadu před zasypáním.....	19
Obr. 3	– schéma podmořského úložiště Forsmark ve Švédsku.....	20
Obr. 4	– schéma reaktoru VVER-1000.....	21
Obr. 5	– reaktorový sál JE Temelín.....	22
Obr. 6	– schéma situace na reaktorovém sále.....	23
Obr. 7	– části reaktoru k fragmentaci.....	23
Obr. 8	– model reaktorové hlavy.....	24
Obr. 9	– nová reaktorová hlava reaktoru v JE Leningrad.....	24
Obr. 10	- blok ochranných trubek reaktoru VVER.....	24
Obr. 11	– vnitřní reaktorové šachty.....	25
Obr. 12	– vnitřní plášť aktivní zóny reaktoru.....	25
Obr. 13	– hrubý svařenec reaktorové nádoby typu VVER.....	26
Obr. 14	– nádoba při instalaci.....	26
Obr. 15	– řezný kotouč pily s hydraulickým pohonem.....	28
Obr. 16	– dělení tlakové nádoby in situ pomocí vodního paprsku.....	29
Obr. 17	– plán segmentace tlakové nádoby reaktorů od vědců z Jižní Korey.....	30
Obr. 18	– jihokorejský – 현동준 – způsob fragmentace pomocí otočného stolu.....	31
Obr. 19	– fragmentace vnitřní šachty reaktoru – Barsebäck (SWE)	32

Obr. 20	– jiný typ otočného stolu Westinghouse.....	32
Obr. 21	– otočný stůl používaný konsorciem GE – HITACHI.....	33
Obr. 22	– speciální stůl na fragmentaci dna tlakové nádrže.....	33
Obr. 23	– schéma fragmentování reaktoru Kori K1.....	34
Obr. 24	– segmentační plán tlakové nádoby.....	34
Obr. 25	– varianta A – stávající řešení.....	36
Obr. 26	– varianta využívající železniční kola a stejnosměrný elektromotor	37
Obr. 27	– varianta otočného stolu s lodním šroubem.....	38
Obr. 28	– model varianty využívající hydraulické pohony.....	39
Obr. 29	– schématické řešení otočné části stolu.....	41
Obr. 30	– vrchní pohled na desku zachycující její rozdělení.....	42
Obr. 31	– rozložení částí vrchní desky na tabulích plechu.....	42
Obr. 32	– barevně rozlišené schéma rámu.....	43
Obr. 33	– schéma rozložení drah a kuželíků.....	43
Obr. 34	– kolorovaný pohled na jednotlivé části tvořící svařovaný rám.....	44
Obr. 35	– vrchní pohled na segmenty desky, přišroubované k rámu.....	44
Obr. 36	– spodní pohled na návrh valivého uložení otočného stolu.....	45
Obr. 37	– detail na kuželíky a vedení pomocí otočných válečků ve spodní dráze.....	45
Obr. 38	– kótované schéma pro výpočet velikostí kuželíků vnějšího prstence.....	46
Obr. 39	– zjednodušená geometrie v prostředí Design Modeler.....	48
Obr. 40	– rozložení podmínek, vazeb a sil na modelu.....	48
Obr. 41	– Výsledná deformace ve vertikální ose Z.....	49
Obr. 42	– reakce ve vazbách.....	49
Obr. 43	– deformace ve svislé ose (Z) na modelu 1/3 otočné desky.....	50
Obr. 44	– redukované napětí dle hypotézy HMM na stejném modelu.....	50
Obr. 45	– použitá síť (mesh) pro model nejexponovanějšího modelu.....	50
Obr. 46	– podélný řez pro model Hertzova kontaktu mezi dráhami a kuželíkem.....	51
Obr. 47	– schéma umístění pohonu s možnostmi pohybů komponent.....	51
Obr. 48	– render modelu s barevně odlišenými částmi pohonu.....	52
Obr. 49	– schéma polohu v jednotlivých polohách.....	53
Obr. 50	– schéma otáčení vrchní desky a odvalujícího se kuželíku.....	53
Obr. 51	– velikosti zatížení [N] jednotlivých kuželíků a jejich pozice.....	54
Obr. 52	– náčrt výpočtu tečné síly.....	54
Obr. 53	– schéma výpočtu potřebné síly pohonu	57
Obr. 54	– kótovaný náčrt zvoleného pohonu.....	58
Obr. 55	– výsledky MKP analýzy zatížené desky s pohonem.....	58
Obr. 56	– pohled na radiální ložisko skrze otvor po demontované vrchní desce.....	59
Obr. 57	– pohled na pevnou část rámu.....	59

Obr. 58 – kolorovaný obrázek konstrukce rámu s vyznačenými typy profilů.....	60
Obr. 59 –připojení hydraulických hadic a následné vedení trubkami.....	60
Obr. 60 – celková deformace rámu	61
Obr. 61 – výsledky průběhu redukovaného napětí (HMH)	61
Obr. 62 – celkový pohled na navržený stůl.....	62
Obr. 63 – detail na připojení hydraulických hadic a kryty ložisek.....	62
Obr. 64 – vrchní pohled na výsledky deformací při kombinovaném zatížení.....	63
Obr. 65 – výsledná redukovaná napětí při kombinovaném zatížení.....	63
Obr. 66 – průběh deformace při zatížení vrchní desky nad pohony.....	64
Obr. 67 – redukované napětí při kontrole kritické části vrchní desky.....	64
Obr. 68 – deformace pevné části při kombinovaném zatížení.....	65
Obr. 69 – redukované napětí na pevném rámu při kombinovaném zatížení.....	65
Obr. 70 – deformace rámu pod zatížením 200 t v kritické vzdálenosti od středu...	66
Obr. 71 – redukované napětí na rámu při kritickém zatížení.....	66

Seznam tabulek

Tabulka 1 – počet reaktorů ve světě.....	16
Tabulka 2 – množství odpadu z likvidace elektrárny – radioaktivní materiály.....	19
Tabulka 3 – množství odpadu z likvidace elektrárny – kontaminované materiály..	19
Tabulka 4 – alternativy řešení otočného stolu.....	35
Tabulka 5 – hodnocení variant otočného stolu	40
Tabulka 6 – odpory kuželíků proti valení (na 1/3 stolu)	55

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Název
a	[mm]	rameno působení síly pohonu
D	[mm]	průměr kuželíku
F	[kN]	síla pohonu
F ₀	[N]	odporová síla jednoho kuželíku
F _{0D}	[N]	celkový odpor 1/3 kuželíků
F _N	[N]	normálová síla při výpočtu valivého odporu
F _T	[N]	tečná síla při výpočtu valivého odporu

F_Q	[N]	síla zatěžující kuželík
I	[kg·m ²]	moment setrvačnosti stolu
i	[-]	index pozice kuželíku
k	[-]	koeficient bezpečnosti
L	[mm]	délka kuželíku
M_{celk}	[N·m]	nutný celkový krouticí moment
M_R	[N·m]	moment potřebný k rozběhu
M_{T01}	[N·m]	odporový moment kuželíků
m	[kg]	hmotnost
n	[-]	poloha kuželíku
n_{max}	[s ⁻¹]	maximální otáčky
o	[mm]	dráha, kterou urazí kuželík na 1 otáčku
O	[mm]	dráha, kterou musí kuželík vykonat
R	[mm]	poloměr
R_R	[mm]	vzdálenost středu kuželíku
R_{OT}	[mm]	poloměr otáčení
R_e	[MPa]	mez kluzu materiálu
t	[s]	doba rozběhu
ε	[rad·s ⁻²]	úhlové zrychlení
σ_{max}	[MPa]	maximální napětí
σ_{red}	[MPa]	redukované napětí
ξ	[m]	rameno valivého odporu

Seznam použitých zkratk

ČR	Česká republika
ČSN	česká technická norma
EN	evropská norma
EU	Evropská unie
GE	General Electric Company
JE	jaderná elektrárna
MKP	metoda konečných prvků
RU	Russia (angl. Rusko)
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TU	Turkey (angl. Turecko)
USA	The United States of America (angl. Spojené státy americké)
VVER	vodo-vodní energetický reaktor

1 Úvod

Vzhledem k současné situaci ve společnosti, kdy jsou značné tlaky na zvyšování bezpečnosti jaderných elektráren, dochází v některých zemích k rozhodnutím vedoucím k jejich úplnému uzavření a stále více se do popředí dostávají projekty vyřazování jaderných elektráren z provozu. Každý stát, který provozuje nebo provozoval jadernou elektrárnu, má schválenou koncepci o dalším osudu vyřazeného jaderného zdroje. Jednou z cest je konzervace areálu, avšak v posledních letech výrazně rostou snahy o celkovou likvidaci a šetrné rozebrání.

Likvidace atomové elektrárny je dlouhodobý proces, který je ovlivněn zejména poločasem rozpadu radioaktivních prvků. Jelikož není možné čekat na dobu, než budou i nejvíce radioaktivní části – například aktivní zóna – bezpečné, přistoupilo se k plánům na fragmentaci částí reaktoru a dalších, radioaktivitou zamořených, struktur. Cílem fragmentace je zmenšení celkového objemu radioaktivních materiálů a jejich následný převoz a uskladnění v patřičném úložišti.

Nejnáročnější částí na likvidaci je samotný reaktor – jedná se o části, které patří mezi středně i vysoce radioaktivní odpady a zároveň jde o velmi rozměrná a neskladná tělesa. Před jejich uskladněním se tedy fragmentují, což je ovšem proces, při kterém nevyhnutelně vzniká další nebezpečí – radioaktivní prach. Fragmentace proto probíhá ve vodě, která i mikroskopické částičky prachu zachytí. Proces dělení částí reaktoru pak spočívá v postupném řezání součásti umístěné na otočném stole. Řezací aparát – například pila, kotouč nebo plazmový hořák – koná jednoduché vertikální nebo horizontální pohyby a otočný stůl přistavuje součást do požadované pozice.

Požadavky na otočný stůl závisí na použité technologii. V této práci půjde o otočný stůl umožňující pouze natáčení součásti. Podmínkou je velmi malá výška – max. 0,5 metru a značná robustnost konstrukce.

2 Účel navrhovaného zařízení

Navrhované zařízení je klasickým případem jednoúčelového přípravku navrhnutého pro specifické použití. V tomto případě jde o otočný stůl určený k fragmentaci částí jaderného reaktoru v rámci projektů vyřazování jaderných zařízení z provozu. Požadavky na návrh jsou definovány individuálně a určuje je typ a stav rozebírané elektrárny, použitá jaderná technologie, dostupné vybavení a váha a rozměry dílů určených k fragmentaci.

2.1 Projekty vyřazování jaderných zařízení z provozu

V historii využití štěpné jaderné reakce je možno najít několik známých milníků:

- 1938 – první úspěšný pokus štěpení
- 1942 – úspěšná řetězová reakce v reaktoru Chicago Pile-1
- 1954 – připojení jaderné elektrárny Obninsk v SSSR do rozvodné sítě

Od dob těchto prvenství bylo postaveno skoro 600 bloků jaderných elektráren a dalších více než 300 jich je plánováno nebo ve výstavbě. Následující tabulka dává přehled o současné situaci¹:

Tabulka 1 – počet reaktorů ve světě

Reaktory v provozu	Odstaveno	Vyřazeno / probíhá vyřazení	Plánovaná výstavba
421	132	59	308

Plánovaná životnost reaktoru je řádově v desítkách let (liší se dle politicko-ekonomické situace v dané zemi), z čehož je vyplývá, že většina elektráren postavených v 60. a 70. letech 20. století je dnes již odstavena. V některých zemích již započaly nebo dokonce proběhly procesy jejich vyřazení a demontáže. Zároveň je z tabulky patrné, že ze 191 nepoužívaných bloků jich dosud bylo více než 2/3 pouze odstaveno a nebyly zahájeny žádné procesy vedoucí ke konečnému rozebrání.

2.1.1 Budoucnost odstavených elektráren ve světě

Po úspěšném spuštění prvních atomových elektráren následoval zejména v 70. a 80. letech obrovský boom výstavby nových bloků za (obvykle) účelem získání elektrické energie. Vzhledem k rychlému vývoji a nárůstů výkonů u nových bloků byly již v 80. letech 20. století starší bloky odstavovány z provozu. K tomuto trendu navíc přispěly společenské tlaky na uzavření jaderných zdrojů z důvodů havárií globálního významu. Například některé zdroje^[2] citují Michaila Gorbačova (bývalého prezidenta SSSR), který uvádí, že Černobylská havárie znamenala konec Sovětského svazu. Pravdivost této spojitosti je dnes těžké ověřit, ovšem politické tlaky po této havárii vedly k výraznému ochlazení podpory elektriny vyrobené z jádra, což například v tehdejší Západní Německu vedlo k zastavení uvádění nové, plně dokončené, elektrárny Kalkar do provozu^[3].

¹ Data pocházejí ze seznamu jaderných reaktorů^[1] a vzhledem k povaze práce – návrhu otočného stolu – nebyly započteny reaktory plovoucí elektrárny Akademik Lomonosov spuštěné v roce 2019.

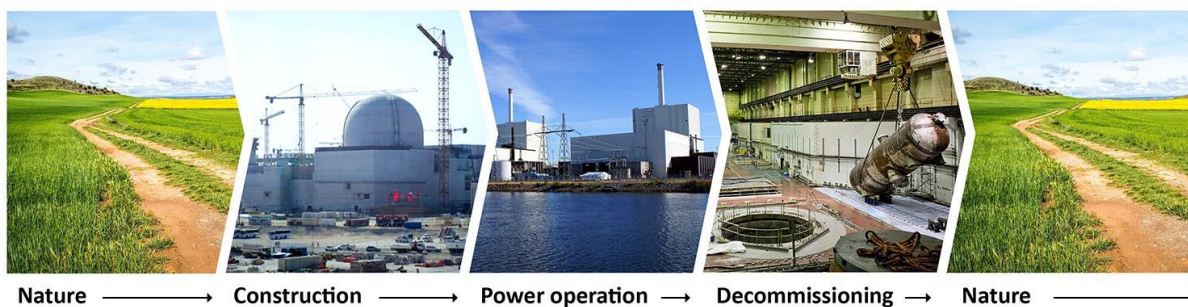
Trend v odstavování elektráren pokračoval a bylo potřeba začít pracovat na nějakém finálním řešení otázky co s rozsáhlými areály, ve kterých se nachází radioaktivní materiál. Mnoho zemí tento problém dodnes řeší udržováním statu quo, tedy elektrárny zabezpečí proti vniknutí nepovolaných osob a jednotlivé objekty podle potřeby udržuje. Mezi tyto země patří Rusko, Bulharsko, ale například také Kanada nebo Japonsko. Na druhé straně jsou státy, jako je Německo, Švédsko nebo Španělsko, které svoje odstavené elektrárny nechtějí nechat samovolně pustnout a rozhodly se pro cestu vyřazení. Od tohoto rozhodnutí si slibují zejména sníženou ekologickou zátěž, zvýšení bezpečnosti v důsledku lepší kontroly nad radioaktivním materiálem a v neposlední řadě finanční úspory, které plynou z ukončení nutnosti střežit a opravovat nevyužívaná zařízení.

Jak už bylo zmíněno, zatím více než 2/3 odstavených bloků zůstává v původním stavu, avšak podíl vyřazených elektráren v posledních letech roste a dá se očekávat, že vzhledem k aktuální politice EU, především pak Evropského parlamentu a některých členských států^[4], bude tento trend pokračovat. Hlasy volající po konci jaderné energetiky se ozývají hlavně z Německa, které zároveň patří mezi premianty ve vyřazování vysloužilých zdrojů. Lze tedy odůvodněně předpokládat, že v následujících 30 letech bude každoročně odstaveno několik bloků a jiné, již odstavené, budou revitalizovány a demontovány. Vzhledem k tomu, že po světě je v plánu výstavba více než 300 nových bloků, které budou převážně nahrazovat starší, technologicky méně vyspělé zdroje, je možné říci, že odvětví zabývající se demontáží vyřazených bloků má budoucnost zajištěnou.

2.1.2 Metodika vyřazování elektráren

K odstavení elektrárny dochází obvykle z finančních příčin – elektrárna je nekonkurenceschopná, vyžaduje velké investice. Další možností jsou stále se zvyšující požadavky na bezpečnost, či politický tlak – například přijetí Slovenska do EU bylo podmíněno vyřazením elektrárny Jaslovské Bohunice V1^[5]. V bývalém Československu do té doby probíhala pouze likvidace jadernou havárií zničeného reaktoru A1, rovněž nacházejícího se v Jaslovských Bohunicích, který se pomalým tempem rozebírá již od roku 1995, a optimistické odhady ukazují na ukončení prací v roce 2035. Závazek Slovenské republiky vůči EU ohledně V1 začal být naplňován v roce 2011 demontáží neozářených částí elektrárny společností JAVYS^[6].

Pohledy na to, jak provést vyřazení elektrárny z provozu se různí – obvykle záleží na finanční situaci subjektu, který má vyřazení provést. Zde se nejvíce projevuje to, zda jde o projekt soukromého investora nebo je hnacím motorem této operace stát. Z pohledu soukromého investora obvykle vítězí varianta zakonzervování, naopak stát (potažmo EU) požaduje úplnou rekultivaci lokality. Velmi často pak dochází k určitému kompromisu, jelikož je výhodné dát dostatečný čas prvkům s krátkým poločasem rozpadu. Fáze vyřazování elektrárny rovněž podléhá kontrole a řízení státními orgány (pro ČR SÚJB) a i byrokraticky jde o náročnou proceduru, na jejímž konci je rozhodnutí o zrušení statusu jaderného zařízení a možnost nového využití areálu. V současnosti je preferováno využití nejaderné části (tj. budov, inženýrských sítí apod.) pro nový účel – například stavbu teplárny nebo nové elektrárny využívající obnovitelné zdroje^[7].



Obr. 72 – Životní cyklus elektrárny – idealistická představa Dr. Antona von Guntena^[8]

Na fázi vyřazení elektrárny pamatují již stavební plány – stavební projekt obsahuje manuál, jak bude v budoucnu elektrárnu možno demontovat, a stavba zejména jaderné části (jaderného ostrova) je tomu přizpůsobena. Při demontáži je započato vyjmutím vyhořelého paliva a jeho odvozem do úložiště. Následuje likvidace nejaderných prvků, které nejsou potřebné ke kontrole, stabilizaci a dochlazování částí jaderného ostrova. Ve světě se používají 3 základní strategie vyřazování^[7]:

- a) **Postupná demontáž elektrárny bezprostředně po odstavení**
- nejrychlejší způsob, finančně i technicky nejnáročnější
- b) **Zakonzervování elektrárny se zachováním minimálního dozoru**
- časově delší (ve vyšších desítkách let), využití přirozeného rozpadu radioaktivních prvků => levnější, zejména z hlediska radiační ochrany
- c) **Postupná demontáž a zakonzervování aktivních částí**
- postup prosazovaný v ČR, výhodou je nižší finanční náročnost, avšak časově jde o nejdéletrvající řešení
- spočívá v demontáži nepotřebných zařízení a konzervaci reaktorů spolu s primárním okruhem a pomocnými pohony

2.1.3 Materiály a odpady získané při demontáži

V případě všech postupů rozebrání elektrárny vzniká obrovské množství odpadu mnoha druhů a míry radioaktivity. Na volbě metody pak závisí poměry mezi různě nebezpečnými odpady. Z hlediska nebezpečí radioaktivity se rozlišují 4 typy odpadů^[9]:

- a) **neradioaktivní odpady** – zejména ocel, beton a různá elektrická zařízení a kabely. Odpad této kategorie je ihned recyklovatelný jako klasická suť, železný šrot apod.
- b) **nízkoradioaktivní odpady** – kontejnment, vnější části reaktorové nádoby, větší část potrubí a vybavení na reaktorovém sále. Odpad této kategorie je tříděn, část je možno recyklovat, zbytek se rozděljuje a ukládá v kontrolované oblasti pod zem, kde se čeká na rozpad radionuklidů.
- c) **středně radioaktivní odpady** – vnitřní šachta reaktoru, část bloku ochranných trubek, beton z oblasti nejbližší aktivní zóně, některá potrubí a pomocné pohony – ukládá se do kontejnerů se stíněním, které se následně přepravují do dlouhodobého úložiště, kde jsou zality betonem.

- d) **vysoce radioaktivní odpady** – jde hlavně o reflektor, aktivní zónu a vyhořelé palivo – ukládáno do speciálních kontejnerů (v ČR používány typu CASTOR nebo nově ŠKODA 1000/19²), které zaručují odvětrávání, radiační stínění a mechanickou ochranu.

Podle výzkumu švédské společnosti Scandpower AS průměrně vznikne při kompletní demontáži jednoho bloku jaderné elektrárny o instalovaném výkonu 800 až 1 000 MW následující množství radioaktivního a kontaminovaného materiálu^[9]:

Tabulka 2 – množství materiálu získaného při likvidaci elektrárny – radioaktivní materiály

Nízko radioaktivní OCEL	Nízkoradioaktivní BETON a PÍSEK	Středně radioaktivní OCEL	Středně radioaktivní BETON
~483 t	~1 375 t	~125 t	~100 t
~585 m ³	~1 835 m ³	~250 m ³	~150 m ³

Tabulka 3 – množství materiálu získaného při likvidaci elektrárny – kontaminované materiály

Velmi níže radioaktivní odpad	Nízkoradioaktivní OCEL	Středně radioaktivní OCEL	Středně radioaktivní OSTATNÍ ODPADY
~275 t	~2833 t	~291 t	~500 t
~916 m ³	~4 620 m ³	~417 m ³	~1000 m ³

Z výzkumu dále vyplývá, že z jednoho bloku elektrárny je vyprodukováno až 300 000 tun odpadu, z čehož cca 170 000 tun je neradioaktivních a naopak 5 700 tun vyžaduje skladování ve speciálních kontejnerech a úložištích. V objemových jednotkách to při adekvátním uložení činí 8 360 m³, které je potřeba uložit v místě s dostatečnou geologickou stabilitou a zároveň dobrým přístupem kvůli kontrole při skladování.



Obr. 73 – skladiště nízko radioaktivního odpadu před zasypáním^[11]

² Prvně použit pro uskladnění vyhořelého paliva z JE Temelín v roce 2018. Od 1. odstávky v roce 2021 budou použity i pro JE Dukovany.

2.2 Fragmentace součástí

V předchozí kapitole bylo zmiňováno zhruba 5 700 tun radioaktivního odpadu, který není možné pouze zakopat do země, ale pro jeho uložení je nutná výstavba speciálních úložišť. Výstavba úložišť je velice drahou a politicky citlivou záležitostí – např. v ČR bylo vytipováno několik lokalit, které by byly geologicky i geograficky vhodné, avšak realizace naráží na tvrdý odpor místních obyvatel a samospráv^[11]. Nové úložiště by mělo sloužit jednak pro vyhořelé palivo, ale výhledově i jako místo, kam se bude dávat radioaktivní odpad z likvidovaných elektráren³. Země s větším počtem elektráren již obvykle svá trvalá úložiště mají – např. Švédsko vybuodovalo trvalé úložiště na celkem 68 000 m³ materiálu pro aktuálně vyřazované elektrárny 50 metrů pod hladinou Baltského moře^[12].



Obr. 74 – Schéma podmořského úložiště Forsmark ve Švédsku^[12]

Je patrné, že vzhledem k objemu odpadu z jednoho bloku elektrárny (cca. 8 360 m³) je velice podstatnou částí procesu správné rozdělení velkých součástí bloku elektrárny tak, aby je bylo možné co nejvýhodněji uložit do kontejnerů a zabíraly co nejméně místa. Druh a tvar použité nádoby závisí na typu materiálu, míře jeho radioaktivity a technologii uložení

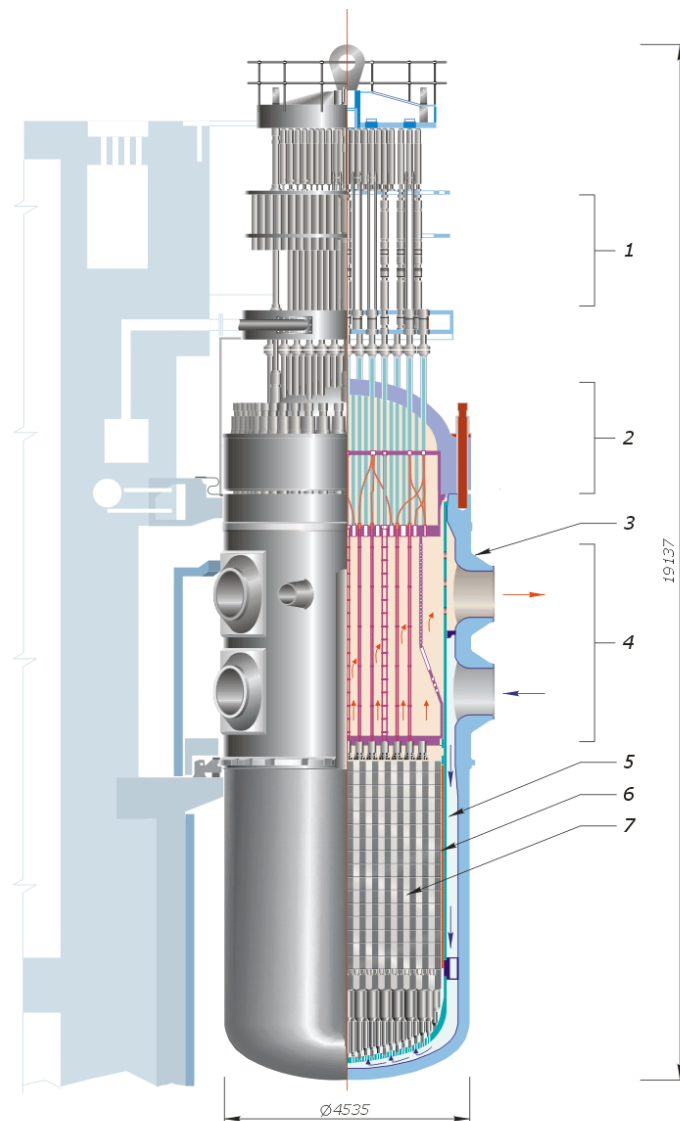
2.2.1 Metodika fragmentace

Po finálním odstavení elektrárny následuje několikaletý klidový režim, při kterém dochází k postupnému útlumu štěpné reakce. Elektrárna musí v tomto režimu zůstat připojená k vnější síti kvůli dochlazování aktivní zóny a možnosti řídit zbytkové reakce. Po uplynutí přibližně tří let dochází k vyjmutí paliva z aktivní zóny. Následuje zhruba tři roky trvající demolice nepotřebných zařízení, likvidace technicky důležitých vod a recyklování neradioaktivního odpadu. Budova reaktoru zůstává netknutá, protože slouží jako kryt pro provedení fragmentace částí reaktoru a primárního okruhu.

Postup fragmentace je jednoduchý – nejprve jsou označeny části, které jsou radioaktivní, případně byly kontaminovány. Pokud je možné jejich rozebrání libovolnou nedestruktivní metodou – například rozšroubováním nebo rozlisováním – je tato

³ Týká se především JE Dukovany, konkrétně bloků 1 až 4, kterým končí prodloužená životnost kolem roku 2045.

metoda aplikována, tak aby nedocházelo k tvorbě úštěpků, třísek a prachu, které snadno kontaminují další materiál či oblasti. Takto je možno zpracovat například velkou část potrubí. Když jsou tyto metody vyčerpány, musí následovat fragmentace pomocí pil, laseru, vodního paprsku nebo plazmových hořáků. Velkou komplikací je vznikající radioaktivní prach a páry tvořené mimo jiné mikroskopickými částicemi, které pronikají filtry. Z tohoto důvodu je nutné veškeré dělení provádět ve vodní lázni. V případě menších součástí (cca do 2 metrů) následuje přesunutí jeřábem do připraveného boxu (bazénu) s vodou, kde dojde k rozdělení na požadované velikosti. Největším problémem zůstává samotný reaktor. Zadání této diplomové práce není pro určitý typ nebo výrobce ani technologii reaktoru. S konzultantem ze zadávající firmy ŠKODA JS a.s. bylo domluveno, že práce bude koncipována na fiktivní elektrárnu s použitou sovětskou konstrukcí reaktoru typu VVER-1000.

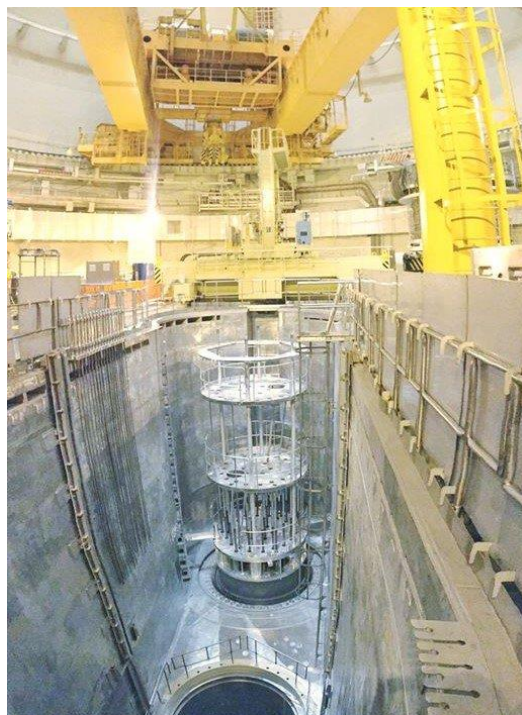


Obr. 75 – Schéma reaktoru VVER-1000^[13]

Číslo označují: **1** – Ovládání řídicích tyčí; **2** – hlava reaktoru; **3** – reaktorová nádoba;
4 – nátrubky pro vstup a výstup vody primárního okruhu; **5** – vnitřní plášť; **6,7** – aktivní zóna

Na obrázku číslo 4 je zobrazen reaktor VVER-1000, jedná se o typ nacházející se např. v JE Temelín nebo v elektrárnách v Bulharsku, Indii a Číně. Jde o větší a výkonnější kategorii reaktorů a dosud nebyl nikde na světě vyřazován z provozu. Všechny do této doby spuštěné jsou s výjimkou plánovaných odstávek v provozu. Nejsou proto zdokumentovány žádné postupy jejich demontáže a popis fragmentace na následujících řádkách vychází z konstrukčně příbuzného, staršího reaktoru typu VVER-440, jejichž vyřazování již proběhlo v Německu.

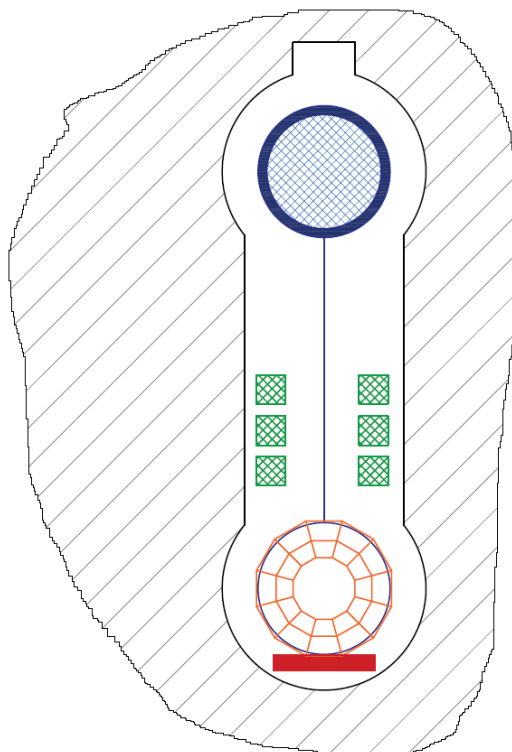
Demontáž reaktoru je možná až po několika letech od odstavení a odebrání jaderného paliva. Po vyjmutí palivových kazet je nádoba znovu uzavřena a následují práce na demontáži ostatního zařízení, při kterých není třeba řezání ve vodní lázni. Po provedení těchto prací následuje technicky, finančně i časově nejnáročnější operace – rozebrání samotného reaktoru. Ten je ve stavu, kdy je tlaková nádoba uzavřena, uvnitř se ale již nenachází palivové soubory. Ty jsou uskladněny ve speciálních kontejnerech ve skladech vyhořelého paliva, případně již v trvalém úložišti. Z reaktoru je dále demontováno veškeré zařízení, které je možno odebrat za podmínky zachování těsnosti tlakové nádoby. Následně je třeba připravit kavernu na reaktorovém sále, která bude naplněna vodou a kde později proběhne samotná fragmentace vnitřních částí reaktoru a tlakové nádoby. K tomuto účelu se s výhodou používá prostor pro manipulaci s jaderným palivem potřebný při jeho rutinní výměně za provozu.



Obr. 76 – reaktorový sál JE Temelín^[14] **Nahoře:** polární jeřáb;
Uprostřed: hlava reaktoru s ovládním řídicích tyčí; **Dole:** bazén pro výměnu paliva

Na obrázku 5 je zachycena kaverna reaktorového sálu po výměně paliva v době, kdy už je reaktor uzavřen a probíhá finální kompletace víka, ovládním řídicích tyčí a je připraveno zavedení měřících sond do aktivní zóny, které za provozu sledují neutronový tok. Přípravy na fragmentaci reaktoru spočívají v kontrole a případných opravách

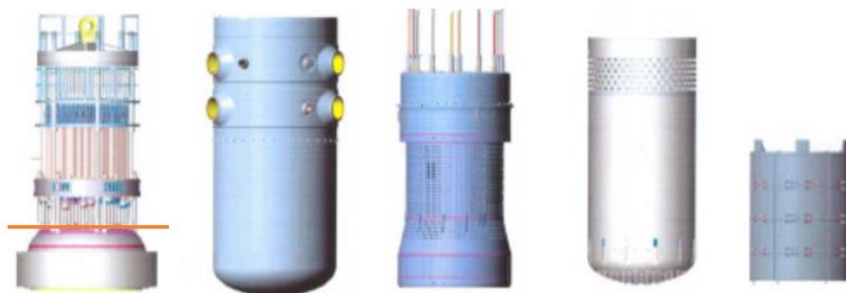
betonové kaverny. Na místo bazénu pro vyhořelé palivo bude přistaven otočný stůl, který je předmětem návrhu této diplomové práce. Vedle otočného stolu je následně postaveno zařízení pro fragmentaci materiálu, které za pomoci otočného stolu rozdělí vnitřní části reaktoru, tlakovou nádobu a její víko na požadovaný počet segmentů. Segmenty jsou pomocí polárního jeřábu nebo manipulátoru skládány do beden ležících vedle stolu.



Obr. 77 – schéma situace na reaktorovém sále těsně před naplněním kaverny (reaktorové šachty) vodou
Modře – reaktor; **Oranžově** – otočný stůl; **Červeně** – dělicí zařízení; **Zeleně** – bedny na materiál

2.2.2 Součásti ke fragmentování na otočném stole

Fragmentování na otočném stole je poměrně zdlouhavá činnost, z tohoto důvodu je snaha takto provádět co nejmenší objem prací. V praxi se tedy takto dělí pouze velké kompaktní kusy, které je nutno dělit pod vodou. Jedná se o následující části:



Obr. 78 – části reaktoru k fragmentaci^[45] **zleva**: vrchní část (reaktorová hlava); tlaková nádoba; blok ochranných trubek; vnitřní šachta reaktoru (koš aktivní zóny); plášť aktivní zóny (reflektor)

- a) **reaktorová hlava** – spodní část je tvořena víkem, kterým prochází řídicí tyče, dále se zde nachází prostory pro sondy k měření teploty a neutronového toku za provozu reaktoru. K tlakové nádobě je tlakotěsně připevněna sadou šteftů a matic dotažených dle předepsaného momentu. Víko nádoby má stejný průměr jako nádoba samotná – 4 535 mm – a výšku (bez ovládání řídicích tyčí) 2 650 mm. Jedná se o ocelový svařenec s váhou okolo 90 tun^[22].

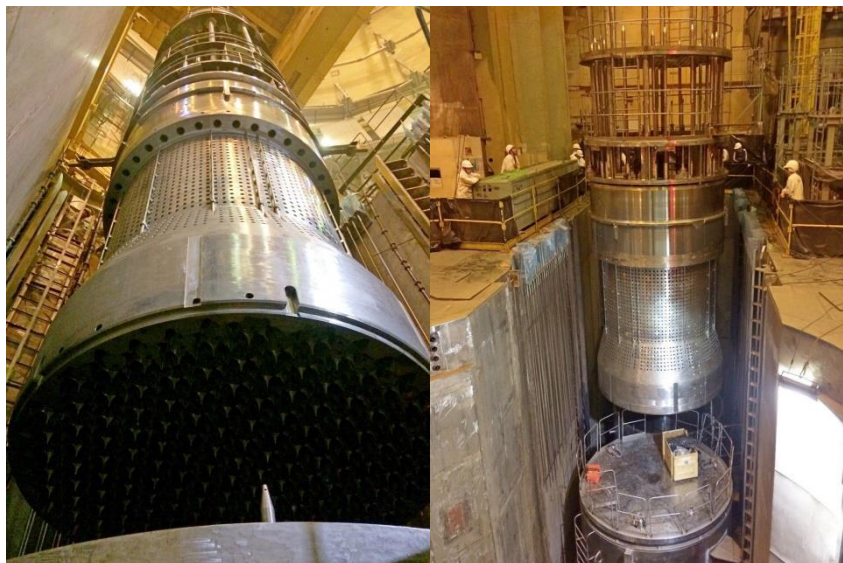


Obr. 79 – model reaktorové hlavy^[16]



Obr. 80 – nová reaktorová hlava reaktoru v JE Leningrad^[17]

- b) **blok ochranných trubek** – válcovitá vnitřní část reaktoru nacházející se nad aktivní zónou, kterou prochází svazkové řídicí tyče. Hlavní funkcí je vedení řídicích tyčí a palivových souborů či kazet. Její „poréznost“ a tvar umožňuje průtok vody primárního reaktoru od aktivní zóny skrze nátrubky do parogenerátoru. Jde o vnitřní část reaktoru, je tedy menšího průměru – přibližně 3 600 mm. Výška je 5 400 mm. Blok ochranných trubek je převážně z oceli a z většiny se jedná o nízkoradioaktivní odpad o celkové hmotnosti cca 50 tun.



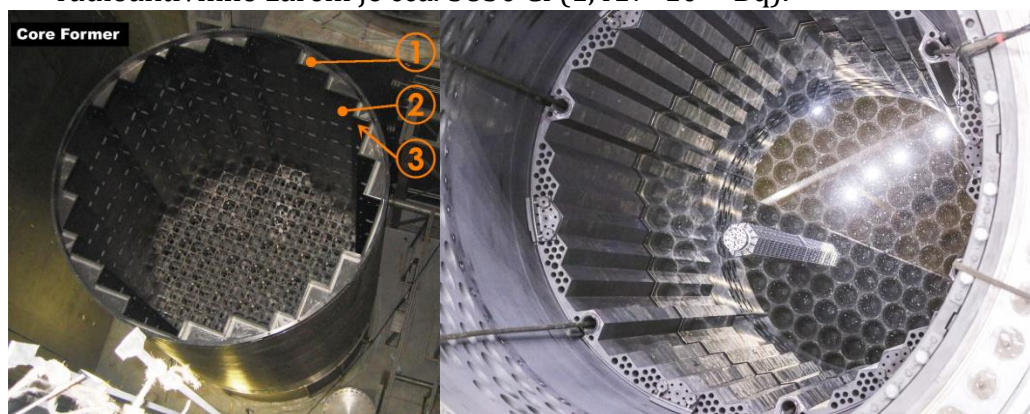
Obr. 81 - blok ochranných trubek reaktoru VVER v JE Leningrad při prvním sestavování reaktoru v roce 2019^[18]

- c) **vnitřní šachta reaktoru** = vnitřní nádoba reaktoru. Je tvořena děrovaným dnem, kterým proudí voda primárního okruhu dovnitř mezi kazety s palivovými proutky. Dno je zaoblené a uvnitř vyplněné strukturou stejnou jako v bloku ochranných trubek, se kterým se společně stará o geometrické rozmístění palivových kazet. Zaoblené dno přechází do duté, válcové, shora otevřené nádoby, ve které se nachází aktivní zóna, reflektor a blok ochranných trubek. Ve vrchní části jsou po obvodu díry, kterými proudí voda ven z aktivní zóny. Konstruktivně se jedná o ocelový svařenec o váze přes 100 tun, který patří mezi středně radioaktivní části reaktoru. Výška šachty je okolo 10 000 mm a její vnější průměr zhruba 3 700 mm



Obr. 82 – vnitřní reaktorové šachty vyrobené ruskou společností Rosatom pro JE Rooppur v Bangladéši v roce 2020^[19]

- d) **plášť aktivní zóny** – vnitřní část reaktoru, přímo vymezuje aktivní zónu. Z tohoto důvodu je vyroben z ocelové kostry, která je z vnitřní strany obložena přišroubovaným grafitem. Grafit slouží jako reflektor a udržuje neutrony ve vymezeném prostoru⁴. Rozměry pláště jsou 3 600 mm v průměru a 3 800 mm na výšku. Jedná se o vysoce radioaktivní materiál. Intenzita radioaktivního záření je cca. 3830 Ci ($1,417 \cdot 10^{10}$ Bq).



Obr. 83 – vnitřní plášť aktivní zóny reaktoru – vlevo JE Indian Point (USA)^[20], vpravo JE Leningrad (RU)^[21]
Čísla označují: 1 – kostru pláště (former); 2 – grafitové desky (baffle); 3 – šrouby

Na obrázku 12 stojí za pozornost rozdíl mezi „západní“ (vlevo) a sovětskou konstrukcí, patrný zejména na tvaru palivových kazet.

⁴ U lehkovodních reaktorů (kam patří i reaktory VVER) je jako reflektor ve vertikálním směru použita voda primárního okruhu. V radiálním směru toto řešení není možné a používá se grafit^[25].

- e) **tlaková nádoba reaktoru** – vnější obal reaktoru, největší a nejtěžší součást k fragmentaci. Jedná se o ocelovou, shora otevřenou tlakovou nádobu. Jde o masivní ocelový svařenec z více kusů – dna, válcové části tvořené prstenci, dvou pater s nátrubky pro vstup a výstup vody do reaktoru a válcové části s dírami pro štefty, kterými se později přimontuje reaktorová hlava. Tloušťka stěny nádoby se pohybuje od 430 mm v místě, kde přiléhá hlava reaktoru, po 170 mm u válcové části a dna. Za provozu reaktoru je nádoba vystavena přetlaku 15,7 MPa^[22].



Obr. 84 – hrubý svařenec reaktorové nádoby typu VVER JE Akkuyu (TU)^[23] **Obr. 85** – nádoba při instalaci^[24]

Z hlediska rozebírání jaderného bloku představuje fragmentace tlakové nádoby největší a časově nejnáročnější výzvu. Hlavním problémem jsou celkové rozměry, váha a její umístění uvnitř šachty. U reaktoru VVER – 1000 má tlaková nádoba průměr 4 535 mm (v místě nátrubků cca 4 660 mm) a výšku 10 850 mm. Váha nádoby je 320 t^[22]. Samotná nádoba není díky reflektoru a stínění vysoce radioaktivní, spadá do kategorie nízkoradioaktivních odpadů.

2.2.3 Metody dělení součástí

Již v kapitole 2.2.1 bylo zmíněno, že k rozdělení součástí na menší, a především skladnější kusy, je možné použít několik metod. Druh použité metody se mimo jiné odráží na návrhu otočného polohovacího stolu a je jedním z nejdůležitějších rozhodnutí, které je nutno provést před samotným plánováním procesu fragmentace. Výběr metody je přímo závislý na požadované době dělení, prostorových možnostech, druhu a velikosti reaktoru a ceně samotného procesu. Společnosti, které se dlouhodobě věnují projektům vyřazování JE z provozu (například americký Westinghouse), mají zpracované přesné plány pro jednotlivé typy a velikosti reaktorů s využitím předchozích zkušeností. Plány zahrnují způsob dělení materiálu, velikosti jednotlivých segmentů, použité obaly a kontejnery, způsob budoucího uložení a časový harmonogram. Dle Petra Pospíšila (2007) z Westinghouse Electric Germany GmbH bylo od roku 1986, kdy se Westinghouse začal věnovat projektům vyřazování JE, používáno hlavně řezání plazmou,

od roku 1999 se pak začalo využívat mechanické dělení pomocí pil, řezných kotoučů a hydraulických nůžek, které se od roku 2011 stalo dominantní metodou fragmentace^[27].

Existují tři typy metod pro dělení částí reaktoru, které mají tyto vlastnosti:

a) **Termální metody**

Řezání plazmou – využívá vysoké teploty a rychlosti ionizovaného plynu, což vede k rychlému čištění řezu. Velmi rychlá metoda vhodná pro použití s robotickým manipulátorem. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost a složitý systém hermeticky uzavíratelných trysek z důvodů řezání pod vodou. Problémem je kontaminace materiálů, která vede ke zbytečnému zvýšení množství radioaktivního odpadu. Vznikající spaliny ve formě par navíc narušují schopnost vody tlumit radiaci a musí být z místa řezu odsávány.

Řezání plamenem – kyslík-acetylenový hořák, metoda je levná, jednoduchá, vybavení dostupné a řezání rychlé. Obtížně se používá ve spolupráci s robotickými manipulátory, obecně jde spíše o manuální metodu, která trpí problémy termálních metod a je používána na menší části reaktoru – například potrubí.

Laserový paprsek – velmi přesná metoda, řezy jsou čisté a tenké, což vede k malému množství kovu rozptýleného ve vodě. Nevýhodou je malá tloušťka řezu – cca. 1,9 mm^[27] – a vznik radioaktivních par při řezu.

b) **Řezání vodním paprskem** – pro tenké materiály je možno použít čistý vodní paprsek, pro hlubší řezy se přidávají abraziva. Velkou výhodou je čistý tenký řez (cca. 1 mm) a tedy velmi málo radioaktivního kovu rozptýleného ve vodě, při řezu nevznikají žádné radioaktivní páry. Dalším benefitem je možnost použití i pro tvarově složité součásti za předpokladu využití víceosého manipulátoru. Nevýhodou je malá rychlost řezání (max. 0,5 mm/min) a vysoká prostorová náročnost zařízení (zejména nádrží s vodou a abrazivem). Řezání vodním paprskem se v dnešní době příliš nevyužívá kvůli složitému a finančně nákladnému řízení a vzniku velkého množství sekundárního radioaktivního odpadu^[26] v podobě abraziva.

c) **Mechanické dělení**

Řezání ocelovým kotoučem nebo pásem – pohon je hydraulický nebo elektrický, samotný nástroj vyžaduje poměrně složité mechanické vedení – z tohoto důvodu se často využívá otočných stolů a nástroj pak koná pohyb pouze v horizontálním a vertikálním směru. Z používaných metod je jednoznačně nejpomalejší, ovšem velkou výhodou je nízká cena zařízení a relativně levné řezné nástroje. Během řezání je nutné přidržovat uřezávaný kus ve stejné pozici, aby nedošlo k poškození nástroje. Při mechanickém dělení se uvolňuje do okolní vody výrazně menší množství radioaktivního materiálu, který navíc nemá takovou rychlost a teplotu jako při termálních metodách. Rovněž odpadají problémy se vznikem radioaktivních par a

složitým řízením u vodního paprsku, proti kterému je ale mechanické dělení méně přesné. Výhodou je celková jednoduchost, spolehlivost a snadný servis. Hlavní nevýhodou je nutnost stanovit plán segmentace tak, aby nebylo nutné upravovat polohu řezacího stroje – je snaha dělat, pokud možno, stále stejné řezy.



Obr. 86 – řezný kotouč pily s hydraulickým pohonem^[28]

Řezání diamantovým lanem (strunou) – vhodné zejména pro dělení betonu, ale používá se i pro ocel. Nevýhodou je poměrně velký prostor potřebný pro umístění řezného zařízení a nutnost dělat řezy v celé tloušťce materiálu najednou – metoda je tedy prakticky nepoužitelná pro řezání reaktorové hlavy nebo dna tlakové nádoby.

3 Otočné stoly – popis a současná řešení

Při fragmentaci je nutné zajistit správnou polohu řezného aparátu (pily, hořáku atp.) vůči fragmentované součásti. Jednou z možností je postavit víceosý robotický manipulátor, na jehož konci bude umístěn přípravek odpovídající vybrané technologii dělení. Jedná se o poměrně složité řešení, které není zdaleka vždy výhodné a vyžaduje značné finanční investice. Obvyklým řešením je proto vybavit řezný aparát jednoduchým posunem ve dvou, maximálně třech navzájem kolmých osách a zbylé chybějící pohyby nahradit nějakým jednoúčelovým přípravkem. Takovými přípravky bývají otočné stoly pro manipulaci se součástmi, jejichž návrhu se týká tato práce. Ve světě vyřazování elektráren jsou raženy dvě konkurenční řešení – první řešení je založeno na použití masivního otočného stolu, na kterém dojde ke kompletní fragmentaci všech součástí reaktoru. Druhá možnost využívá dvou přípravků – otočného stolu a manipulačního zařízení pro fragmentaci tlakové nádoby in situ. Výhoda tohoto řešení spočívá v méně nákladném stole, který může být výrazně subtilnější, protože je využit pouze pro relativně lehké součásti z vnitřku reaktoru. Zároveň odpadne manipulace s velkou a těžkou nádobou, protože manipulační zařízení je umístěno přímo uvnitř tlakové nádoby, bez nutnosti jejího přesunu z původního místa. Nádoba je poté zevnitř fragmentována a jednotlivé kusy rovnou skládány do přepravních kontejnerů. Jedná se o velmi často používanou metodu, která má výhody hlavně v jednoduchosti, rychlosti a není nutné dimenzovat otočný stůl na zátěž tlakové nádoby.



Obr. 87 – dělení tlakové nádoby in situ pomocí vodního paprsku^[29]

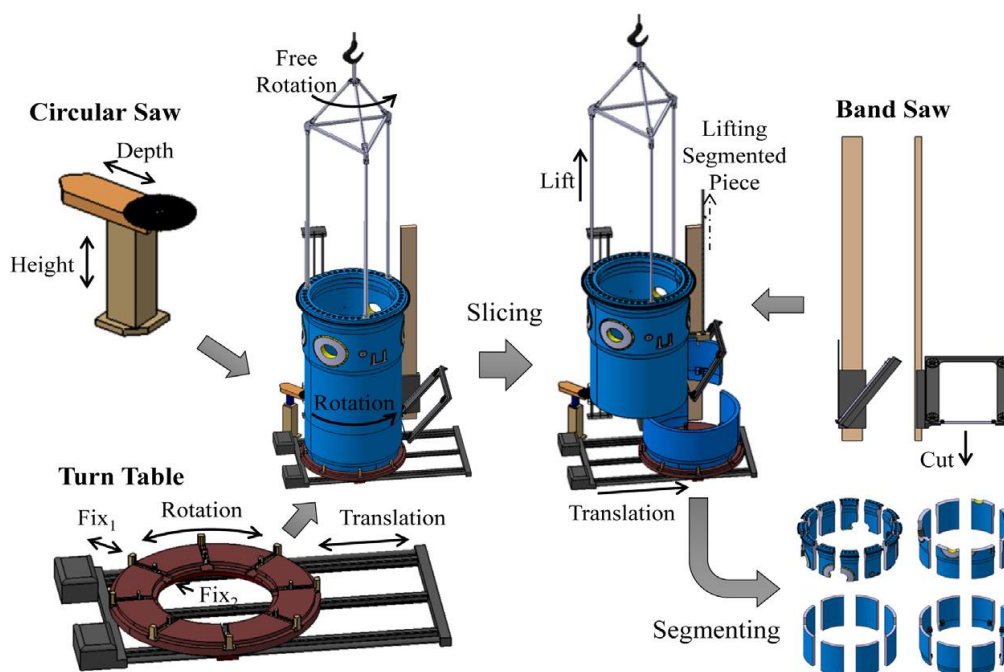
Zadavatel diplomové práce – ŠKODA JS a.s. – definovala metodu fragmentace s využitím otočného stolu, na kterém budou fragmentovány všechny části reaktoru. Přínosy této koncepce jsou hlavně v univerzálnosti řešení – s otočným stolem je možné rozložit všechny požadované části reaktoru – tedy hlavu, blok ochranných trubek, tlakovou nádobu, vnitřní šachtu i vnitřní plášť pomocí jednoho řezacího zařízení. Návrh a konstrukce takového zařízení se vyplatí, pokud jedna firma demontuje celý reaktor a není příliš tlačena časem. Princip metody s otočným stolem spočívá v postavení konstrukce s řezným aparátem na dno kaverny pro manipulaci s vyhořelým palivem reaktoru. Fragmentační metodou je obvykle mechanické dělení pomocí pilového

kotouče nebo pásu, lze také využít plazmového hořáku. Řezný nástroj koná jednoduché pohyby svisle nebo vodorovně. Fragmentovaná součást je uložena na otočném stole, umístěném na pozici původního bazénu pro vyhořelé palivo. Otočný stůl natáčí součást kolem své osy a postupně ji dostává do řezných pozic. Rozborka reaktoru probíhá podle radiačního znečištění jednotlivých částí reaktoru – od reaktorové hlavy po plášť aktivní zóny, tak aby nedošlo k navýšení radiace kontaminováním.

3.1 Otočné stoly ostatních dodavatelů

Následující příklady otočných stolů pochází z prezentací firem pracujících na projektech vyřazování elektráren. Bohužel není možné zjistit, kdo je přesným subdodavatelem a nejsou ani známé přesné specifikace.

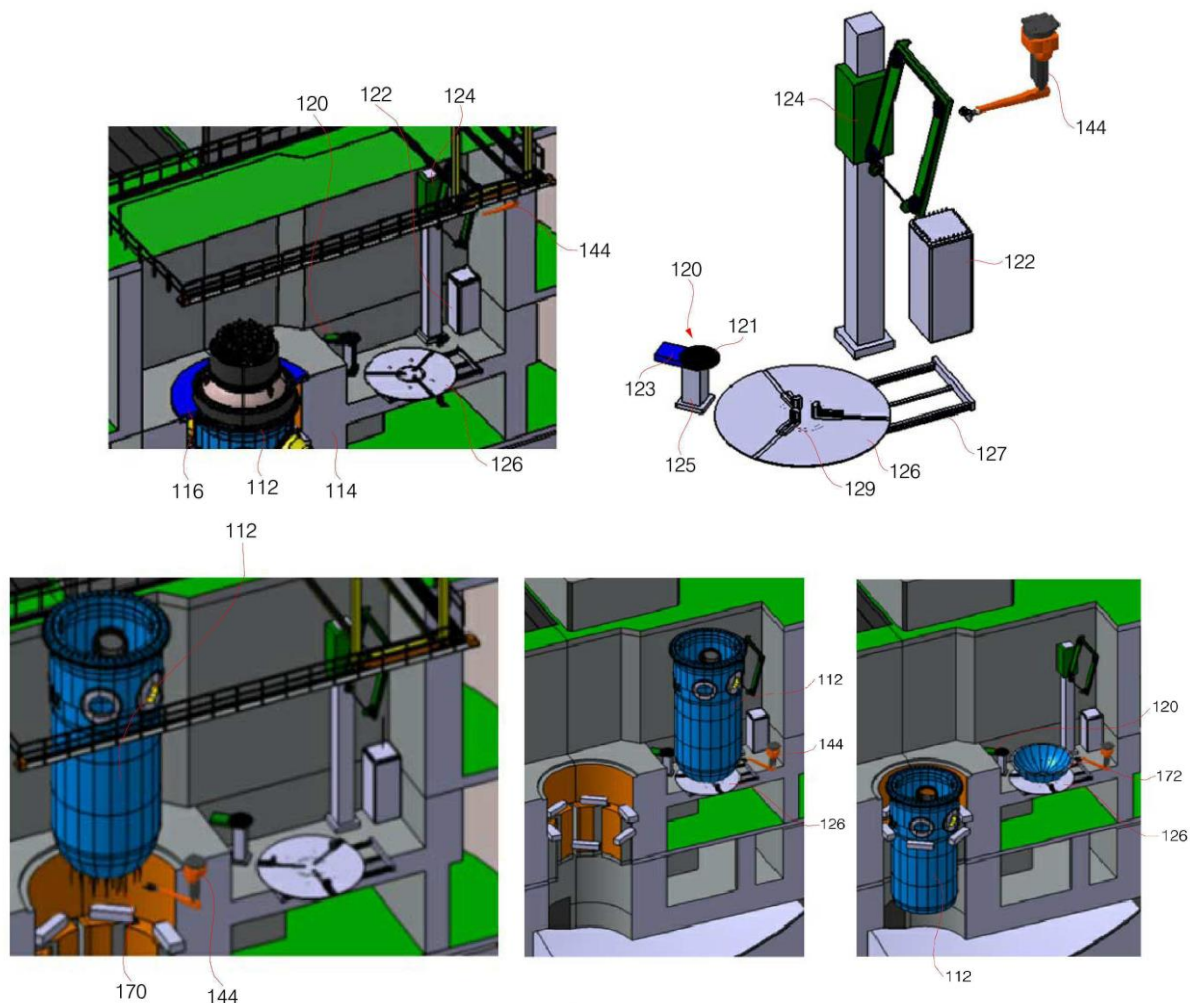
Korea Atomic Energy Research Institute, Korea Institute of Nuclear Safety



Obr. 88 – plán segmentace tlakové nádoby reaktorů od vědců z Jižní Korey[30]

První nalezenou konstrukcí otočného stolu je společný projekt pracovníků Korea Atomic Energy Research Institute, Korea Institute of Nuclear Safety pod vedením Jeonga Kwan Seonga. Návrh uvažuje s otočným stolem dimenzovaným na části tlakové nádoby, umožňující rotaci kolem svislé osy a lineární pohyb v jedné ose. Pohon stolu je elektrický, pomocí ozubených kol. K řezání využívají mechanických metod kotoučové pily pro horizontální řezy a pásové pily pro dělení ve vertikálním směru. Konstrukce otočného stolu napovídá, že je určena pouze k fragmentaci dutých rotačních součástí a například víko tlakové nádoby nebo její dno je fragmentováno jinak.

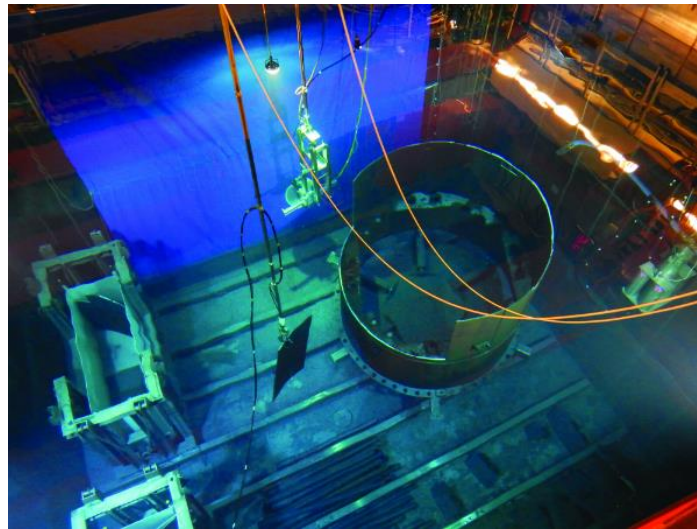
현동준 (Hyun Dong-jun) - Jižní Korea



Obr. 89 – jihokorejský - 현동준 (Hyun Dong-jun) - způsob fragmentace pomocí otočného stolu^[31]

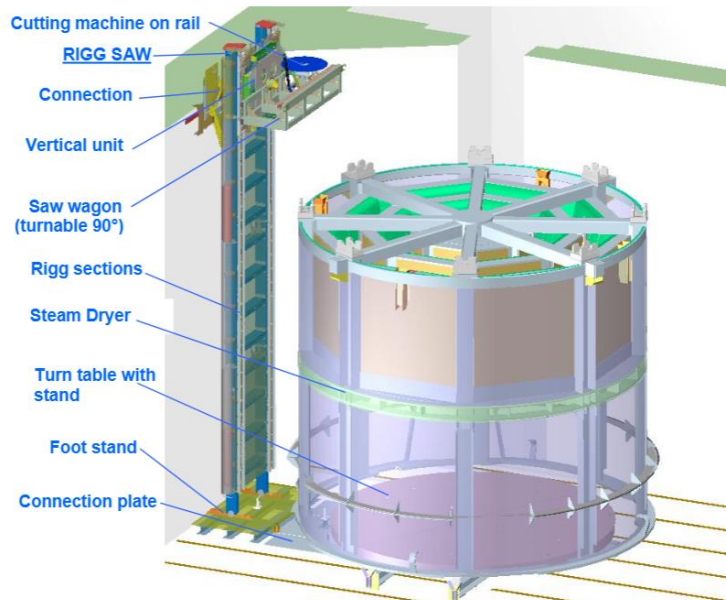
Z patentové přihlášky Hyun Dong-jun u Korejského úřadu pro duševní vlastnictví^[31] pochází způsob fragmentace představený v pěti krocích na obrázku č. 18. Je patrné, že fragmentace je prováděna třemi řznými nástroji. Složitě tvarované součásti se dělí vodním paprskem vedeným robotickým manipulátorem. Mechanickou metodou pomocí kotoučové pily se provádí horizontální řezy, na vertikální je použito diamantové lano. Otočný stůl patří do podobné kategorie, jako je žádaný zadavatelem – tedy jsou na něm fragmentovány všechny části reaktoru. Stůl je dimenzován na části tlakové nádoby, která je po vyjmutí ze své šachty přesunuta nad stůl a pomocí kotoučové pily z ní je oddělena požadovaná část. Zbytek nádoby se následně vrací na původní místo. Na rozdíl od přecházející jihokorejské konstrukce tato umožňuje kompletní fragmentaci a neomezuje se pouze na součásti „trubkového“ charakteru. Otočný stůl umožňuje kromě rotace okolo své osy i posuvný pohyb v jedné ose. Pohon stolu je dle přihlášky elektrický.

Westinghouse – USA – práce na JE Barsebäck (SWE)



Obr. 90 – fragmentace vnitřní šachty reaktoru - Barsebäck (SWE)^[32]

Westinghouse dlouhodobě patří mezi leadery v oboru vyřazování jaderných elektráren. Na obrázku 19 je zachycena fragmentace mechanickou metodou na otočném stole lehké konstrukce. Stůl je určen na vnitřní části reaktoru a reaktorovou hlavu, mohl by být využit i na tlakovou nádobu za předpokladu jejího rozdělení na větší počet nízkých (a tedy lehkých) částí. Pohon stolu je elektrický.



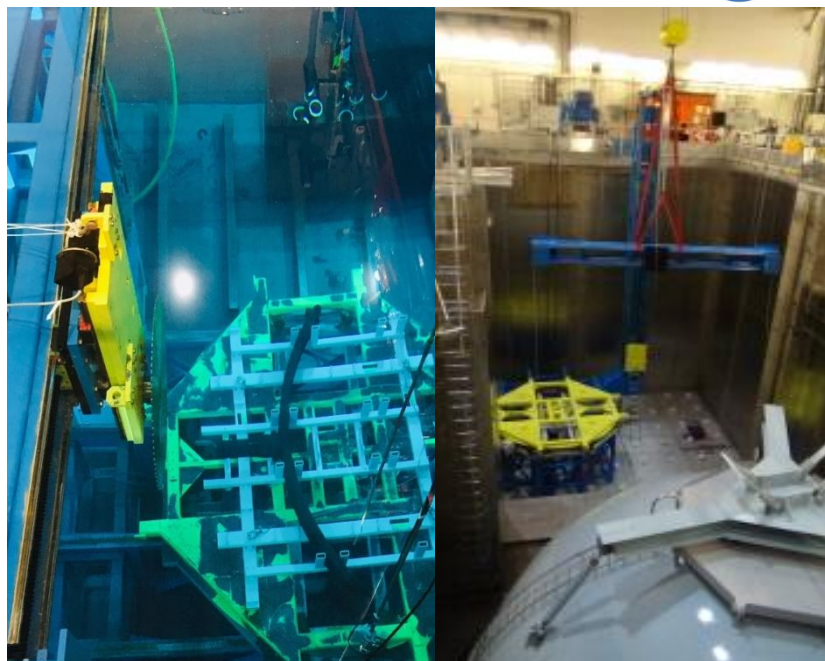
Obr. 91 – jiný typ otočného stolu Westinghouse^[33]

Druhý typ stolu používaný firmou Westinghouse je rovněž dimenzovaný na výrazně nižší hmotnosti fragmentovaných součástí. Je to dáno jinou technologií, kdy využijí fragmentace tlakové nádoby in situ a na lehčí součásti pak stačí subtilnější konstrukce stolu.

GE – HITACHI – USA – Japonsko



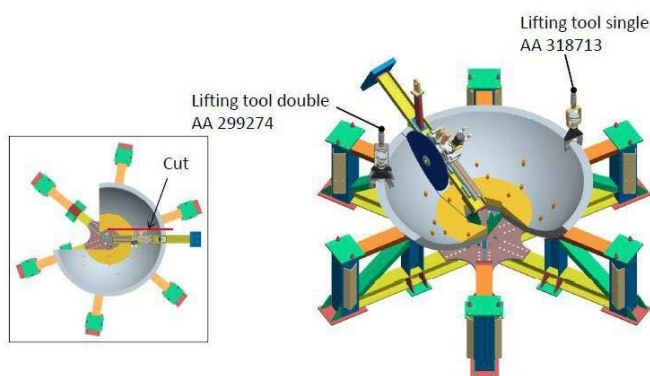
HITACHI



Obr. 92 – otočný stůl používaný konsorciem GE – HITACHI - vlevo^[34], vpravo^[35]

Konsorcium GE – Hitachi použilo při demontáži elektrárny ve švédském Oskarhamnu otočný stůl zobrazený na obrázku č. 21. Jde o svařovanou konstrukci poháněnou elektromotorem určenou pro fragmentaci lehkých a středně těžkých částí reaktoru. Metoda fragmentace je opět z kategorie mechanických, jde o kotoučovou pilu schopnou vertikálního a horizontálního pohybu. Konstrukce tohoto stolu se vymyká ostatním tím, že je umístěna na poměrně vysokém podstavci. Obvykle je snaha konstruovat stoly s co možná nejmenší výškou.

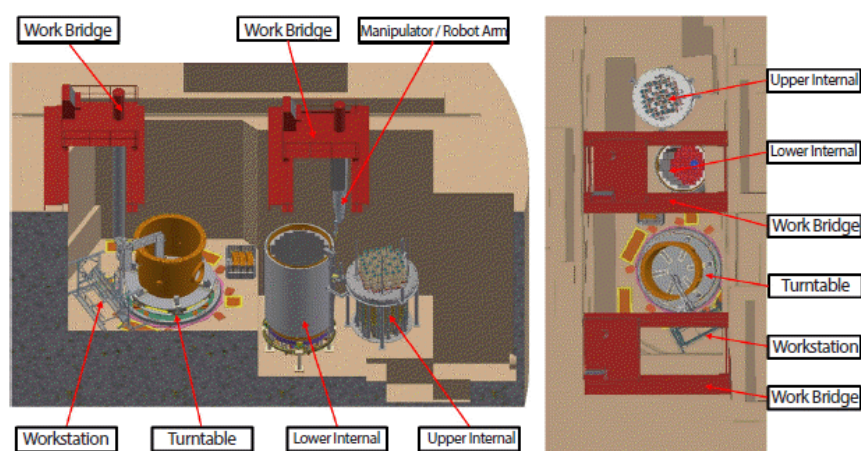
ENRESA – Španělsko



Obr. 93 – speciální stůl na fragmentaci dna tlakové nádrže^[36]

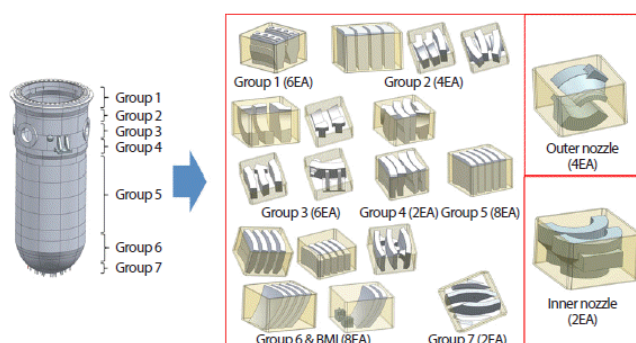
Španělská ENRESA je nezisková organizace starající se od roku 1986 o radioaktivní odpady, vyhořelé palivo a vyřazené elektrárny. Tato organizace si obvykle najímá jiné firmy (např. Westinghouse) pro realizaci jejich poslání, sama pak přichází se zajímavými návrhy, jako je například otočný stůl na obrázku č. 22. Jedná se o speciální přípravek na fragmentaci dna reaktorové šachty a tlakové nádoby. Jde o další konstrukční cestu využívající nové řešení. Dno nádoby je uloženo na stole bez pohonu a je děleno mechanicky kotoučovou pilou. Stůl umožňuje natáčení dna okolo vertikální osy. Samotné natočení pak proběhne pomocí robotických nástrojů, které jinak dno drží ve stabilní poloze.

KHNP, DOOSAN, KEPCO & KONES – Jižní Korea



Obr. 94 – schéma fragmentování reaktoru Kori K1^[37]

Sdružení korejských firem v čele s KEPCO (Korea Electric Power Corporation) představilo v roce 2017 plán na vyřazení reaktoru Kori K1. Na rozdíl od všech předchozích řešení pro zrychlení procesu využívá dvě pracoviště, jedno pro těžké části reaktoru s otočným stolem a pracovní stanicí s kotoučovou pilou. Druhé pracoviště disponuje lehčím otočným stolem a je určeno pro fragmentaci vnitřních částí reaktoru. Pohon stolů je elektrický, veškerá manipulace se součástmi probíhá pomocí původních jeřábů určených k manipulaci s palivem během jeho výměny. V dokumentu^[37] je přiložen i detailní segmentační plán, který dává přehled o velikosti a počtu fragmentovaných dílů.



Obr. 95 – segmentační plán tlakové nádoby^[37]

4 Návrh variant otočného stolu

Návrhu variant předchází stanovení funkcí, které musí otočný stůl splnit. Jednotlivé funkce pak mají přiřazena dílčí řešení, která tvoří morfologickou matici. Bylo určeno sedm základních požadavků – funkcí – které musí zařízení splnit a ke každému byla přidělena alespoň tři funkční řešení. V tabulce je zahrnuto nejčastější stávající řešení (označené jako varianta A). Konstrukční řešení, která se nevyskytují v žádné stanovené variantě, byla při řešení uvažována, avšak nebyla shledána jako dostatečně výhodná pro jejich aplikování.

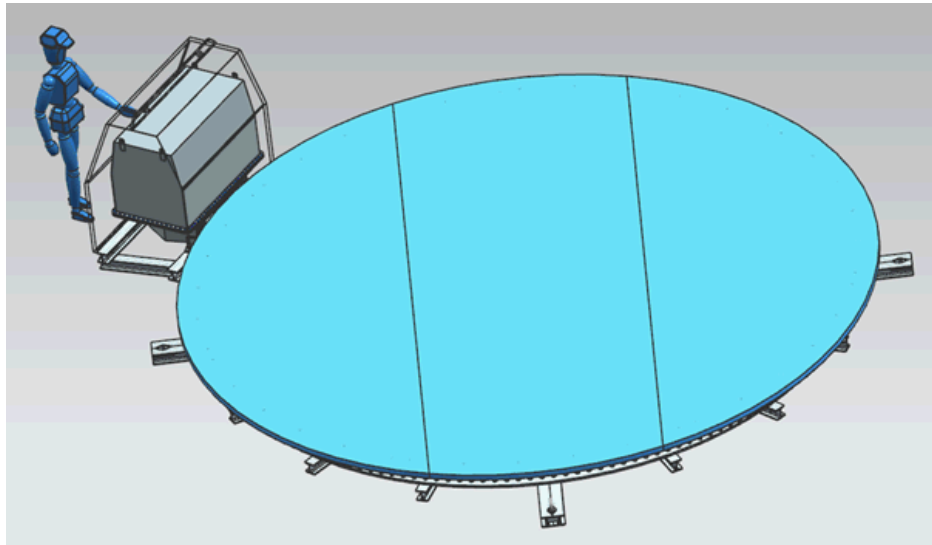
Tabulka 4 – alternativy řešení otočného stolu

Funkce/funkční celek	Technické provedení			
	1	2	3	4
Nosná konstrukce	svařovaný rám	odlitek	šroubovaný rám	nýtovaná konstrukce
Natočení součásti – na vzduchu	mechanicky - ručně	elektromotor + převodovka	stejnoseměrný elektromotor	hydraulické válce
Natočení součásti – ve vodě	lodní šroub	elektromotor + převodovka	stejnoseměrný elektromotor	hydraulické válce
Vedení rotačního pohybu	kuželíky	válečky	hydrostatické ložisko	„železniční“ kola
Otočná část	svařenec	odlitek	šroubovaný rám + deska	svařovaný rám + sroubovaná deska
Upnutí součásti	upínkami	letmo - vlastní vahou	hydraulickým přípravkem	-
Transportovatelnost	vcelku - oka z vnějšku rámu	vcelku - oka uvnitř rámu	po částech	-

Legenda: červeně – varianta A; oranžově – varianta B; modře – varianta C; zeleně – varianta D

4.1 Varianta A – stávající řešení

V této variantě řešení stolu jsou zahrnuta stávající řešení, která jsou (dle dostupných informací) prakticky totožná u všech výrobců. Jedná se o jednoduché funkční řešení, charakterizované použitím asynchronního motoru a převodovky. Nosný rám i vrchní otočná část je tvořena jako svařenec. Otáčení stolu je možné v obou směrech a krouticí moment je přenášen od převodovky na otočnou část stolu pastorkem a ozubeným věncem s čelním ozubením. Je možné nalézt konstrukce s vnitřním ozubením na věnci, ale častějším řešením je vnější ozubení. Tyto varianty jsou typické jednou konstantní rychlostí otáčení, v případě otočného stolu ŠKODA JS a.s. jde o rychlost 1 otáčka za hodinu.



Obr. 96 – varianta A – stávající řešení^[38]

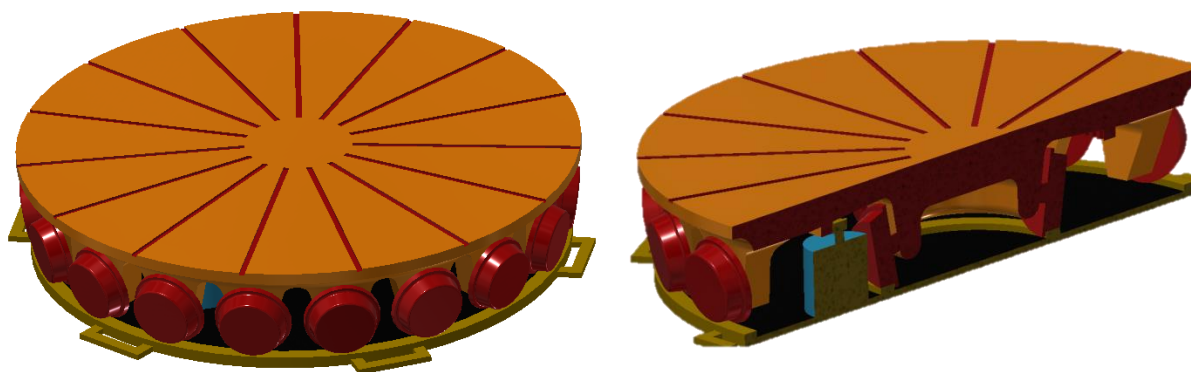
Nevýhodou těchto variant je poměrně vysoká výška stolu. Ta je omezena prostorem pod jeřábem reaktorového sálu a musí být maximálně 0,7 m. Vyšší výška stolu je důsledkem použití rozměrné převodovky, která musí mít velmi vysoký převodový poměr, a tedy i počet stupňů. Na obrázku 25 je zobrazeno aktuální řešení Škoda JS, kde problém s velikostí pohonu a převodovky vyřešili přesunutím mimo stůl do speciálního pancéřovaného boxu.

4.2 Varianta B

První z navrhovaných variant řeší zejména problém s převodovkou a motorem, které zabírají hodně místa a stoly následně vychází vysoké. Řešením je použití stejnosměrného motoru, který je na rozdíl od asynchronního střídavého motoru schopen jednoduchého řízení otáček na základě vstupního napětí a budícího proudu^[39]. Historicky se stejnosměrné motory používaly v těžkém strojírenství, takže jsou pro použití v otočném stole potenciálně velmi vhodné. Jejich nevýhoda je ve vyšší pořizovací ceně a především v jejich konstrukci, která využívá mechanický komutátor. Ten je namáhán mechanicky a tepelně a je velmi náchylný k tzv. přeskokům, při kterých dojde ke zkratu a zničení zařízení. Motory by musely být poměrně hodně předimenzovány, aby bylo možné garantovat požadovanou životnost bez servisního zásahu.

Další konstrukční změnou je vynechání obvyklého řešení, kdy se otočná část odvaluje po tělískách typu váleček nebo kuželík. Návrh počítá s využitím kolejnic a ocelových kol podobných těm, která se používají na železnici. Výhodou je možnost nakoupit hotová kola pro různé manipulační vozíky například od firmy BONATRANS GROUP a.s.^[40] a ušetřit čas i finanční prostředky, jelikož se jedná o velkosériové výrobky. Problémem může být malý poloměr otáčení a vznikající tření, které je možné těžko určit, protože výpočtové modely pro železniční kola nejsou schopné s těmito hodnotami počítat. Rovněž je velmi pravděpodobné, že by se musel navrhovat speciální jízdní profil kola a kolejnice.

Návrh B počítá s využitím odlévaných částí rámu a otočné vrchní desky. Při této technologii je možné obě součásti vytvořit jako celistvé kusy a potřebné funkční plochy obrobít. Nevýhodou je nutnost vytvořit složitou formu a nutnost najít slévárnu, která je schopna vyrobit takto velké odlitky. Samotný proces je finančně nákladný, nicméně umožňuje vytvořit prakticky ideální nosný rám a otočnou desku, která bude (na rozdíl od svařovaných) kruhová a zařízení nebude zabírat zbytečné místo navíc. Ideální je do odlitku vytvořit vhodné otvory a drážky pro umístění upínek na fixaci fragmentované části.

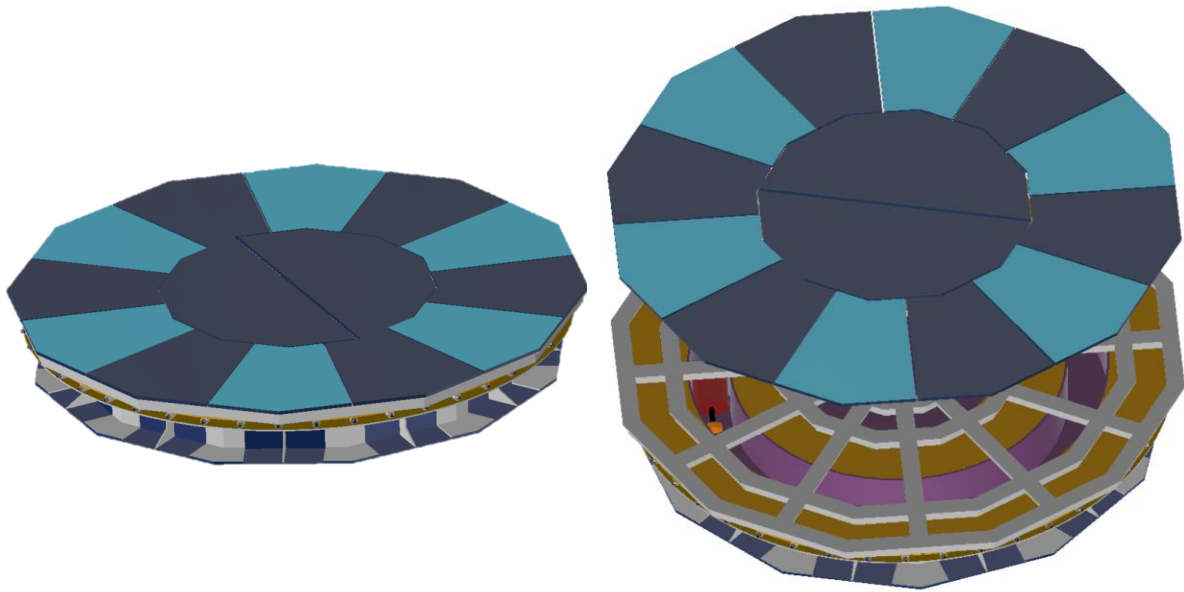


Obr. 97 – schématický model varianty využívající železniční kola (na modelu červeně) a stejnosměrný elektromotor (modře) bez převodovky

4.3 Varianta C

Další z uvažovaných variant řeší problémy se zástavbou pohonu netradičním způsobem – elektrický motor zůstává, avšak převodovka je díky změně druhu pohonu výrazně zjednodušena. K otáčení ve vodě je na výstupní hřídel motoru uchycen lodní šroub. Jelikož je instalován uvnitř rámu, proudící voda má definovaný „kanál“ ve kterém se pohybuje. Je tedy možné konstrukci výhodně optimalizovat pomocí metody konečných objemů tak, aby docházelo k usazování kovových špon na předem vybraném místě. Na suchu není pohon nainstalován a otáčení je řešeno čistě mechanickou cestou pomocí pák a lidské síly. Tomuto řešení pohonu je přizpůsobena konstrukce otočné části i hlavního rámu – obě konstrukce jsou šroubované, tak aby bylo možné pohon snadno rozebrat a vyjmout. Velkou výhodou tohoto řešení je snadná transportovatelnost a skladnost. Šroubové spoje lze navíc snadno rozebrat, takže po skončení procesu fragmentace by byla snadná likvidace kontaminovaného stolu.

Nevýhodou tohoto řešení je vysoká technologická náročnost, obtížné řízení a nutnost mechanického natáčení stolu na suchu (které se ovšem předpokládá v malém procentu využití otočného stolu). Vývoj pohonu otočného stolu této konstrukce by byl velmi nákladný, kromě simulací by muselo být vše experimentálně ověřeno.



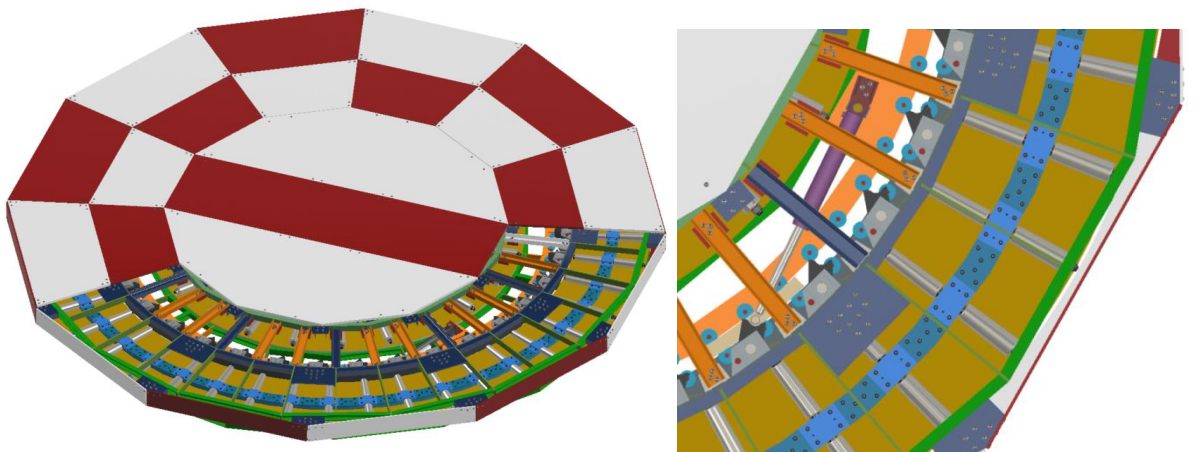
Obr. 98 – varianta otočného stolu s lodním šroubem. Elektrický motor s vrtulí (na modelu červeně a oranžově) je uložen uvnitř rámu v kanále (na modelu fialově), který usměřňuje proudění.

4.4 Varianta D

Další možnost, jak nahradit pohon tvořený elektromotorem a převodovkou, je využití hydraulických pohonů. Pro celkovou jednoduchost bylo pracováno s lineárními pohony, které jsou velmi levné, jednoduché a spolehlivé. Vzniká však problém, jak převést lineární pohyb pohonu na rotační. Řešení spočívá v naklápění hydraulického válce kolem vertikální osy procházející pevným (nevýsuvným) koncem tělesa válce. Následně stačí zařídit, aby měl konec pístnice vedení, které mu umožní konat pohyb po požadované kružnici. Jelikož je pohyb omezený délkou vysunutí válce, musí pístnice působit na otočnou část stolu pouze při posunu v jednom směru a při návratu do výchozí polohy se hladce vrací. K tomu slouží výklopné segmenty s pružinami. Délka vysunutí pístnice umožňuje natočení vrchní části stolu o požadovaný úhel. Větší natočení jsou pak realizována ve více cyklech. Rychlost vysunutí je řízena proporčním ventilem a výhodou je, že zatímco v zatíženém směru může být posun velmi pomalý, zpětný pohyb lze realizovat výrazně rychleji. Z ekonomického hlediska jde o poměrně levné řešení, protože samotné válce nejsou drahé a řídicí ventily jsou umístěny nahoře v reaktorovém sále a nejsou kontaminovány, takže je možné jejich opakované použití. Použití hydraulických válců navíc vede k velmi nízkým konstrukcím, které se lépe vejdu do omezeného prostoru. K jejich vytvoření stačí menší množství materiálu a dochází tedy i k ekonomickým úsporám.

Otáčení součásti je uvažováno stejně jako v předchozí variantě na kuželíkových tělískách, která byla vybrána jako vhodná z hlediska malých ztrát vlivem tření. Kuželová tělíška jsou rozmístěna na několika soustředných prstencích, tak aby byly schopné co nejlépe zachytit zatížení od fragmentovaných součástí. Pohybují se na drahách, které jsou součástí svařovaného rámu a otočné vrchní konstrukce, na které je přišroubována vícedílná vrchní deska.

Nevýhodou tohoto řešení je možnost otáčení pouze v jednom směru a nutnost vedení hydraulických hadic k více pohonům.



Obr. 99 – model varianty využívající hydraulické pohony (na obrázku fialově)

4.5 Výběr nejvýhodnější varianty

Při výběru vhodné varianty byla v úvahu brána zejména celková výška stolu, která byla zadavatelem označena v mnoha realizovaných zakázkách jako hraniční. Dále byla hodnocena celková složitost pohonu (zadavatel požadoval jednoduché řešení), jeho zástavbové rozměry a nevýhody daného řešení. V hodnocení má stávající řešení – varianta A – u každého hlediska 10 bodů a hodnocení ostatních variant je založeno na porovnání s tímto výchozím stavem.

Tabulka 5 – hodnocení variant otočného stolu

Kritéria a hodnocení (H)								
Varianta	Výška stolu (m)	H	Složitost pohonu	H	Zástavbové rozměry	H	Nevýhody	H
A	0,5	10	střední	10	malé	10	nutnost převodovky	10
B	0,7	5	jednoduché	15	střední	8	železniční kola, typ pohonu	5
C	0,4	12	obtížné	5	velké	5	složitost	5
D	0,3	15	jednoduché	15	velmi malé	12	jednosměrný provoz	8

Původní varianta byla ohodnocena 40 body. Aby byla varianta uvažována jako vhodná, musí tento součet překonat. Varianty B a C získaly 33 respektive 27 bodů a byly tedy zavrhnuty. Vítězem hodnocení se stala varianta D využívající k pohybu desky hydraulické pohony, která získala 50 bodů. Velký počet bodů získala hlavně za celkovou malou výšku stolu a jednoduchost pohonu. Její nevýhodou oproti ostatním řešením je pouze jednosměrný provoz. Bylo však zhodnoceno, že vzhledem k rotačnímu charakteru všech fragmentovaných částí reaktoru jde o malý hendikep, který při vhodném plánu fragmentace není omezující.

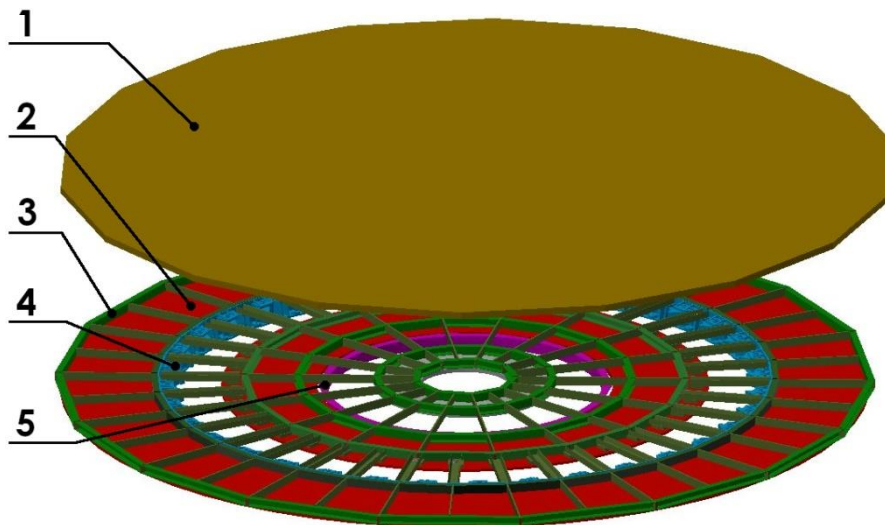
Vítězné řešení pracuje s využitím převážně svařovaných konstrukcí, z tohoto důvodu není stůl navržen jako kruhový, ale jeho deska tvoří osmnáctiúhelník svařený z nakoupených polotovarů. Kontrola těchto částí je provedena metodou konečných prvků (MKP).

5 Návrh dílčích celků vybrané varianty

Při převádění vítězného konceptu do reálných a funkčních návrhů bylo postupováno od vrchu stolu – otočné desky. U ní jsou totiž zadány parametry jako nosnost či rozměry a je tedy výhodné začít odsud.

5.1 Vrchní otočná deska

Již v popisu variant je řešení popisováno jako svařovaná konstrukce s přišroubovanou vrchní deskou. Toto řešení bylo zvoleno na základě snahy o jednoduchou montáž, při které bude využito maximum nakupovaných polotovarů.



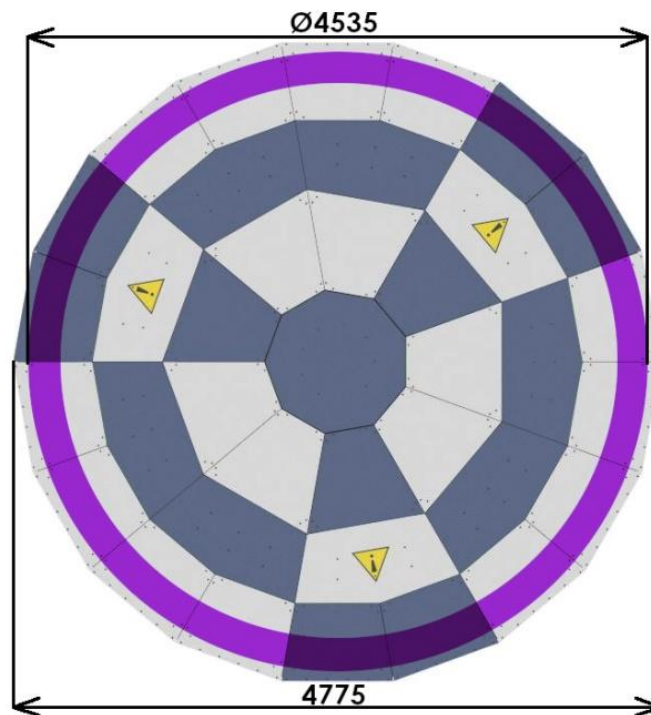
Obr. 100 – schématické řešení otočné části stolu s barevně odlišenými základními částmi
Číslo označují: 1 – vrchní deska; 2 – dráhy pro odvalování kuželíků; 3 – svařovaný rám;
4 – část rámu, na kterou budou působit pohony; 5 – vnější kroužek radiálního ložiska

5.1.1 Vrchní deska

Tato součást byla navržena jako první, se zadavatelem práce bylo domluveno, že její tloušťka bude alespoň 25 mm, pokud následná kontrola pevnosti neprokáže, že musí být větší. Její rozměr byl rovněž daný – určil ho vnější rozměr největší fragmentované součásti – tlakové nádoby reaktoru (průměr 4535 mm).

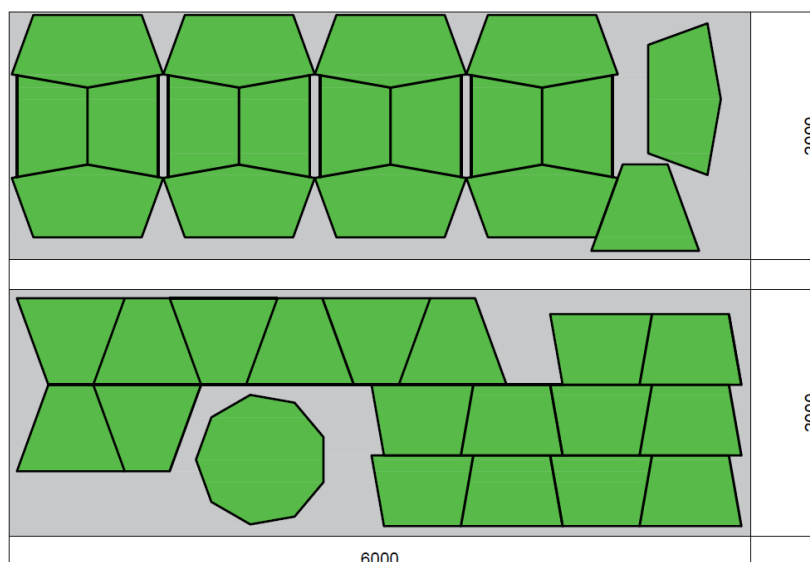
Při konstrukci rámu vyplynulo, že desku bude vhodné rozdělit na více segmentů. To umožňuje přístup k pohonům a zároveň vede k možnosti použít menší kusy plechu, které jsou výrazně dostupnější a levnější než tabule o rozměrech cca 5x5 metrů potřebné pro výrobu desky z jednoho kusu.

Rozdělení desky na jednotlivé segmenty vychází z prostorových potřeb pohonů, konstrukce svařovaného rámu a předpokládaných zatížení. Celkově je na desku stolu použito 37 kusů plechu čtyř tvarů. Každý umožňuje montáž a demontáž nezávislou na ostatních. U většiny těchto plechů se nepředpokládá jejich demontáž, výjimkou jsou tři desky, označené na následujících obrázcích žlutým vykřičníkem, které slouží k montáži a případnému servisu pohonů.



Obr. 101 – vrchní pohled na desku zachycující její rozdělení – fialově je zvýrazněn rozměr tlakové nádoby

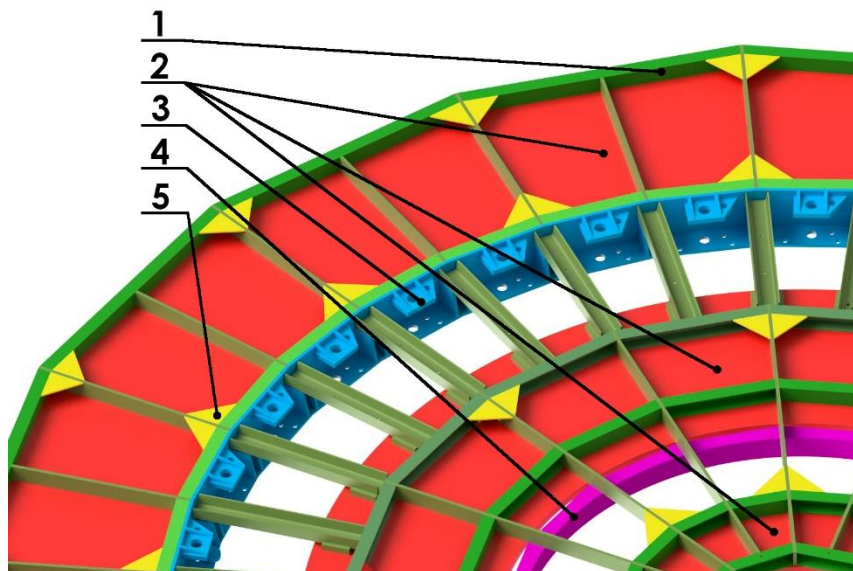
Při návrhu byla zohledněna dostupnost polotovarů – plechů – které budou použity. Velký výběr nabízí dodavatel hutního materiálu Feron a.s., který ve svém katalogu^[41] nabízí plechy tloušťky 25 mm o šířce 1000 mm nebo 2000 mm a délce 2000, 3000 a 6000 mm. Pro výrobu desek stolu byly vybrány 2 kusy plechu 25x2000x6000 mm (číslo položky 210090J) z materiálu S235JR+N (ČSN 11 375). Možné rozložení součástí na tabulích plechu je následující:



Obr. 102 – rozložení částí vrchní desky na tabulích plechu

5.1.2 Svařovaný rám

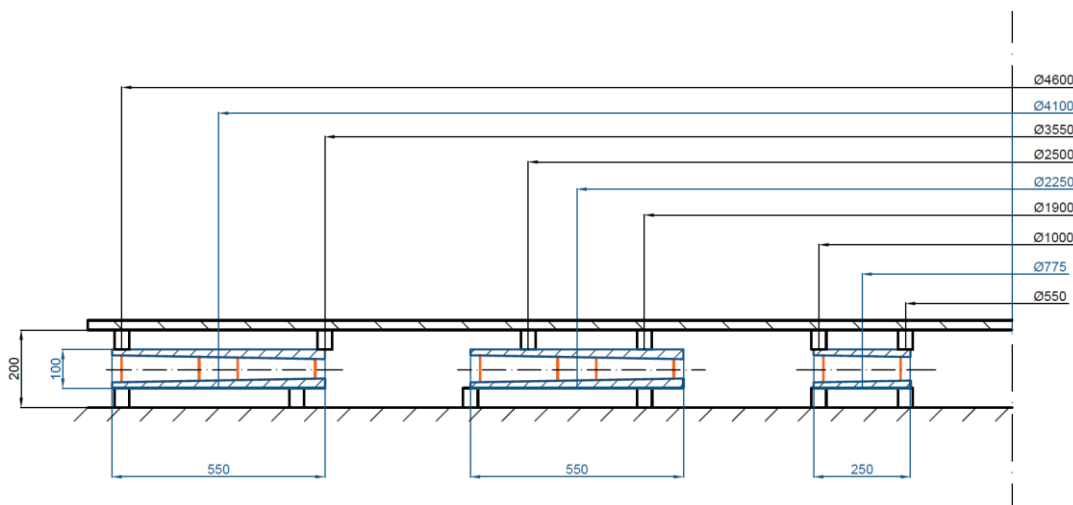
Komponenty vrchní desky jsou pomocí šroubů spojeny se svařovaným rámem. Rám je tvořen z profilované konstrukce, drah, po kterých se odvalují kuželíky, vnějším kroužkem radiálního ložiska a svařovaným věncem nesoucím segmenty, přes které je přenášena síla od pohonů, potřebná pro otáčení stolu.



Obr. 103 – barevně rozlišené schéma rámu

Čísła označují: 1 – svařovaná konstrukce; 2 – dráhy pro kuželíky; 3 – prstenec přenášející síly od pohonů; 4 – vnější kroužek radiálního ložiska; 5 – uchycení komponent vrchní desky

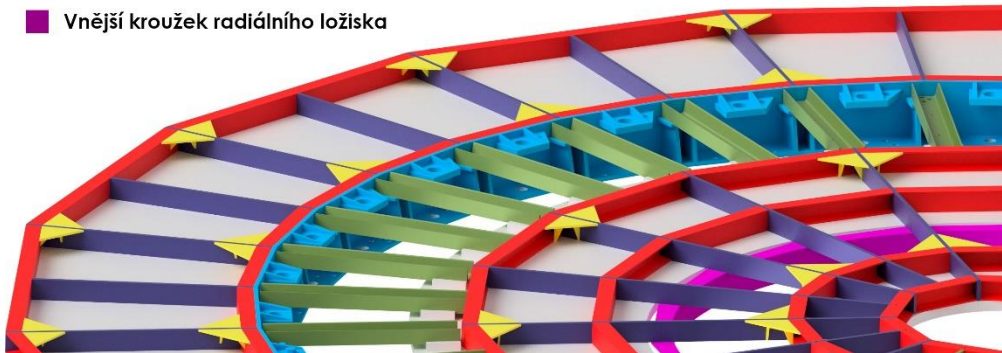
Na otočném stole se nachází celkem tři sady drah umožňující otáčení desky stolu díky odvalování po kuželíkách. Tyto dráhy jsou přivařeny ke konstrukci tvořené z profilů a plochých tyčí. Kuželová plocha, která je v kontaktu s valivými elementy, odpovídá kuželíkům. Rozměry drah jsou dány velikostí desky stolu a co nejrovnoměrňším rozložením zatížení. V prostorech mezi drahami jsou umístěny další potřebné komponenty – pohony a radiální ložisko. Výška dráhy je pak stanovena tak aby celková výška prostoru mezi drahami na otočné a pevné části stolu (se započtením kuželíku) byla 100 mm.



Obr. 104 – schéma rozložení drah a kuželíků – černě jsou profily rámu, modře dráhy, oranžově kuželíky

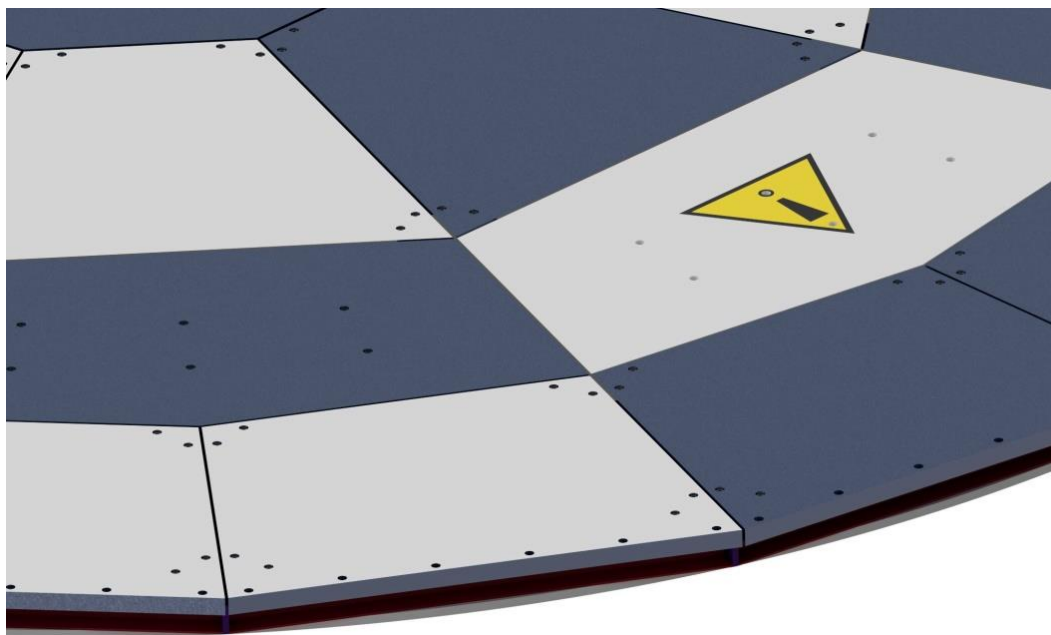
Svařovaná konstrukce nacházející se nad drahami je tvořena několika prstenci z profilů tvaru UPN o výšce 50 mm, které jsou v pravidelných rozestupech proloženy plochou tyčí o tloušťce 10 mm. V místě, které se nachází nad pohony je svařenec tvořen naležato umístěnými profily tvaru UE o výšce 65 mm.

- UPN 50 ČSN 42 5570
- \neq 50x10 ČSN 42 5522.11
- Prstenec přenášející síly od pohonů
- Vzpěry pro přišroubování segmentů vrchní desky
- UE 65 ČSN 42 5571
- Vnější kroužek radiálního ložiska



Obr. 105 – kolorovaný pohled na jednotlivé části tvořící svařovaný rám

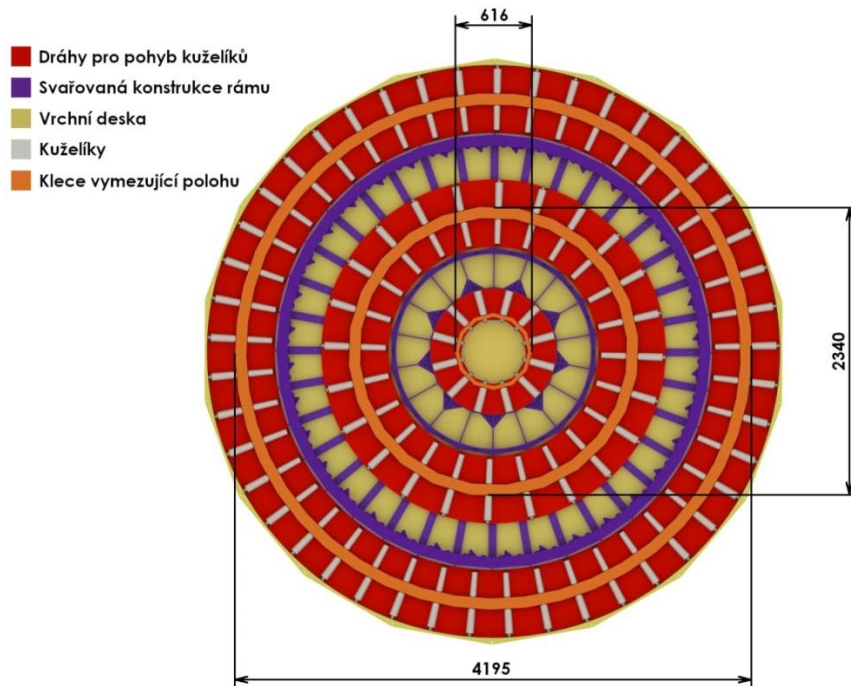
Na svařovaném rámu vrchní (otočné) části stolu je použito více než 44,25 m profilu UPN 50, 37,9 m ploché tyče \neq 50x10 a 16,8 m profilu UE 65. Všechn tento materiál je v nabídce v online katalogu Feron a.s. [41]. Dalšími částmi svařované konstrukce je prstenec přenášející síly od pohonu a vnější kroužek radiálního ložiska, které budou podrobněji rozebrány v kapitole týkající se pohonu. Na obrázku 34 se ještě nachází žlutě vyobrazené vzpěry, ve kterých budou vyrobeny díry se závitem pro šrouby M8 držící vrchní desku. Každá deska je uchycena 6 až 8 šrouby s válcovou zapuštěnou hlavou.



Obr. 106 – vrchní pohled na segmenty desky, přišroubované k rámu

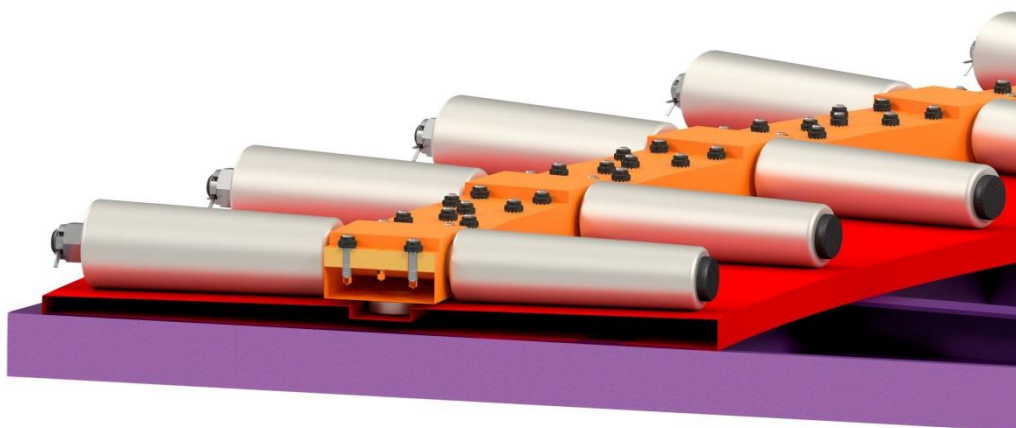
5.1.3 Axiální uložení otočné části

Otočný stůl přenáší především axiální síly dané hmotností fragmentovaných částí. Radiální síly pochází od pohonů a jejich zachycení je řešeno níže v kapitole týkající se pohonu. Pro zachycení sil axiálního směru byly vybrány kuželíky, protože při jejich použití vznikají při pohybu relativně malé a jednoduše určitelné ztráty, které je nutné spočítat pro návrh pohonu.



Obr. 107 – spodní pohled na návrh valivého uložení otočného stolu

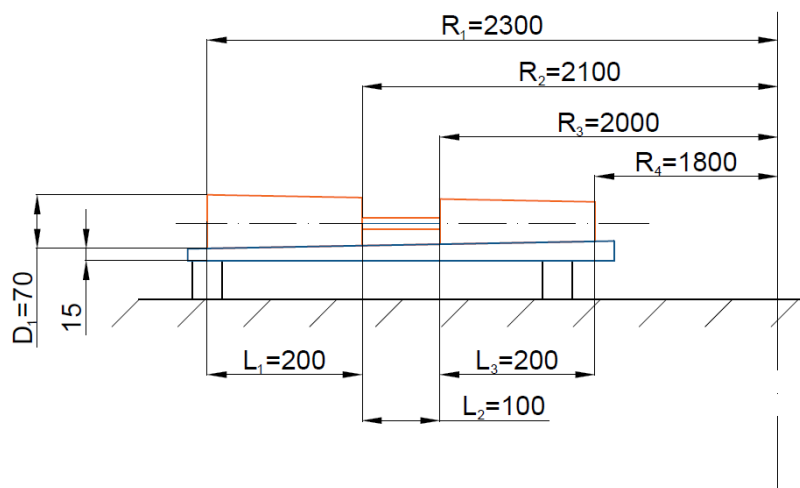
Na obrázku 36 je zobrazeno schéma rozložení kuželíků na jednotlivých drahách. Počet kuželíků je volen s ohledem na velikost napětí zjištěného při MKP analýze a zároveň tak, aby bylo možné vyrobit klece, které vymezují polohu kuželíků. Tyto klece jsou sešroubovanou sestavou tří typů dílčích součástí a jejich účelem je zamezit nežádoucímu pohybu kuželíků. Ve spodní části segmentu klece je umístěn otočný váleček, který vymezuje polohu celého ložiska vůči spodní dráze.



Obr. 108 – detail na kuželíky a vedení pomocí otočných válečků ve spodní dráze – dráha a klec jsou zobrazeny v řezu

Pro odvalování desky je použito celkem 172 ks kuželíků ve třech různých drahách. Velikost kuželíků je vypočtena tak, aby při jejich otočení kolem své osy po odpovídající dráze došlo k pohybu na kružnici okolo centrální osy stolu.

Průměr kuželíků spolu s výškami obou drah vytvoří prostor vysoký 100 mm, ve kterém se bude nacházet pohon.



Obr. 109 – kótované schéma pro výpočet velikostí kuželíků vnějšího prstence

Pro všechny dráhy byl zvolen stejný největší průměr kuželíků – $D_1 = 70$ mm – a jejich polohy (vzdálenost od osy otáčení – R_1 až R_4), ze kterých lze dopočítat délky (L_1 až L_3). Zbývá dopočítat průměry komolých kuželů ve vzdálenostech R_2 až R_4 od osy. Výpočet vychází z podmínky rovnosti poměrů mezi dráhou, kterou musí vykonat ve známé poloze (R_1) kuželík o daném průměru (D_1) a stejným poměrem v další poloze (R_2 až R_4), kde je průměr neznámý.

Výpočet kuželíků vnějšího prstence:

Vstupní parametry:	poloměr kružnice	R_1	[mm]	2300
	poloměr kružnice	R_2	[mm]	2100
	poloměr kružnice	R_3	[mm]	2000
	poloměr kružnice	R_4	[mm]	1800
	průměr kuželíku při R_1	D_1	[mm]	70

Zbývá určit:	průměr kuželíku při R_2	D_2	[mm]	
	průměr kuželíku při R_3	D_3	[mm]	
	průměr kuželíku při R_4	D_4	[mm]	

Podmínka stejného poměru:

$$\frac{O_1}{o_1} = \frac{O_2}{o_2} \text{ kde: } O_1 \text{ a } O_2 \text{ jsou dráhy (kružnice), které musí kuželík vykonat na 1 otočku stolu}$$

: o_1 a o_2 jsou obvody komolého kuželu v odpovídajícím místě

Po dosazení a úpravě:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{\pi \cdot D_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_2}{\pi \cdot D_2} \Rightarrow D_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot D_1 \quad (5.1)$$

Rovnici (5.1) lze stejným způsobem aplikovat i pro poloměry R_3 a R_4 :

$$D_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot D_1 = \frac{2100}{2300} \cdot 70 = \mathbf{63,9 \text{ mm}}$$

$$D_3 = \frac{R_3}{R_1} \cdot D_1 = \frac{2000}{2300} \cdot 70 = \mathbf{60,9 \text{ mm}}$$

$$D_4 = \frac{R_4}{R_1} \cdot D_1 = \frac{1800}{2300} \cdot 70 = \mathbf{54,8 \text{ mm}}$$

Výpočet kuželíků druhého a vnitřního prstence:

Vstupní parametry: poloměr kružnice	R_5	[mm]	1375
poloměr kružnice	R_6	[mm]	1175
poloměr kružnice	R_7	[mm]	1075
poloměr kružnice	R_8	[mm]	875
poloměr kružnice	R_9	[mm]	477,5
poloměr kružnice	R_{10}	[mm]	277,5
průměr kuželíku při R_5	D_5	[mm]	70
průměr kuželíku při R_9	D_9	[mm]	70

Postup je analogický s výpočtem u vnějšího prstence – největší poloměr i délky kuželíků jsou stejné – rozdíl je pouze v poloměrech kružnic, po kterých se kuželíky pohybují. Tyto poloměry mají vliv na kuželovitost tělísek, odpovídající průměry jsou tedy následující:

$$D_6 = \frac{R_6}{R_5} \cdot D_5 = \frac{1175}{1375} \cdot 70 = \mathbf{59,8 \text{ mm}}$$

$$D_7 = \frac{R_7}{R_5} \cdot D_5 = \frac{1075}{1375} \cdot 70 = \mathbf{54,7 \text{ mm}}$$

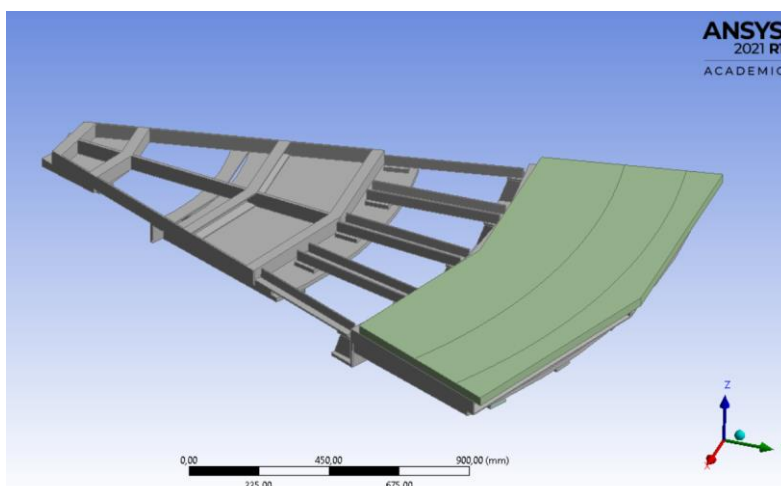
$$D_8 = \frac{R_8}{R_5} \cdot D_5 = \frac{875}{1375} \cdot 70 = \mathbf{44,5 \text{ mm}}$$

$$D_{10} = \frac{R_{10}}{R_9} \cdot D_9 = \frac{277,5}{477,5} \cdot 70 = \mathbf{40,68 \text{ mm}}$$

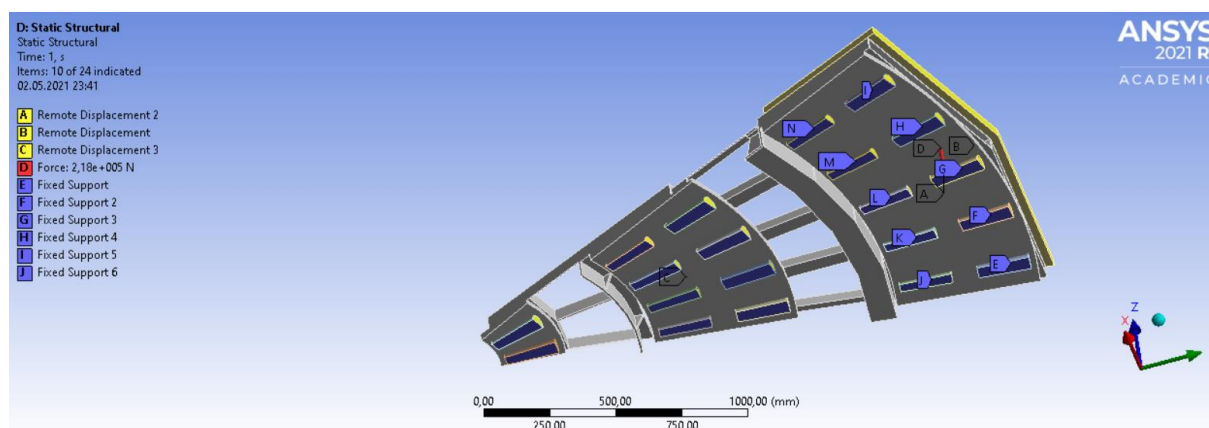
5.1.4 Pevnostní kontrola vrchní desky

Pevnostní kontrola desky byla provedena metodou konečných prvků v programu ANSYS Mechanical. K řešení posloužila strukturální analýza při uvažování lineárně statické úlohy. Cílem bylo zjistit, zda navržená svařovaná konstrukce pevnostně vyhovuje. Druhým úkolem bylo určit namáhání jednotlivých kuželíků, kde byl předpoklad, že kvůli ne zcela pravidelné geometrii nemusí být zatížení rovnoměrné, ale bude se periodicky opakovat s určitým vzorem.

Zkoumaným zatěžovacím stavem bylo požadované zatížení – 200 tun – které z fragmentovaných částí reaktoru může dosáhnout pouze jeho tlaková nádoba⁵. Desku otočného stolu lze zjednodušit a analyzovat pouze její část – pro prvotní testování tedy byla vybrána nejmenší možná část – 1/9. Cílem bylo zjistit, jak zhruba vypadá rozložení namáhání na jednotlivé kuželíky. 3D model vytvořený v programu SIEMENS NX 12 byl importován a zjednodušen ve vestavěném modeláři – Design Modeler. Zjednodušení se týkalo především uvažování svařence jako jednoho sloučeného objektu, vynechání šroubů a zaoblení profilů. Dále byly kuželíky rozděleny horizontálním řezem a použita pouze jejich polovina.



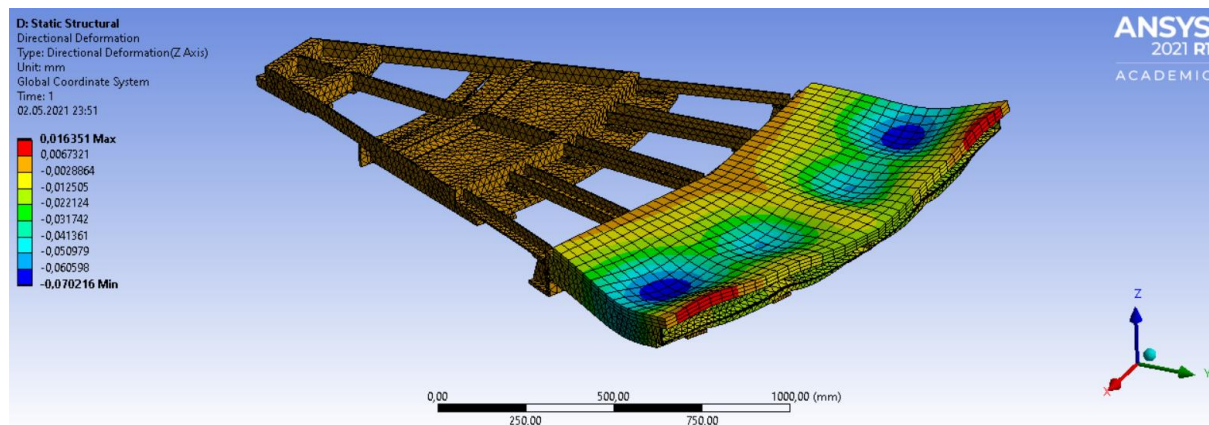
Obr. 110 – zjednodušená geometrie v prostředí Design Modeler



Obr. 111 – rozložení podmínek, vazeb a sil na modelu

⁵ Váhy a rozměry jednotlivých částí k fragmentaci jsou zpracovány v kapitole 2.2.2.

Obrázek 40 zachycuje zadání vazeb (constrains) – na spodní polovinu kuželíků byly přidány vazby úplné fixace. Čela kuželíků (v skutečnosti držných klecí) pak byla zbavena pohybů v osách X a Y (ponechán byl pouze ve vertikální ose Z). Na rovinách ohraničující 1/9 původního modelu jsou nastaveny vazby symetrie. Zatěžující síla je rovna 218 000 N (1/9 celkové zátěže) a působí na část mezikruží nacházejícího se na horní desce (patrné na obrázku 39), která simuluje umístěnou část tlakové nádoby.

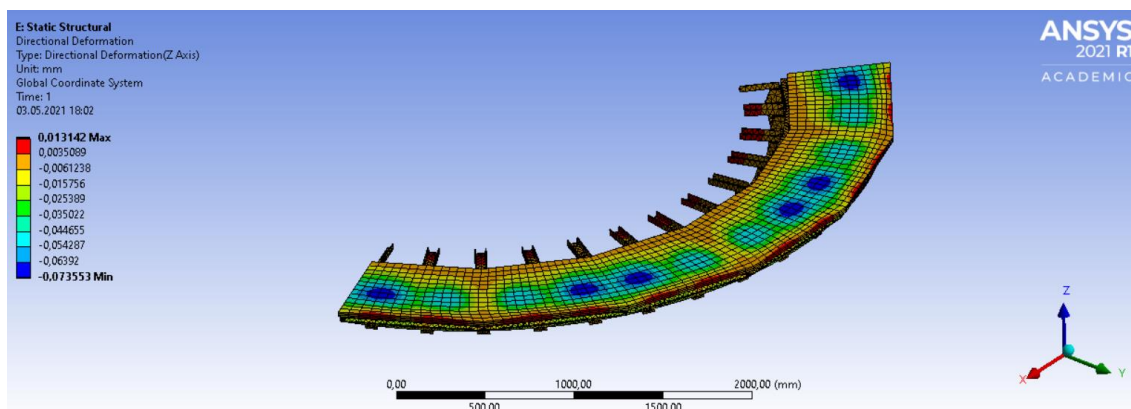


Obr. 112 – Výsledná deformace ve vertikální ose Z

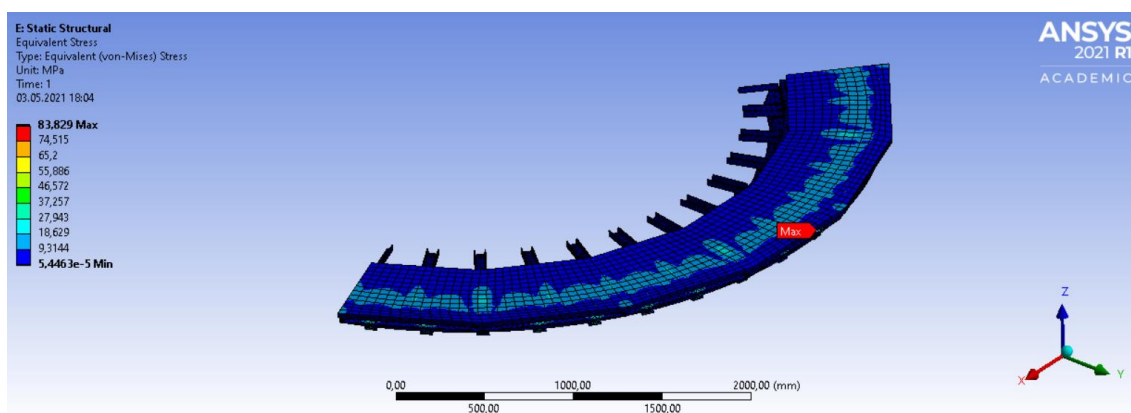
Z obrázku 41 je patrné, že maximální deformace činí 0,07 mm, podstatným faktem však je, že pro adekvátní zjištění deformací a namáhání kuželíků bude potřeba udělat model větší části stolu. Proto bylo rozhodnuto provést simulaci na 1/3 desky. Důležité je potvrzení domněnky, že je možné při tomto zatížení model zjednodušit a celou nezatíženou část vynechat. Vyplývá to z reakcí ve vazbách kuželíků prostředního a vnitřního prstence, které jsou oproti těm na vnějším zanedbatelné.

Probe: Reactions	X Magnitude	Y Magnitude	Z Magnitude	Total	Units	Time (s)
Force Reaction 1	1449,6	1581,6	18087	18214	N	1,
Force Reaction 2	-4832,4	2658,1	29987	30490	N	1,
Force Reaction 3	1418,7	8093,4	47697	48399	N	1,
Force Reaction 4	5351,9	856,86	29921	30408	N	1,
Force Reaction 5	-943,81	2034,3	18083	18221	N	1,
Force Reaction 6	-4245,6	10137	16114	19505	N	1,
Force Reaction 7	-6740,1	10833	15967	20438	N	1,
Force Reaction 8	1186,4	6647,9	10153	12194	N	1,
Force Reaction 9	10003	7897,6	15934	20404	N	1,
Force Reaction 10	7479,3	8021,	16075	19460	N	1,
Force Reaction 11	-5,0421	15,104	-0,92307	15,95	N	1,
Force Reaction 12	0,82596	6,0596	0,8696	6,1772	N	1,
Force Reaction 13	1,3153	6,1204	0,9611	6,3334	N	1,
Force Reaction 14	10,169	12,99	-0,67035	16,511	N	1,
Force Reaction 15	4,3855	5,5118	0,49453	7,061	N	1,
Force Reaction 16	2,1288	3,4391	0,54942	4,0818	N	1,
Force Reaction 17	-0,7625	3,8791	0,48395	3,9828	N	1,
Force Reaction 18	-2,1669	6,3543	0,29412	6,7201	N	1,
Force Reaction 19	-0,7705	-5,3024	-10,055	11,393	N	1,
Force Reaction 20	-1,07	-5,2326	-9,9679	11,309	N	1,

Obr. 113 – reakce ve vazbách – Force Reaction 11 až 20 patří ke kuželíkům na vnitřním a prostředním prstenci

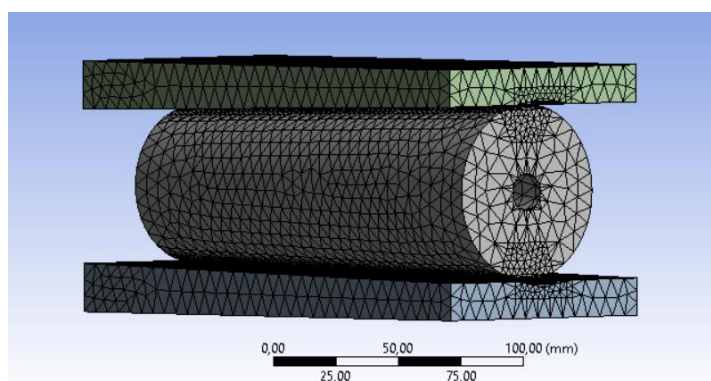


Obr. 114 – deformace ve svislé ose (Z) na modelu 1/3 otočné desky

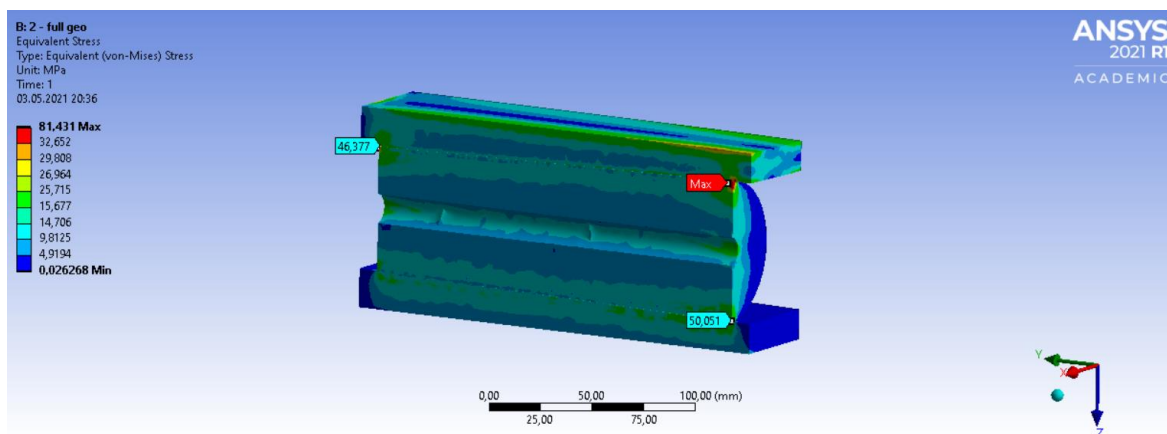


Obr. 115 – redukované napětí dle hypotézy HMH na stejném modelu

Na rozšířeném modelu vyšla stejná maximální deformace v ose Z – 0,07 mm. Charakter zatížení odpovídá prvotně modelované situaci a je i potvrzeno periodicky se opakující rozložení zatížení na kuželíky. Vypočtené reakce v pevných vazbách budou následně použity při výpočtu valivého odporu u návrhu pohonů a při pevnostní analýze pevného rámu. Z obrázku 44 je patrné, že největšího napětí (83,8 MPa) je dosaženo v místě kontaktu kuželíku s dráhou, která se po něm odvaluje. Použitá síť (mesh) není dostatečně kvalitní pro korektní výpočet napětí v Hertzově kontaktu. Toto nejexponovanější místo je tedy detailně prověřeno na vlastním modelu se sítí odpovídající pro výpočet Hertzova kontaktu:



Obr. 116 – použitá síť (mesh) pro model nejexponovanějšího kuželíku



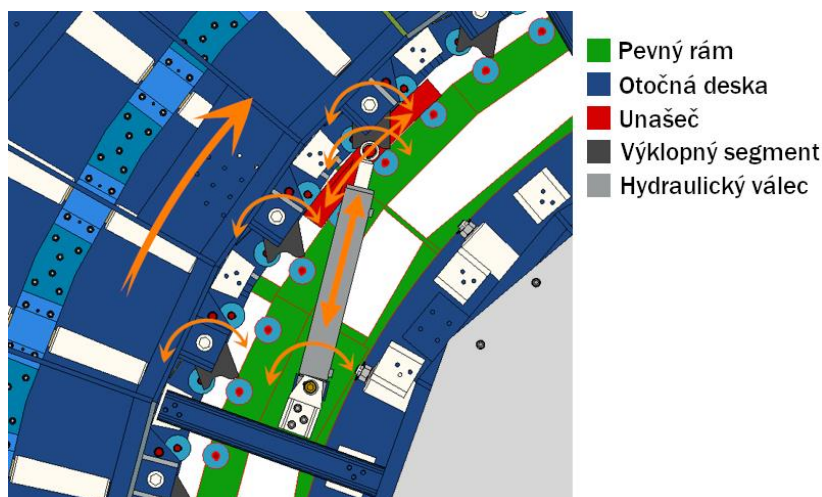
Obr. 117 – podélný řez zobrazující redukované napětí (HMH) pro model Hertzova kontaktu mezi dráhami a kuželíkem

Porovnáním dosažených hodnot na obrázcích 44 a 46 je patrné, že hustší síť vedla k přesnějšímu určení napětí u Hertzova kontaktu. Maximální hodnota je podobná – 81,4 MPa a pro uvažované materiály (ČSN 17 381) je zcela korektní.

5.2 Návrh a výpočet pohonů

5.2.1 Koncepce

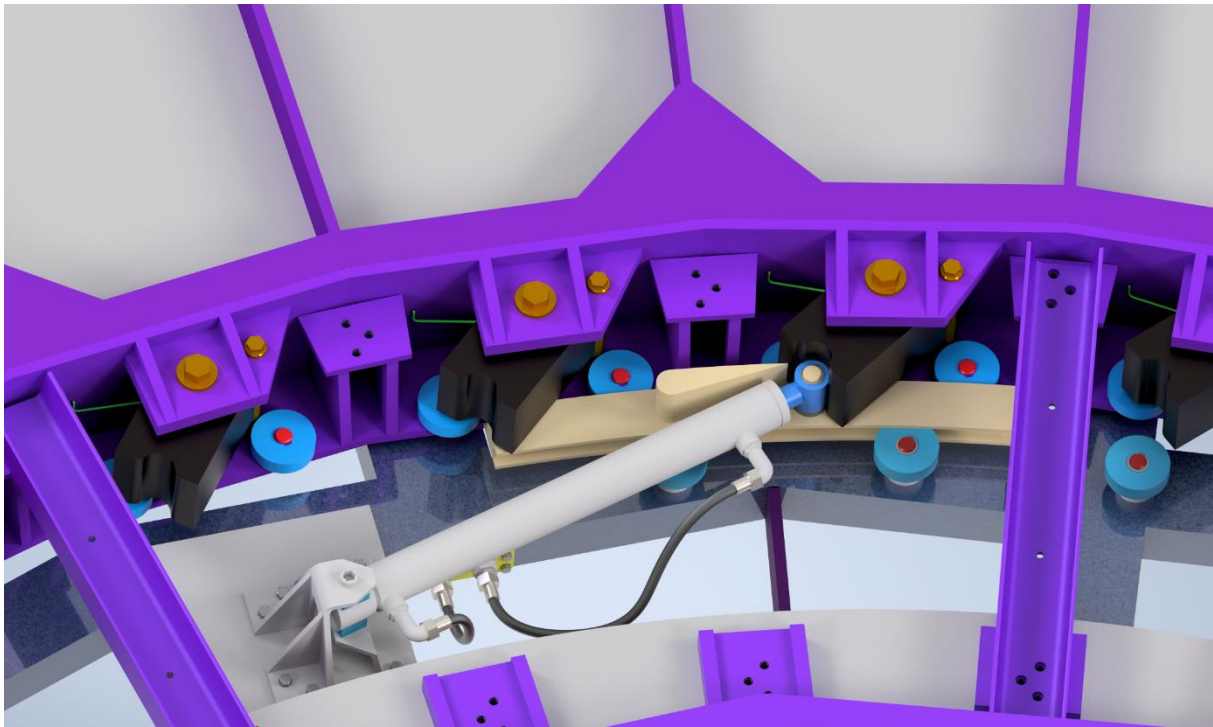
V kapitole pojednávající o uvažovaných variantách je u té vítězné uvedeno, že pohon stolu bude zajištěn pomocí hydraulických válců. Výhodou tohoto řešení je značná jednoduchost a nízké pořizovací náklady pohonu, je však třeba vyřešit změnu pohybu z lineárního, který poskytuje válec, na požadovaný rotační pohyb desky stolu.



Obr. 118 – schéma umístění pohonu s naznačenými možnostmi pohybů komponent

Obrázek 47 ukazuje ilustraci navrženého mechanismu pro přeměnu lineárního vratného pohybu na rotační pohyb otočné části stolu. Hydraulický válec je uložen na čepu v pevném rámu a umožňuje své natočení okolo čepu. Pístnice je pevně spojena s unašečem, který při jejím vysunování koná vratný pohyb po kružnici. Pohyb unašeče je vymezen otočnými válečky a maximálním zdvihem pohonu. Při vysunování pístnice koná její konec (pevně spojený s unašečem) pohyb po kružnici, při kterém se dostane do

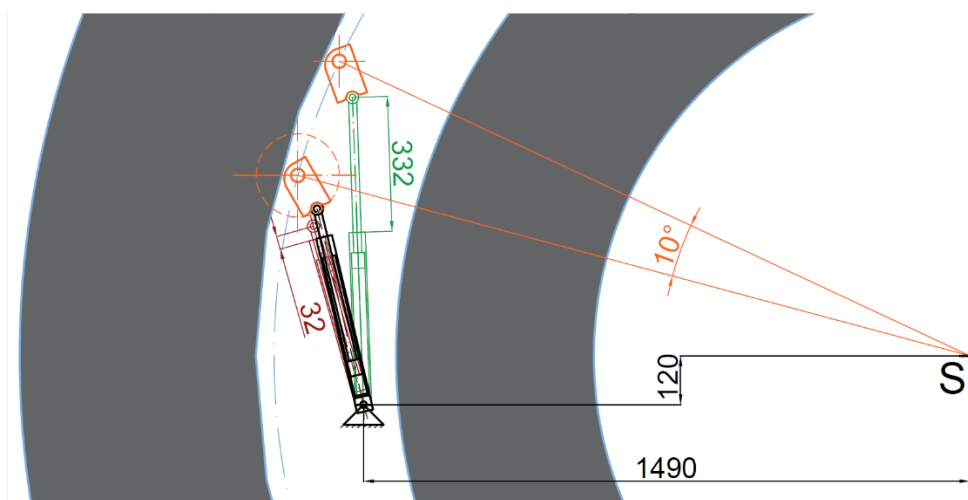
kontaktu s výklopným segmentem uloženým v otočné části stolu. Díky tomu dojde k natočení desky stolu o úhel daný geometrickou polohou čepu, kolem kterého se naklápí pohon, a délkou zdvihu, který může pohon realizovat. Po dosažení maximálního zdvihu (a natočení stolu) dojde ke zpětnému pohybu pístnice, jejíž konec se díky unašeči vrací opět po kružnici do výchozí polohy. Výklopné segmenty mají v sobě vsazenou pružinu, která je drží ve vyklopeném stavu, při zpětném pohybu jsou zatlačeny do rámu otočné desky a po projetí unašeče se silou pružiny vrací do původní polohy.



Obr. 119 – render modelu otočného stolu zachycující barevně odlišené jednotlivé části pohonu

Při rešerši aktuálně používaných řešení bylo zjištěno, že segmentační plány jednotlivých dodavatelů počítají s dělením fragmentované části reaktoru po 5° až 15°. Zadavatel přesně nestanovil požadavek na velikost fragmentovaných dílů, bylo tedy zvoleno, že fragmentace bude probíhat po 10°, přičemž je konstrukčně možné upravit toto řešení na libovolný úhel z uvažovaného rozsahu. Pro zvolený úhel natočení 10° bylo z dostupných hydraulických pohonů vybráno jako nejvhodnější řešení s dvojčinným válcem od italské firmy AMA S.p.A. v Čechách zastoupenou dodavatelem CS Technika s.r.o. o zdvihu 300 mm. Konkrétní typ a provedení je vybráno níže na základě výpočtu potřebné síly.

Při hledání vhodné geometrické polohy čepu, kolem kterého se bude pohon naklápět, a zároveň potřebného zdvihu byly uvažováno, že pohon musí být schopen natočit stůl o více než požadovaných 10°, tak aby při zpětném pohybu měl výklopný segment čas a prostor vrátit se do výchozí polohy. Rovněž bylo třeba zajistit, aby se pohon do omezeného prostoru bezpečně vešel a nenastávaly problémy při kontaktech s výklopnými segmenty. Toto je řešeno včasným odklápěním segmentů unašečem, v horní části vybaveným výstupkem, který po požadovanou dobu odklání segment z prostoru pohybu válce a pístnice.

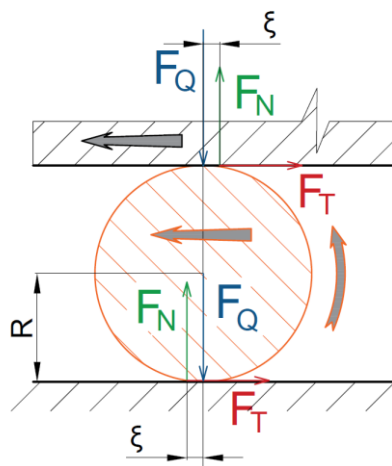


Obr. 120 – schéma polohu v jednotlivých polohách

Polohy, kterých pohon může dosáhnout jsou zakresleny v obrázku 49 – červeně je zanesena poloha při zcela zasunuté pístnici, černě při kontaktu s výklopným segmentem a zeleně při plném zdvihu (300 mm) a požadovaném natočení. Oranžovou čárkovanou kružnicí je zvýrazněn výklopný segment a jeho poloha vůči plně zasunuté pístnici.

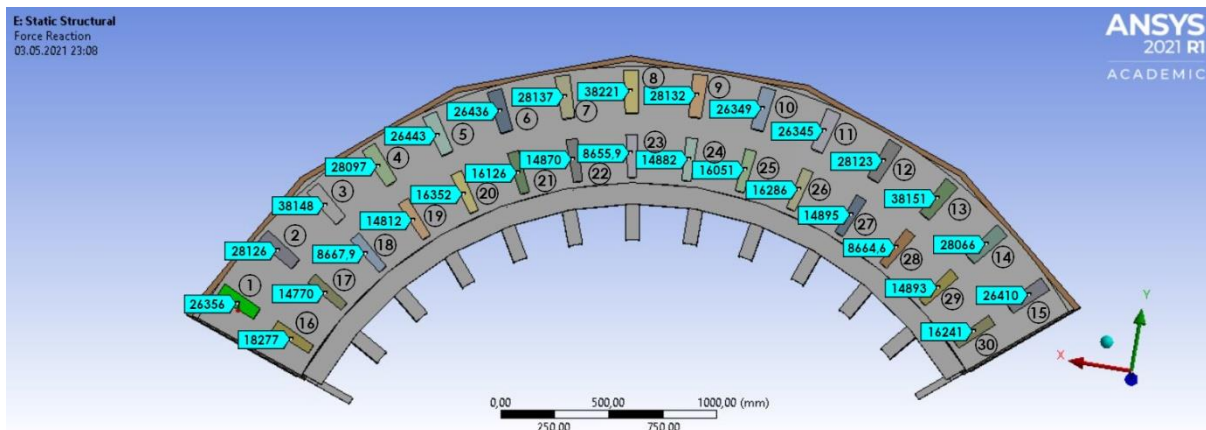
5.2.2 Výpočet valivého odporu při pohybu kuželíků

Jednou ze složek celkového momentu potřebného pro otáčení stolu je ztrátový odpor, který vzniká při valení kuželíků. Pro určení jeho maxima byl opět uvažován stav, kde je stůl pod maximální zátěží 200 tun, tvořených tlakovou nádobou reaktoru. Při jejím otáčení je, mimo největší zatížení stolu, rovněž zatížen největší počet kuželíků – 90 z celkových 172. Při výpočtu je tedy uvažován valivý odpor všech 90 kuželíků, který je realizován každým kuželíkem dvakrát – při kontaktu se spodní i horní dráhou. Situace na následujícím schématu je platná pro každý kuželík, s tím, že se liší velikost zatěžující síly, která odpovídá reakci ve svislém směru, získané při pevnostní kontrole 1/3 modelu otočné desky. Zatěžovány jsou kuželíky pohybující se ve dvou různých vzdálenostech od osy otáčení stolu – jedná se tedy o dvě rozdílné skupiny těles, která se z hlediska výpočtu valivého odporu liší výpočtovým poloměrem R .



Obr. 121 – schéma otáčení vrchní desky a odvalujícího se kuželíku

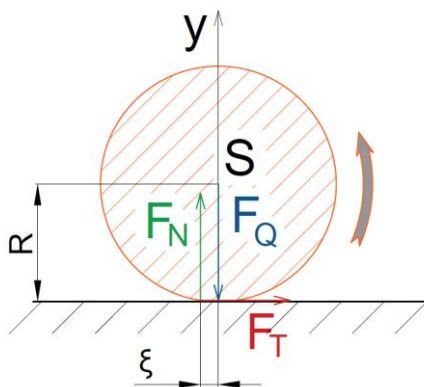
Valivé odpory mezi kuželíkem a spodní/horní dráhou jsou uvažovány jako stejné. Na následujících řádcích je uveden obecný výpočet tečné síly F_T , která bude poté zdvojnásobena, aby odpovídala reálné situaci v daném místě. Konkrétní výsledky pro jednotlivé kuželíky jsou zpracovány v tabulce. Pozice počítaného kuželíku (n) a odpovídající síla vychází z tohoto schématu.



Obr. 122 – velikosti zatížení [N] jednotlivých kuželíků a jejich pozice.

Výpočet tečné síly (obecně):

Vstupní parametry:	poloměr kuželíku (v místě) R	[mm]
	síla zatěžující kuželík F_Q	[N]
	rameno valivého odporu ξ	[mm]
	počet kuželíků n	[-]
	rameno působení tření R_T	[m]
Zbývá určit:	tečná síla při valení F_T	[N]



Obr. 123 – náčrt výpočtu tečné síly

Z podmínek rovnováhy:

$$\sum M_{iS} = -F_N \cdot \xi + F_T \cdot R = 0 \quad (5.2)$$

$$\sum F_{iy} = -F_Q + F_N = 0 \quad (5.3)$$

Z (5.2) po dosazení (5.3) vyplývá:

$$\mathbf{F}_T = \frac{F_Q \cdot \xi}{R} \quad (5.4)$$

Obecně pro kuželíky na 1/3 otočného stolu:

$$\mathbf{F}_{T_n} = \frac{F_{Q_n} \cdot \xi}{R_i}, \text{ pro } n \in \{1, 2, \dots, 30\} \wedge i = \{1\} \vee \{2\} \quad (5.5)$$

Koeficient n určuje pozici kuželíku, i je indexem poloměru, na kterém se kuželík nachází. Rameno valivého odporu je zvoleno dle Strojnických tabulek [42] - $\xi = 0,05\text{mm}$. Následující tabulka obsahuje data vzniklá aplikací rovnice (5.5) pro jednotlivá zatížení dle MKP analýzy kuželíků a desky stolu:

Tabulka 6 – odpory kuželíků proti valení (na 1/3 stolu) při uvažování maximální zátěže 200 t na vnější prstenech

	#	Zatěžující síla [N]	Tečná síla [N]	Odpor kuželíku [N]		#	Zatěžující síla [N]	Tečná síla [N]	Odpor kuželíku [N]
	n	F_Q	F_T	$F_O = 2 \cdot F_Q$		n	F_Q	F_T	$F_O = 2 \cdot F_Q$
Poloměr kuželíku $R_{i=1} = 33,478\text{ mm}$	1	26356	39,36	78,73	Poloměr kuželíku $R_{i=2} = 28,913\text{ mm}$	16	18277	31,61	63,21
	2	28126	42,01	84,01		17	14770	25,54	51,08
	3	38148	56,97	113,95		18	8667,9	14,99	29,98
	4	28097	41,96	83,93		19	14812	25,61	51,23
	5	26443	39,49	78,99		20	16352	28,28	56,56
	6	26436	39,48	78,97		21	16126	27,89	55,77
	7	28137	42,02	84,05		22	14870	25,72	51,43
	8	38221	57,08	114,17		23	8655,9	14,97	29,94
	9	28132	42,02	84,03		24	14882	25,74	51,47
	10	26349	39,35	78,71		25	16051	27,76	55,51
	11	26345	39,35	78,69		26	16286	28,16	56,33
	12	28123	42,00	84,00		27	14895	25,76	51,52
	13	38151	56,98	113,96		28	8664,6	14,98	29,97
	14	28066	41,92	83,83		29	14893	25,75	51,51
	15	26410	39,44	78,89		30	16241	28,09	56,17
Σ	Celkový odpor F_{OD1} [N]			1318,90	Σ	Celkový odpor F_{OD2} [N]			741,69

Kuželíky 1 až 15 se pohybují po kružnici o poloměru $R_{R1} = 2,2\text{ m}$ a kuželíky 16 až 30 po $R_{R2} = 1,9\text{ m}$. Vypočtené celkové odpory platí pro 1/3 otočného stolu, ve výpočtu brzdného momentu tedy budou započteny 3x.

Brzdný moment celého vnějšího prstence (45 dvojic kuželíků):

$$\mathbf{M}_{T01} = 3 \cdot (F_{OD1} \cdot R_{R1} + F_{OD2} \cdot R_{R2}) \quad (5.6)$$

$$\mathbf{M}_{T01} = 3 \cdot (1318,9 \cdot 2,2 + 741,69 \cdot 1,9) = 1,29 \cdot 10^4 \text{ Nm}$$

5.2.3 Moment desky s fragmentovaným tělesem

Druhou podstatnou složkou pro výpočet celkového momentu daného pohonem je moment daný odporem otočné části a fragmentované nádoby při rozběhu na požadované otáčky. Zátěžový stav je stejný – tlaková nádoba o hmotnosti 200 tun. K tomu je navíc uvažováno 5800 kg jako váha otočné části stolu – rámu a vrchní desky – která byla získána z 3D modelu. Maximální otáčky stolu byly dány zadavatelem – 1 otáčka za hodinu, doba rozběhu byla zvolena.

Vstupní parametry: celková hmotnost	m	[kg]	205800
poloměr otáčení	R_{OT}	[m]	2,2
maximální otáčky	n_{max}	[h ⁻¹]	1
doba rozběhu	t	[s]	0,1

Zbývá určit:	moment setrvačnosti	I	[kg · m ²]
	úhlové zrychlení	ϵ	[rad · s ⁻²]
	moment k rozběhu	M_R	[Nm]

Moment setrvačnosti:

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R_{OT}^2 = \frac{1}{2} \cdot 205800 \cdot 2,2^2 = 4,98 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.7)$$

Úhlové zrychlení:

$$\epsilon = \frac{\omega}{t}, \text{ kde } \dots \omega = 2 \cdot \pi \cdot n_{max} \quad (5.8)$$

$$\epsilon = \frac{\omega}{t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{max}}{t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1}{0,1 \cdot 3600} = 0,017 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (5.9)$$

Moment potřebný k rozběhu:

$$M_R = I \cdot \epsilon = 4,98 \cdot 10^5 \cdot 0,017 = 8,47 \cdot 10^3 \text{ Nm} \quad (5.10)$$

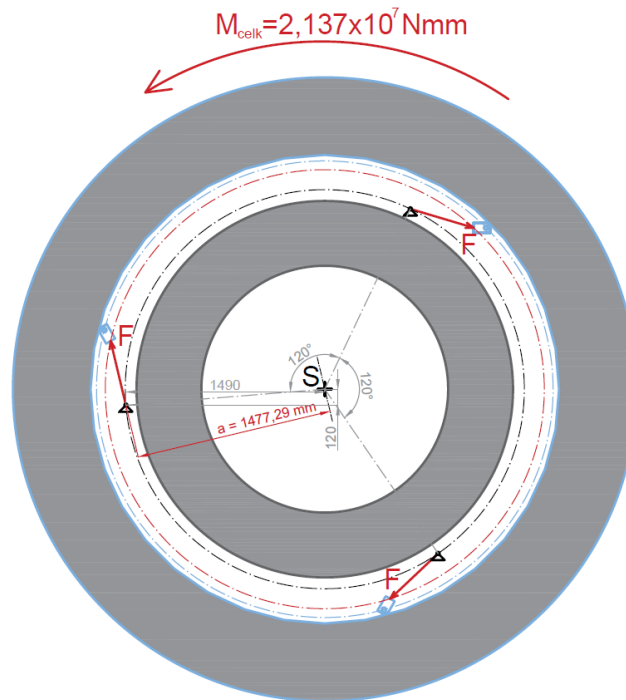
5.2.4 Celkový potřebný moment pro otočení

V celkovém momentu není započten odpor prostředí, který je obtížné určit vzhledem k různému charakteru součástí. Součásti jsou rotačního charakteru, takže odpor proti otočení daný prostředím není velký. Celkový potřebný moment je tedy určen jako součet momentu potřebného k rozběhu a odporu proti valení.

$$M_{celk} = M_R + M_{T01} = (8,47 + 12,9) \cdot 10^3 = 2,137 \cdot 10^4 \text{ Nm} \quad (5.11)$$

5.2.5 Potřebná síla pohonu

Aby nebyla funkce stolu přímo závislá na funkci jednoho pohonu, bylo rozhodnuto o distribuci potřebné síly mezi 3 shodné pohony, které jsou rozmístěny pravidelně po 120° okolo otočného stolu. Geometrická poloha pohonu je dána dříve určeným potřebným zdvihem. Rameno a , na kterém působí síly F je stanoveno z výkresu vytvořeném v programu AutoCAD na základě předem určené pozice, ze které jsou pohony schopny realizovat potřebný rozsah pohybů a polohy výklopných segmentů.



Obr. 124 – schéma výpočtu potřebné síly pohonu – šedě jsou vybarveny dráhy s kuželíky

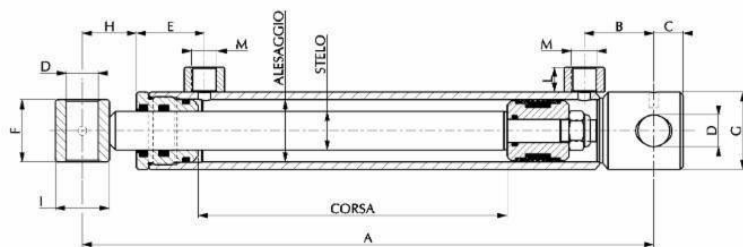
Z podmínky rovnováhy:

$$\sum M_{iS} = -M_{\text{celk}} + 3 \cdot F \cdot a = 0 \quad (5.12)$$

$$F = \frac{M_{\text{celk}}}{3 \cdot a} = \frac{2,137 \cdot 10^7}{3 \cdot 1477,29} = 4,82 \text{ kN} \quad (5.13)$$

5.2.6 Volba pohonu

Výpočet je proveden bez uvažování odporu prostředí a přáním zadavatele bylo výrazné předimenzování pohonných jednotek. Z tohoto důvodu je z katalogu firmy AMA S.p.A vybrán dvojčinný válec katalogového čísla OCDE322030^[43], který při požadovaném zdvihu 300 mm a maximálním pracovním tlaku 150 bar vyvede sílu 12 kN. Rychlost vysouvání je řízena pomocí proporcionálních průtokových ventilů, umístěných mimo bazén, ve kterém dohází k fragmentaci součástí. Hydraulické médium je ke stolu přiváděno 6 hadicemi, které jsou vždy po dvojicích přivedeny k dvojčinnému válci. Použití proporcionálních ventilů se snímači by zároveň umožnilo dosažení přesné polohy, pokud by byla požadována jiná než je násobek základních 10°.



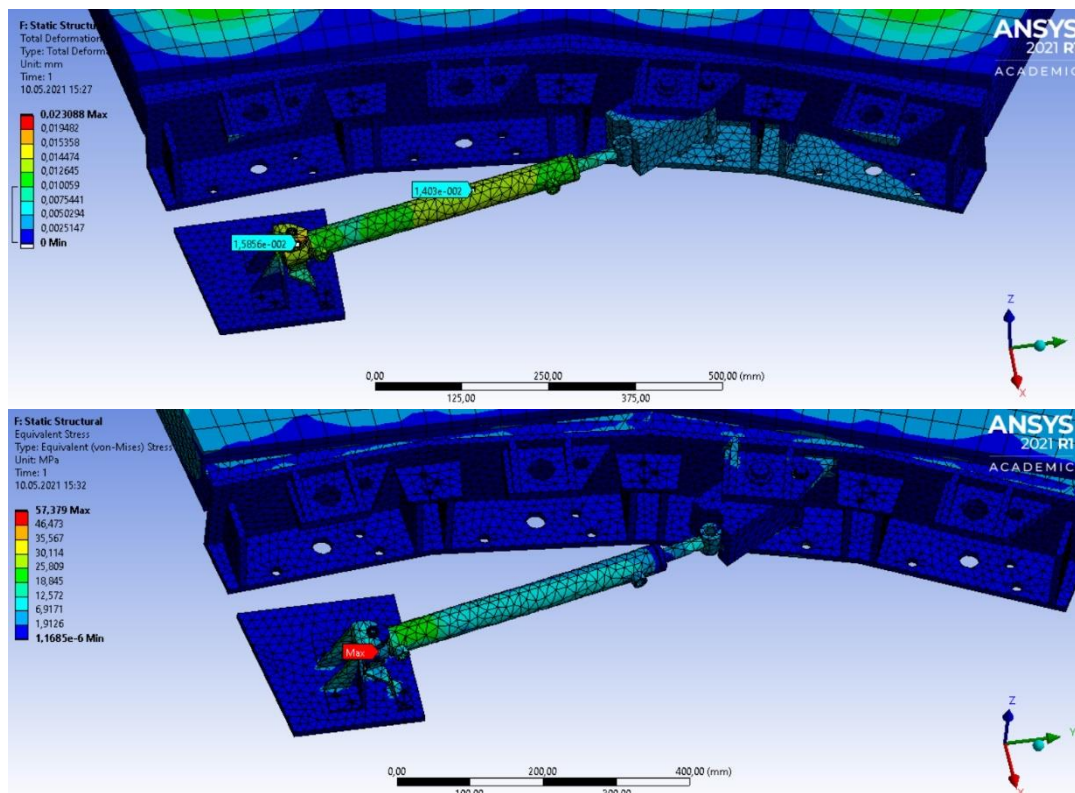
Vnitřní průměr válce "ALESSAGGIO" mm	32 mm
Průměr pístnice "STELO" mm	20 mm
Délka tahu CORSA (STROKE)	300 mm
Rozměr A	455 mm
Rozměr B	33 mm
Rozměr C	17 mm
Rozměr D	16 mm
Rozměr E	44 mm
Rozměr F	35 mm
Rozměr G	40 mm
Rozměr H	32 mm
Rozměr I	30 mm
Rozměr L	16 mm
Rozměr M	1/4"

Obr. 125 – kótovaný náčrt zvoleného pohonu [44]

Výrobce udává, že na objednávku je schopný dodat pohony v podobě schopné provozu ve vodě – hlavní rozdíly jsou v materiálu pístnice a jejího utěsnění. Vzhledem k použití a předpokládané době fragmentace je nutné tento problém řešit komunikací s výrobcem či výrobou komponent z vhodného materiálu např. oceli 17 042.

5.2.7 Pevnostní kontrola

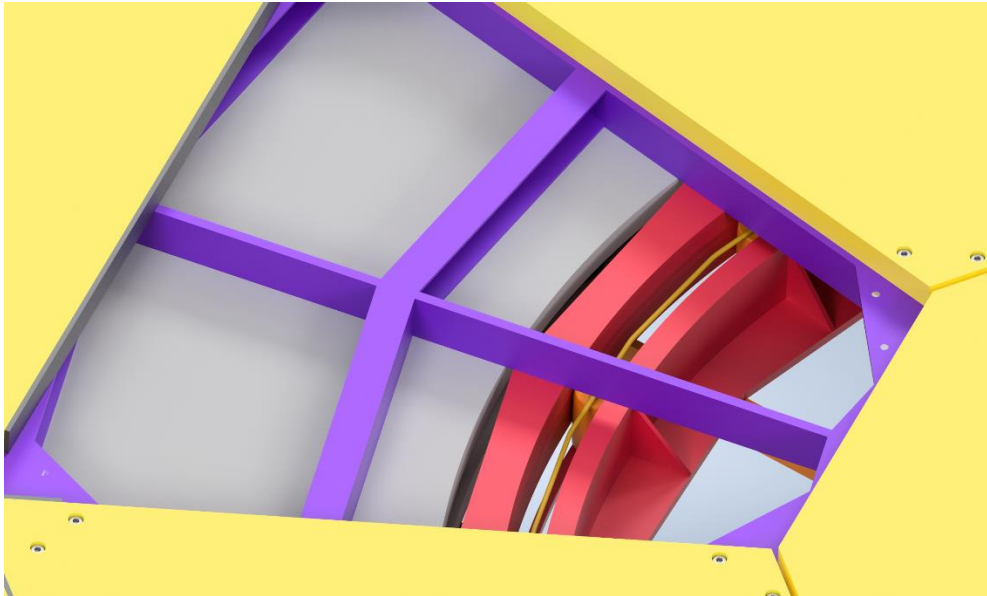
Metodou konečných prvků bylo kontrolováno namáhání vence s výklopnými segmenty a uložení čepu v pevném rámu stroje. Dosažené výsledky odpovídají tomu, že hydraulické pohony nevyvíjí maximální sílu, na kterou jsou výrobcem navrženy. Maximální deformace na upevnění válce je 0,016 mm, na pístnici 0,014 mm. Maximální redukované napětí se nachází na čepu, kolem kterého se naklápí pohon a dosahuje 57,4 MPa.



Obr. 126 – výsledky MKP analýzy zatížené desky s pohonem

5.2.8 Radiální zachycení sil

Působením pohonů do sestavy otočného stolu vstupují radiální síly. Ty jsou v porovnání s axiálními silami danými zátěží malé. Uvažovaná metoda fragmentace součástí plazovým hořákem žádné další radiální síly nepřináší. Zachycení těchto sil řeší věnec s válečky fungující jako radiální ložisko, který se nachází mezi druhým a třetím prstencem axiálních ložisek.

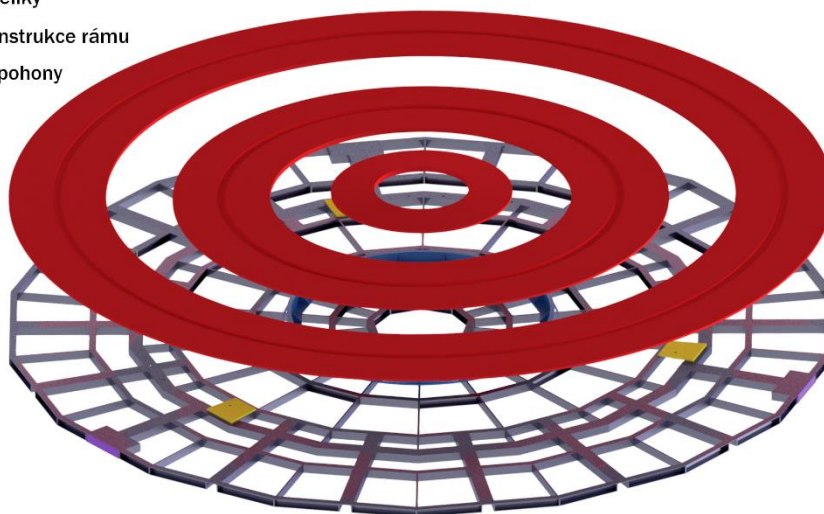


Obr. 127 – pohled na radiální ložisko skrze otvor po demontované vrchní desce

5.3 Pevný rám

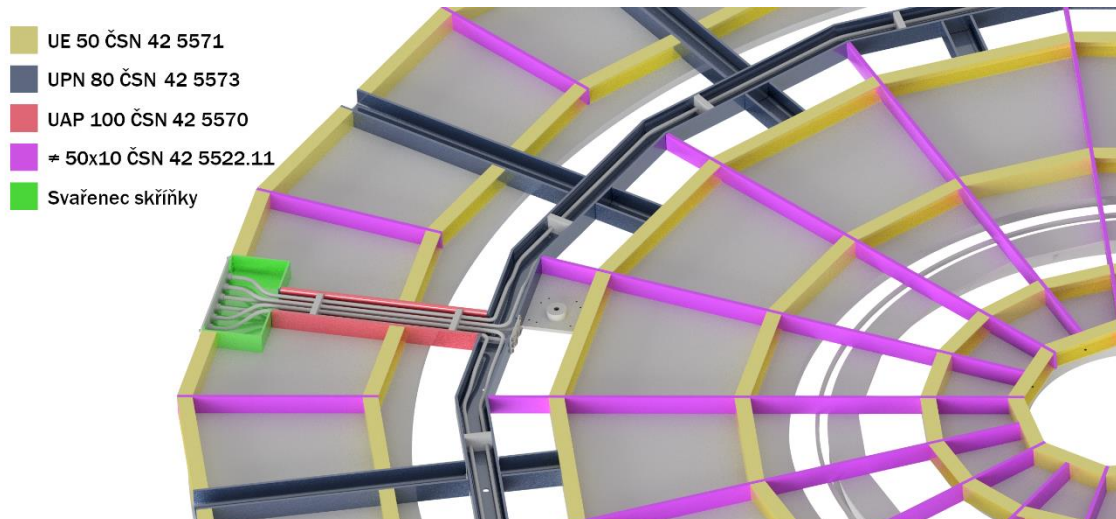
Konstrukce spodní pevné části je obdobná jako u otočné části – základem je svařovaná konstrukce z profilů, ke které jsou přivařeny dráhy, po kterých se odvalují kuželíky. Rozměry drah jsou totožné s horní deskou. Ke svařované konstrukci jsou dále přivařeny základové desky pro pohony a vnitřní kroužek radiálního ložiska.

- Dráhy pro kuželíky
- Svařovaná konstrukce rámu
- Základny pro pohony



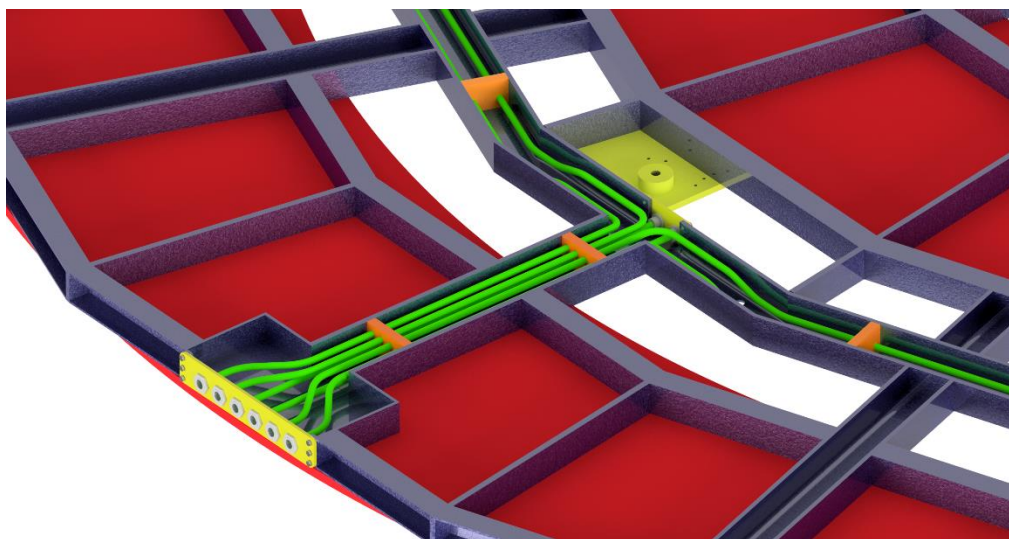
Obr. 128 – pohled na pevnou část rámu – dráhy pro kuželík jsou zvednuty, aby byla odkryta svařovaná konstrukce

Hlavním rozdílem oproti otočné desce je provedení svařované konstrukce. Ta je rovněž vyrobena z nakupovaných polotovarů – profilů UPN 50, UPE 80 a UAP 100 – a svařené skříňky pro připojení hadic hydraulického média. Profily jsou (stejně jako u horní otočné desky) dostupné u dodavatele hutního materiálu Feron a.s. [41].



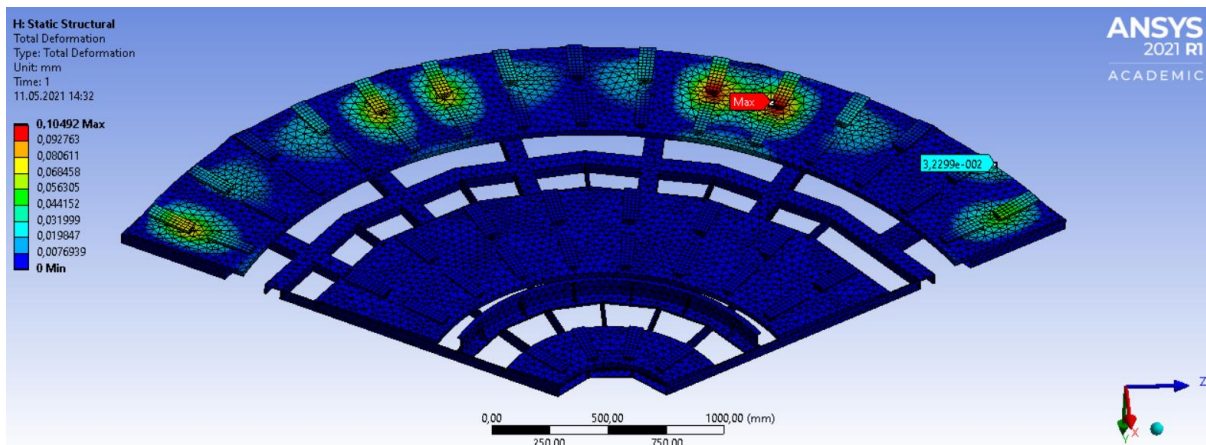
Obr. 129 – kolorovaný obrázek zachycující spodní pohled na konstrukci rámu s vyznačenými typy profilů

Jak je z obrázků patrné, konstrukce rámu mimo nosné funkce umožňuje přívod hydraulické kapaliny k pohonům. Ke stolu vedou hadice pro tři jednotlivé pohony, které jsou dvojčinné, tedy k zařízení je nutno přivést 6 hadic. V rámu stolu je hydraulické médium rozváděno uvnitř profilů přesnými hydraulickými trubkami, které mají na koncích navařeny vývodky se závitem M14x1,5. Zvoleny byly běžně dostupné trubky 10 x 1 mm vyrobené z nerezavějící oceli ČSN 17 348, které jsou vyráběny přímo pro hydraulické aplikace a trvalé použití ve vodě [43]. Dodavatelem těchto trubek v České republice je například společnost KOVAZ s.r.o. [44]. Trubky jsou nataženy od společného místa vstupu do konstrukce stolu až pod patřičný pohon. Tam jsou na vývodku přes redukci připojeny krátké hadice vedoucí k pohonu, které nejsou pevné a umožňují kývavý pohon hydraulického válce.



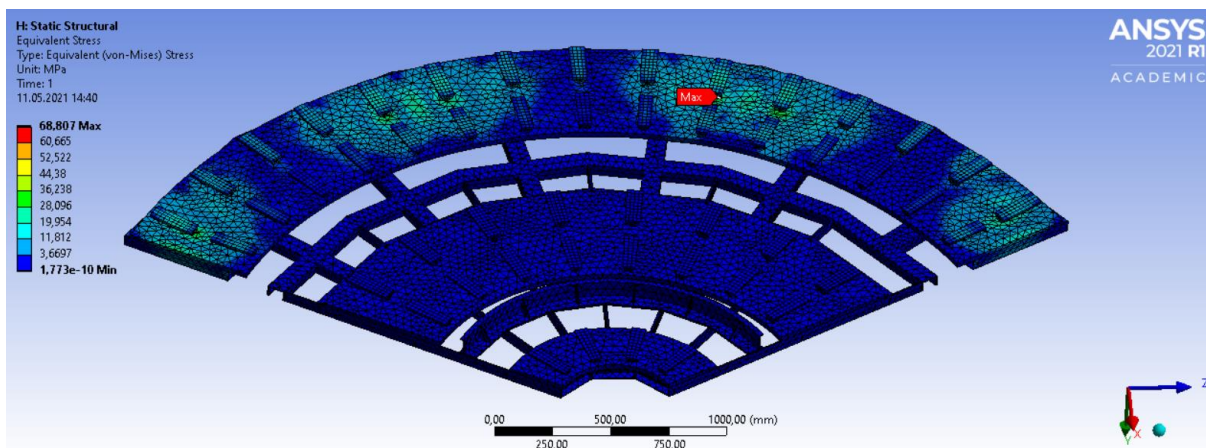
Obr. 130 – detail na místo připojení hydraulických hadic a následné vedení trubkami k jednotlivým pohonům

Konstrukce rámu byla rovněž podrobena kontrole pomocí metody MKP. Modelována byla opět 1/3 celkové geometrie a rozmístění a zatížení kuželíků odpovídá zjištěným reakcím ve vazbách otočné desky.



Obr. 131 – výsledky celkové deformace dosažené při zatížení odpovídající situaci při kontrole vrchní desky

Na obrázku 60 je opět patrné periodické opakování deformačních účinků po obvodu stolu. Částečně je to způsobeno takto se chovajícím zatížením. Výrazně větší vliv ale má geometrie rámu. Konkrétně kuželíky, pod kterými není zaznamenána žádná deformace se (na rozdíl od ostatních) nachází přímo nad výztuhou. Označené místo je pak anomálie způsobená lokální geometrickou odlišností – v těchto místech je skříňka pro přívod hydraulického média. Maximální deformace se nachází v místě Hertzova kontaktu mezi kuželíkem a dráhou a činí 0,105 mm.



Obr. 132 – výsledky průběhu redukovaného napětí (HMH)

Rovněž na výsledcích redukovaného napětí se projevují stejné vlivy geometrie. Největší hodnota napětí 68,8 MPa je v jednom z Hertzových kontaktů mezi kuželíkem a dráhou.

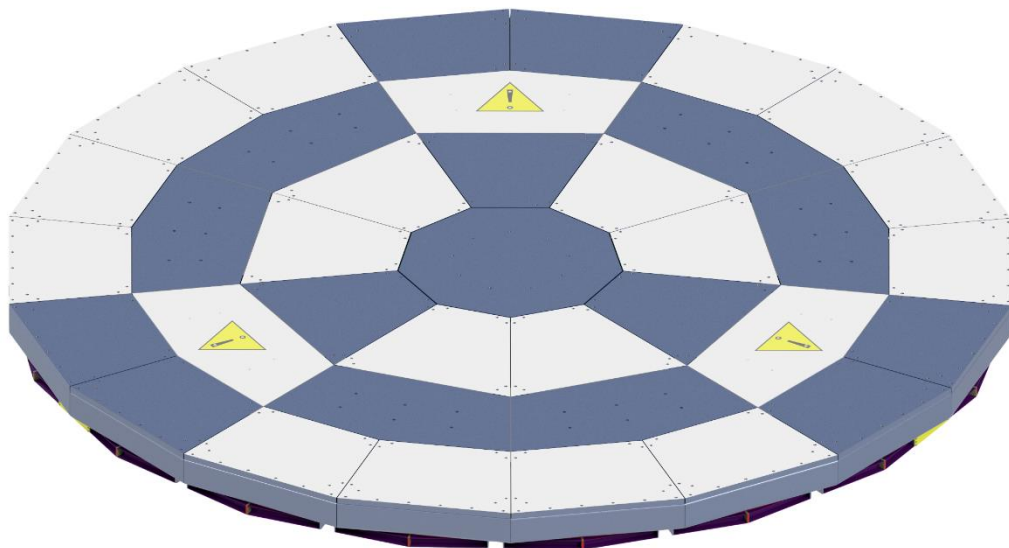
6 Zhodnocení

6.1 Celkový pohled

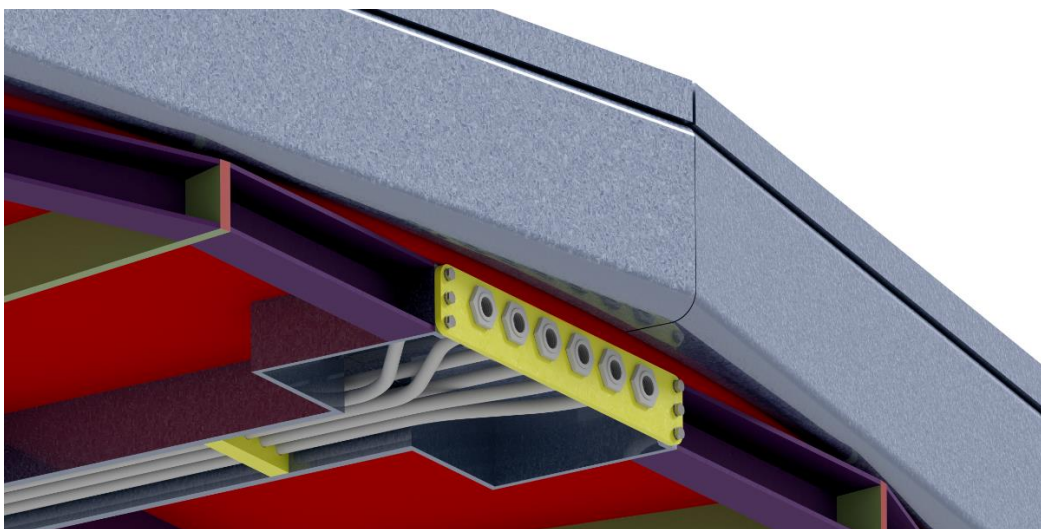
Navržený otočný stůl je osmnáctiboký svařenec s přišroubovanou vrchní deskou rozdělenou na segmenty. Tato konstrukce umožňuje jednodušší svaření a zároveň umožňuje snadnou demontáž a případné servisní zásahy. Vnější rozměry jsou 4775x4700 mm a celková výška 225 mm.

K vrchní desce jsou ve finálním návrhu přišroubovány boční kryty, které výrazně omezují vstup nečistot vzniklých při fragmentaci do prostoru, kde se nachází pohony a pohybují kuželíky.

V příloze 1 se nachází kompletní výkres sestavy otočného stolu se základními kótami a popisem dílů.



Obr. 133 – celkový pohled na navržený stůl



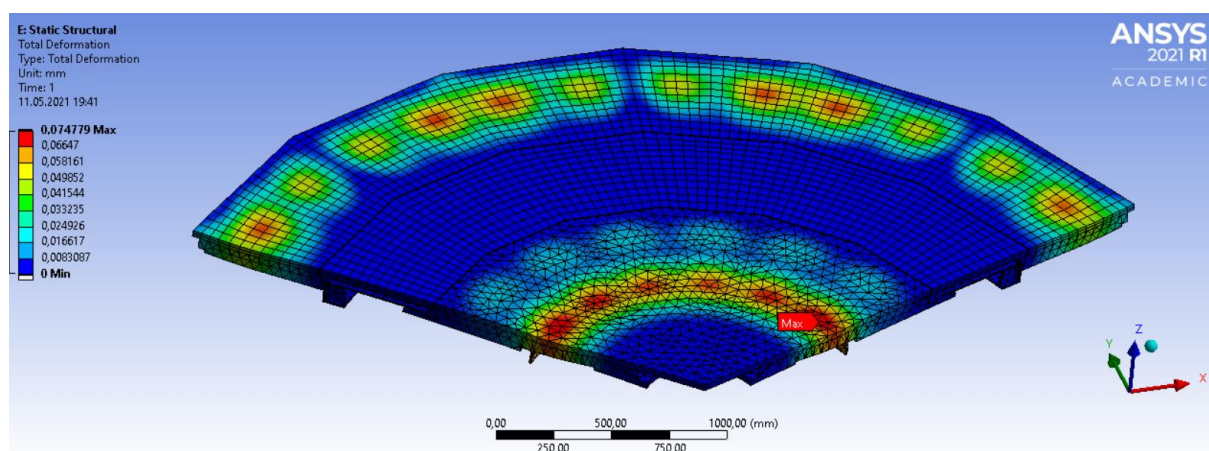
Obr. 134 – detail na připojení hydraulických hadic a kryty ložísek

6.2 Maximální zátěž

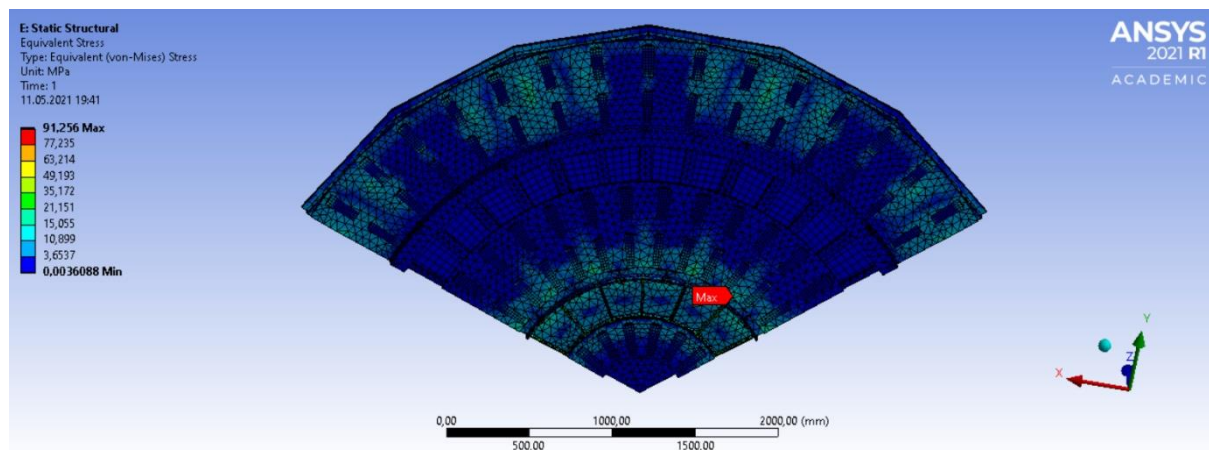
Zadavatelem byla požadována maximální únosnost stolu 200 tun. Analýzou částí k fragmentaci bylo zjištěno, že tuto váhu má pouze tlaková nádoba reaktoru, respektive její část. Proto bylo při návrhu kontrolována část stolu, která tuto plnou zátěž musí zvládnout. Celé zatížení přenášel vnější prstenec kuželíků, na závěr tedy byla provedena série analýz kontrolující deformace a redukované napětí stolu při zatížených jiných částech. Modelována byla opět 1/3 stolu, doplněná vazbami symetrie.

6.2.1 Otočná deska

V prvním případě bylo rozhodnuto o kombinaci zatížení 200 t na vnějším prstenci kuželíků a 200 t mezi vnitřním a druhým prstencem.



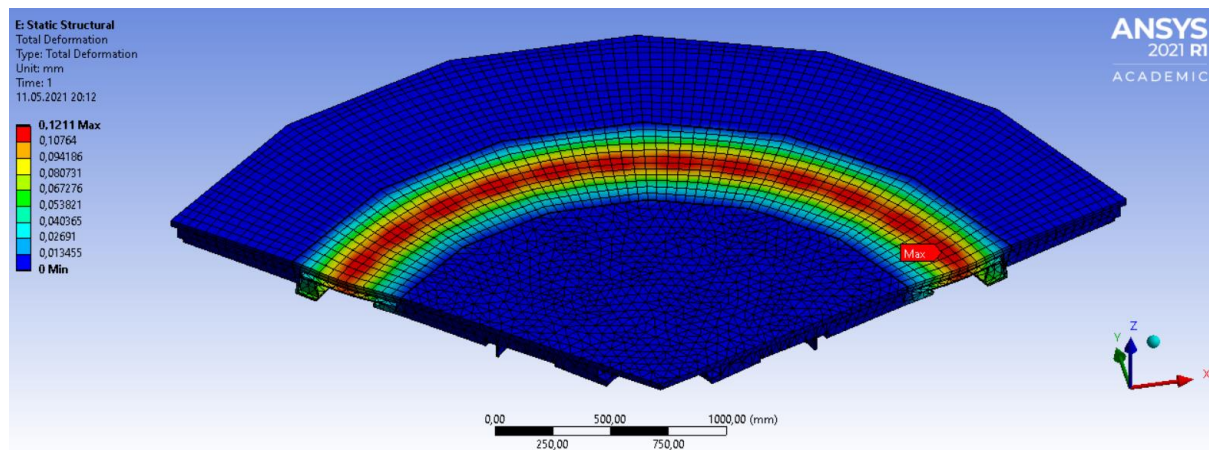
Obr. 135 – vrchní pohled na výsledky analýzy deformací při kombinovaném zatížení desky



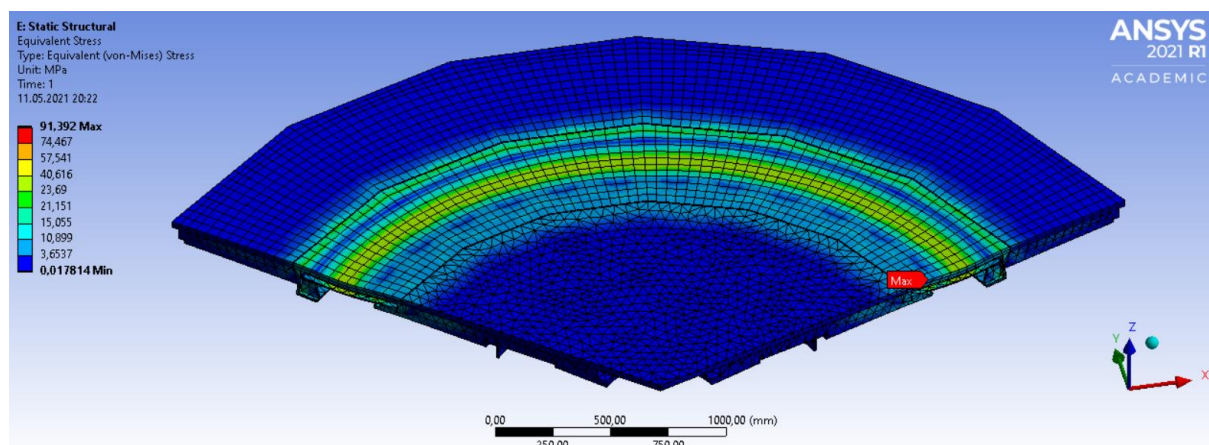
Obr. 136 – výsledná redukovaná napětí při kombinovaném zatížení

Toto kombinované zatížení bylo zvoleno s ohledem na předchozí zjištění, že zatížení vnějšího prstence nemá vliv na kuželíky vnitřních drah. Proto bylo simulováno takovéto zatížení, na výsledcích je možné přímé porovnání mezi chováním desky stolu při vnějším obvodu i uprostřed. Z výsledků je patrné, že deformace i redukovaná napětí jsou vyšší od sil zatěžujících střed desky – konkrétně jde o deformaci o 0,075 mm a maximální napětí 91,256 MPa, které tentokrát není v Hertzově kontaktu, ale nachází se v kontaktu dráhy s jednou z výztuží.

Druhý kontrolovaný případ testoval nejkritičtější místo návrhu – zatížen byl prostor nad pohony, kde je konstrukce otočné desky nejslabší. Bylo očekáváno, že zde bude potenciální problém a nejhorší výsledky na celém analyzovaném modelu. Konstrukce otočné desky v tomto místě je tvořena deskou o tloušťce 25 mm shodnou s okolím. Pod deskou jsou ovšem umístěny pouze profily UE 65, které spojují vnější a vnitřní otočnou část stolu.



Obr. 137 – průběh deformace při zatížení vrchní desky nad pohony



Obr. 138 – redukované napětí při kontrole kritické části vrchní desky

Z dosažených výsledků je patrné, že se naplnily předpoklady, že nad pohony bude dosaženo nejneprůzračnějších hodnot – deformace až 0,12 mm a redukované napětí 91,39 MPa. Nejvyšší hodnoty se pochopitelně nachází na profilech UE 65, vyrobených dle dodavatele (Feron a.s.) z materiálu S235JR (odpovídá ČSN 11 375), který má mez kluzu $R_e = 235$ MPa. Vzhledem k tomu, že se neočekává takto velké zatížení této části desky, byla požadovaná bezpečnost stanovena na $k > 2$.

Dosažená bezpečnost:

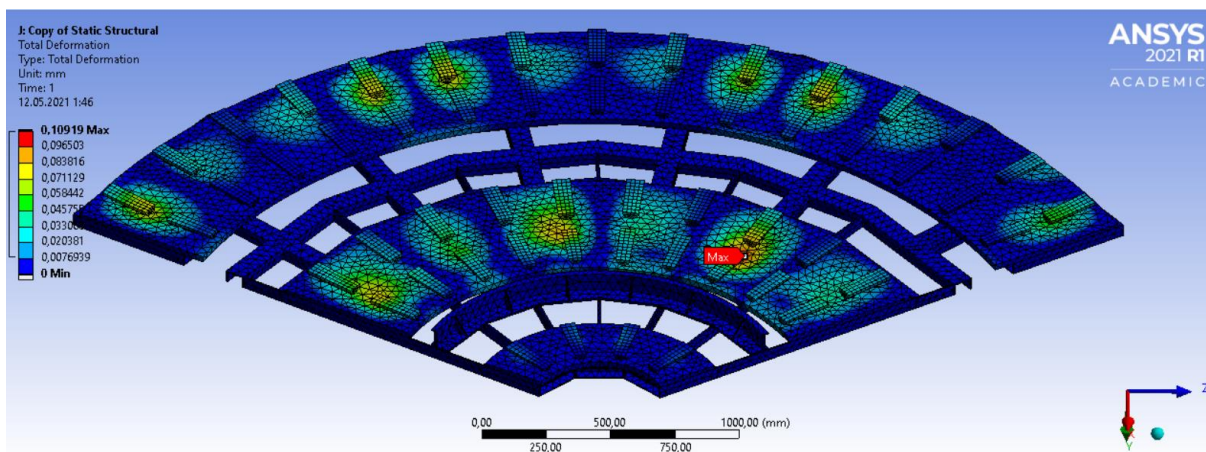
$$k = \frac{R_e}{\sigma_{\max}} = \frac{235}{91,39} = 2,57 \Rightarrow \text{Vyhovuje!}$$

Otočná část stolu tedy i v kritickém bodě vyhovuje s maximálním požadovaným zatížením.

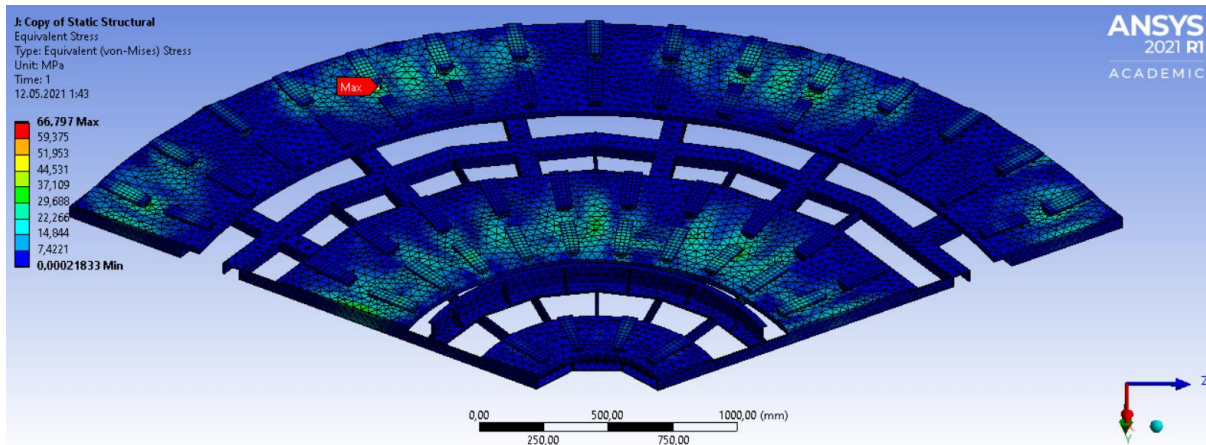
6.2.2 Pevná část

Na základě reakcí ve vazbách zjištěných při analýze otočné části byl odpovídajícím způsobem zatížen i pevný rám stolu. Zkoumány byly opět oba dva případy, stejně jako u otočné části.

a) Kombinované zatížení 200 tun na vnějším prstenci a na vnitřních segmentech:



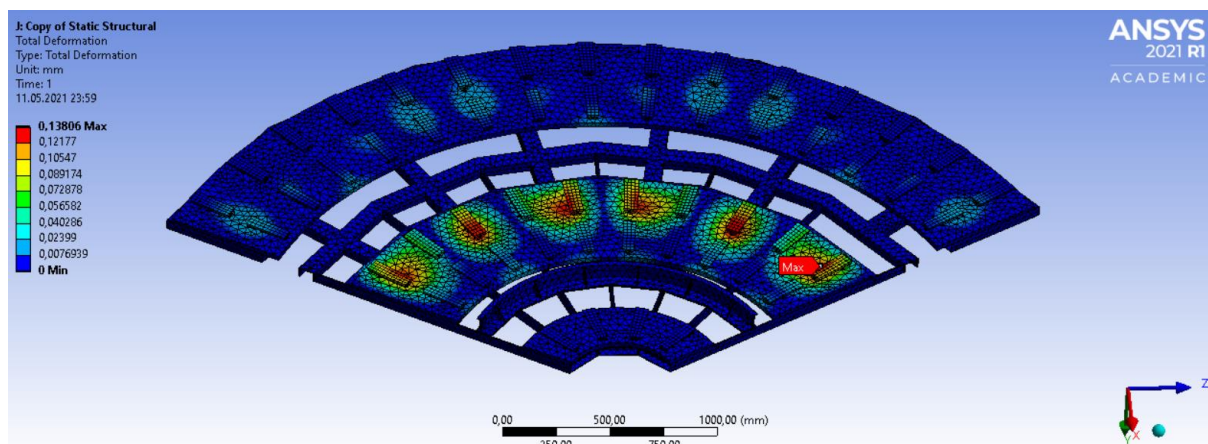
Obr. 139 – deformace pevné části při kombinovaném zatížení



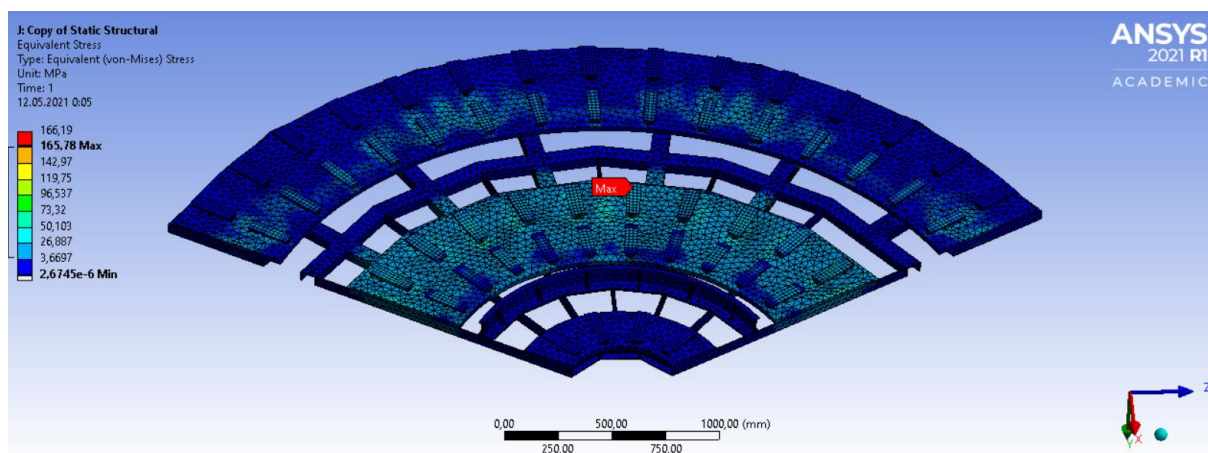
Obr. 140 – redukované napětí na pevném rámu při kombinovaném zatížení

Z výsledků je patrné, že na rozdíl od otočné části stolu u pevného rámu není možné jasně říci, že nebezpečnější je namáhání středových částí. Redukované napětí vychází větší v Hertzových kontaktech na kuželkách vnějšího prstence (max. 66,8 MPa). Naopak větší deformace jsou, rovněž jako u otočné části, na prostředním prstenci. V případě maxima – 0,11 mm – jde o místo, kde se kuželík nachází přesně mezi výztuhami rámu. Dosažené hodnoty se pohybují v podobných mezích jako u předchozích analýz.

b) Druhý případ – zatížení 200 tun působící na profily nad pohony:



Obr. 141 – deformace rámu pod zatížením odpovídající 200 t působícím v kritické vzdálenosti od středu stolu



Obr. 142 – redukované napětí na rámu při kritickém zatížení

Z výsledků je zřejmé, že se jedná o nejvíce zatíženou část stolu – deformace činí 0,14 mm a maximální dosažené redukované napětí v Hertzově kontaktu je 165,78 MPa. Na základě těchto výsledků, požadavků na korozivzdornost drah a kuželíků a požadovanou svařitelnost byl navržen materiál ČSN 17 381(EN 1.4462) s mezí kluzu $R_e = 450 \text{ MPa}$ ^[45]. Do České republiky je dovážena například firmou Matezex^[46]. Požadována byla opět bezpečnost $k > 2$.

Dosažená bezpečnost:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{\max}} = \frac{450}{165,78} = 2,71 \Rightarrow \text{Vyhovuje!}$$

7 Závěr

Cílem práce bylo analyzovat problematiku likvidace částí reaktoru v rámci projektů vyřazování jaderných elektráren z provozu a na základě získaných dat získaných navrhnout nové řešení jednoúčelového přípravku – otočného stolu. V úvodu práce byly sepsány vlastnosti jednotlivých součástí k fragmentaci a provedena rešerše technických řešení a druhů otočných stolů používaných ve světě. Na základě těchto dat pak byly vytipovány dílčí celky a navržena jejich řešení, ze kterých byly určeny čtyři varianty konstrukce – jedno odpovídající aktuální a tři nová. Řešení byla konfrontována s klasickou dosavadní koncepcí bodovým ohodnocením, kdy se zkoumalo, zda nové řešení dílčího celku přinese nějaké výhody anebo naopak.

Vybrané řešení v hodnocených kritériích výrazně zvítězilo, bylo ze všech variant nejnižší (což byl jeden z hlavních problémů stávajícího řešení), disponuje jednoduchým a levným pohonem, který zabírá malé množství místa. Pohyb otočného stolu je jednosměrný, což vzhledem k rotačnímu charakteru fragmentovaných částí nepředstavuje výrazný hendikep.

Hlavní inovací návrhu je pohon otočného stolu lineárními hydraulickými válci, které díky navrženému mechanismu transformují přímočarý pohyb na pohyb po kružnici, díky kterému dochází k natočení stolu o určený úhel. Návrh tohoto pohonu byl ověřen sérií MKP analýz, kontrolujících deformace a namáhání jednotlivých konstrukčních členů.

Pevný rám i otočná svařovaná konstrukce byly kontrolovány v několika zátěžových stavech na požadovaných 200 tun, přičemž dle analýzy součástí k fragmentaci by takovýmto zatížením měly být vystaveny pouze vnější části stolu. Z MKP analýz vyplývá, že stůl je navržen jako předdimenzovaný, ve výpočtovém modelu je ovšem počítáno s dokonalým spojením svařované konstrukce a zadavatel navíc, vzhledem k účelu stolu, požadoval odolnější řešení.

Technické parametry stolu:	
Rozměry	Ø4775 - 225 mm
Maximální zátěž	200 tun
Druh pohonu	3 x dvojčinný hydraulický válec
Délka zdvihu pohonu	300 mm
Síla pohonu	min. 5 kN
Rychlost otáčení	volitelná
Připojení hydraulických hadic	6 x M14x1,5

8 Seznam použité literatury

- [1] List of commercial nuclear reactors. *Wikipedia.org* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_commercial_nuclear_reactors
- [2] Gorbačov: Vybuchl i Sovětský svaz. *Idnes.cz* [online]. ©2006. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/gorbacov-vybuchl-i-sovetsky-svaz.A060424_194517_nazory_ad
- [3] SNR-300. *Wikipedia.org* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/SNR-300>
- [4] VALERO J., HRONOVÁ M. Rada EU dál považuje jadernou energii za udržitelnou. *Euractiv.cz* [online]. ©2019 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://euractiv.cz/section/energeticka-ucinnost/news/rada-eu-dal-povazuje-jadernou-energii-za-udrzitelnou/>
- [5] EVROPSKÁ KOMISE. ZPRÁVA KOMISE EVROPSKÉMU PARLAMENTU A RADĚ o výsledcích dosažených při provádění programů pomoci pro vyřazování jaderných zařízení z provozu týkajících se Bulharska, Slovenska a Litvy v roce 2019 a v předcházejících letech. *ec.europa.eu* [online]. ©2020 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2020/CS/COM-2020-82-F1-CS-MAIN-PART-1.PDF>
- [6] WAGNER V. Kolik stojí likvidace vysloužilé jaderné elektrárny? - 2. část. *OENERGETICE.cz* [online]. ©2020 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/nazory/kolik-stoji-likvidace-vyslouzile-jaderne-elektrarny-2-cast>
- [7] VYŘAZOVÁNÍ Z PROVOZU A LIKVIDACE JADERNÉ ELEKTRÁRNY. *Svetenergie.cz* [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/zivotni-cyklus-elektrarny/vyrazovani-z-provozu-a-likvidace-je>
- [8] GUNTEN A. Lifecycle. *VGA.expert* [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://vga.expert/decommissioning/>
- [9] NIELSEN Per-Ole. Waste from Decommissioning of Nuclear Power Plants. *Statens Kärnkraftinspektion* [online]. ©1992 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/007/24007749.pdf
- [10] BOMAZI. NTS – Low-level radioactive waste storage pit. *Wikipedia.org* [online]. ©2011 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NTS_-_Low-level_radioactive_waste_storage_pit.jpg
- [11] Nechceme úložiště. *Nechcemeuloziste.cz* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.nehcemeuloziste.cz/>
- [12] Large majority in favour of a nuclear fuel repository in Forsmark. *SKB.com* [online]. ©2018 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.skb.com/news/large-majority-in-favour-of-a-nuclear-fuel-repository-in-forsmark/>

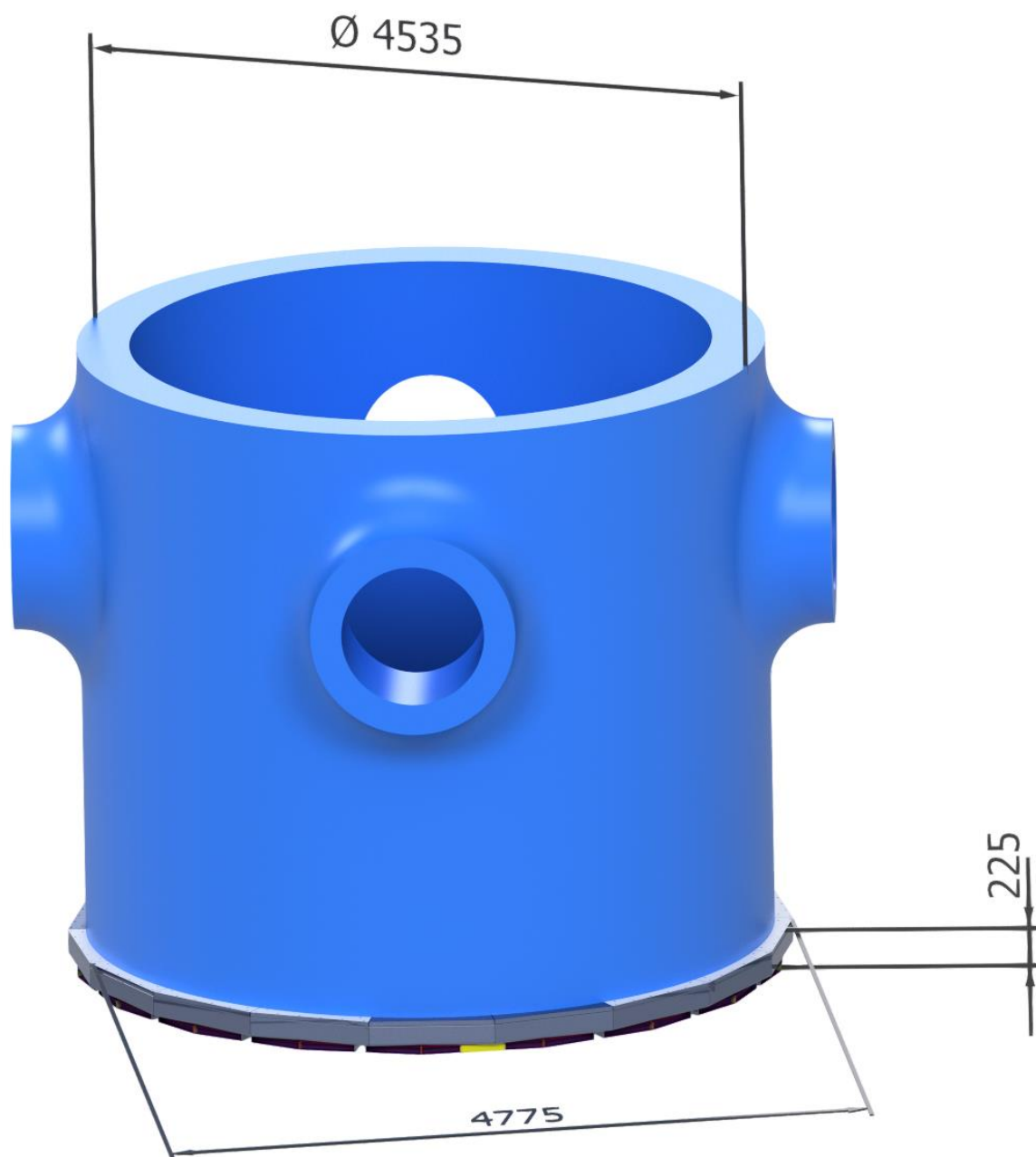
- [13] PANTHER. Schéma reaktoru VVER-1000. *Wikipedia.org* [online]. ©2005 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/VVER#/media/Soubor:Wwer-1000-scheme.png>
- [14] SKUPINA ČEZ. Zavíráme reaktor JE. *Twitter.com* [online]. ©2019 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://twitter.com/SkupinaCEZ/status/1117677296406683648>
- [15] SANGIORGI M., et al. *In-Vessel Melt Retention (IVMR) Analysis of a VVER-1000 NPP: JRC Technical Report* [online]. ©2016 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC101823>
- [16] Štítek: hlava reaktoru. *Atominfo.cz – Aktuálně o jádru* [online]. ©2017 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/tag/hlava-reaktoru/>
- [17] SYNDROMA. VVER reactor head. *Twitter.com* [online]. ©2020 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://twitter.com/Syndroma3/status/1313781776112914437/photo/1>
- [18] SYNDROMA. Leningrad 2-2. *Twitter.com* [online]. ©2019 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://twitter.com/Syndroma3/status/1173865210626674688>
- [19] РОСАТОМ. Атоммаш завершил изготовление внутрикорпусных устройств реактора для первого блока строящейся в Республике Бангладеш АЭС. *Twitter.com* [online]. ©2020 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://twitter.com/rosatom/status/1331184816654602240>
- [20] RIVERKEEPER. From nuts to bolts: Why the NRC must ground BOTH Indian Point reactors. *Riverkeeper – NY's clean water advocate* [online]. ©2016 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.riverkeeper.org/news-events/news/stop-polluters/power-plant-cases/indian-point/nuts-bolts-nrc-must-ground-indian-point-reactors/>
- [21] SYNDROMA. First fuel assembly loaded into Leningrad 2-2 reactor today at 11:08. *Twitter.com* [online]. ©2020 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://twitter.com/Syndroma3/status/1284800802285125638>
- [22] BRUMOVSKÝ M., DRAGUNOV YU. Chapter 4 WWER REACTOR PRESSURE VESSEL DESIGN. *U.S. Department of Energy* [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/322674>
- [23] РОСАТОМ. На Атоммаше завершилась термообработка корпуса реактора для второго блока АЭС. *Twitter.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://twitter.com/rosatom/status/1359127042470645762>
- [24] РОСАТОМ. На Атоммаше успешно проведены гидроиспытания корпуса реактора для первого энергоблока строящейся АЭС. *Twitter.com* [online]. ©2020 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://twitter.com/rosatom/status/1282653146083459072>

- [25] NUCLEAR-POWER.NET. Core Baffle. *NuclearPower.net* [online]. ©2020 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-reactor/neutron-reflector/core-baffle/>
- [26] COOKE C.. Reactor vessel internals segmentation at Zion. *ResearchGate.net* [online]. ©2013 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/293639228_Reactor_vessel_internals_segmentation_at_Zion
- [27] POSPÍŠIL P. REACTOR VESSEL INTERNALS SEGMENTATION EXPERIENCE USING MECHANICAL CUTTING TOOLS. *ResearchGate.net* [online]. ©2013 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/272537564_Reactor_Vessel_Internals_Segmentation_Experience_using_Mechanical_Cutting_Tools
- [28] BOUCAU J., SEGERUD P., SANCHEZ M. Best practices for preparing vessel internals segmentation projects. *International Atomic Energy Agency* [online]. ©2015 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/061/47061301.pdf?r=1
- [29] KIM K. Rancho Seco Reactor Vessel Segmentation Experience Report. *Electric Power Research Institut* [online]. ©2008 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.epri.com/research/products/00000000001015501>
- [30] KWANGSEONG J., et al. An evaluation on the scenarios of work trajectory during installation of dismantling equipment for decommissioning of nuclear facilities. *ScienceDirect.com* [online]. ©2016 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454916300032>
- [31] 현동준. 명칭 원자로 압력용기 해체방법. *대한민국특허청* [online]. ©2013 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://patentimages.storage.googleapis.com/90/6a/ad/af35bac78fc93f/KR20150073536A.pdf>
- [32] Breaking up Barsebäck. *Nuclear Engineering International* [online]. ©2018 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.neimagazine.com/features/featurebreaking-up-barsebck-6195729/>
- [33] NORDIN J. Dismantling Techniques. *Westinghouse Electric Sweden AB* [online]. ©2014 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://docplayer.net/52237595-0-summary-4-1-introduction-and-method-purpose-method-scope-and-assumptions-5.html>
- [34] ALLEN J. GE Hitachi Nuclear Energy Completes Decommissioning Project at Reactor in Sweden. *General Electric* [online]. ©2019 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-hitachi-nuclear-energy-completes-decommissioning-project-reactor-sweden>
- [35] Breaking up Barsebäck. *Segmentation starts at Oskarshamn 2* [online]. ©2018 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.neimagazine.com/news/newssegmentation-starts-at-oskarshamn-2-6153484>

- [36] SNYDER M. Proceedings: 14th EPRI International Nuclear Power Plant Decommissioning Workshop. *Electric Power Research Institut* [online]. ©2016 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.epri.com/research/products/000000003002007087>
- [37] YOUNG HWAN H., et al. A Study on Segmentation Process of the K1 Reactor Vessel and Internals K1. *Korea Science* [online]. ©2019 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201911263333308.pdf>
- [38] PROKŠ MARTIN, Otočný stůl Škoda JS. *Osobní poznámky* ©2020 [cit. 2021-04-18].
- [39] KUBIE I. Způsoby řízení stejnosměrných motorů. *Profi ElektriKa.cz* [online]. ©2014 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://elektriKa.cz/data/clanky/zpusoby-rizeni-stejnosmernihych-motoru>
- [40] KOLA. *GHH-Bonatrans – Pioneers of wheelset solutions* [online]. ©2018 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.ghh-bonatrans.com/cs/produkty-a-sluzby/kola/>
- [41] FERONA ONLINE. *Ferona a.s.* [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>
- [42] VÁVRA P., et al. *Strojnické tabulky*. 2.vydání Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. ISBN 04-234-84, s. 49
- [43] CIL 32X20X300 CON FOND. FORATO. *AMA – Componenti per un mondo in movimento* [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.ama.it/en/product/NOCDE322030/cil-32x20x300-con-fond-forato/>
- [44] STANDARDNÍ DVOUČINNÝ HYDRAULICKÝ VÁLEC 455MM. *Kardanka.cz* [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.kardanka.cz/standardni-dvoucinny-hydraulicky-valec-455mm-21406>
- [45] INEREZ. Jakosti nerezových materiálů. *Inerez.cz Nerezový materiál a zařízení*. [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/jakosti-nerezovych-materialu/>
- [46] KOVAZ. NEREZ trubka bezešvá přesná 10x1 R10X171. *Kovaz – hydraulika a pneumatika*. [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.kovaz.cz/nerez-trubka-bezesva-presna-10x1-r10x171-49512/>
- [47] X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462). *European Steel and Alloy Grades/Numbers SteelNumber*. [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=136
- [48] NEREZOVÁ OCEL. *Matezex.cz*. [online]. n.d. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.matezex.cz/prevodni-tabulky.html>

PŘÍLOHA č. 1

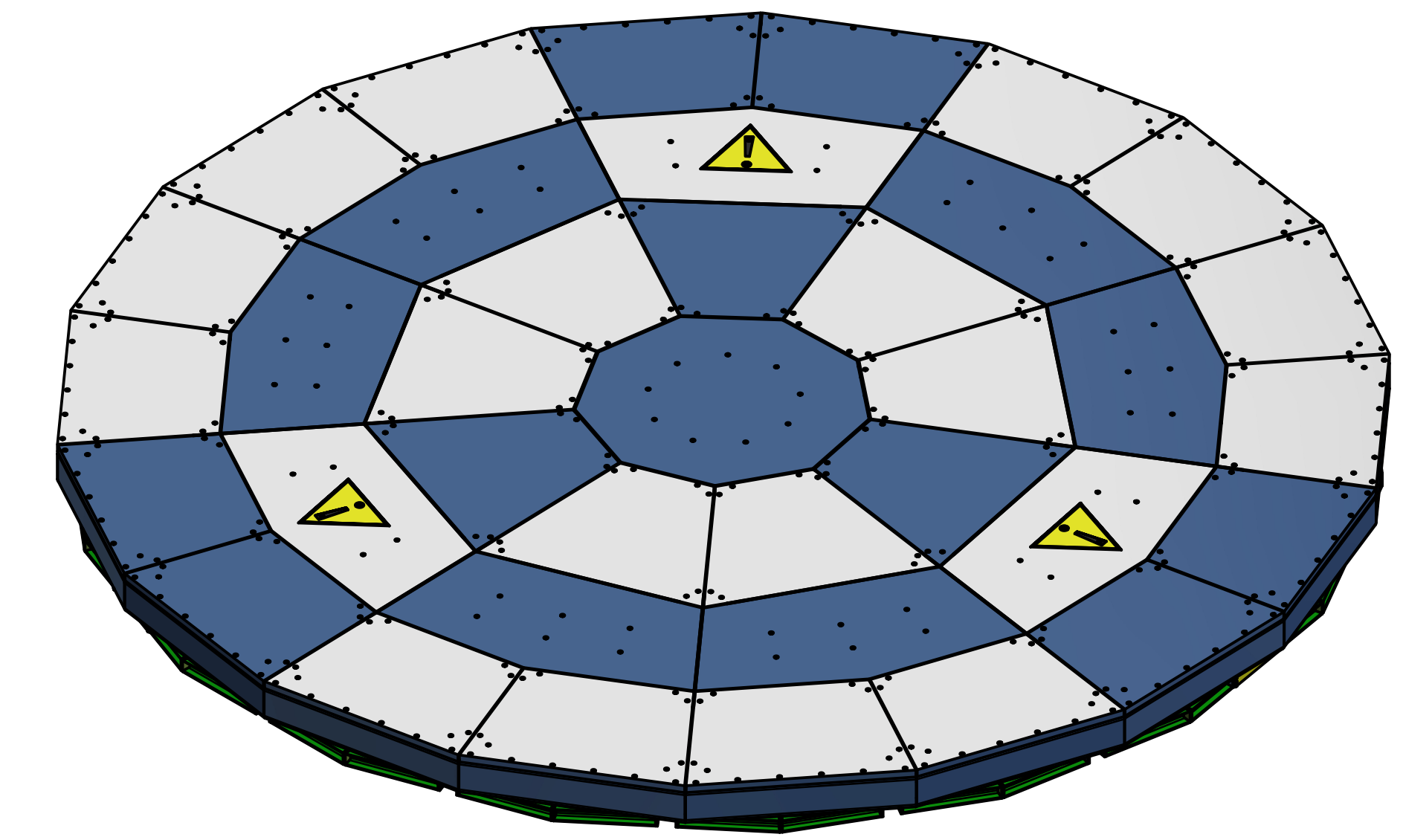
3D model stolu s částí reaktorové nádoby



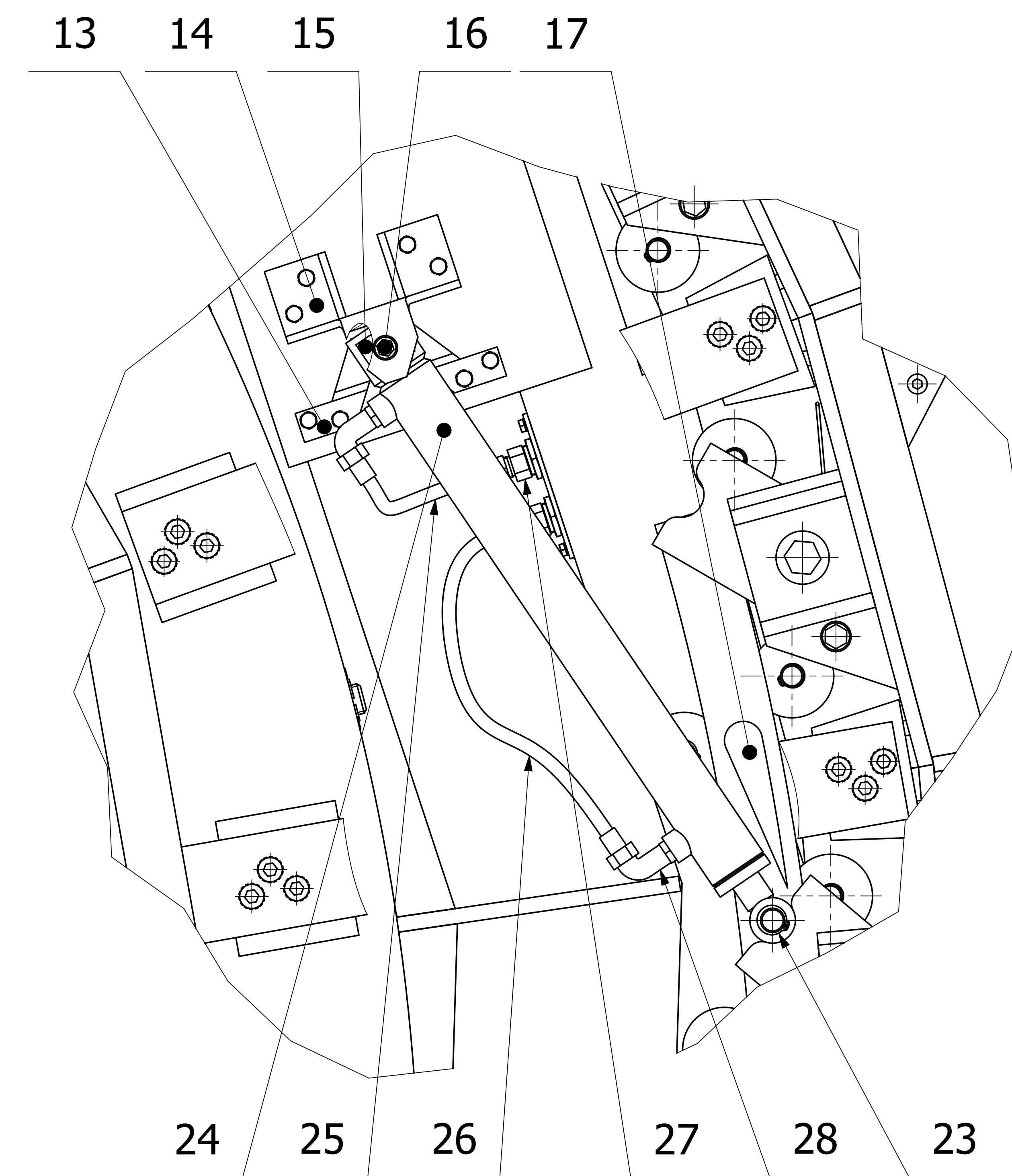
PŘÍLOHA č. 2

Výkres sestavy otočného stolu včetně kusovníku

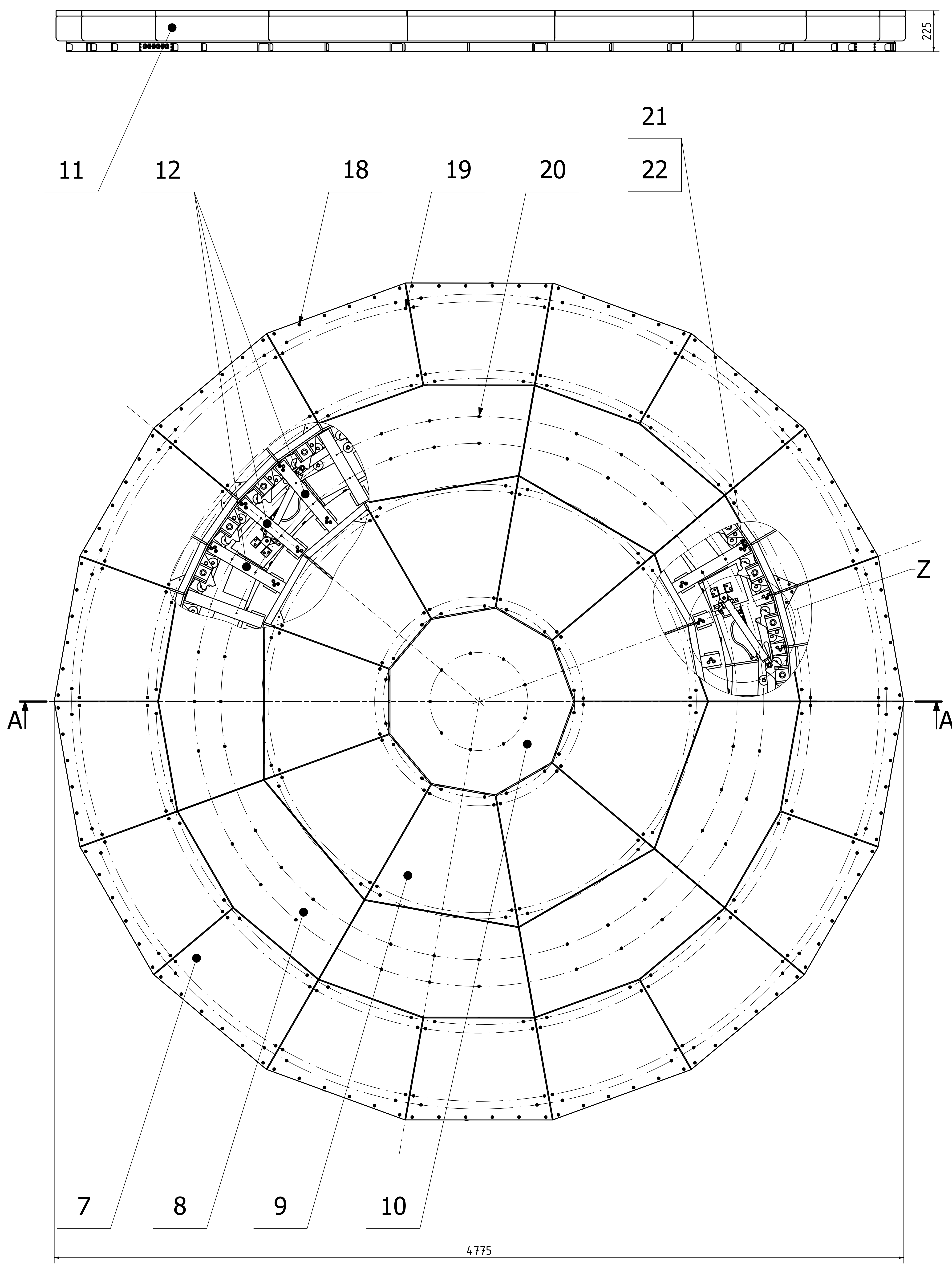
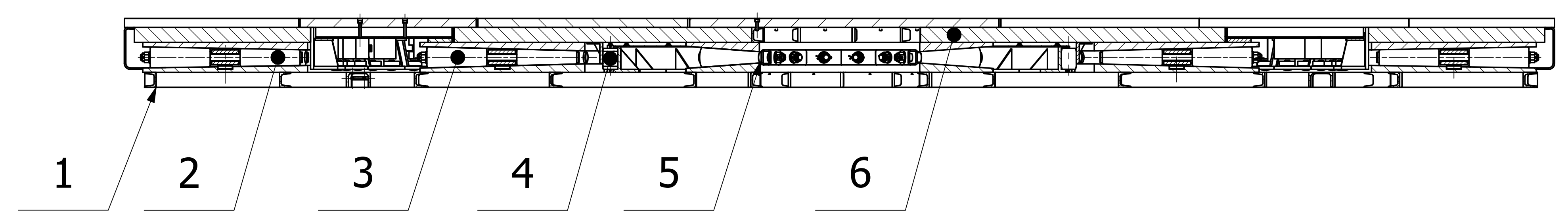
IZOMETRICKÝ POHLED
M1:20



DETAIL Z M1:2




A-A




Podtisk 1:10	Heslost Dp 10 800	Prvotisk	Formát A0
Fakulta strojni ČAPADOŽSKÝ UNIVERSITY V PLZNE	Prvotisk VÍT HORÁČEK Datum 15.4.2021	Název OTOČNÝ STŮL ŠKODA J.S.	
Katedra KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ	Prvotisk VÝKRES SESTAVY	Číslo dokumentu 0-JS77-2021-000	str. 1 z 3

Číslo polož.	Název-označení	Polotovár	Hmotn. (kg)	J.	Množ.
	Číslo výkresu - označení normy	Materiál			
1	RÁM		2320		1
	0-JS77-2021-001-000				
2	KUŽELÍKOVÁ OTOČ VNĚJŠÍ		850		1
	3-JS77-2021-002-000				
3	KUŽELÍKOVÁ OTOČ VNITŘNÍ		477		1
	3-JS77-2021-003-000				
4	RADIÁLNÍ LOŽISKO		21		1
	3-JS77-2021-004-000				
5	KUŽELÍKOVÝ PRSTENEC		59		1
	3-JS77-2021-005-000				
6	OTOČNÝ RÁM		3400		1
	0-JS77-2021-006-000				
7	DESKA A 820x570x25	P 25x2000x6000 - ČSN 42 5310.12	83		18
	4-JS77-2021-007	11 375.1			
8	DESKA B 1225x588x25	P 25x2000x6000 - ČSN 42 5310.12	113		9
	4-JS77-2021-008	11 375.1			
9	DESKA C	P 25x2000x6000 - ČSN 42 5310.12	123		9
	4-JS77-2021-009	11 375.1			
10	DESKA D 873x700x25	P 25x2000x6000 - ČSN 42 5310.12	243		1
	4-JS77-2021-010	11 375.1			
11	BOČNÍ KRYT 827x140x55	P 5x1000x4500 ČSN 42 5310.12	5,8		18
	4-JS77-2021-010	11 375.1			
12	PROFIL UE 65-480	UE 65 - 6000 ČSN 42 5571.0	2,5		9
	4-JS77-2021-012	11 375			
13	PODPERA A 140x55x30	P 5x1000x4500 ČSN 42 5310.12	0,17		3
	4-JS77-2021-013	11 375.1			
14	PODPERA B 120x90x50	P 5x1000x4500 ČSN 42 5310.12	0,553		3
	4-JS77-2021-014	11 375.1			
15	TVAROVÁ PODLOŽKA 30x30x15	4HR 30 ČSN 42 5520.00	0,12		6
	4-JS77-2021-015	11 375.0			
16	ČEP POHONU Ø16-128	Ø 17 ČSN 42 5510.1	0,196		3
	4-JS77-2021-016	11 375.0			

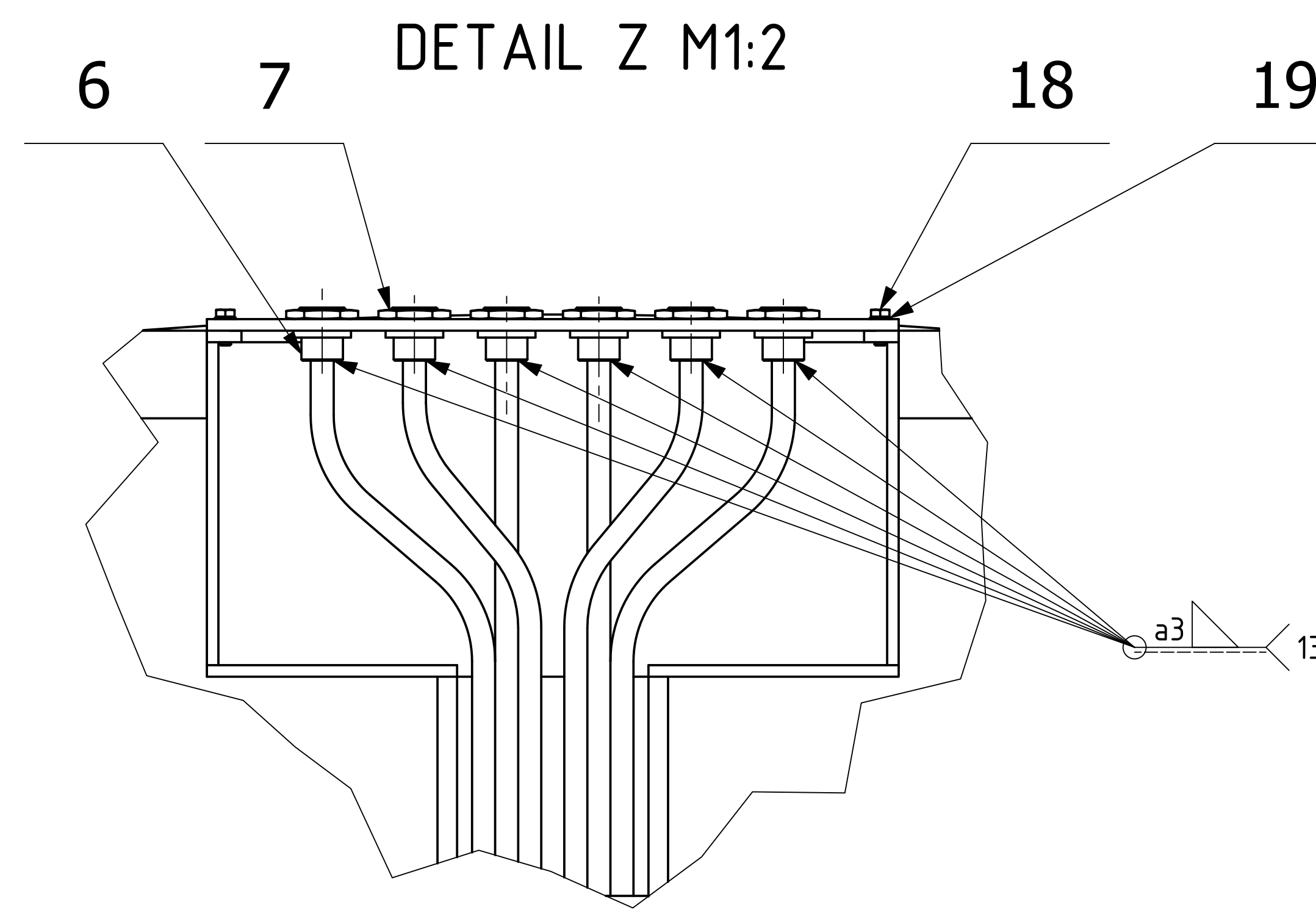
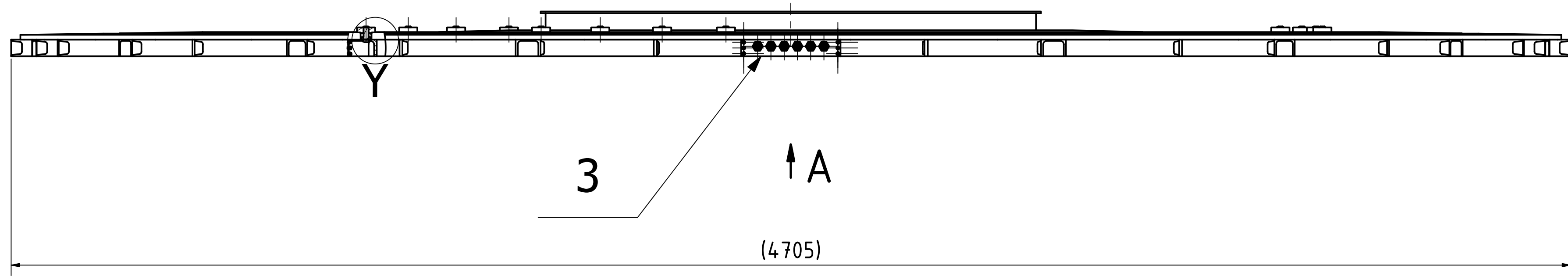
 <p>FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p>	Kreslil VÍT HORÁČEK	Název OTOČNÝ STŮL ŠKODA J.S.
	Datum 15.4.2021	Číslo dokumentu 0-JS77-2021-000
<p>KKS</p> <p>KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ</p>	Schválil	<p>List 2 List 3</p>
	Datum	
	Druh dokumentu SEZNAM POLOŽEK	

Číslo polož.	Název-označení	Polotovar	Hmotn. (kg)	J.	Množ.
	Číslo výkresu - označení normy	Materiál			
17	UNAŠEČ	11 375	3,363		3
	3-JS77-2021-017-000				
18	ŠROUB M8x25		0,017		108
	ČSN 02 1143.52				
19	ŠROUB M8x35		0,021		216
	ČSN 02 1143.52				
20	ŠROUB M8x50		0,025		54
	ČSN 02 1143.52				
21	ŠROUB M10x14		0,021		54
	ČSN 02 1143.52				
22	PODLOŽKA 10,5		0,001		54
	ČSN 02 1745.00				
23	KROUŽEK 16		0,007		3
	ČSN 02 2930				
24	POHON OCDE322030		3,24		3
	AMA S.p.A - KARDANKA.CZ				
25	HYDRAULICKÁ HADICE 400-M14		0,45		3
	ZAKOUPENO - KARDANKA.CZ				
26	HYDRAULICKÁ HADICE 600-M14		0,6		3
	ZAKOUPENO - KARDANKA.CZ				
27	ZÁVITOVÁ REDUKCE BSPxBSP		0,03		6
	ZAKOUPENO - KARDANKA.CZ				
28	ZÁVITOVÁ REDUKCE "L"		0,035		6
	ZAKOUPENO - KARDANKA.CZ				

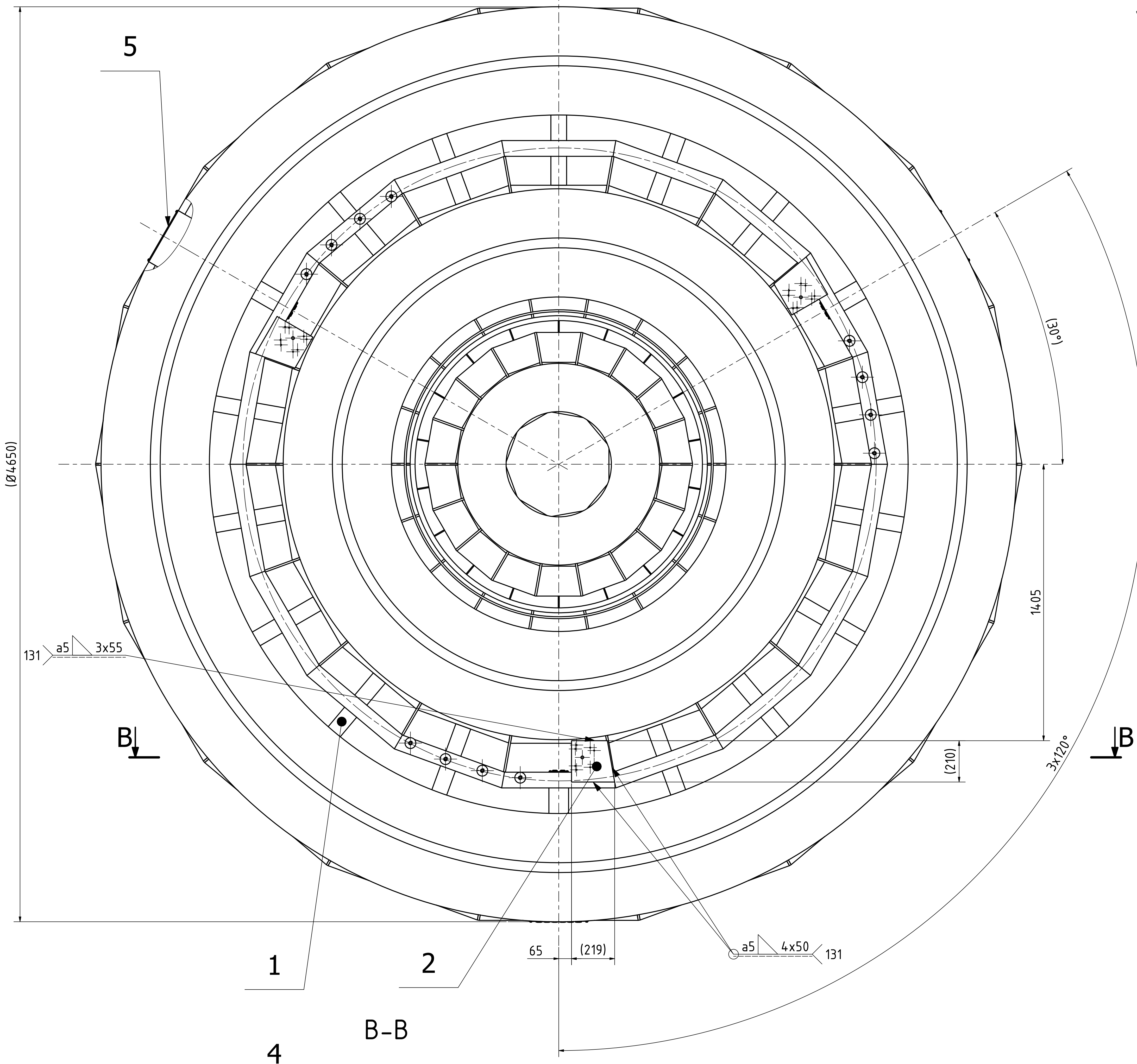
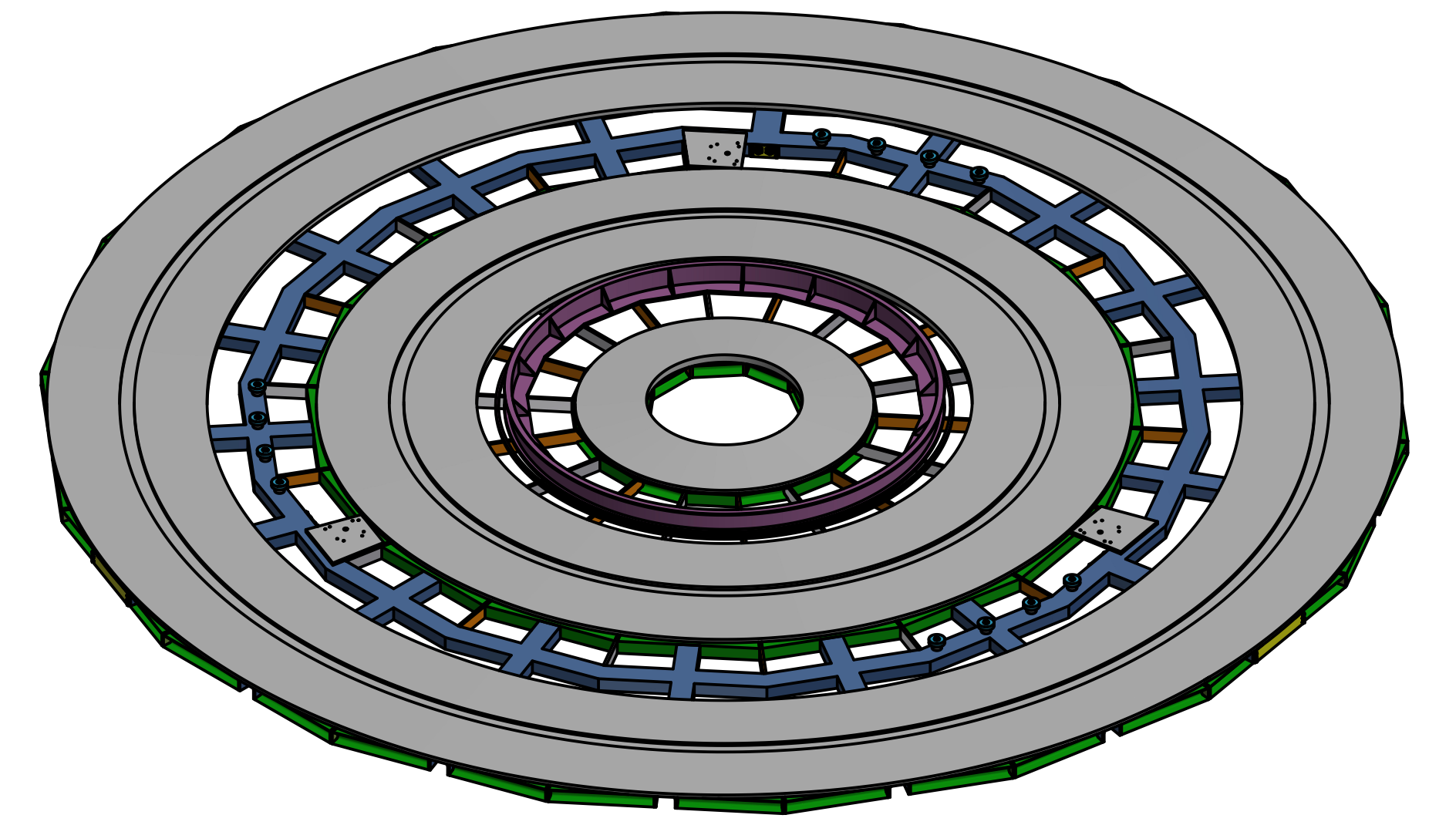
 <p>FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p>	<p>Kreslil VÍT HORÁČEK</p> <p>Datum 15.4.2021</p>	<p>Název OTOČNÝ STŮL ŠKODA J.S.</p>
	<p>Schválil</p> <p>Datum</p> <p>Druh dokumentu SEZNAM POLOŽEK</p>	<p>Číslo dokumentu 0-JS77-2021-000</p>
<p>KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ</p>		<p>List 3 Listů 3</p>

PŘÍLOHA č. 3

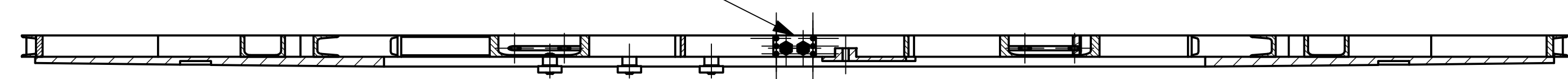
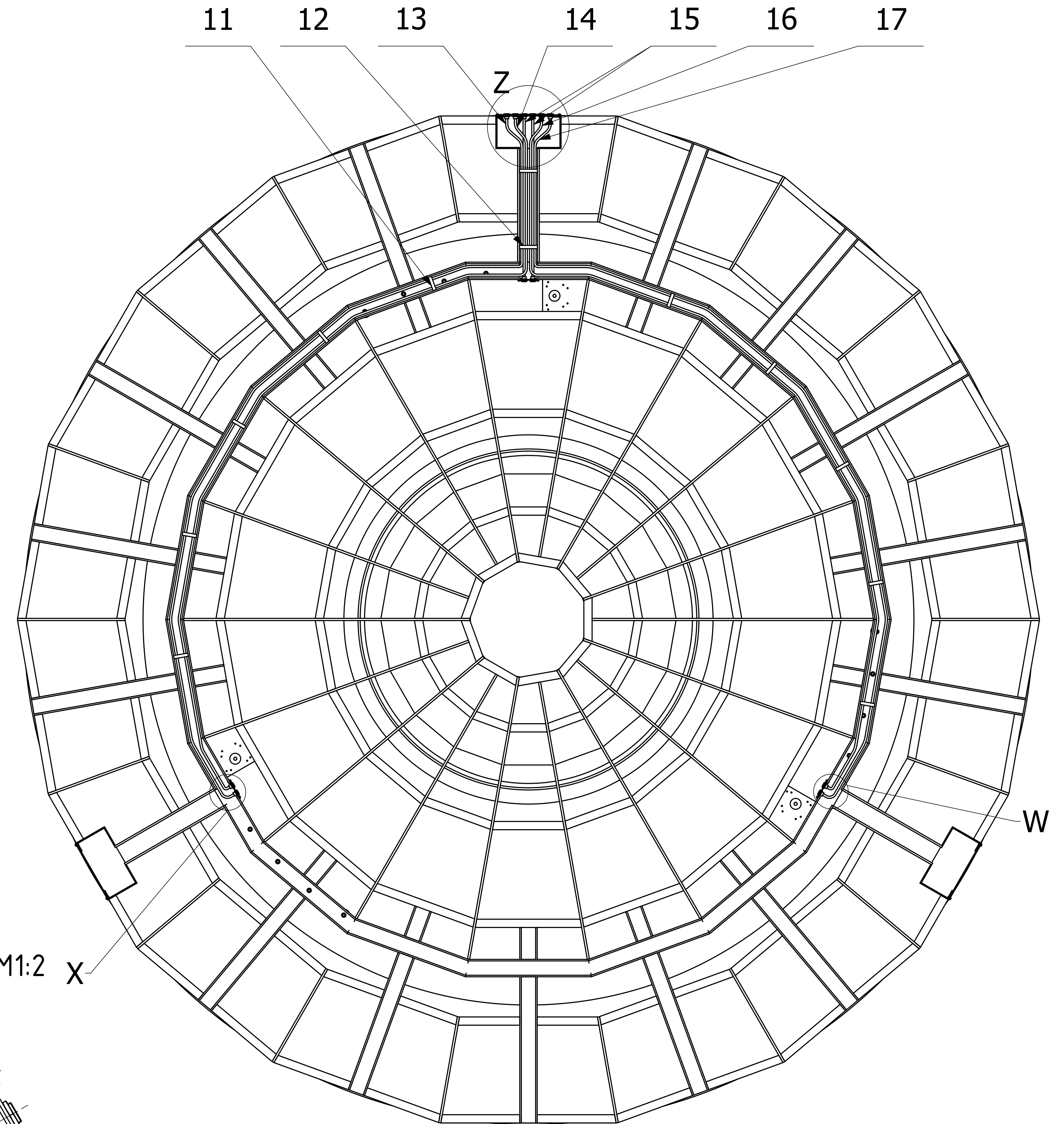
Výkres podsestavy rámu včetně kusovníku



IZOMETRICKÝ POHLED
M1:20

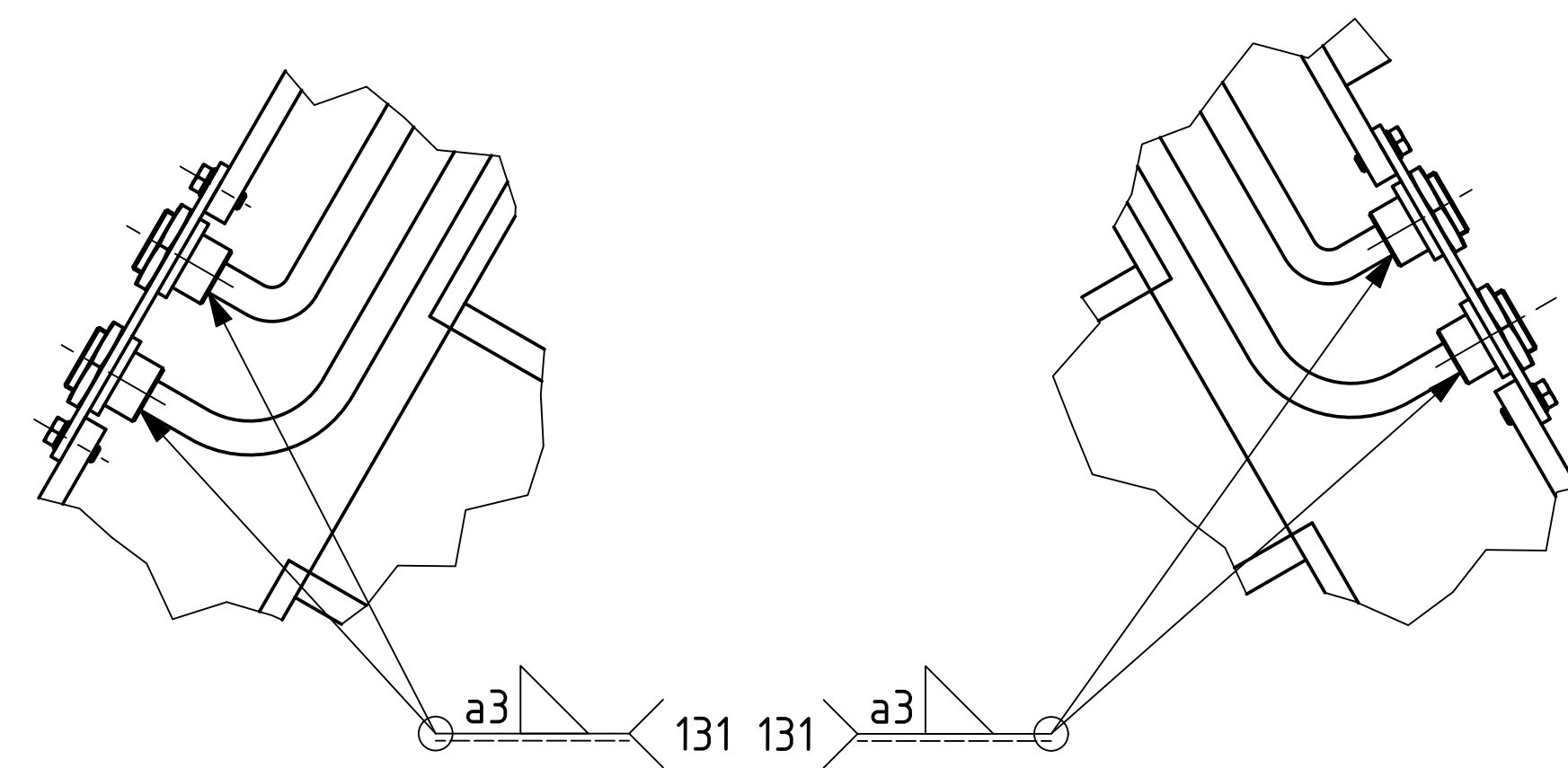


POHLED A

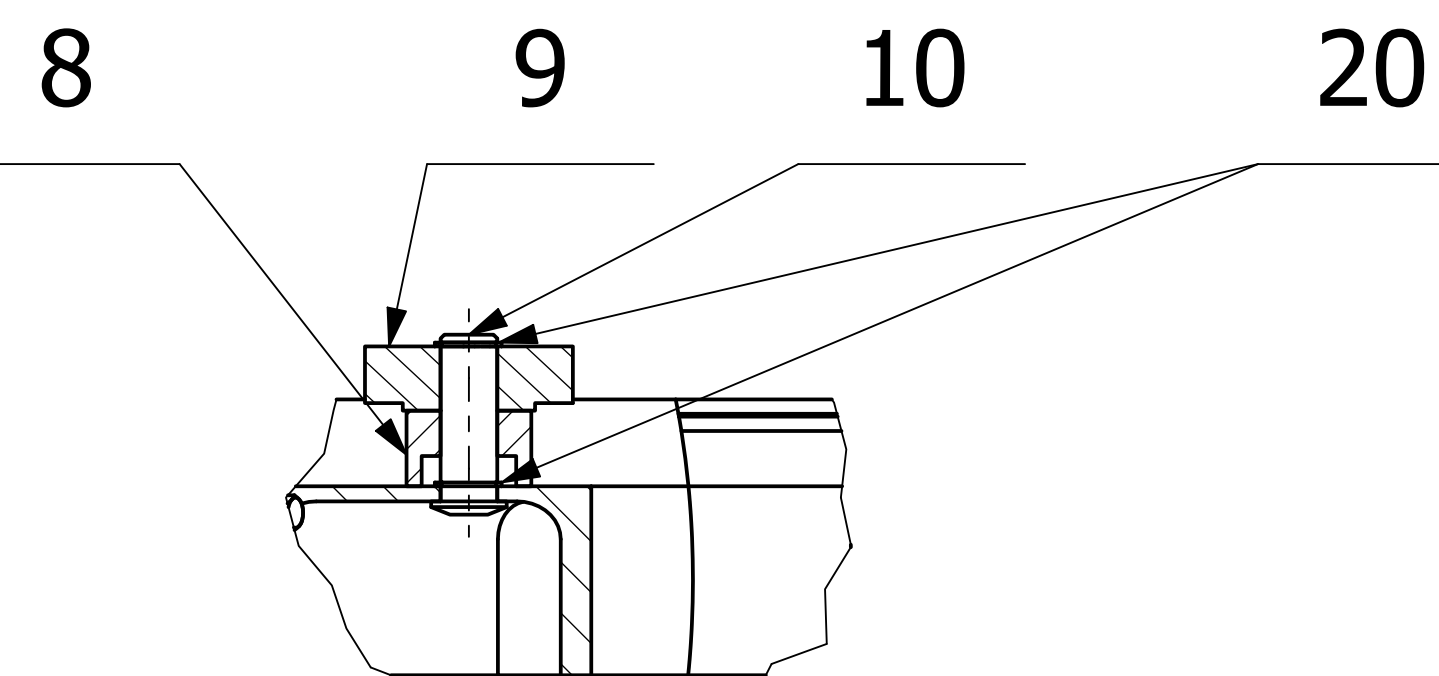


DETAIL W M1:2

DETAIL X M1:2




DETAIL Y M1:2



PO SWAŘENÍ OPATŘIT KUŽELOVÉ PLOCHY DRAH OCHRANNOU FÓLIÍ, OSTATNÍ PLOCHY NÁTĚROVOU HMOTOU PRAGOKOR METAL E

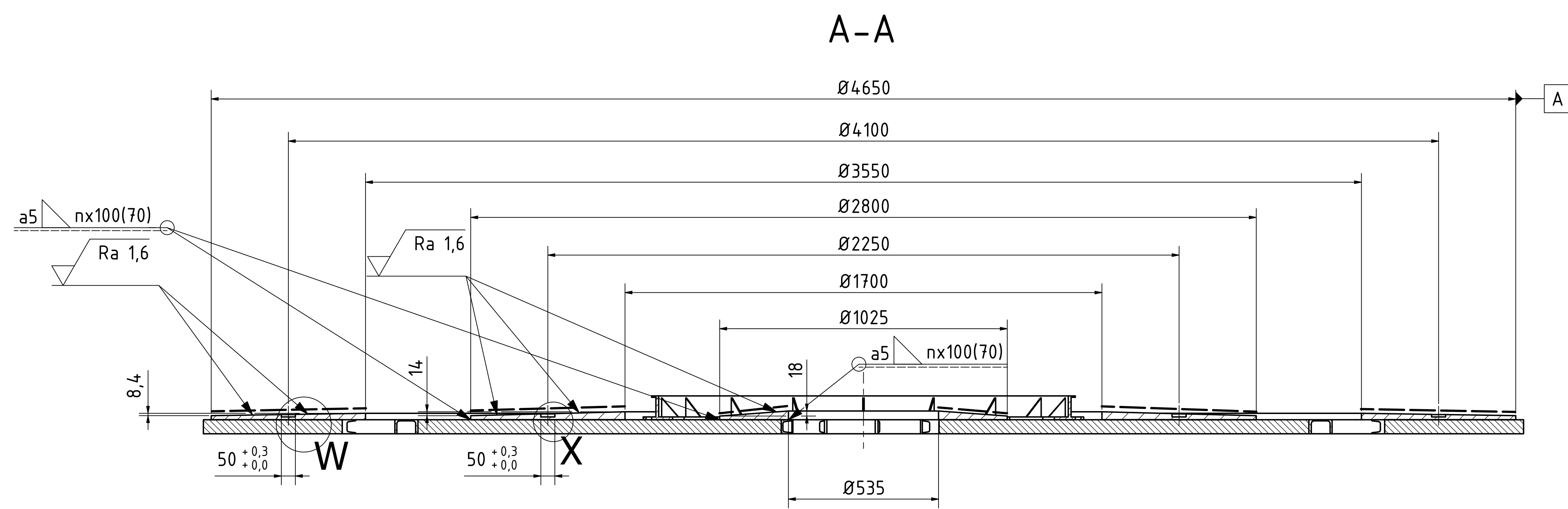
Podpis: 1:10	Heslo: 2320	Stav: 17.4.2021	Formát: A0
Fakulta Strojní Čápadžské v Plzni	Pracovník: VÍT HORÁČEK	Datum: 17.4.2021	Název: RÁM
Katedra Konstruování Strojů	Titul dokumentu: VÝKRES SESTAVY	Číslo dokumentu: 0-JS77-2021-001-000	Verze: 1/01

Číslo polož.	Název-označení	Polotovár	Hmotn. (kg)	J.	Množ.
	Číslo výkresu - označení normy	Materiál			
1	SVARENEC RÁMU		2045		1
	0-JS77-2021-001-001				
2	ZÁKLADNA POHONU 220x210x30		3,57		3
	4-JS77-2021-001-002	11 375.0			
3	DESKA VSTUPNÍ 300x50x5	P 5x700x500 ČSN 42 5310.12	0,5		1
	4-JS77-2021-001-003	11 375.1			
4	DESKA VÝSTUPNÍ 150x50x5	P 5x700x500 ČSN 42 5310.12	0,26		3
	4-JS77-2021-001-004	11 375.1			
5	ZÁSLEPKA 300x50x5	P 5x700x500 ČSN 42 5310.12	0,6		2
	4-JS77-2021-001-005	11 375.1			
6	VÝVODKA Ø25-23	Ø 26 - 260 ČSN 42 5510.1	0,035		12
	4-JS77-2021-001-006	11 375.0			
7	MATICE M20-4	Ø 30 - 55 ČSN 42 5510.1	0,015		12
	4-JS77-2021-001-007	11 375.0			
8	DISTANČNÍ KRÚŽOK Ø 35-20	Ø 35 - 300 ČSN 42 5510.1	0,087		12
	4-JS77-2021-001-008	11 375			
9	VÁLEČEK Ø 55-17	Ø 58 - 200 ČSN 42 5510.1	0,271		12
	4-JS77-2021-001-009	11 375.0			
10	ČEP Ø 20-48	Ø 22 - 620 ČSN 42 5510.1	0,057		12
	4-JS77-2021-001-010	11 375.0			
11	DRŽÁK TRUBEK A 66x46x15	200x100x15 HDPE	0,066		10
	4-JS77-2021-001-011	64 3010			
12	DRŽÁK TRUBEK B 66x46x15	200x100x15 HDPE	0,054		2
	4-JS77-2021-001-012	64 3010			
13	TRUBKA 10x1 LEVÁ A	KOVAZ.CZ R10X171	0,832		1
	4-JS77-2021-001-013	17 346			
14	TRUBKA 10x1 LEVÁ B	KOVAZ.CZ R10X171	0,745		1
	4-JS77-2021-001-014	17 346			
15	TRUBKA 10x1 ROVNÁ	KOVAZ.CZ R10X171	0,32		2
	4-JS77-2021-001-015	17 346			
16	TRUBKA 10x1 PRAVÁ A	KOVAZ.CZ R10X171	0,832		1
	4-JS77-2021-001-016	17 346			

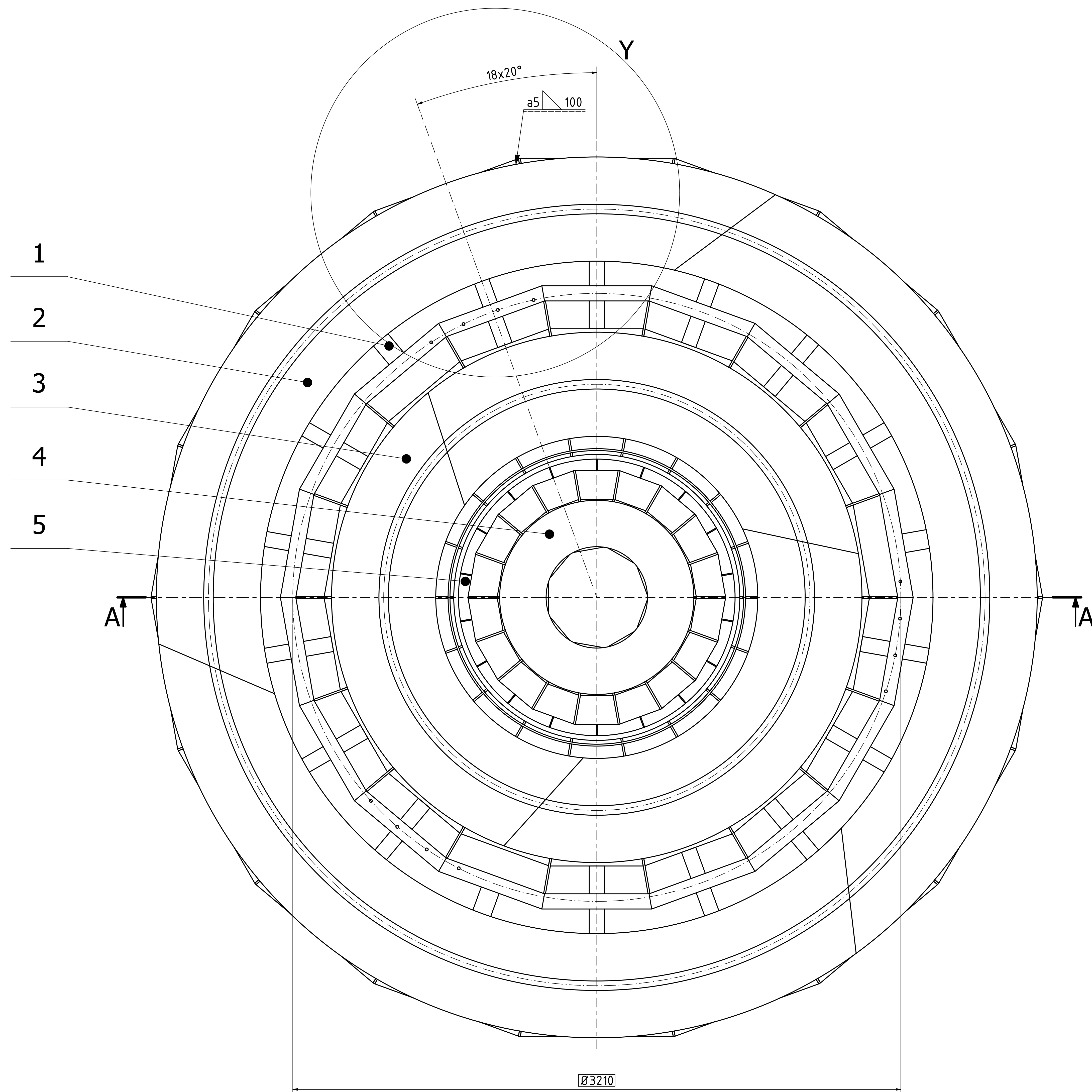
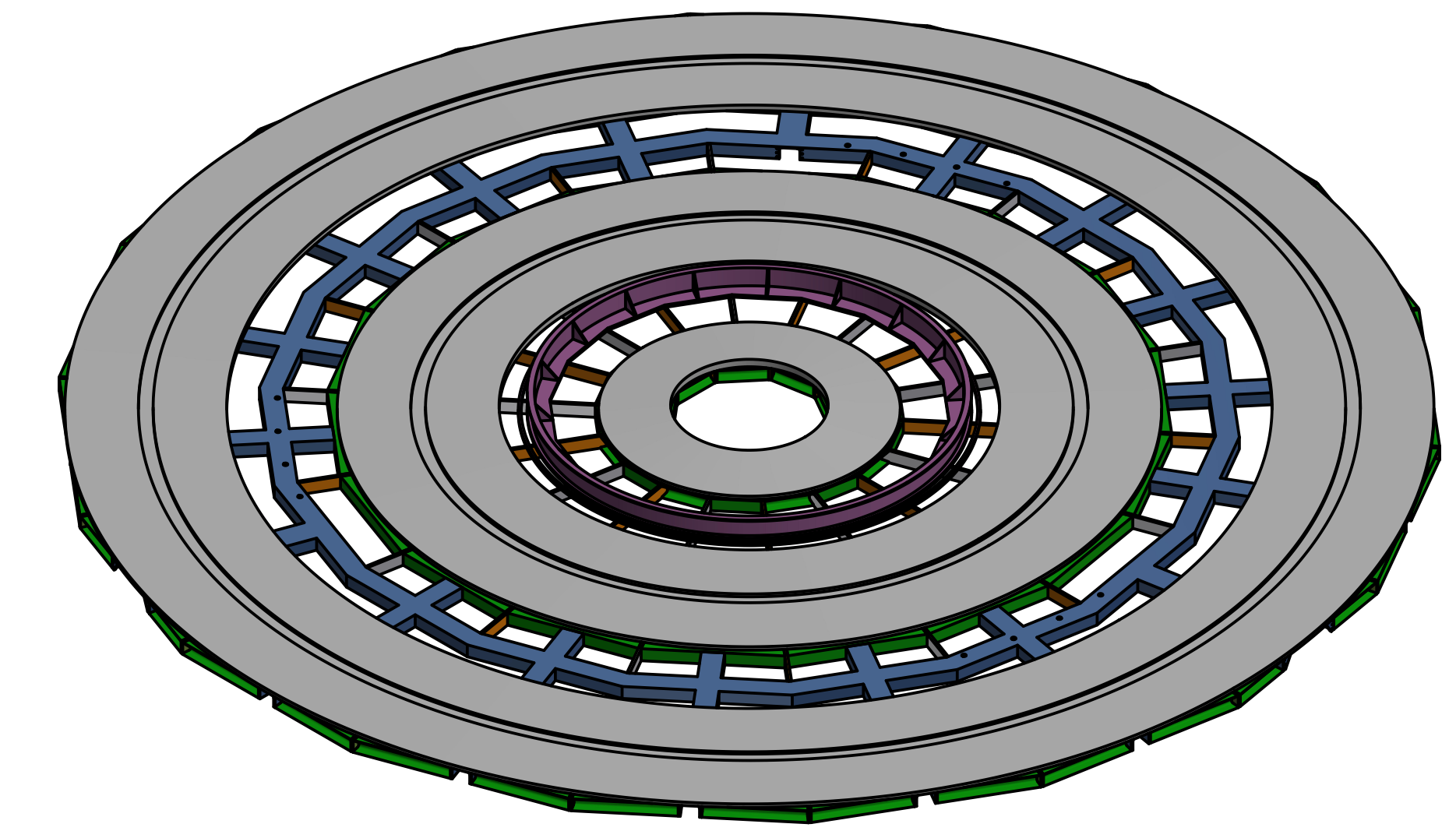
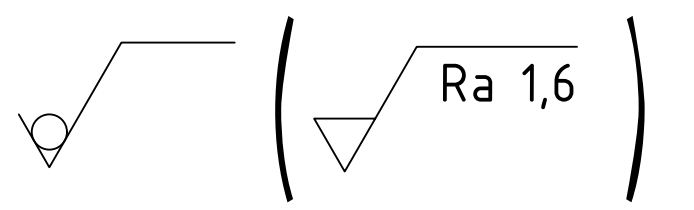
 <p>FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p>	Kreslil VÍT HORÁČEK	Název RÁM
	<p>Datum 17.4.2021</p> <p>Schválil</p>	Číslo dokumentu 0-JS77-2021-001-000
<p>KKS KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ</p>	<p>Datum</p> <p>Druh dokumentu SEZNAM POLOŽEK</p>	<p>List 2 List 3</p>

PŘÍLOHA č. 4

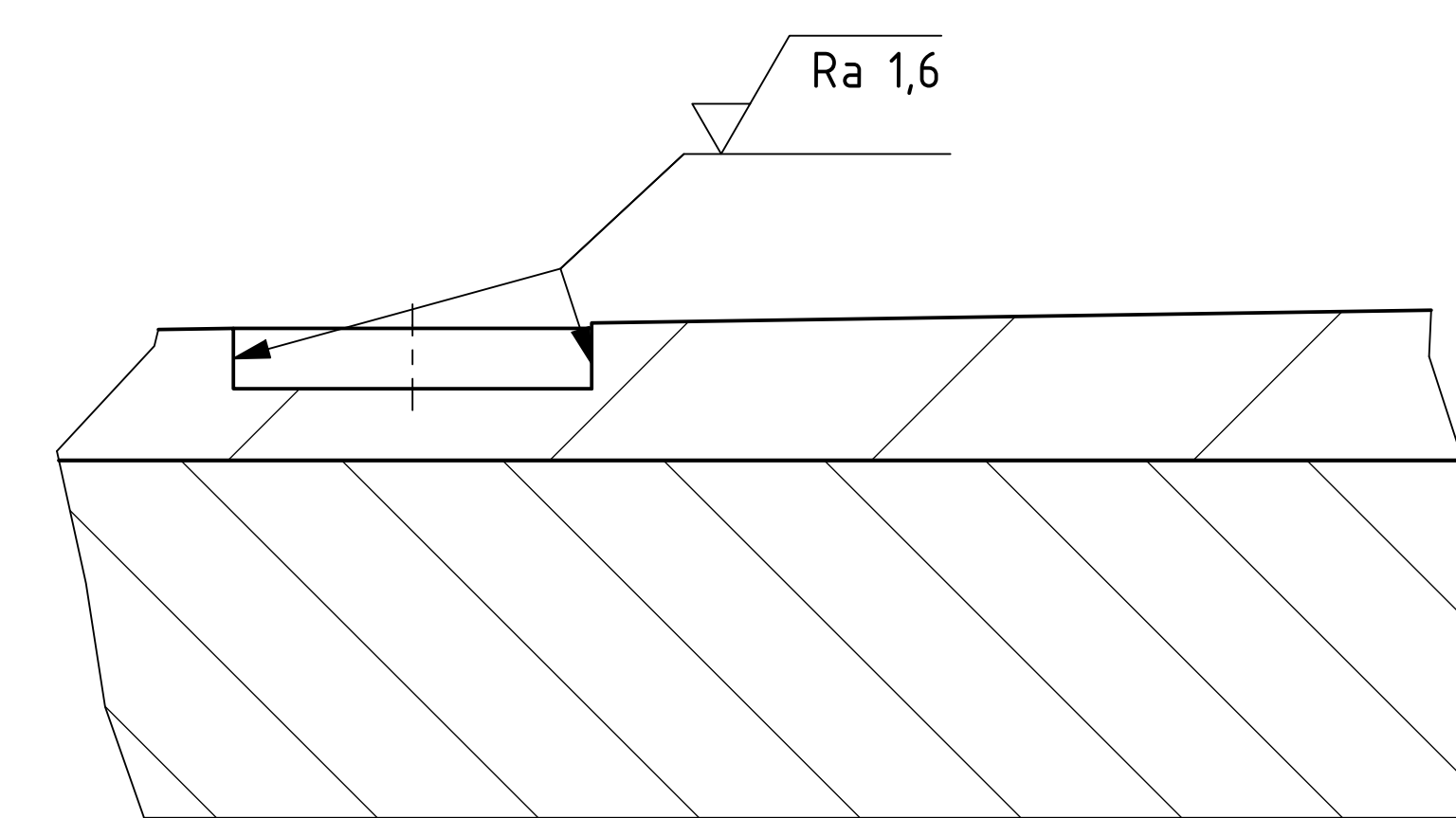
Výkres svařovaného rámu



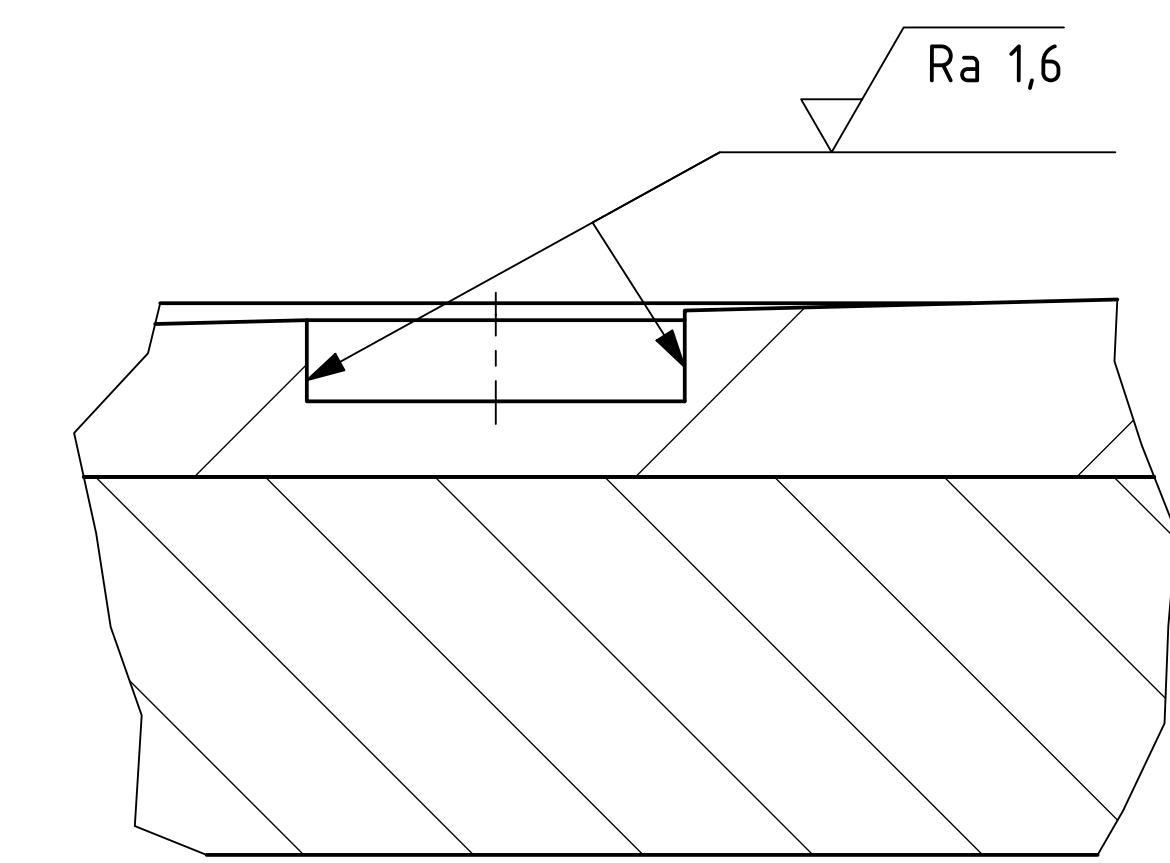
IZOMETRICKÝ POHLED
M1:20



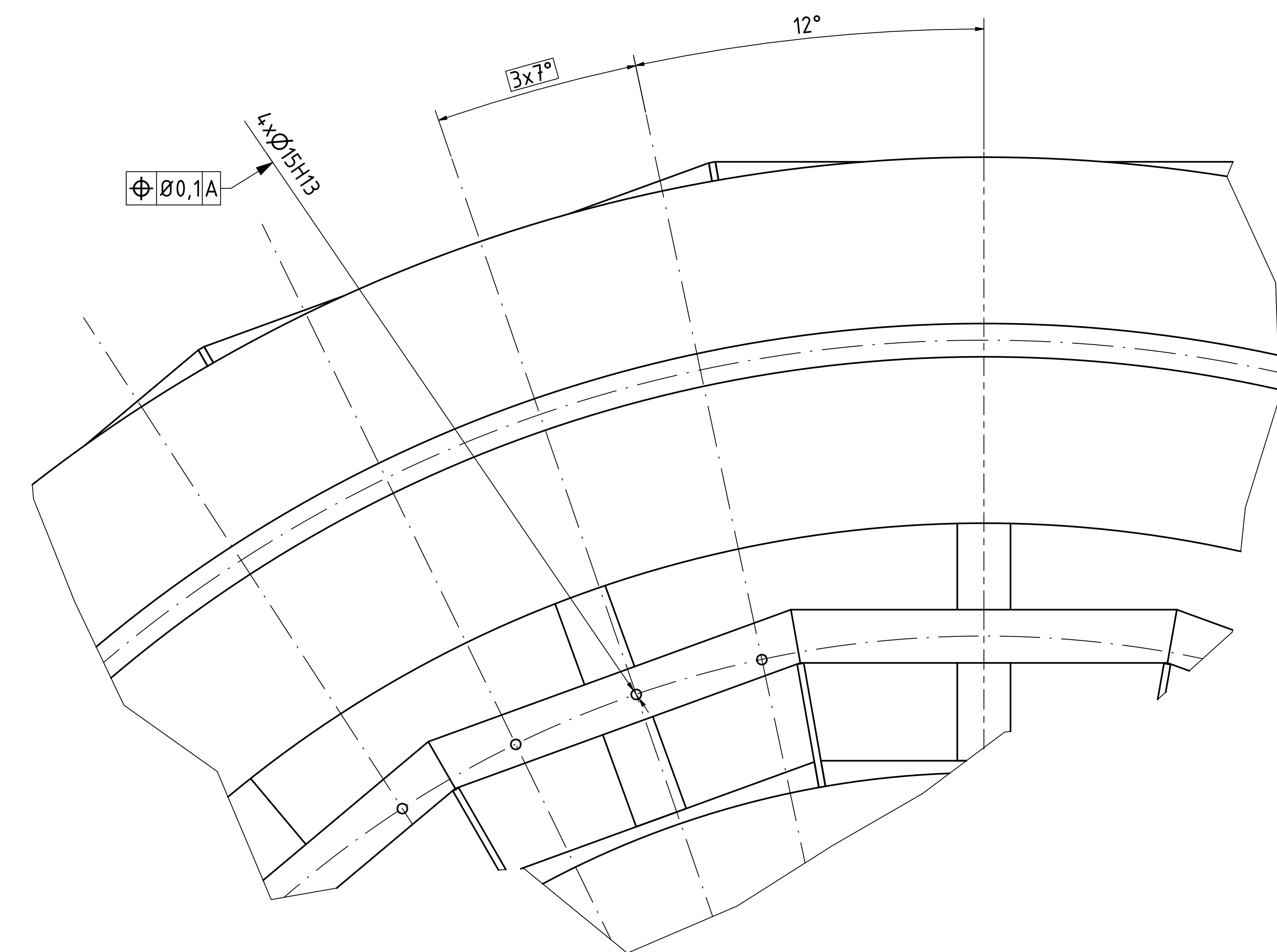
DETAIL W M1:1



DETAIL X M1:1



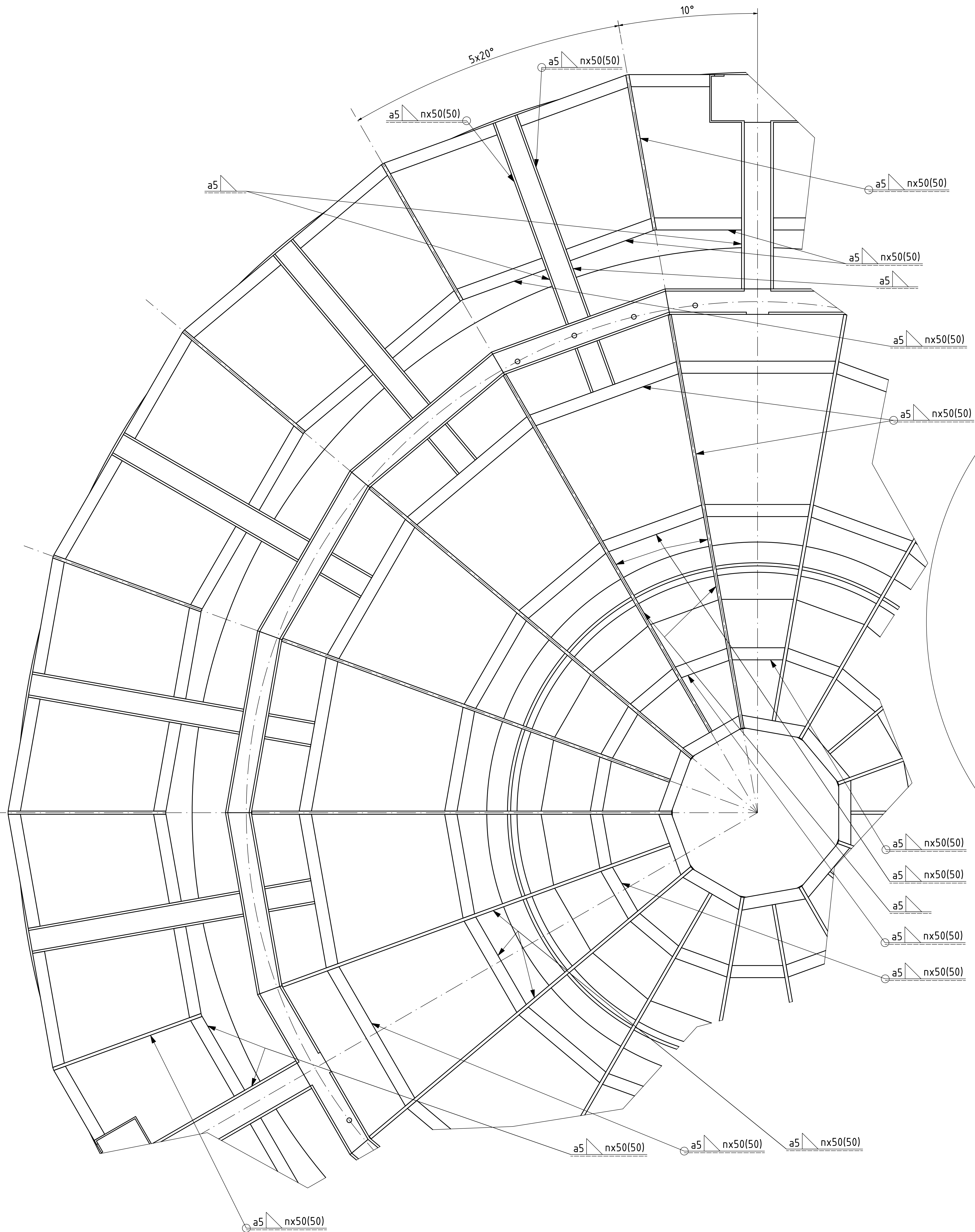
DETAIL Y M1:5



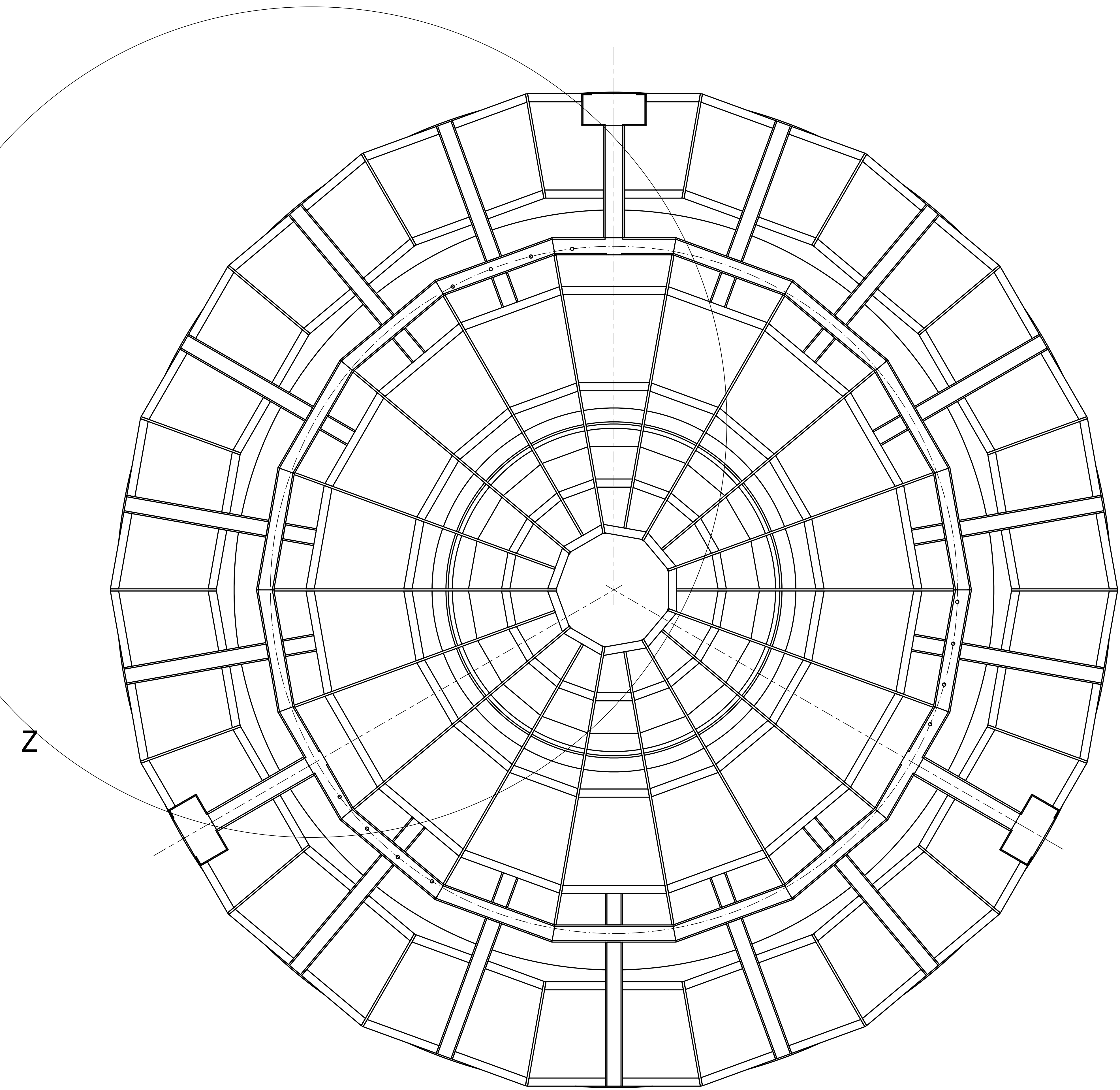
DÍRY KÓTOVANÉ V DETAILU X JSOU NA RÁMU UMÍSTĚNY 3x SYMETRICKY PO 120° PŘED PŘIVAŘENÍM DRAH (POZ. 2.3.4) NEJPRVE SVÁŘIT SEGMENTY DRAH (POZ. 2.3) DO JEDNOHO CELKU DÍLENSKÝMI SVÁŘI PO SVAROVÁNÍ NORMALIZAČNĚ ŽÍHAT PRO SNÍŽENÍ PŇUTÍ VRCHNÍ PLOCHY DRAH PRO KÚŽELÍKY (POZ. 2.3.4) OBROBIT PO SVARĚNÍ A ŽÍHÁNÍ KÚŽELOVÉ PLOCHY DRAH SYČENY S^3P

1:10	2045	SVĚTLA	A0
FAKULTA STROJNÍ ČESKÉHO VYSOKÉHO ŠKOLNÍHO TECHNICKÉHO UNIVERSITY V PRAZE	VÍT HORÁČEK 20.4.2021	SVĚTLA	SVĚTLA
KATEDRA KONSTRUKČNÍ STROJNÍ	DRUH DOKUMENTU VÝKRES SESTAVY	0-JS77-2021-001-001	světla 1:10-3

DETAIL Z M1:5



POHLED ZDOLA

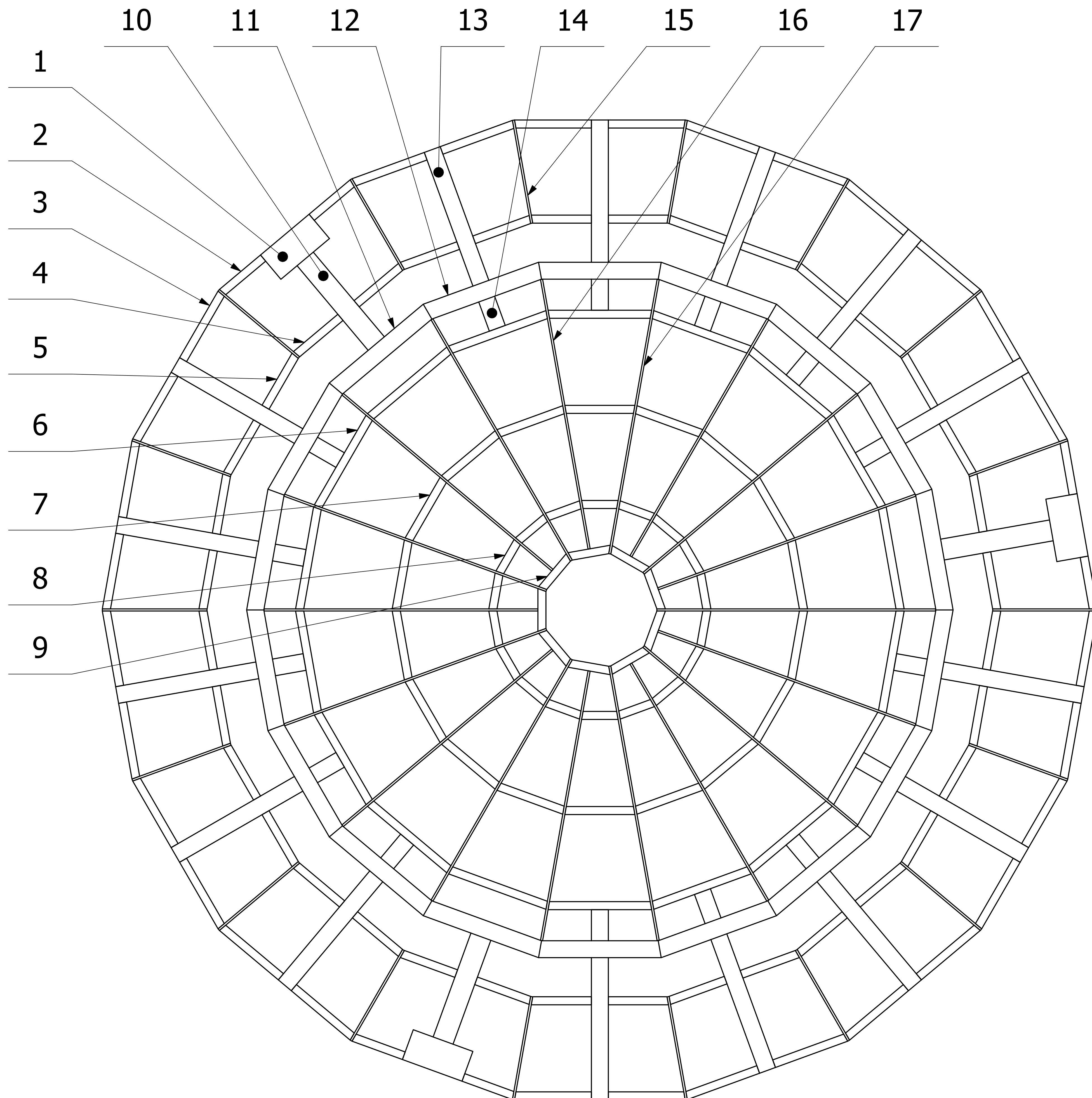
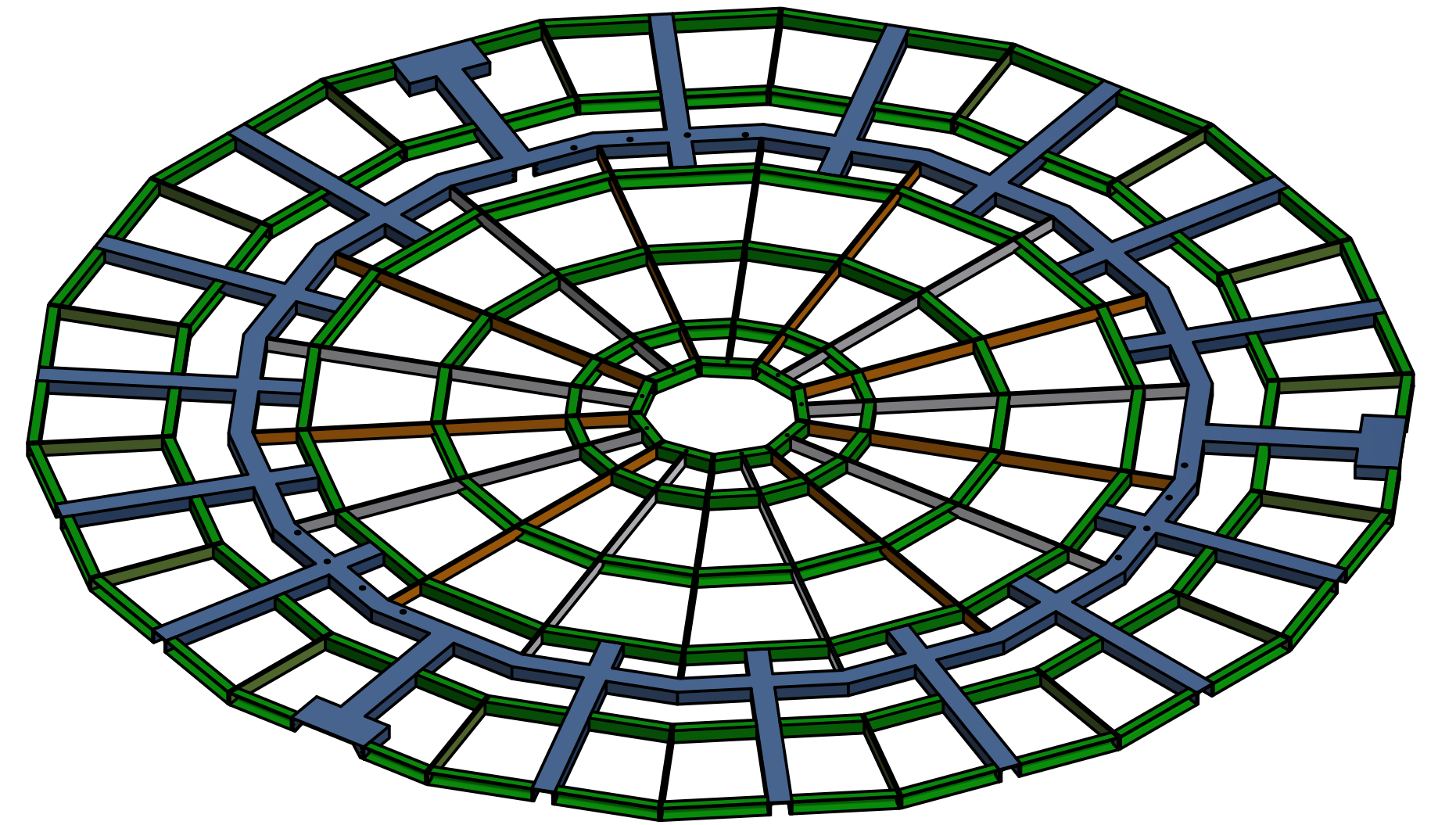


KOUTOVÉ SVARY PROVEDENY TECHNOLOGIÍ: 131		Měřítko: 1:10		Průřez: 2045	Formát: A0
 FAKULTA STROJNÍ PŘÍRODOVĚDNÁ UNIVERZITA V BRNĚ	Projekt: VÍT HORÁČEK Datum: 20.4.2021	Název: SVĚŘENEC RÁMU			
	Katedra: KATEDRA KONSTRUVÁNÍ STROJŮ Druh dokumentu: VÝKRES SESTAVY	Datum:	Titul autorů: 0-JS77-2021-001-001 List: 1 z 2		

PŘÍLOHA č. 5


Výkres svařované konstrukce

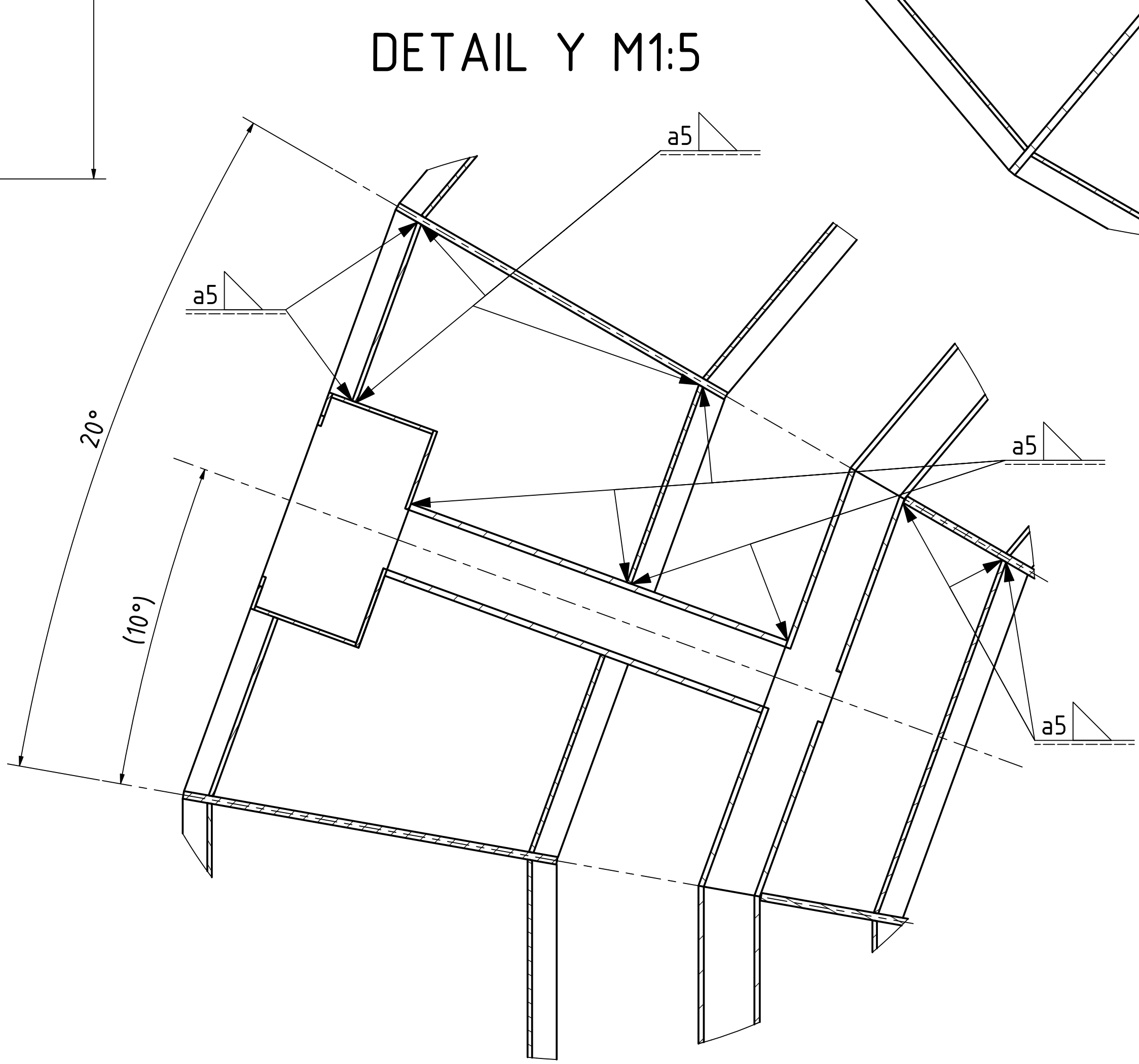
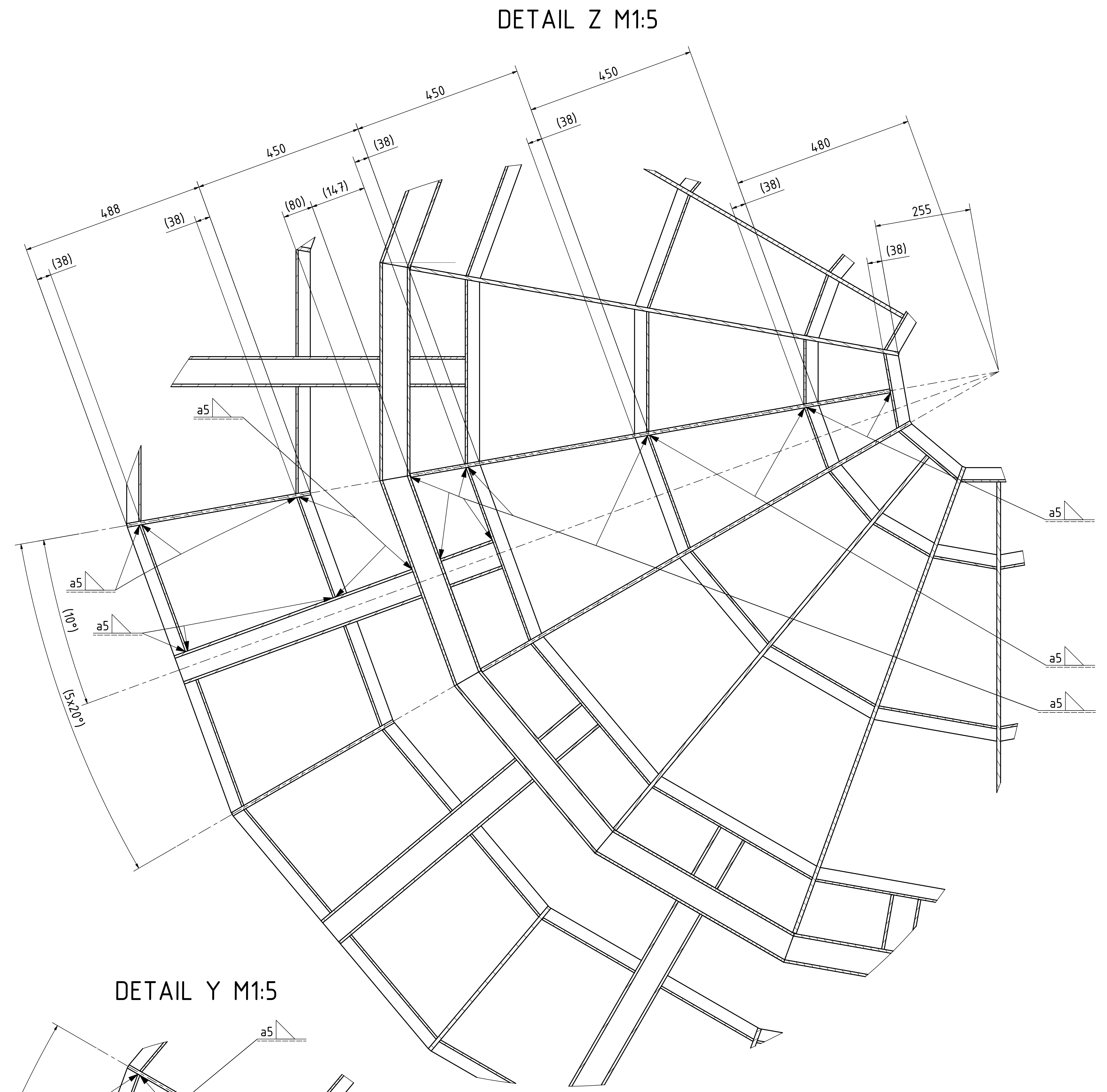
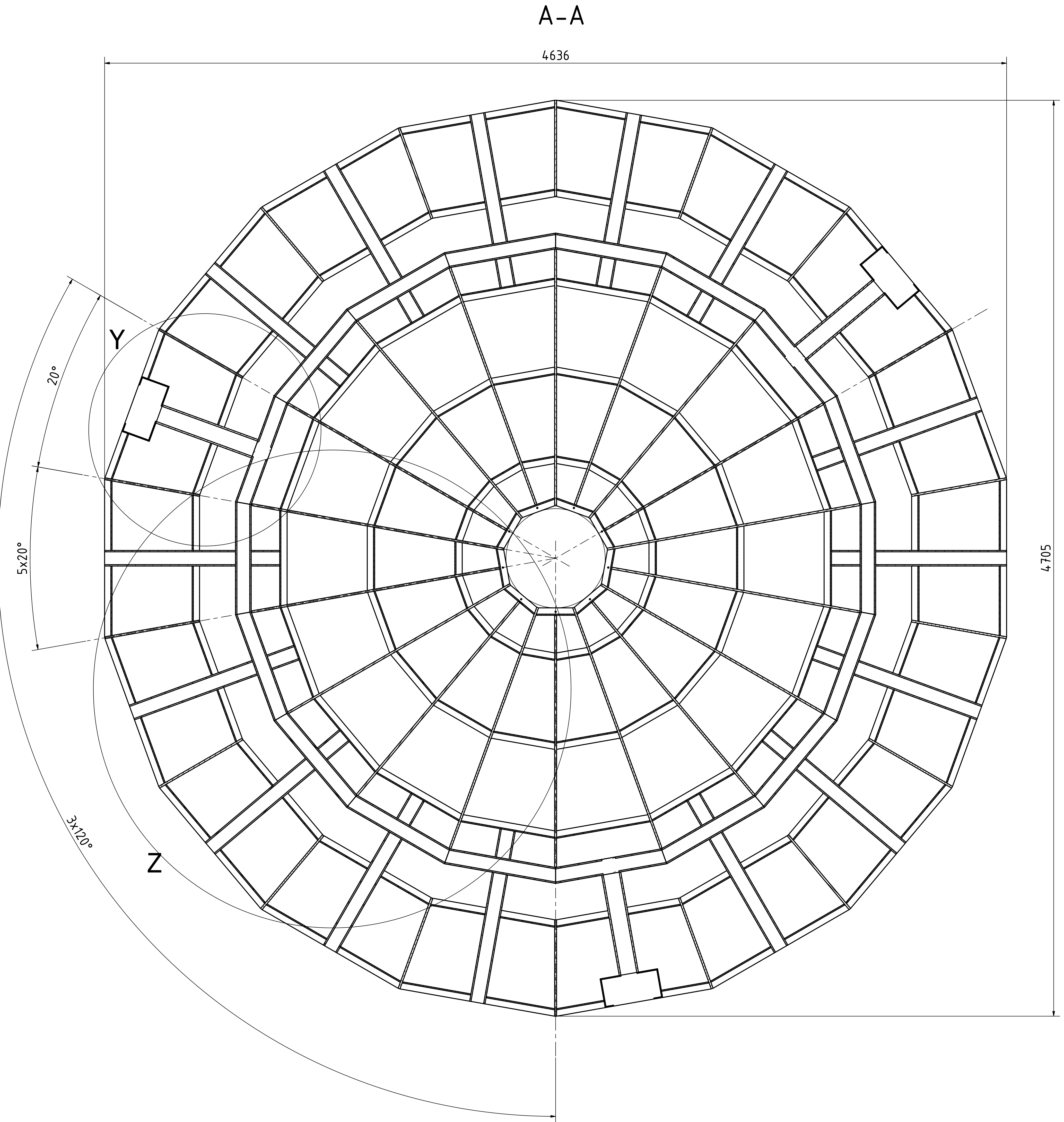
IZOMETRICKÝ POHLED
M1:20



Měřítko	1:10	Hmotnost (kg)	567	Průřezání		Formát	A1
KATEDRA KONSTRUKOVÁNÍ STROJŮ	FAKULTA STROJNÍ ZAPADČEŘSKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil	VÍT HORÁČEK	Název		SVAŘOVANÁ KONSTRUKCE	
		Datum	21.4.2021	Číslo dokumentu		1-JS77-2021-001-501	
		Schválil		Druh dokumentu	VÝKRES SESTAVY	Str 1	Str 4

Číslo polož.	Název-označení	Polotovár	Hmotn. (kg)	J.	Množ.
	Číslo výkresu - označení normy	Materiál			
1	SVAŘOVANÁ SKŘÍNKA		2,75		3
	4-JS77-2021-001-900	11 375			
2	PROFIL UE 50-250	UE 50 - 6000 ČSN 42 5571	1,3		6
	4-JS77-2021-001-902	11 375			
3	PROFIL UE 50-360	UE 50 - 6000 ČSN 42 5571	1,69		30
	4-JS77-2021-001-903	11 375			
4	PROFIL UE 50-270	UE 50 - 6000 ČSN 42 5571	1,34		6
	4-JS77-2021-001-904	11 375			
5	PROFIL UE 50-280	UE 50 - 6000 ČSN 42 5571	1,39		30
	4-JS77-2021-001-905	11 375			
6	PROFIL UE 50-485	UE 50 - 6000 ČSN 42 5571	2,4		18
	4-JS77-2021-001-906	11 375			
7	PROFIL UE 50-325	UE 50 - 6000 ČSN 42 5571	1,61		18
	4-JS77-2021-001-907	11 375			
8	PROFIL UE 50-170	UE 50 6000 ČSN 42 5571	0,84		18
	4-JS77-2021-001-908	11 375			
9	PROFIL UE 50-200	UE 50 - 6000 ČSN 42 5571	0,99		9
	4-JS77-2021-001-909	11 375			
10	PROFIL UAP 100-520	UAP 100 - 2000 ČSN 42 5570	5,2		3
	4-JS77-2021-001-910	11 375			
11	PROFIL UPN 80-670	UPN 80 - 6000 ČSN 42 5573	5,36		15
	4-JS77-2021-001-911	11 375			
12	PROFIL UPN 80-575 A	UPN 80 - 6000 ČSN 42 5573	4,34		3
	4-JS77-2021-001-912	11 375			
13	PROFIL UPN 80-575 B	UPN 80 - 6000 ČSN 42 5573	4,6		15
	4-JS77-2021-001-913	11 375			
14	PROFIL UPN 80-142	UPN 80 - 6000 ČSN 42 5573	1,14		15
	4-JS77-2021-001-914	11 375			
15	STOJINA 50x10-495	≠ 50x10 - 6000 ČSN 42 5522.11	1,98		18
	4-JS77-2021-001-915	11 375			
16	STOJINA 50x10-1300	≠ 50x10 - 6000 ČSN 42 5522.11	5,2		18
	4-JS77-2021-001-916	11 375			

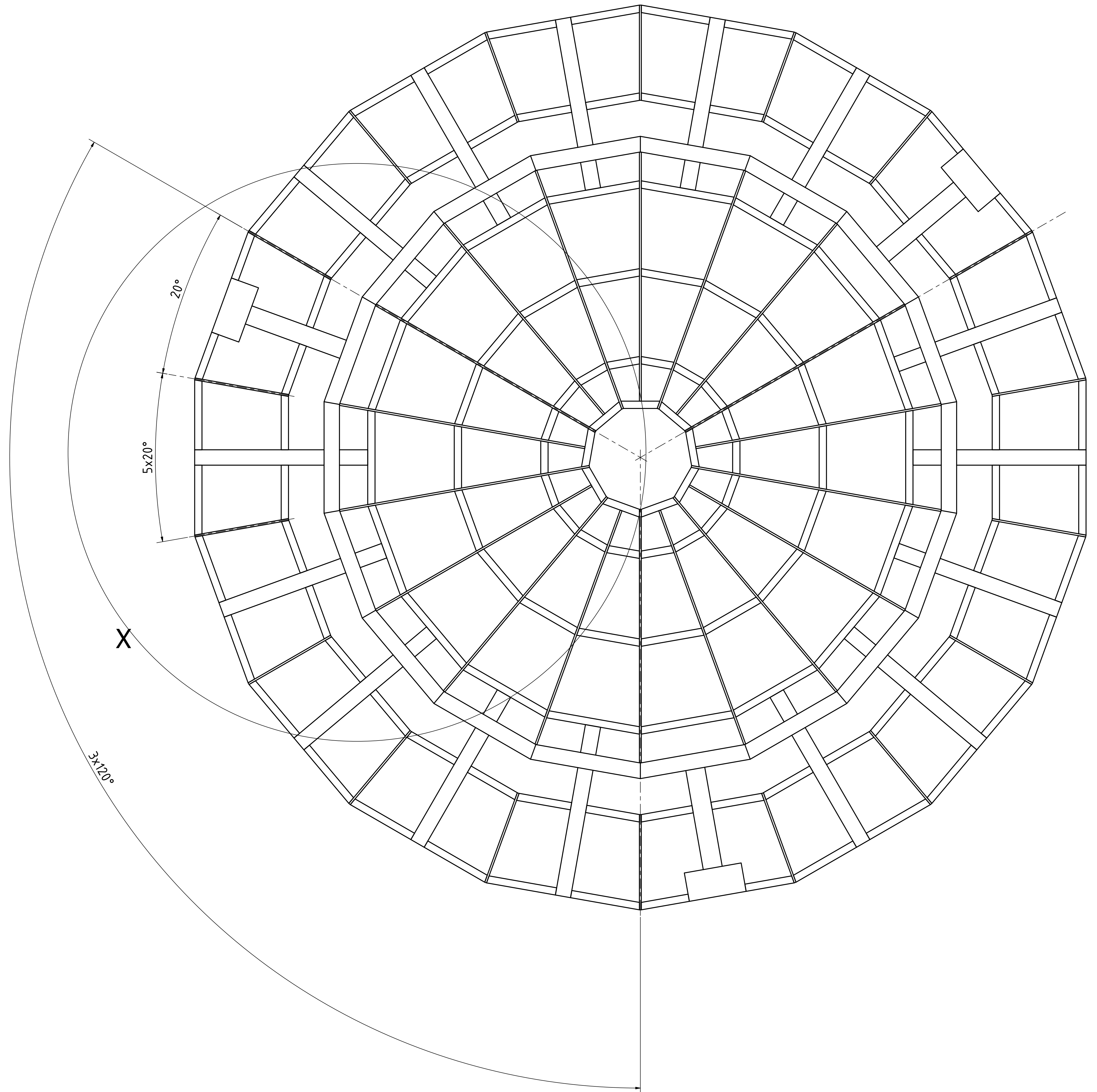
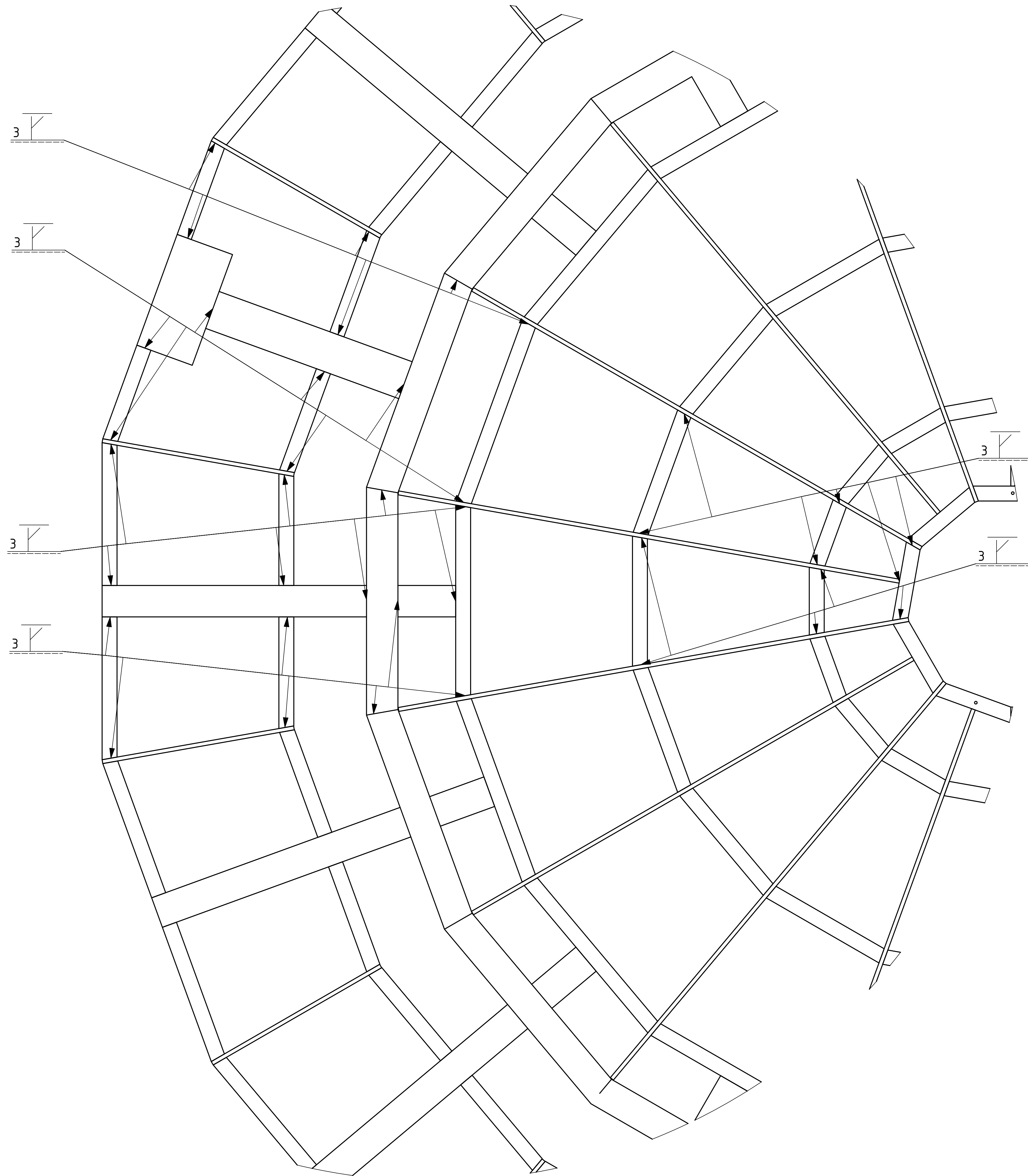
 <p>FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI</p>	Kreslil VÍT HORÁČEK	Název SVAŘOVANÁ KONSTRUKCE
	Datum 21.4.2021	Číslo dokumentu 1-JS77-2021-001-501
<p>KKS</p> <p>KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ</p>	Schválil	
	Datum	
	Druh dokumentu SEZNAM POLOŽEK	



KOUTOVÉ SVARY PROVEDENY TECHNOLOGIÍ: 131

Podtisk 1:10	Heslovník 567	Formát A0
Fakulta Strojní Čáslavské univerzity v Plzni	Pracovník VÍT HORÁČEK Datum 21.4.2021	Název SVAŘOVANÁ KONSTRUKCE
Katedra Konstruování Strojů	Držitel dokumentu VÝKRES SESTAVY	Číslo dokumentu 1-JS77-2021-001-501 1/3 1/1/4

DETAIL X M1:5

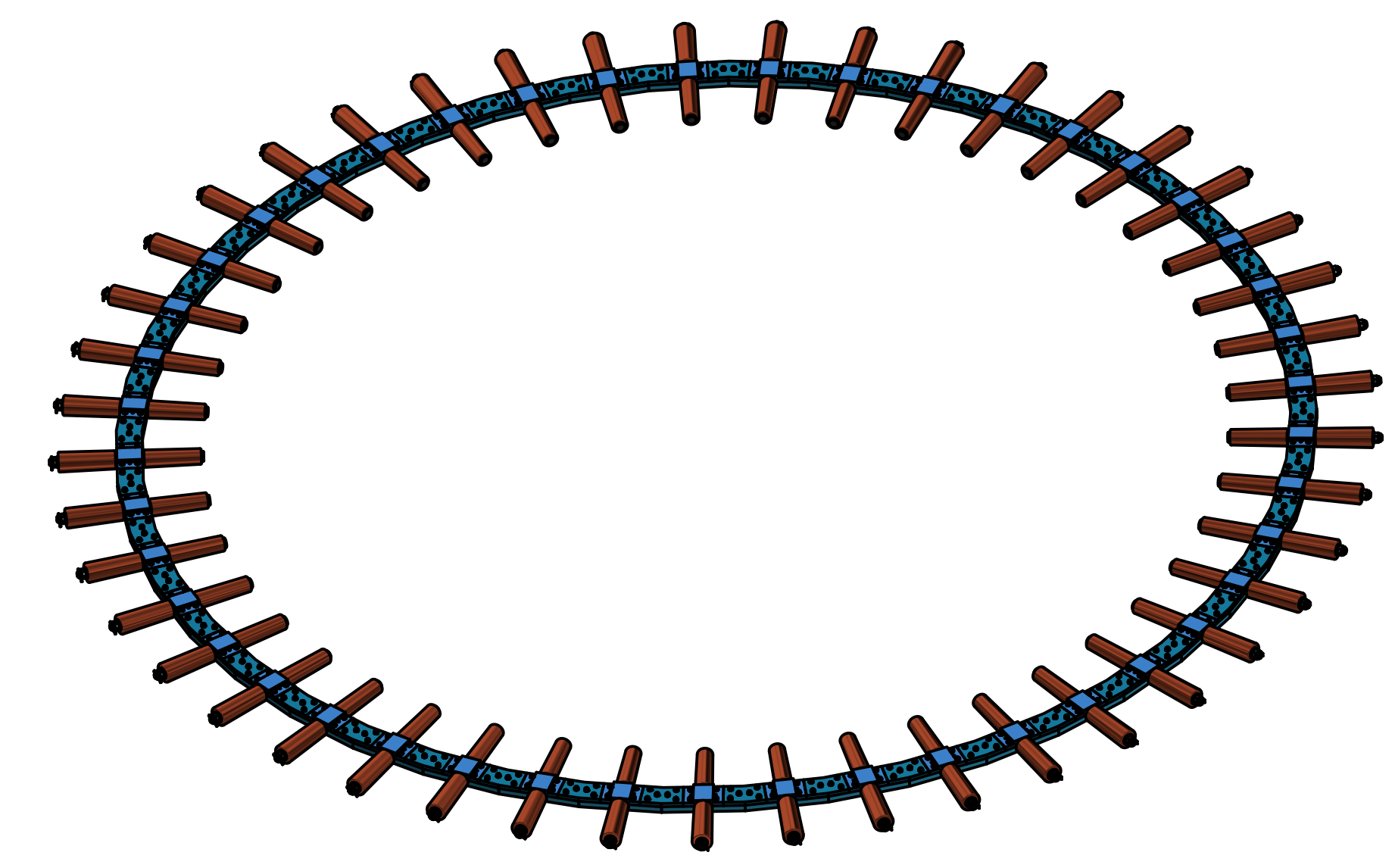


TUPÉ SVARY PROVÉST SYMETRICKY ZESPODU I SVRCHU
PO SVAŘOVÁNÍ NORMALIZAČNĚ ŽÍHAT KE SNÍŽENÍ PNUTÍ

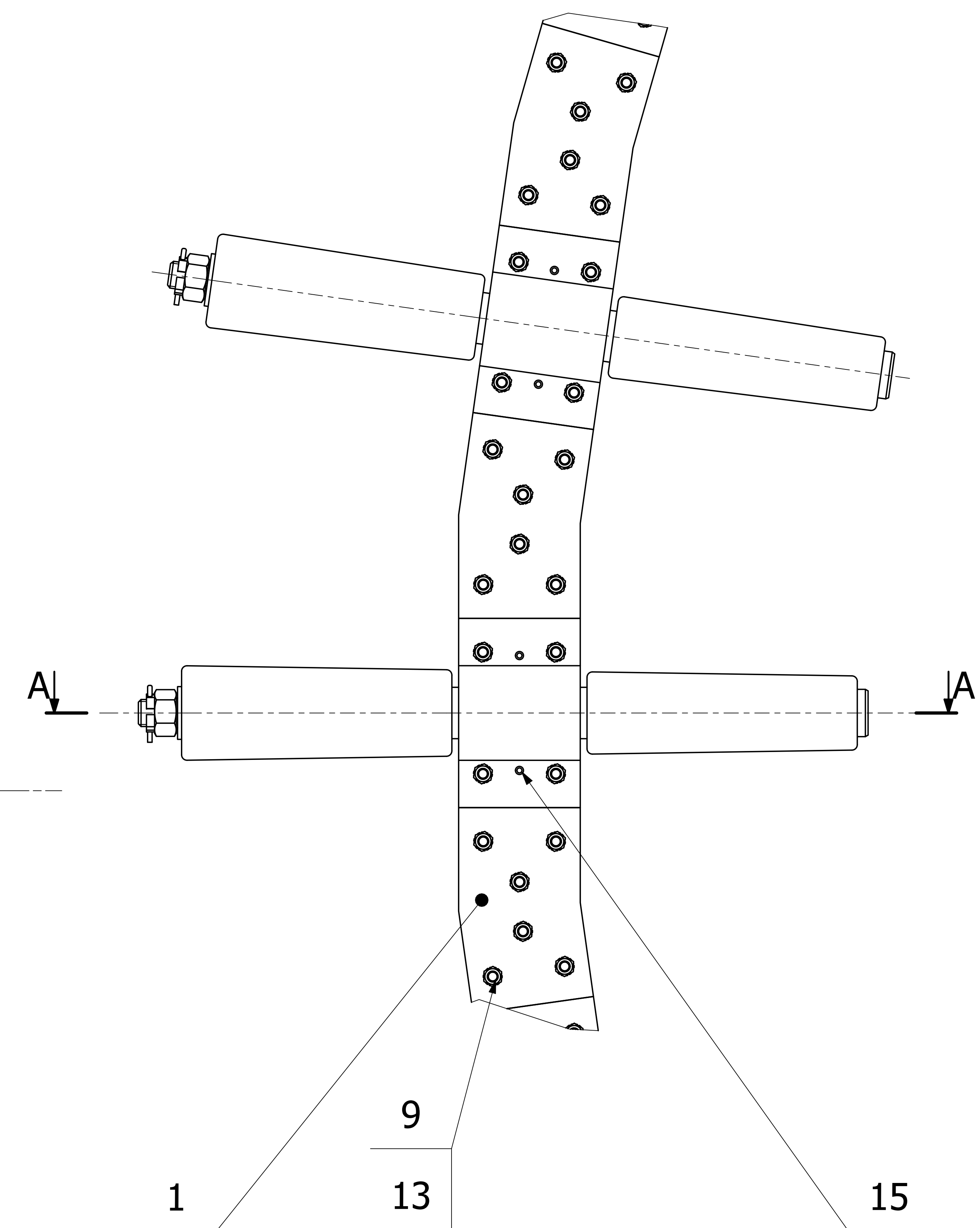
Podtisk 1:10	Heslo 567	Stručný VIT HORACEK	Formát A0
Fakulta strojni ČAPADOZEK UNIVERZITY V PLZNI	Datum 21.4.2021	Název SVAŘOVANÁ KONSTRUKCE	
Katedra KONSTRUKOVÁNÍ STROJŮ	Druh dokumentu VÝKRES SESTAVY	Číslo dokumentu 1-JS77-2021-001-501	Verze 1/1/14

PŘÍLOHA č. 6

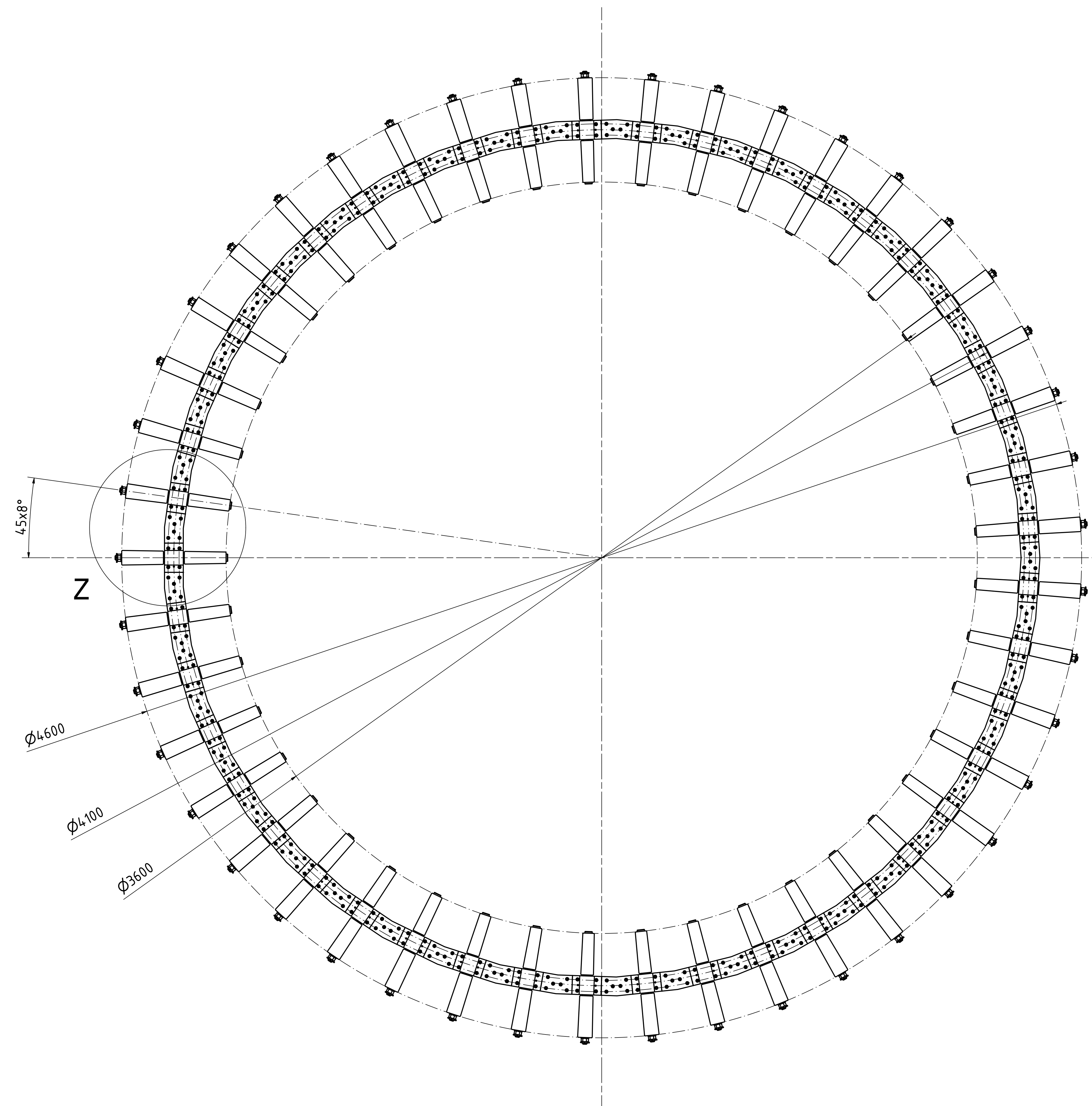
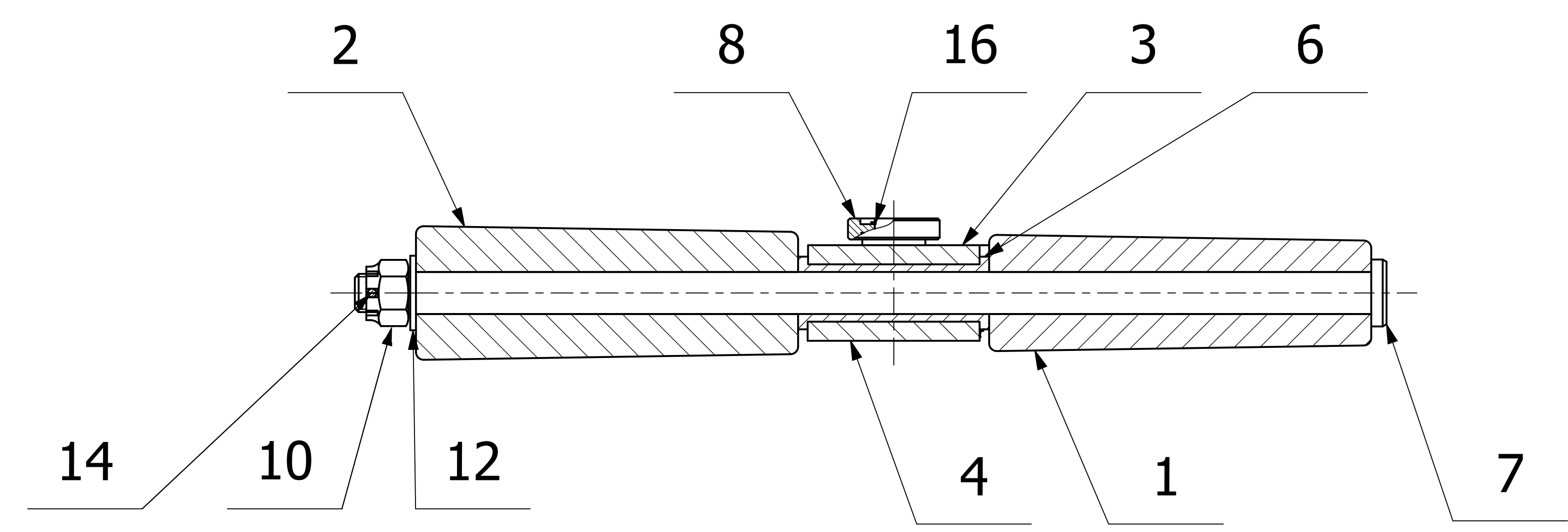
Výkres kuželíkové otoče



DETAIL Z M1:2



A-A



Číslo polož.	Název - označení Číslo výřezu - označení normy	Původce Materiál	Hmotn. Bp	Prost.
1	KUŽELÍK Ø63,9-200 4-JS77-2021-002-001	Ø70-205 ČSN 42 5710.1 17 381	3,524	4,5
2	KUŽELÍK Ø70-200 4-JS77-2021-002-002	Ø75-205 ČSN 42 5710.1 17 381	4,923	4,5
3	SEGMENT KLECE A 140x90x25 4-JS77-2021-002-003	P 26x100x2000 11 523	1,774	4,5
4	SEGMENT KLECE B 290x90x25 4-JS77-2021-002-004	P 26x100x2000 11 523	4,873	4,5
5	SEGMENT KLECE C 150x90x15 4-JS77-2021-002-005	P 16x100x2000 11 523	1,519	4,5
6	POUZDRO Ø38-100 4-JS77-2021-002-006	Ø38-102 ČSN 42 5710.1 17 381	0,189	4,5
7	HŘÍDEL Ø35-54,0 4-JS77-2021-002-007	Ø38-102 ČSN 42 5710.1 17 381	1,630	4,5
8	VÁLEČEK Ø48-11 4-JS77-2021-002-008	Ø50-12 ČSN 42 5710.1 17 381	0,096	4,5
9	ŠROUB M8x25 ČSN 02 1174.19		0,013	4,50
10	MATICĚ M20 ČSN 02 1411		0,078	4,5
11	MATICĚ M8 ČSN 02 1492.25		0,007	4,50
12	PODLOŽKA 23 ČSN 02 1702		0,018	4,5
13	PODLOŽKA 8,4 ČSN 02 1745		0,001	4,50
14	ZÁVLAČKA 4x36 ČSN 02 1781		0,001	4,5
15	KOLÍK 6x18 ČSN 02 2150.2		0,004	90
16	KROUŽEK 20 ČSN 02 2930		0,001	4,5