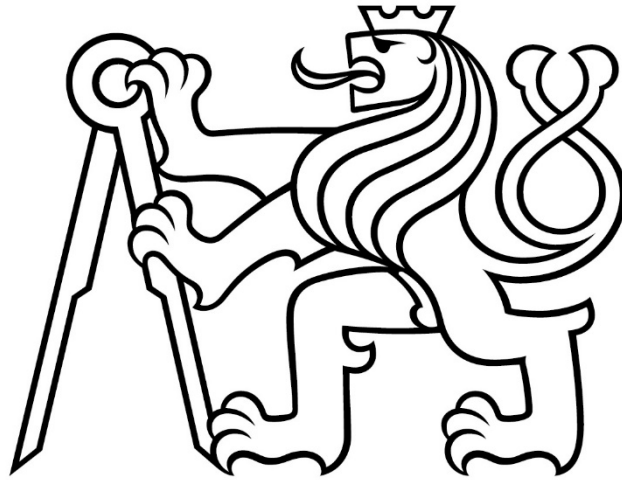


České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta stavební  
Katedra hydrotechniky



Bakalářská práce

**Optimalizace tvaru betonové spirály  
s využitím parametrického prostorového  
modelu**

Optimization of concrete spiral form using  
parametric 3D model

Vypracoval: Jiří Štika

Vedoucí práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Rok: 2019


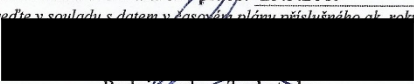


## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

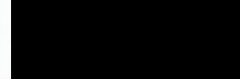
### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Štika	Jméno: Jiří	Osobní číslo: 458737
Zadávací katedra: K142 Katedra hydrotechniky		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Optimalizace tvaru betonové spirály s využitím parametrického prostorového modelu</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Optimization of concrete spiral form using parametric 3D model</u>	
Pokyny pro vypracování: - návrh parametrického modelu radiálního rozváděče pro vertikální nízkospádovou axiální turbínu - parametrizace základní geometrie betonové spirály a provedení výpočtů CFD - stanovení optimalizačního hodnotícího kritéria - optimalizace vybraných geometrických parametrů spirály - zobrazení výsledného návrhu pomocí VR technologie	
Seznam doporučené literatury: SMETANA, Jan. Hydraulika. 1. vyd. Praha: ČSAV, 1957. NECHLEBA, Miroslav. Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství. 2., rozšř. vyp. Praha: Stát. nakl. techn. lit, 1962. Ansys CFX manual podklady firmy DIVE Turbinen, GmbH	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Petr Nowak</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>21.2.2019</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>25.5.2019</u>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
<u>21.2.2019</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze dne: 24. 5. 2019

.....

Jiří Štika

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Dr. Ing. Petru Nowakovi a Ing. Jiřímu Součkovi za velice vřelý a nestandardní přístup při vedení této práce. Jsem velice vděčný, že mi bylo umožněno se takto rozvíjet. Dále děkuji za poskytnuté technické zázemí a cenné rady, bez kterých by tato bakalářská práce nevznikla. V neposlední řadě děkuji své rodině, která mi umožnila celé studium a své přítelkyni, která při mně vždy stála.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou návrhu parametrického prostorového modelu pro některé části vertikální nízkospádové axiální turbíny. Na základě rešerše provedené autorem práce je navržen parametrický model radiálního rozvaděče v prostředí softwarového 3D modeláře. V práci je dále představena parametrizace základní geometrie betonové spirály. Geometrické modely pro jednotlivé návrhy betonové spirály jsou dále použity pro CFD analýzu. Autor práce dále stanovuje optimalizační hodnotící kritérium, na jehož základě je provedena optimalizace vybraných geometrických parametrů betonové spirály. Po vyhodnocení výsledků je navržena optimální varianta betonové spirály a následně je ověřena pomocí CFD metody. Výsledný návrh je prezentován v prostředí virtuální reality pro větší názornost výsledku optimalizace tvaru betonové spirály.

**Klíčová slova:** Rozvaděcí kolo, parametrický model, betonová spirála, ANSYS CFX, Grasshopper, VR, matematické modelování, optimalizace

## **Abstract**

This thesis is about parametric 3D model design of certain sections of vertical low head axial turbine. Based on research, the author designed parametric model of radial guide wheel using 3D modeling software. Parametrization of concrete spirals basic geometry is introduced. Geometric models of concrete spiral designs are then used for CFD analysis. Optimization of chosen geometric parameters of the concrete spiral is conducted based on optimization assessing criterion defined by the author. After evaluating the outcomes, the optimal version of the concrete spiral is designed and verified using CFD methods. For better illustrative nature of the optimal shape of the concrete spiral, the final design is presented in VR environment.

**Key words:** Guide wheel, parametric model, concrete spiral, ANSYS CFX, Grasshopper, VR, mathematical modeling, optimization

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Teoretická část.....</b>	<b>4</b>
2.1	Malé vodní elektrárny kašnového typu.....	4
2.2	Spirála turbíny.....	6
2.2.1	Betonová spirála .....	6
2.2.2	Stanovení geometrie betonové spirály .....	8
2.2.3	Parametry betonové spirály.....	10
2.3	Rozváděcí kolo vertikální nízkospádové axiální turbíny .....	13
2.4	NACA profil .....	14
2.4.1	Historie NACA profilu .....	14
2.4.2	Parametry „NACA 4-DIGIT“ profilu .....	14
2.4.3	Geometrie NACA profilu .....	15
2.5	Parametry rozváděcího kola.....	18
2.5.1	Horní turbínové víko.....	19
2.5.2	Lopatky rozváděcího kola .....	20
2.5.3	Spodní turbínové víko .....	21
<b>3</b>	<b>Praktická část .....</b>	<b>23</b>
3.1	Parametrický model betonové spirály .....	23
3.1.1	Vstupní parametry parametrického modelu betonové spirály .....	24
3.2	Parametrický model rozváděcího kola.....	26
3.2.1	Základní vstupní parametry parametrického modelu radiálního rozvaděče... .....	26
3.2.2	Speciální funkce parametrického modelu radiálního rozvaděče .....	29
3.3	Geometrie pro CFD analýzu .....	33
3.3.1	Rozváděcí kolo .....	33
3.3.2	Kašnový přivaděč bez spirály .....	35
3.3.3	Kašnový přivaděč se spirálou .....	36

3.4	Výpočetní síť pro CFD analýzu .....	38
3.4.1	Výpočetní síť rozváděcího kola.....	39
3.4.2	Výpočetní síť přivaděče .....	39
3.5	CFD analýza .....	40
3.5.1	Okrajové podmínky výpočtu.....	40
3.5.2	Nastavení fyzikálních parametrů výpočtu .....	41
3.5.3	Nastavení výpočtu .....	41
3.6	Vyhodnocení výsledků výpočtů prvotních variant.....	41
3.6.1	Stanovení hodnotícího kritéria .....	41
3.6.2	Vyhodnocení CFD analýzy pro betonovou kašnu bez spirály .....	43
3.6.3	Vyhodnocení CFD analýzy pro betonovou kašnu se spirálou .....	48
3.7	Další tvarové modifikace betonové spirály .....	52
3.7.1	Návrh „Spir_a75_x100“ s ostruhou.....	52
3.7.2	Návrh „Spir_a75_x100“ s ostruhou a betonovou rampou.....	54
3.8	Zobrazení výsledného návrhu pomocí VR technologie .....	59
<b>4</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>Použitá literatura a zdroje informací.....</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>64</b>
<b>7</b>	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>Seznam grafů.....</b>	<b>68</b>

# 1 Úvod

Současným trendem je snaha o automatizaci ve všech sférách průmyslu a o celkové zefektivňování výrobních a návrhových procesů. Matematické modelování se stalo neodmyslitelnou součástí veškerých tvarových návrhů a optimalizací ve všech odvětvích průmyslu. Je tedy snaha co nejvíce využít výpočetní techniku pro návrh a optimalizaci některých produktů vzhledem k velkým finančním nákladům na fyzikální modelování. Fyzikální modelování je často ekonomicky nedosažitelné zejména u projektů s menším rozpočtem.

Tato bakalářská práce si klade za cíl zrychlit možný proces návrhu některých částí turbínového soustrojí za pomoci parametrických modelů. Dalším cílem je optimalizovat tvar betonové spirály pomocí parametrického modelu a dosáhnout vhodných nátokových podmínek na oběžné kolo turbíny. Optimalizace bude prováděna pomocí CFD metody. Práce si také klade za cíl prezentovat výsledný návrh pomocí moderní technologie VR.

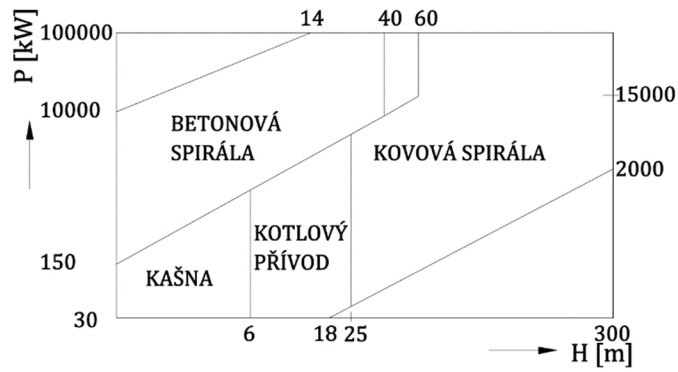


## 2 Teoretická část

### 2.1 Malé vodní elektrárny kašnového typu

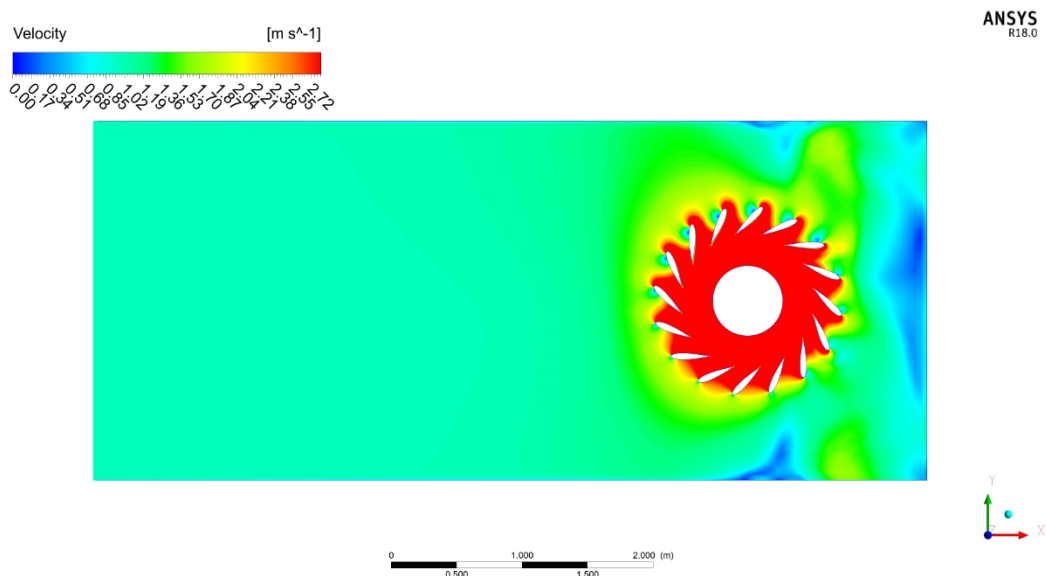
V České republice je za malou vodní elektrárnu považována elektrárna s maximálním instalovaným výkonem  $P = 10$  MW, avšak Evropská unie limituje toto označení výkonem  $P = 5$  MW. Většina instalovaného výkonu vodních elektráren, a to cca 90 %, je tvořena výkony většími než  $P = 5$  MW a zbylých cca 10 % jsou malé vodní elektrárny v limitu podle evropského zařazení. Tyto elektrárny se nebudují pouze v místech bývalých mlýnů, hamrů, pil apod., ale i v místech stávajících jezů, popř. jiných přirozených či umělých vzdutí hladiny vodního toku či v místech jiných možností využití hydroenergetického potenciálu. Četná soustrojí malých vodních elektráren jsou instalována do technologických zařízení vodohospodářských a vodárenských systémů, v petrochemických, hutních i jiných provozech. Je tedy nutno považovat malé vodní elektrárny nejen za intenzifikační faktor využití energetických zdrojů, ale i za řešení úspor energie v uzavřených výrobních systémech. [1]

Přívod vody na oběžné kolo (dále jen OK) turbíny za pomoci kašnových konstrukcí je doménou především elektráren s nižším spádem. U turbín menších rozměrů (asi do  $D_{OK} = 1,2$  m), které byly navrhovány na spády do 5 – 6 m se využívalo umístění stroje do otevřených dřevěných nebo betonových kašen. Toto řešení bylo ekonomicky příznivé vzhledem k velikosti projektu, a často také jediné možné. U odkrytých kašen vzniká hned několik problémů. První problém představuje nebezpečí tvorby vertikálních vírů, ty mohou do turbíny přisávat vzduch. V důsledku tohoto problému vychází výsledné rozměry kašny veliké. Při symetrickém umístění osy stroje v kašně dochází k roztáčení vody v kašně a k periodickému tvoření vertikálních vírů. K mírnému zlepšení dochází, když je osa stroje umístěna excentricky. Jako hlavní nevýhoda odkrytých kašen se ukazuje jejich závislost na spádu turbíny. Při větších spádech vycházela konstrukční hloubka otevřených kašen značně velká. Proto se při spádech turbíny nad 6 – 10 m budovala krytá kašna, ta prošla obdobným vývojem jako kašna odkrytá. [2] [3]

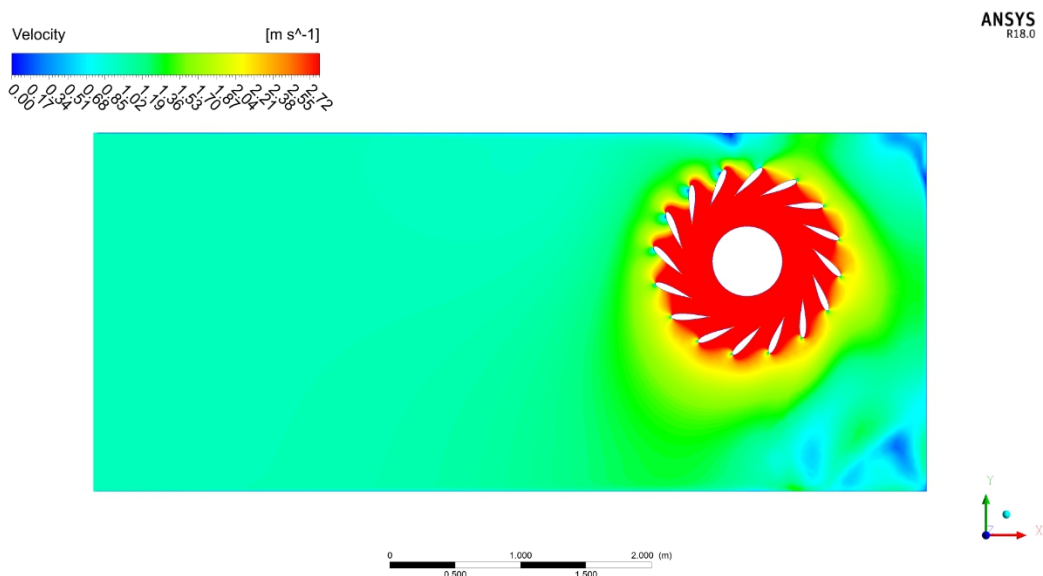


**Obrázek 2.1:** Rozsah použití přívodů vody k tlakové turbíně [2]

Při snahách o zlepšení nátokových podmínek na OK turbíny docházelo k postupným stavebním úpravám kašny, neboť ta má za úkol zajistit co možná nejvíce rovnoměrné natékání na rozváděcí kolo (dále jen RK) turbíny. U čtvercových a obdélníkových půdorysných tvarů kašny vznikají „mrtvé kouty“, kolem kterých opět může docházet k vytváření vertikálních vírů. Tento jev způsobuje zbytečné ztráty v přivaděči. Proto je nezbytné, aby tato místa byla vyplněna konstrukcí kašny. Pokud dojde k vyplnění problémových míst při excentrickém umístění osy stroje v kašně, tak zůstává půdorysný tvar, který je tvarem velice blízký spirále turbíny. Z kašen se postupem času vyvinuly spirály, které se mohou navrhovat buď jako betonové nebo ocelové. Spirály se navrhují v podobě spirální ulity, která obepíná rozvaděč turbíny po celém obvodu nebo jen částečně. [3]



**Obrázek 2.2:** Rozložení rychlostí proudění v kašně obdélníkového půdorysu při symetrickém umístění osy stroje. Modré oblasti popisují místa s téměř nulovou rychlostí proudění, v těchto místech lze očekávat tvorbu vírů. Obrázek je pořízen z CFD analýzy.



**Obrázek 2.3:** Rozložení rychlostí proudění v kašně obdélníkového půdorysu při excentrickém umístění osy stroje. Pokud bychom vyplnili modré oblasti, tak uvidíme náznak spirálního tvaru kašny. Z obrázku je také patrné, že došlo k lepšímu rozložení rychlostí okolo RK. Obrázek je pořízen z CFD analýzy.

## 2.2 Spirála turbíny

Důsledkem špatného natékání na turbínu v prostých půdorysech kašen, došlo k vyvíjení příznivějších tvarů této konstrukce. Modelové výzkumy měly za výsledek postupnou proměnu obdélníkových půdorysů na půdorysy spirálních tvarů. Spirály turbín můžeme dělit na kovové a na spirály betonové. Kovová spirála má zpravidla kruhový příčný profil a používá se do míst s velkými rychlostmi proudění. Kovová spirála není předmětem této bakalářské práce, proto nebude dále popisována. [2]

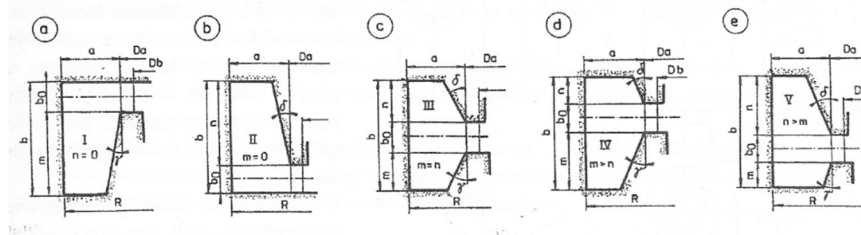
### 2.2.1 Betonová spirála

Betonová spirála se nejčastěji používá u Kaplanových, vrtulových a Francisových turbín o menším spádu (max. do 40 – 60 m). Maximální přípustné rychlosti, aniž by muselo dojít k opancéřování povrchu spirály, dosahují hodnot  $6,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Větší rychlosti bez opancéřování nejsou přípustné, jelikož beton není schopen těmto rychlostem dlouhodobě odolávat. U větších strojů je otázka symetrického nátoku velice choulostivá, a proto je návrhu spirály věnována velká pozornost. [4]

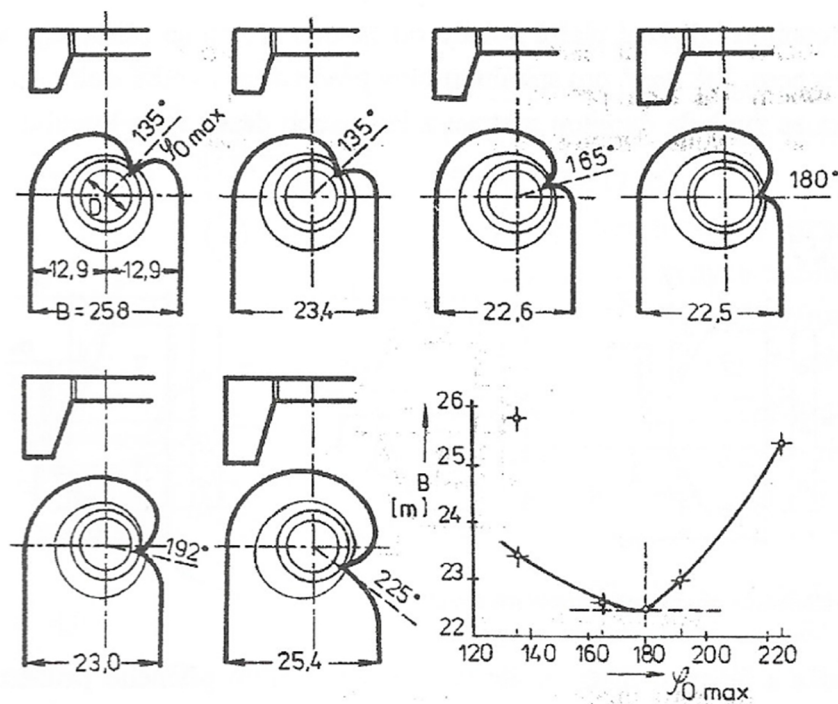
Jak bylo zmíněno výše, kovové spirály mají zpravidla kruhový průřez, ale u betonových spirál je situace nejednoznačná. Spirály z betonu mají většinou lichoběžníkový průřez, ale i zde dochází k velké tvarové rozmanitosti. Dalším vstupujícím faktorem je úhel obchvatu spirály. Úhel obchvatu spirály určuje výslednou šířku přivaděče, a tím výrazně ovlivňuje objem prací a betonáže. Při modelovém výzkumu se ukazuje úhel  $180^\circ$  jako úhel s nejmenší výslednou šířkou přivaděče. [4]

Princip přivádění vody na turbínu za pomoci spirály spočívá v předpokladu rovnoměrného úbytku vody z komory po jejím vnitřním obvodu do RK. Přitom se předpokládá přibližně konstantní rychlost proudění a na základě toho se vyšetří výšky průtočných profilů v libovolném radiálním řezu spirály. [4]

Dalším důležitým prvkem betonové spirály je tzv. „ostruha“, ta ukončuje spirálu. Přestože je ostruha dnes hojně využívána u obou druhů spirál, tak se jedná o komplikovanou konstrukci, což zvyšuje celkové náklady na výstavbu spirály. Celou konstrukci spirály je poměrně složité bednit, a proto se u menších strojů někdy využívá polystyrénové kopyto. Po vytvrdnutí betonu se kopyto nechá vyžehnout plamenem. [3]



**Obrázek 2.4:** Charakteristické příčné řezy betonových spirál [2]



**Obrázek 2.5:** Vliv úhlu obchvatu na šířku spirály [2]

### 2.2.2 Stanovení geometrie betonové spirály

V této kapitole bude detailněji popsán postup hydraulického návrhu betonové spirály, jak o něm pojednává literatura [2].

Následující hydraulický výpočet neuvažuje tření, ani eventuální nerovnoměrnost a nesymetričnost rozložení bodových rychlostí vody ve vstupním profilu spirály. Tento výpočet slouží k tomu, aby bylo alespoň v přijatelné míře zabezpečeno rovnoměrné rozdělení průtoku po obvodě rozváděcích lopatek. Kýžených výsledků se docílí následnou optimalizací spirály pomocí fyzikálního nebo matematického modelování či jejich kombinací. V rámci této bakalářské práce bude využito pouze matematické modelování a následující výpočet bude modifikován, jak bude popsáno v následujících kapitolách.

Předpokladem tohoto výpočtu je postupné snižování průtoku po obvodě RK. Tento předpoklad je popsán vztahem [2]:

$$Q_{\varphi_0} = \frac{Q \varphi_0}{2\pi} \quad (2.1)$$

kde  $Q_{\varphi}$  je hodnota průtoku příčným profilem spirály [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] odkloněným od ostruhy o úhel  $\varphi_0$  [rad],  $Q_{\varphi_0}$  je celkový průtok turbínou [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Při výpočtu spirály se nejprve určí celkový průtok  $Q$  turbínou, střední rychlost vody  $v$  v přivaděči před spirálou, užitný spád  $H$ , příčný řez spirály a úhel obchvatu  $\varphi_{0, \max}$  spirály. [2]

Protože volený úhel obchvatu nedosahuje plných  $360^\circ$ , musí být určitá část průtoku přiváděna na turbínu přímo bez účasti spirály. Průtok  $Q_{\text{poč}}$ , který má být dále rovnoměrně rozdělován po délce spirály, bude tudíž menší než celkový přítok vody  $Q$  na turbínu. Tuto podmínku popisuje následující vzorec [2]:

$$Q_{\text{poč}} = Q \frac{\varphi_{0, \max}}{2\pi} \quad (2.2)$$

Při rovnoměrném rozdělení průtoku  $Q$  po celém obvodu OK musí mít rovnice (2.2) obecnou platnost, což lze vyjádřit tvarem [2]:

$$Q_n = Q \frac{\varphi_n}{2\pi} \quad (2.3)$$

kde  $Q_n$  je průtok příčným profilem  $n$  spirály, který je pootočen o úhel  $\varphi_n$  od ostruhy spirály. Vyjádříme-li z rovnice (2.2) průtok  $Q$ , lze po dosazení upravit rovnici (2.3) na tvar [2]:

$$Q_n = Q_{\text{poč}} \frac{\varphi_n}{\varphi_{0, \max}} \quad (2.4)$$

Protože rychlost vody po délce spirály musí být konstantní (přitom by se neměla výrazně lišit od rychlosti vstupního profilu spirály), je možné za pomoci rovnice kontinuity ve tvaru [2]:

$$Q_n = S_n v_{poč} \quad (2.5)$$

dosazením do rovnice (2.4), upravit tuto rovnici na tvar [2]:

$$S_n = S_{poč} \frac{\varphi_n}{\varphi_{0,max}} \quad (2.6)$$

K určení plochy spirály v určitém úhlu  $\varphi_n$  stačí stanovit rychlost ve vstupním profilu spirály  $v_{poč}$ . Z hydraulických důvodů je vhodné, aby počáteční rychlost ve spirále byla rovná rychlosti v přivaděči. Toto vyjadřuje nerovnice [2]:

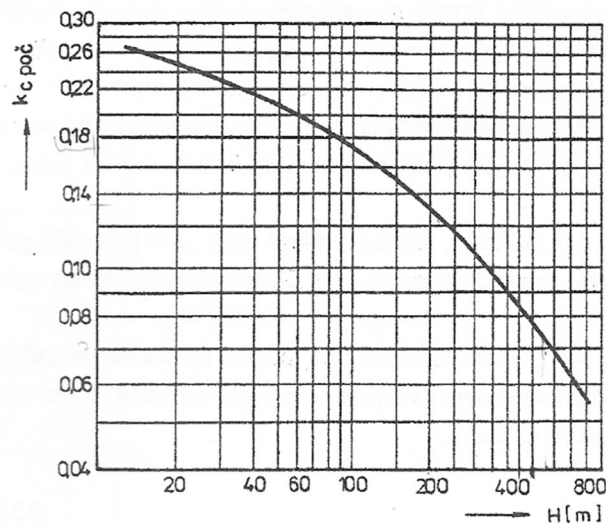
$$v_{poč} \geq v \quad (2.7)$$

Rychlost  $v_{poč}$  lze orientačně stanovit ze vztahu [2]:

$$v_{poč} = K_{v,poč} \sqrt{2 g H} \quad (2.8)$$

kde  $H$  je užitný spád turbíny [m] a  $K_{v,poč}$  je rychlostní součinitel pro střední rychlost vody v počátečním profilu spirály.

Hodnota součinitele  $K_{v,poč}$  se pohybuje v širokém intervalu  $\langle 0,05; 0,28 \rangle$ . Tato hodnota závisí na velikosti užitého spádu  $H$ . Z následujícího obrázku lze orientačně stanovit hodnotu součinitele.



**Obrázek 2.6:** Závislost rychlostního součinitele na spádu. [2]

Postup výpočtu je stejný pro betonovou i kovovou spirálu. Z vypočtených hodnot ploch spirály lze stanovit jednotlivé geometrické charakteristiky průřezu. Toto stanovení bude popsáno dále v této práci, neboť jednotlivé geometrické charakteristiky jsou závislé na zvoleném příčném profilu spirály.

Výše popsaný hydraulický výpočet je pouze orientační a slouží především k prvotnímu odhadu tvaru spirály. Následná optimalizace spirály probíhá pomocí fyzikálního či matematického modelování.

### 2.2.3 Parametry betonové spirály

Jednotlivé parametry betonové spirály se odvíjejí především od volby příčného řezu spirály viz *obrázek 2.4*. V této bakalářské práci bude dále popisován a používán jednoduchý lichoběžníkový profil, který počítá s umístěním RK u stropní konstrukce tlakového přivaděče.

Protože hydraulický návrh popsaný v předešlé kapitole neuvažuje žádnou parametrizaci a jedná se spíše o orientační návrh, je nutné pracovní postup upravit. Následující tabulka popisuje základní parametry betonové spirály:

*Tabulka 2.1: Klíčové parametry betonové spirály s jednoduchým lichoběžníkovým profilem*

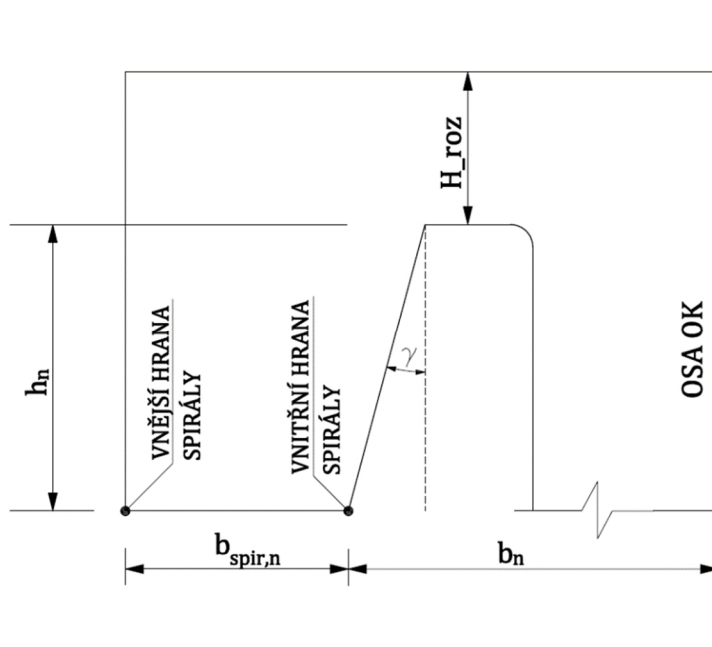
Označení parametru	Popis parametru	Jednotky
$\gamma$	Zkosení lichoběžníkového profilu spirály	[°]
$\varphi_{0, \max}$	Maximální úhel obchvatu spirály	[°]
$\varphi_n$	Úhel pootočení spirály od zakončení spirály	[°]
H_roz	Výška RK	[mm]
H_in	Výška přivaděče	[mm]
B_in	Šířka přivaděče	[mm]
S <sub>poč</sub>	Plocha vstupního profilu spirály	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>n</sub>	Plocha profilu spirály v určitém úhlu $\varphi_n$	[mm <sup>2</sup> ]
b <sub>0</sub>	Vzdálenost vnitřního obrysu spirály ve vstupním profilu od osy stroje	[mm]
b <sub>n</sub>	Vzdálenost vnitřního obrysu spirály v určitém profilu spirály od osy stroje	[mm]
b <sub>spir,0</sub>	Šířka dna spirály ve vstupním profilu spirály	[mm]

$b_{spir,n}$	Šířka dna spirály v určitém profilu spirály	[mm]
$h_0$	Výška vstupního profilu spirály	[mm]
$h_n$	Výška profilu spirály v určitém místě spirály	[mm]
$a$	Parametr ovlivňující rychlost snižování plochy průřezů spirály	[-]
$x_{spir}$	Parametr ovlivňující šířku lichoběžníkového průřezu	[-]

Aby bylo možné parametricky ovlivnit průběh plochy průřezu lichoběžníkové spirály, byla na základě konzultace s vedoucím této práce sestavena rovnice pro výpočet plochy  $S_n$  úpravou rovnice (2.6). Výsledná rovnice má tvar:

$$S_n = \frac{(2\pi - \varphi_n) S_{poč}}{2\pi \left[ a + (1 - a) \sqrt{1 - \frac{\varphi_n^2}{4\pi^2}} \right]} \quad (2.9)$$

kde parametr  $a$  ovlivňuje průběh plochy betonové spirály po její délce. Pro získání vnitřního obrysu spirály je nezbytné nejprve graficky znázornit základní charakteristiky betonové spirály.



**Obrázek 2.7:** Charakteristický příčný řez betonovou spirálou bez strojní části, s popisem základních geometrických charakteristik.



Protože cílem parametrizace této spirály je rychlé generování geometrického modelu pro model matematický, na jehož základě bude geometrie optimalizována v závislosti na výsledcích CFD analýzy, není žádoucí vytvářet složitě provázaný parametrický model. Jakmile jsou vypočítány plochy v jednotlivých místech spirály dle rovnice (2.9), je možné vypočítat vnitřní obrys spirály pomocí následující rovnice:

$$b_n = \sqrt{\frac{2 S_n}{m}} + R_{RK} \quad (2.10)$$

kde  $S_n$  je vypočítaná plocha v určitém místě spirály dle rovnice (2.9) a  $R_{RK}$  je poloměr prostoru RK. Koeficient  $m$  se vypočítá dle následujícího vzorce:

$$m = \operatorname{tg}(90 - \gamma) \quad (2.11)$$

kde  $\gamma$  je úhel zkosení lichoběžníkového profilu spirály. Tímto je definován vnitřní obrys betonové spirály.

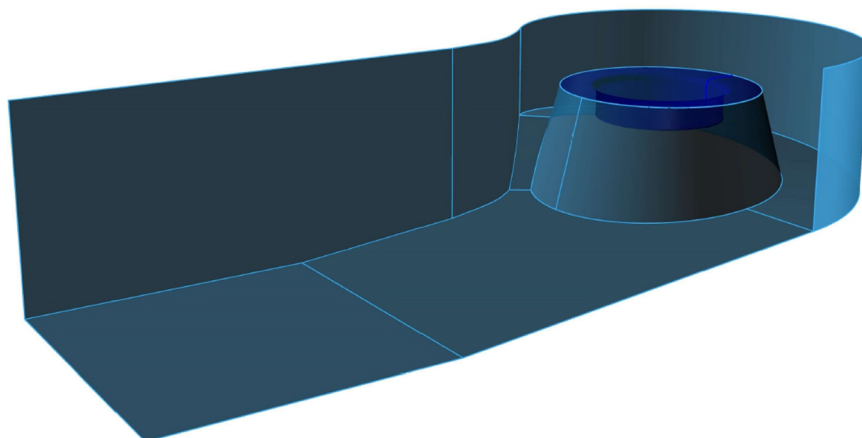
Výšku spirály  $h_n$  v určitém místě spirály je po stanovení vnitřního obrusu možné dopočítat ze vzorce:

$$h_n = \frac{b_n - R_{RK}}{\operatorname{tg}(\gamma)} \quad (2.12)$$

Dále je třeba parametrizovat šířku dna spirály, tedy sestavit rovnici, díky které bude možné vypočítat vzdálenost vnější hrany spirály  $b_{spir,n}$ , a zároveň bude možné tuto vzdálenost jedním parametrem ovlivňovat. Z obrázku 2.7 je zjevné, že vzdálenost vnější hrany spirály od osy OK turbíny lze stanovit součtem  $b_n$  a  $b_{spir,n}$ . Po konzultaci s vedoucím práce byl zaveden předpoklad, že vzdálenost vnější hrany spirály se bude lineárně zmenšovat v závislosti na šířce dna vstupního profilu spirály  $b_{spir,0}$ , vzdálenost vnější hrany spirály v určitém řezu spirálou se určí dle následující rovnice:

$$b_{spir,n} = b_{spir,0} - x_{spir} \varphi_n \quad (2.13)$$

kde  $x_{spir}$  je parametr jímž lze ovlivňovat průběh šířky dna spirály po její délce. Parametr  $x_{spir}$  leží v intervalu  $\langle 0; \infty \rangle$ . Z rovnice (2.13) vyplývá, že spirála ve svém maximálním úhlu obchvatu nemusí být ukončena ostruhou. To zohledňuje prostorovou potřebu pro případnou revizi či opravu spirály nebo strojní části turbíny. K této variantě je nutné přistupovat velice opatrně a je žádoucí provést ověření funkčnosti návrhu pomocí modelového výzkumu. Varianta bez ostruhy je vidět na obrázku 2.8.



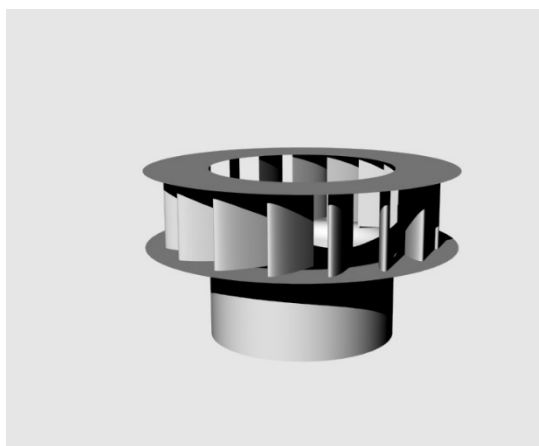
**Obrázek 2.8:** Prostorový modelu přiváděče se spirálou při maximálním úhlu obchvatu 220°, bez ostruhy a strojní části.

### 2.3 Rozváděcí kolo vertikální nízkospádové axiální turbíny

Rozváděcí kolo (dále jen RK) u tohoto typu turbín slouží především k regulaci průtoku turbínou a ke zlepšení nátokových poměrů na oběžné kolo (dále jen OK) turbíny. Nátokovými poměry se myslí určitá rychlost a určitý směr proudění, a to po celém obvodu lopatkové mříže RK stejně. Dnešním trendem je využití téměř výhradně natáčivých rozváděcích lopatek. Z tohoto poznatku plyne fakt, že záleží pouze na výstupní části rozváděcích lopatek. Další část lopatek má za úkol pouze neklást zbytečné hydraulické odpory, které by narušovaly strukturu proudění a způsobovaly by tak přílišné ztráty. [5]

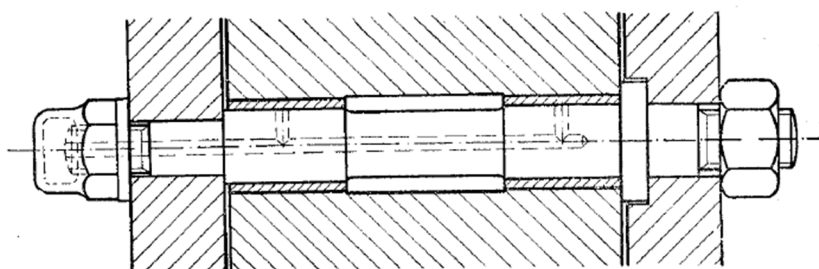


**Obrázek 2.9:** Montáž RK, Francie. [6]



**Obrázek 2.10:** Render prostorového modelu RK bez OK určeného pro CFD výpočty.

Rozváděcí lopatky RK jsou většinou otáčivě uloženy na čepch, které spojují horní a spodní turbínové víko. Lopatky mají k otáčení na čepch zalisovaná bronzová pouzdra. Tato pouzdra sahají z každé strany do 1/4 až 1/3 délky otvoru. Čep, na němž se lopatka otáčí, se mezi těmito pouzdry často osazuje na menší průměr, aby i po narezavění této plochy šel snadno vyjmout. Zvláště u vertikálních turbín mívá čep na spodním konci nákrůžek, který vyčnívá asi o 0,5 mm nad víko turbíny, takže lopatka je jím axiálně nesena, netře se celou délkou o víko a dá se snáze natáčet. Toto uspořádání má tu nevýhodu, že při výměně pouze jedné lopatky nelze čep vytáhnout; proto je na čepu často místo nákrůžku navlečen zvláštní kroužek. Čep pak lze vytáhnout směrem vzhůru. Aby se lopatky snáze otáčely, dělají se asi o 1 mm kratší, než je vzdálenost horního a spodního turbínového víka. Toto uložení je znázorněno na *obrázku 2.11*. [5]



**Obrázek 2.11:** Schéma uložení rozváděcí lopatky vůči hornímu a spodnímu turbínovému víku. [5]

V minulosti bylo pro potřeby leteckého průmyslu vyvinuto mnoho profilů křídel. Ty se ukázaly jako vhodné i pro použití pro potřeby turbinářského odvětví, zejména kvůli podobným hodnotám Reynoldsova čísla. Jako ideální pro vytvoření parametrického modelu RK se jeví letecké profily „NACA“. [5]

## 2.4 NACA profil

### 2.4.1 Historie NACA profilu

Profil NACA nese název bývalého stejnojmenného federálního úřadu americké vlády (National Advisory Committee for Aeronautics), který byl založen 3. března 1915 na podporu leteckého výzkumu. Úřad zanikl 1. října 1958 a jeho poslání bylo předáno organizaci „NASA“ (National Aeronautics and Space Administration). Mezi lety 1974 – 1975 Charles Ladson a Cuyler Brooks napsali první programy, jež byly schopné generovat souřadnice NACA profilů na základě zadaných parametrů. [7] V dnešní době existuje mnoho známých a otestovaných sérií těchto křídel, ty se liší především účelem, za kterým byly sestaveny, jejich vlastnostmi, vstupními parametry, ale i počtem vstupních parametrů. Pro potřebu sestavení parametrického modelu rozvaděče postačí tzv. „NACA 4-DIGIT“. Ten je charakterizován třemi hlavními parametry. Informace týkající se výpočetních postupů a různých vlastností daných sérií křídel jsou dostupné online. [8]

## 2.4.2 Parametry „NACA 4-DIGIT“ profilu

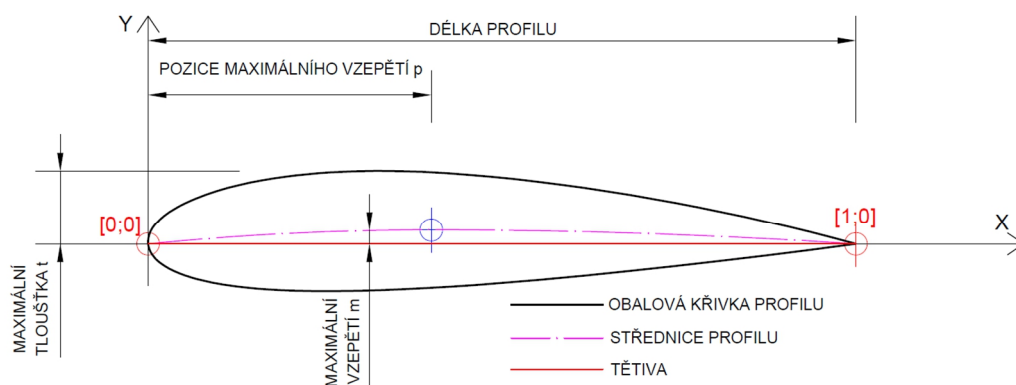
Hlavní parametry křídla implikuje již samotný název. Ten má formát „NACA MPXX“, kde M je číselná hodnota maximálního vzepětí střednice (maximum camber) v procentech, P je pozice maximálního vzepětí (position of the maximum camber) a XX je maximální tloušťka profilu (thickness) v procentech. Dále lze volit mezi několika dalšími parametry, jako např. distribuce bodů (lineární/cosinus), počet bodů a způsob ukončení profilu (otevřený/uzavřený). Toto jsou základní parametry pro „jednotkový“ profil křídla. Ten je generován v intervalu  $x = <0, 1>$ . Počet bodů, pro které jsou souřadnice počítány není nijak omezen, čím větší počet bodů, tím můžeme očekávat více vyhlazenou křivku, která se proloží vypočtenými souřadnicemi. Stojí však za uvážení, zda-li potřebujeme počet bodů v řádech tisíců, když porovnáme dobu potřebnou pro výpočet souřadnic a výslednou křivku profilu s křivkou, kde vypočteme například jen 100 bodů.

*Tabulka 2.2: Parametry jednotkového profilu „NACA 4-DIGIT“.*

Označení parametru	Anglický název parametru	Český název parametru	Jednotky	Rozsah hodnot
M (m)	Maximum camber	Maximální vzepětí	[%]	<0;9,5>
P (p)	Position of the maximum camber	Pozice maximálního vzepětí	[%]	<0;90>
XX (t)	Maximum thickness	Maximální tloušťka	[%]	<1;40>
Pts	Number of points	Počet bodů	[-]	-
Spacing	Spacing	Distribuce bodů	[-]	lineární/cosinus
Trailing edge	Trailing edge	Ukončení profilu	[-]	otevřený/uzavřený

## 2.4.3 Geometrie NACA profilu

V předchozí kapitole jsme si představili vstupní parametry NACA profilu. Podle těchto parametrů lze vypočítat souřadnice bodů, které následně slouží k tvorbě profilové křivky křídla. Jednotkový profil a jeho části vidíme na *obrázku 2.12*.

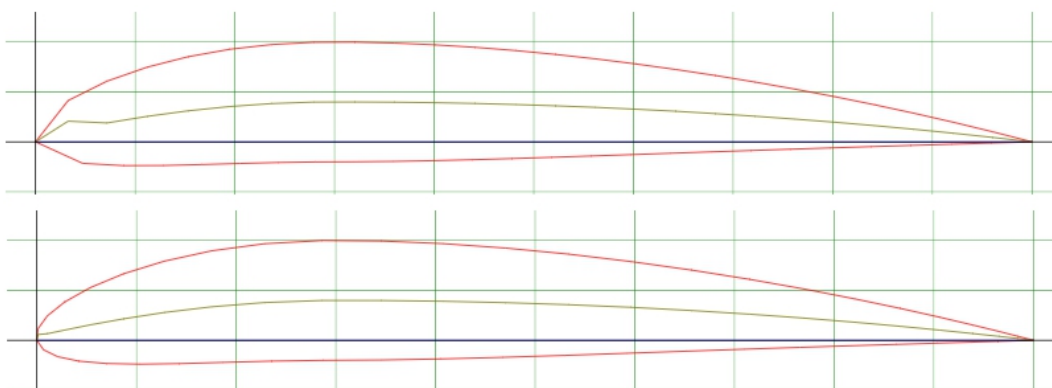


**Obrázek 2.12:** Jednotkový „NACA 4-DIGIT“ profil s uzavřeným koncem, cosinovou distribucí bodů a popsány základními vstupními parametry.

Chceme-li generovat „NACA 4-DIGIT“ profil, musíme nejdříve zvolit distribuci bodů. Pokud zvolíme lineární rozdělení, tak nepatrně urychlíme výpočet souřadnic jednotlivých bodů, ale obalová křivka profilu nemusí být dostatečně vyhlazená v nátokové a odtokové části, což není žádoucí stav viz obrázek 1.5. Nedostatečné vyhlazení profilu bychom museli dohánět větším počtem výpočetních bodů, to ale zvýší dobu potřebnou pro výpočet souřadnic. Při distribuci bodů funkcí cosinus dostáváme relativně hladký profil již při malém počtu vypočítaných souřadnic. Při cosinovém rozložení jsou body distribuovány dle následující rovnice [8]:

$$x = \frac{(1 - \cos(\beta))}{2} \quad (2.14)$$

kde je úhel  $\beta$  lineárně rozdělen na intervalu  $\langle 0; \pi \rangle$ . Toto rozložení bodů dostatečně vyhladí křivku na nátokové a výtokové straně lopatky, protože rovnice (2.14) distribuuje větší počet bodů v místech s větší křivostí.



**Obrázek 2.13:** Porovnání způsobu distribuce bodů u profilu NACA 4312 s uzavřeným koncem a vypočtenými 50 body. Na horním profilu bylo zvoleno lineární rozložení bodů, u profilu dole byla zvolena distribuce bodů dle rovnice (2.14). [8]

Po zvolení distribuce bodů je dále třeba vypočítat souřadnice střednice. Tento výpočet probíhá ve dvou intervalech. Ty jsou ohraničeny hodnotou pozice maximálního vzepětí. Souřadnice  $y$  pro střednici se vypočítají dle následujících rovnic [8]:

Rovnice pro přední část profilu, kde hodnota  $y_c$  roste a leží v intervalu  $\langle 0; p \rangle$

$$y_c = \frac{m}{p^2} (2px - x^2) \quad (2.15)$$

Rovnice pro zadní část profilu, kde hodnota  $y_c$  klesá a leží v intervalu  $\langle p; 1 \rangle$

$$y_c = \frac{m}{(1-p)^2} (1 - 2p + 2px - x^2) \quad (2.16)$$

Ve fázi, kdy je definována geometrie střednice profilu, je nutné vypočítat tloušťku profilu pro jednotlivé body střednice. Tloušťku vypočteme z následujícího vzorce [8]:

$$y_t = \frac{t}{0.2} (a_0x^{0.5} + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4) \quad (2.17)$$

kde  $t$  je hodnota vstupního parametru tloušťky profilu. Hodnoty parametrů  $a_0 - a_4$  uvádí následující tabulka:

**Tabulka 2.3:** Hodnoty jednotlivých parametrů rovnice (2.17)

Označení parametru	Hodnota parametru	Poznámka
$a_0$	0,2969	
$a_1$	-0,1260	
$a_2$	-0,3516	
$a_3$	0,2843	
$a_4$	-0,1015	Otevřený konec profilu
$a_4$	-0,1036	Uzavřený konec profilu

Vypočtená hodnota  $y_t$  dle rovnice (2.17) je poloviční tloušťkou profilu a je zapotřebí jí nanést na obě strany střednice. Tloušťku nanášíme kolmo na střednici v každém jejím známém bodě. K nanesení potřebujeme nejdříve určit gradient střednice, ten dostaneme první derivací její funkce. Pokud derivujeme rovnice (2.15) a (2.16), dostáváme následující tvar:

Rovnice pro přední část profilu, kde hodnota  $y_c$  roste a leží v intervalu  $\langle 0; p \rangle$

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{2m}{p^2} (p - x) \quad (2.18)$$

Rovnice pro zadní část profilu, kde hodnota  $y_c$  klesá a leží v intervalu  $\langle p; 1 \rangle$

$$\frac{dyc}{dx} = \frac{2m}{(1-p)^2} (p-x) \quad (2.19)$$

Z první derivace můžeme vypočítat úhel  $\theta$ . Díky tomuto úhlu budeme schopni nanášet tloušťku profilu po délce jeho střednice vždy kolmo na ni. Úhel  $\theta$  vypočteme z následujícího vzorce [8]:

$$\theta = \arctan \left( \frac{dyc}{dx} \right) \quad (2.20)$$

Tento úhel nabývá hodnoty 0, pokud zvolíme symetrický profil, tedy vstupní parametr  $m$  bude roven 0. Výsledné souřadnice povrchu profilu vypočteme z následujících vztahů [8]:

vztahy popisující horní povrch profilu (upper surface)

$$x_u = x - y_t \sin(\theta) \quad (2.21)$$

$$y_u = y_c + y_t \cos(\theta) \quad (2.22)$$

vztahy popisující spodní povrch profilu (lower surface)

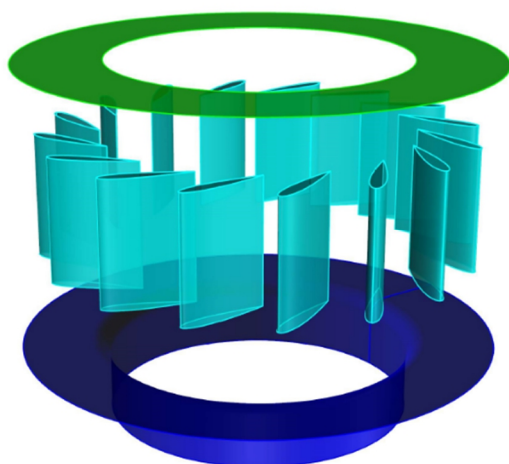
$$x_l = x + y_t \sin(\theta) \quad (2.23)$$

$$y_l = y_c - y_t \cos(\theta) \quad (2.24)$$

Nyní máme kompletně definovanou geometrii NACA profilu.

## 2.5 Parametry rozváděcího kola

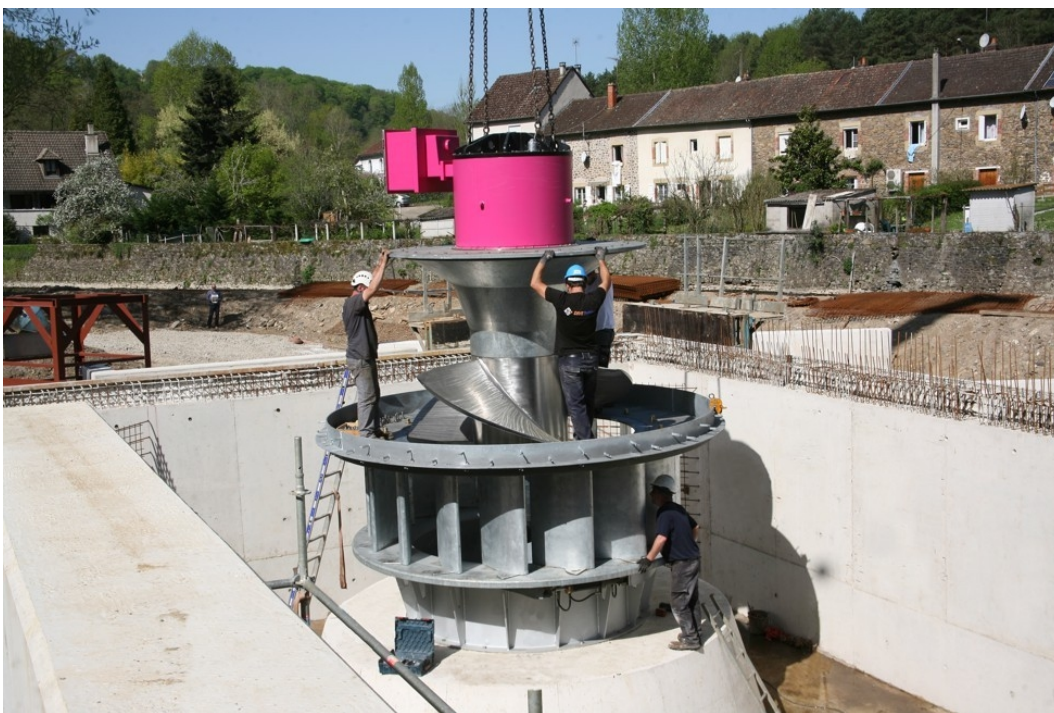
Pro vytvoření parametrického modelu RK je důležité si nejdříve definovat základní části RK a jejich parametry. RK lze rozdělit na 3 základní části, a to na horní turbínové víko, lopatky RK a spodní turbínové víko. V prostoru RK se také nachází náboj OK, ale jeho parametrizace není předmětem této bakalářské práce, proto není dále uvažován při návrhu parametrického modelu RK.



**Obrázek 2.14:** Prostorový model RK a jeho jednotlivé části. Odshora: horní turbínové víko, lopatky RK, spodní turbínové víko s přechodem do komory OK.

### 2.5.1 Horní turbínové víko

Horní turbínové víko ohraničuje prostor rozváděče, je neseno čepy natáčivých lopatek RK. U některých technických návrhů slouží horní turbínové víko také jako nosný prvek pro generátor s oběžným kolem, který je osazen na horním turbínovém víku. Toto provedení vidíme na následujícím obrázku.



**Obrázek 2.15:** Instalace OK s generátorem, Francie. [6]



U elektráren kašnového typu se někdy volí umístění rozváděče tak, že horní turbínové víko lícuje s úrovní stropu kašny. Toto uspořádání je vhodné u menších spádů.

Pro tvorbu prostorového parametrického modelu, který poslouží pro CFD (computational fluid dynamics) výpočty, jsou důležité parametry, jež jsou uvedeny v následující tabulce:

*Tabulka 2.4: Klíčové parametry horního turbínového víka.*

Označení parametru	Popis parametru	Jednotky
$D_{ok}$	Průměr oběžného kola	[mm]
$D_{rk}$	Vnější průměr spodního turbínového víka při určitém natočení lopatek RK	[mm]

### 2.5.2 Lopatky rozváděcího kola

Lopatky RK tvoří stěžejní část rozváděče. Jednotlivé lopatky mezi sebou vytváří prostor, kde proudí kapalina směrem na OK. Tento meziprostor nazýváme lopatkovou mříží. V lopatkové mříži dochází k významné transformaci rychlostního pole kapaliny, tudíž parametry lopatek RK přímo ovlivňují kvalitu proudění před OK. Důležité vlastnosti lopatek RK definují parametry v následující tabulce:

*Tabulka 2.5: Klíčové parametry lopatek RK.*

Označení parametru	Popis parametru	Jednotky
L	Délka lopatky	[mm]
b	Maximální šířka lopatky	[mm]
Místo největší tloušťky lopatky	Místo, kde je lopatka nejširší	[mm]
m	Maximální vzepětí lopatky	[-]
p	Pozice maximálního vzepětí	[mm]

V tabulce 2.5 jsou uvedeny parametry samotných lopatek RK. Pro úplné definování geometrie RK jsou důležité následující parametry:

*Tabulka 2.6: Klíčové parametry RK.*

Označení parametru	Popis parametru	Jednotky
Bod otáčení lopatky	Pozice osy, kolem které se lopatka natáčí	[mm]
Úhel dovřený lopatky	Úhel, při kterém je RK uzavřeno. Tento úhel je vztažen k poloměru OK, který prochází bodem otáčení lopatky	[°]
Nominální úhel lopatky	Stanovený výchozí stav natočení lopatek RK, odpovídající jmenovitému průtoku turbínou.	[°]

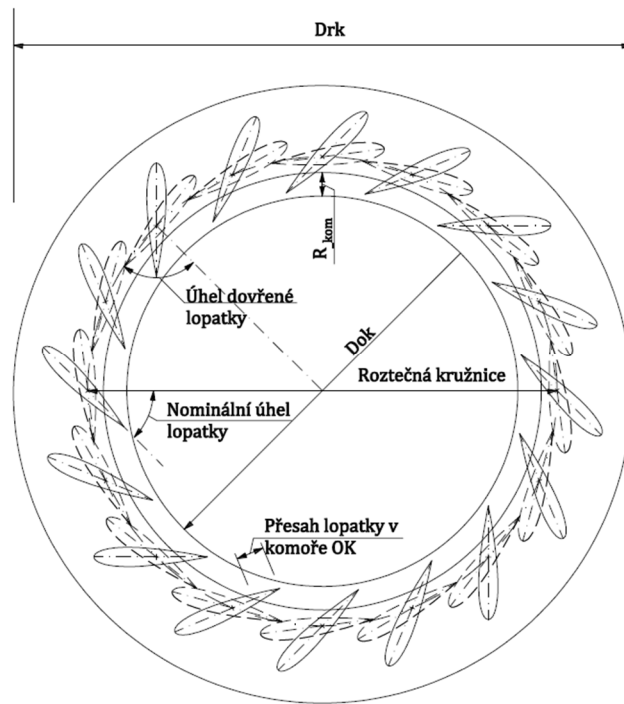
Délka lopatky v komoře OK	Délka části lopatky, která zasahuje do prostoru OK	[mm]
Počet lopatek RK	Počet lopatek RK	[ks]
Roztečná kružnice RK	Poloměr kružnice, která prochází osami otáčení lopatek RK	[mm]
H <sub>roz</sub>	Výška RK	[mm]

### 2.5.3 Spodní turbínové víko

Spodní turbínové víko má podobnou funkci jako horní turbínové víko. U modernějších strojů je možné toto víko použít jako kulisu pro mechanismus natáčení lopatek RK. Jedná se o konstrukčně velice jednoduchý a levný mechanismus, na němž lze ušetřit výrobní náklady a snížit tak poruchovost celého stroje. Protože se jedná o vertikální axiálně natékanou turbínu, nelze opomenout změnu směru proudění v rozváděči, kde dochází ke změně z horizontálního směru proudění na směr vertikální. Tento přechod se jeví jako problematický z hlediska stability proudění, a je proto nutné tuto transformaci zajistit s jistou opatrností. K šetrnému převedení z horizontálního na axiální směr poslouží část kruhové plochy s určitým poloměrem. Stěžejní parametry spodního turbínového víka popisuje následující tabulka:

*Tabulka 2.7: Klíčové parametry spodního turbínového víka.*

Označení parametru	Popis parametru	Jednotky
D <sub>ok</sub>	Průměr oběžného kola	[mm]
D <sub>rk</sub>	Vnější průměr spodního turbínového víka při určitém natočení lopatek RK	[mm]
R <sub>kom</sub>	Poloměr přechodu mezi spodním víkem a válcovou komorou OK	[mm]

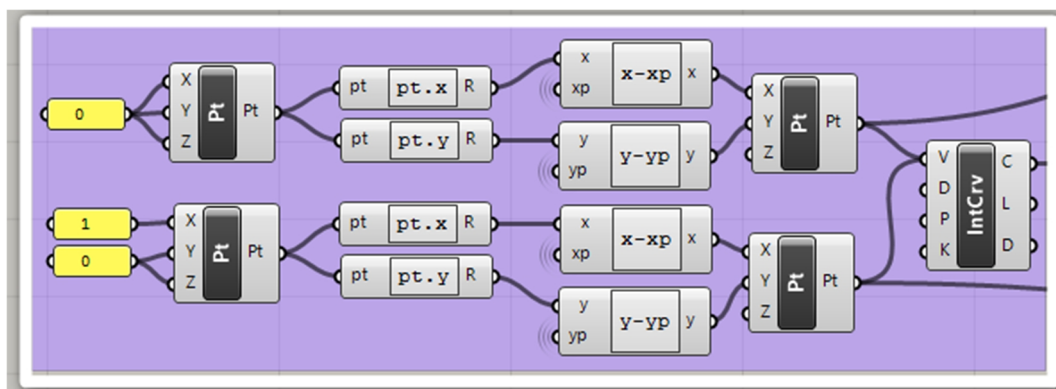


**Obrázek 2.16:** Půdorysné chéma RK s vyznačenými parametry.

## 3 Praktická část

### 3.1 Parametrický model betonové spirály

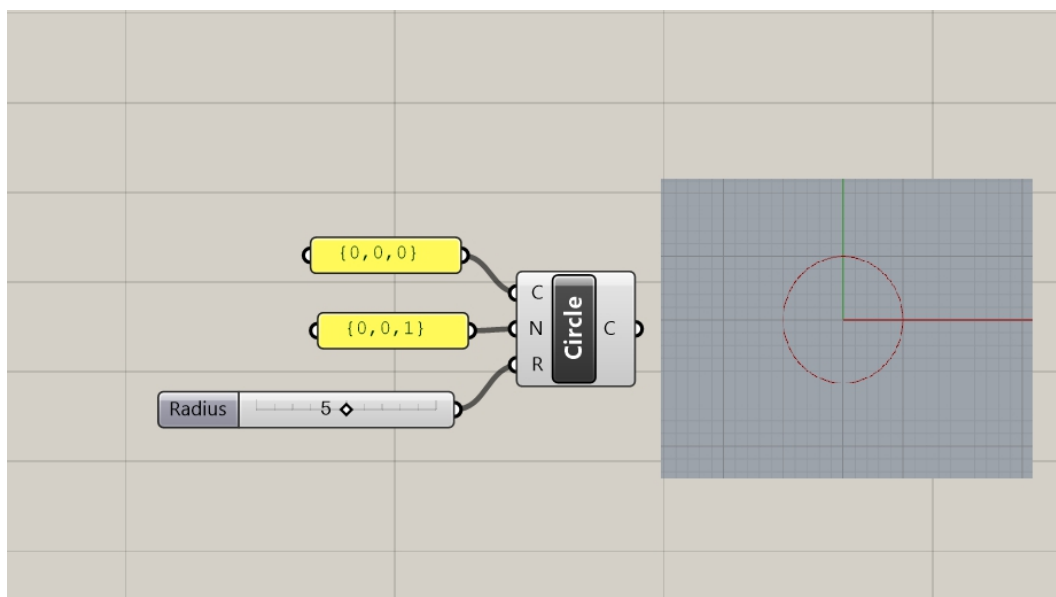
Parametrický model betonové spirály byl vytvořen v rámci této bakalářské práce pro zrychlení procesu optimalizace tvaru spirály při jejím návrhu. Změna jednotlivých parametrů je viditelná téměř s nulovou časovou odezvou, proto lze model použít i pro edukativní účely. Největší sílu tohoto modelu spatřuji ve velice rychlém generování geometrie pro CFD analýzu. Z kapitoly 2.2.1 je patrné, že velikost záboru pozemku pro objekt elektrárny je závislý na maximálním úhlu obchvatu RK. Pokud by se jednalo o konkrétní pozemek s konkrétními rozměry, bylo by možné model použít ke sledování zvětšování nebo zmenšování záboru pozemku v závislosti na úhlu obchvatu a najít tak vhodné řešení pro danou situaci. Celý parametrický model byl vytvořen v softwarovém prostředí „Grasshopper®“. Jedná se o nadstavbu modelovacího softwaru „Rhinceros®“.



Obrázek 3.1: Ukázka z pracovního prostředí softwaru „Grasshopper®“.

Veškeré funkce modelu se skládají z dílčích funkcí modeláře „Rhinceros®“ a tvoří tak dohromady jednotlivé skripty. Propojení těchto skriptů následně vytváří výsledný parametrický model. Funkce modeláře „Rhinceros®“, jež mají různé vstupní parametry, jsou postupně provazovány a jejich výstupní hodnoty poskytují vstupní parametry pro funkce další. To je vidět na obrázku 3.1. Jednoduchým příkladem pro představu fungování pracovního prostředí „Grasshopper®“ je funkce „Circle CNR“, jejíž parametry jsou „Center“ (střed kružnice), „Normal“ (normálový vektor) a „Radius“ (poloměr kružnice). Výstupem funkce je „Circle“ (tedy křivka kružnice s kýženým poloměrem). Tento příklad je viditelný na obrázku 3.2.

V pracovním prostředí aplikace „Grasshopper®“ krom funkcí, které mají grafický výstup, je možné psát matematické funkce, pracovat s komplexními čísly, vkládat subskripty napsané v programovacích jazycích „Python“ nebo „C#“. Pro řešení specifických problémů lze využít evoluční řešitel „Galapagos“. Všechny funkce prostředí „Grasshopper®“ a jejich možnosti jsou popsány online na oficiálních stránkách. [9]



**Obrázek 3.2:** Ukázka funkce „Circle CNR“ z pracovního prostředí „Grasshopper®“. Na obrázku vidíme samotný box s funkcí a 3 vstupní parametry „C, N, R“. Výsledkem takto nastavených vstupních parametrů je křivka kružnice se středem v bodě  $\{0,0,0\}$ , normálovým vektorem  $\{0,0,1\}$  a poloměrem 5 jednotek (v tomto případě 5 mm). Náhled kružnice s těmito parametry se nachází v pravé části obrázku. Jedná se o výřez z pracovního okna „Rhinceros®“, kam jsou náhledy výsledku funkcí generovány v reálném čase.

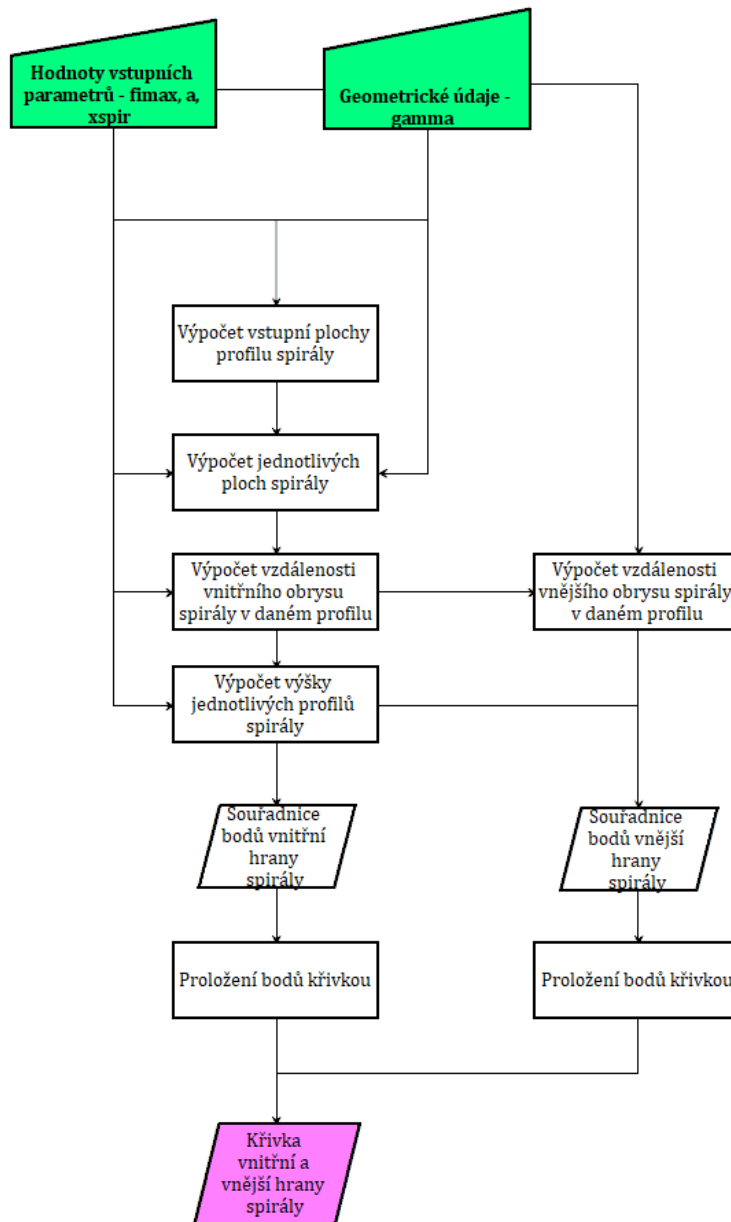
### 3.1.1 Vstupní parametry parametrického modelu betonové spirály

Základní parametry modelu zajišťují vstupní hodnoty pro funkce, které následně generují geometrii spirály dle výpočtu, který je popsán v kapitolách 2.2.2 a 2.2.3. Výsledný tvar betonové spirály lze ovlivňovat hodnotou vstupních parametrů, které jsou popsány v následující tabulce:

**Tabulka 3.1:** Přehled proměnných parametrů parametrického modelu betonové spirály s jejich popisem.

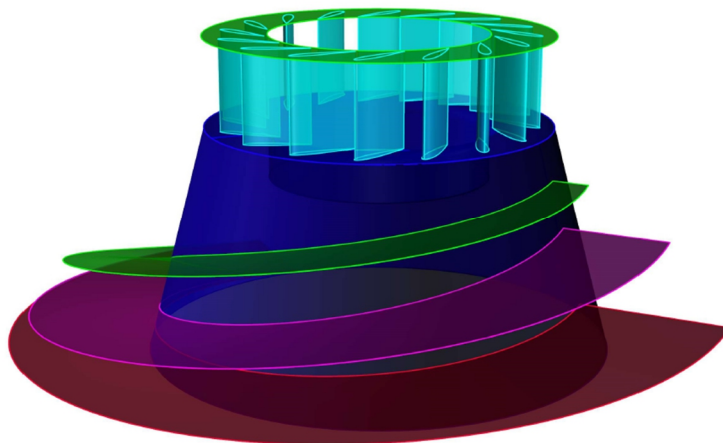
Označení parametru v modelu	Popis parametru	Jednotky	Rozsah hodnot
$\varphi_{0, \max}$	Hodnota maximálního úhlu obchvatu	[°]	$(0; 360>$
$\gamma$	Hodnota úhlu zkosení lichoběžníkového profilu spirály	[°]	$<0; 90)$
$a$	Parametr ovlivňující rychlost snižování plochy průřezů spirály	[-]	$(0; \infty)$
$X_{\text{spir}}$	Parametr ovlivňující snižování šířky lichoběžníkového průřezu. Výsledná hodnota $b_{\text{spir},n}$ v místě $\varphi_{0, \max}$ nesmí být větší než $b_{\text{spir},0}$	[-]	$<0; \infty)$

Protože pracovní prostředí s výsledným modelem je značně rozsáhlé a je na první pohled náročné najít souvislosti ve fungování modelu, byl pro představu fungování modelu vytvořen vývojový diagram, viz obrázek 3.3.



**Obrázek 3.3:** Vývojový diagram parametrického modelu betonové spirály. Zelené boxy charakterizují ručně zadávané hodnoty vstupních parametrů modelu, parametrický model jimi spouští výpočet.

Výstupem z parametrického modelu jsou křivky, které popisují vnitřní a vnější hranu betonové spirály. Tyto křivky ohraničují plochu dna betonové spirály. Pro ilustraci výstupů s různými hodnotami vstupních parametrů slouží *obrázek 3.4*.



**Obrázek 3.4:** Prostorový model, který obsahuje 3 varianty dna betonové spirály s maximálním obchvatem 220°. Varianty se liší hodnotami vstupních parametrů v parametrickém modelu betonové spirály.

## 3.2 Parametrický model rozváděcího kola

Parametrický model byl vytvářen v rámci této bakalářské práce za účelem urychlení procesu návrhu jednotlivých částí soustrojí pro nízkospádovou vertikální axiálně natékanou turbínu. Model také poslouží k edukativním účelům. Těžiště použití spatřuji v rychlém vytváření geometrie pro CFD výpočty. Dále jsou velice názorné případné kolize jednotlivých částí RK, například lopatka RK versus náboj OK. Celý parametrický model byl vytvořen, stejně jako parametrický model betonové spirály, v prostředí „Grasshopper®“.

Měnitelné parametry modelu jsou rozděleny do dvou základních skupin, a to do parametrů základních a speciálních.

### 3.2.1 Základní vstupní parametry parametrického modelu radiálního rozvaděče

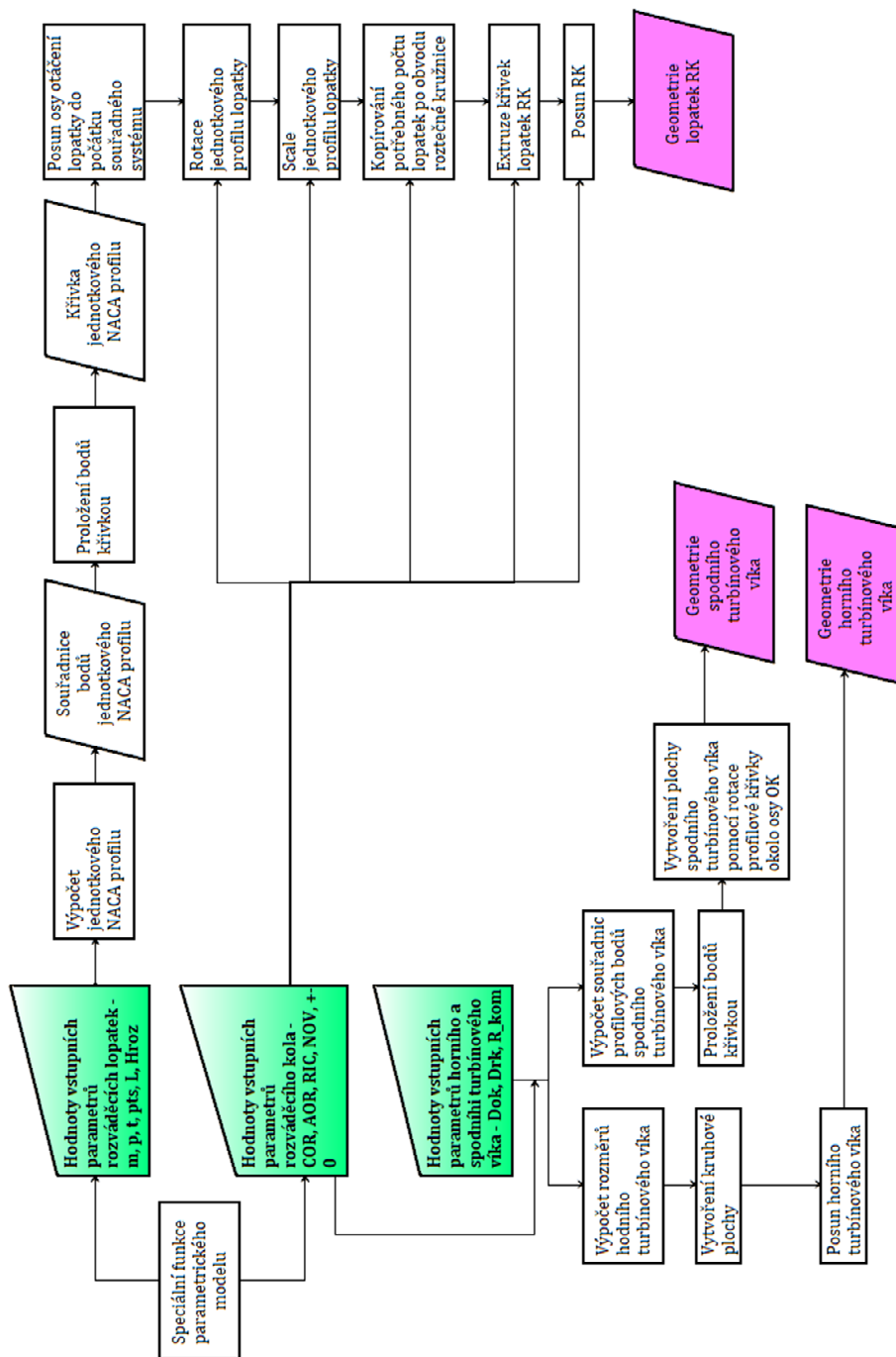
Základní parametry modelu zajišťují vstupní hodnoty pro funkce sloužící především ke generování rozváděcích lopatek dle výpočtu, jenž je popsán rovnicemi v kapitole 2.4.3. Proces generování lopatkových profilů lze ovlivnit parametry, které jsou uvedeny i s popisem v následující tabulce:

**Tabulka 3.2:** Přehled základních proměnných parametrů parametrického modelu RK.

Označení parametru v modelu	Popis parametru	Jednotky	Rozsah hodnot
m	Maximální vzepětí lopatky RK	[%]	<0; 9,5>
p	Pozice maximálního vzepětí lopatky	[%]	<0; 90>
t	Maximální tloušťka lopatky	[%]	<1; 40>
Center of rotation (COR)	Pozice bodu otáčení, kolem kterého se lopatka natáčí.	[-]	<0; 1>
pts	Počet bodů, pro které jsou počítány souřadnice lopatky	[ks]	<1; ∞>
L	Délka lopatky. Jedná se o koeficient zvětšení jednotkového profilu lopatky	[mm]	<1; ∞>
Angle of rotation (AOR)	Úhel natočení lopatky, který je definován jako ostrý úhel mezi střednicí profilu lopatky a poloměrem, který směřuje z osy otáčení OK do bodu otáčení lopatky.	[°]	<0; 360>
Radius in center (RIC)	Poloměr roztečné kružnice lopatek RK.	[mm]	<1; ∞>
Number of vanes (NOV)	Počet lopatek RK.	[ks]	<1; ∞>
H <sub>roz</sub>	Výška lopatky RK.	[mm]	<0; ∞>
± 0	Posun lopatek RK o požadovanou vzdálenost nad ±0 lokálního souřadného systému.	[mm]	<0; ∞>

Protože byl parametrický model vytvářen ve stejném softwarovém prostředí, tak i u tohoto modelu je výsledné pracovní prostředí značně rozsáhlé a není možné ho obsáhnout v této bakalářské práci. Z tohoto důvodu byl vytvořen vývojový diagram parametrického modelu, viz *obrázek 3.5*.





**Obrázek 3.5:** Vývojový diagram parametrického modelu RK. Zelené boxy charakterizují ručně zadávané hodnoty vstupních parametrů modelu, parametrický model jimi spouští výpočet.

### 3.2.2 Speciální funkce parametrického modelu radiálního rozvaděče

V úvodu kapitoly 3.1 byly zmíněny některé přednosti modelovacího prostředí „Grasshopper®“, konkrétně využití evolučního řešitele pro hledání řešení specifických problémů. Nástroj nazývaný „Galapagos“ byl v parametrickém modelu využit k řešení hned několika úloh. Přesný popis fungování tohoto nástroje je dostupný online. [9] Díky tomuto nástroji má parametrický model několik speciálních funkcí, které jsou popsány dále v této kapitole. Krom řešení evolučním algoritmem model dále generuje geometrii horního a spodního turbínového víka. I u těchto prvků modelu lze měnit vstupní parametry, ty jsou již detailně popsány v tabulkách 2.4 a 2.7.

#### 3.2.2.1 Nalezení úhlu natočení lopatek uzavřeného rozváděcího kola

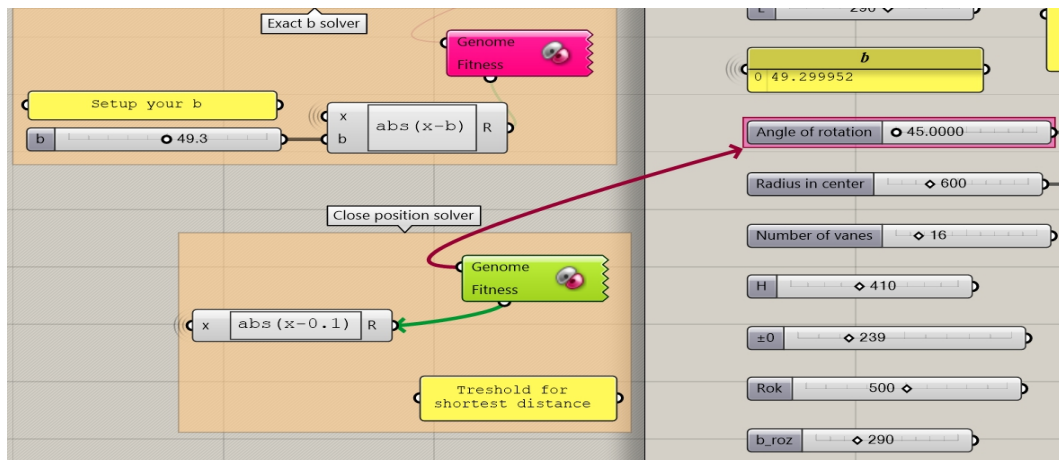
První problém řešený pomocí evolučního algoritmu, který používá nástroj „Galapagos“, spočíval v nalezení úhlu natočení rozváděcích lopatek RK, při kterém je rozváděč uzavřen.

Rozvaděč lze prohlásit za uzavřený, pokud jednotlivé lopatky RK jsou natočeny tak, že průtok mezi jednotlivými lopatkami je rovný téměř 0. Je tedy nutné nalézt úhel natočení lopatek, kdy i jejich vzájemná vzdálenost bude rovna téměř 0. Evoluční řešitel „Galapagos“ dokáže pouze maximalizovat nebo minimalizovat určitou hodnotu („Fitness“) na základě jednoho, či více parametrů („Genome“) ty slouží jako proměnné. Hodnota proměnného parametru je omezena zvoleným intervalem. Evoluční řešitel začne hledat buď největší nebo nejmenší požadovanou hodnotu, kterou mu umožní nastavený interval proměnného parametru. Dalším prvek, který ovlivňuje přesnost nalezeného řešení, je počet desetinných míst tohoto parametru. Čím více desetinných míst, tím se zvyšuje i výpočetní čas celé operace. Z tohoto faktu vyplývá, že je nejdříve nutné nalézt nejmenší vzdálenost mezi sousedními lopatkami RK.

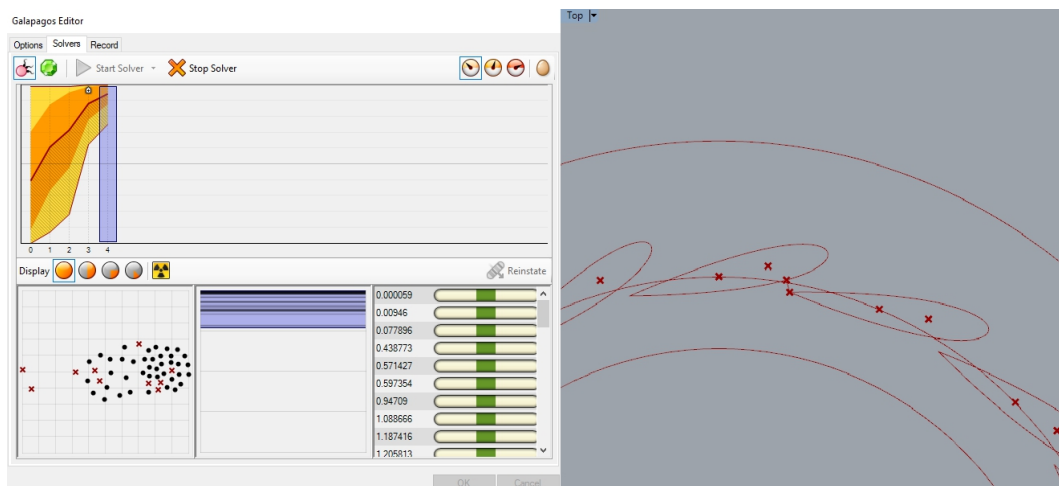
K nalezení nejmenší vzdálenosti mezi lopatkami RK při určitém natočení byl použit subskript napsaný v programovacím jazyce „C#“. Výstupem tohoto skriptu jsou 2 body na 2 zvolených křivkách, jež jsou k sobě nejbližší. Jakmile jsou definovány tyto 2 body, je možné měřit jejich vzájemnou vzdálenost. Právě tato vzdálenost je „Fitness“ hodnotou pro evoluční řešitel „Galapagos“. Nyní zbývá řešitel pouze nastavit pro minimalizaci této hodnoty a jako proměnný parametr („Genome“) byl nastaven parametr modelu „Angle of rotation“. Takto nastavený „Galapagos“ by našel úhel, při kterém je vzájemná vzdálenost dvou lopatek rovna 0. To je nežádoucí stav, jelikož vzájemná vzdálenost dvou křivek nabývá hodnoty 0 v každém průsečíku těchto křivek. Je tedy nutné zavést následující okrajovou podmínku:

$$0 = |x - x_w| \quad (3.1)$$

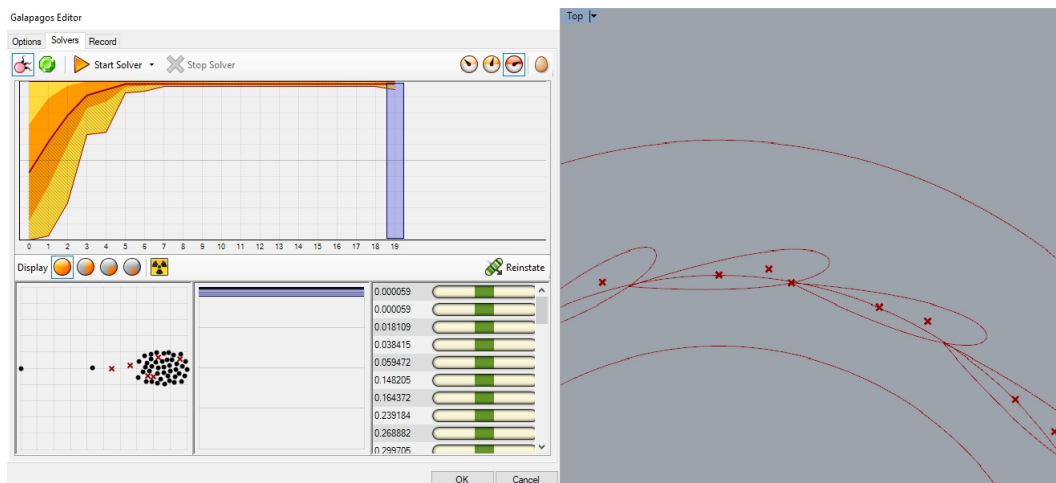
kde  $x$  je modelem vypočtená nejmenší vzdálenost mezi sousedními lopatkami a  $x_w$  je jejich požadovaná vzdálenost. Pokud nyní řešitel začne minimalizovat „Fitness“ hodnotu a dosáhne okrajové podmínky, znamená to, že  $x = x_w$ , což odpovídá hledanému řešení. Pro ilustraci fungování evolučního řešitele slouží obrázky 3.6, 3.7 a 3.8.



**Obrázek 3.6:** Výřez z pracovního prostředí „Grasshopper®“ s ukázkou zapojení evolučního řešitele k nalezení úhlu natočení lopatek, při kterém je rozvaděč uzavřen. Při tomto zapojení má proměnný parametr rozlišení 4 desetinná místa a požadovaná vzájemná vzdálenost lopatek  $x_w$  je 0,1 mm.



**Obrázek 3.7:** Vlevo evoluční řešitel hledající optimální hodnotu úhlu natočení lopatek pro splnění okrajové podmínky, vpravo půdorysný pohled na RK během hledání řešení.



**Obrázek 3.8:** Vlevo evoluční řešitel po dosažení okrajové podmínky dle možností stanoveného intervalu a rozlišení proměnného parametru, vpravo půdorysný pohled na uzavřený rozvaděč.

### 3.2.2.2 Stanovení přesné pozice bodu otáčení lopatky rozváděcího kola

Druhý problém je řešen obdobně evolučním řešitelem „Galapagos“. Tentokrát se jedná o stanovení přesné pozice bodu otáčení lopatky. U této úlohy byla stanovena podobná okrajová podmínka řešení jako v kapitole 3.2.2.1. Okrajová podmínka má tvar:

$$0 = |pos - pos_w| \quad (3.2)$$

kde  $pos$  je vypočtená pozice bodu otáčení lopatky dle parametru „Center of rotation“ a  $pos_w$  je požadovaná hodnota pozice bodu otáčení lopatky. Měněným parametrem, pomocí něhož se snaží řešitel splnit okrajovou podmínku, je „Center of rotation“. Ten udává pozici bodu otáčení lopatky.

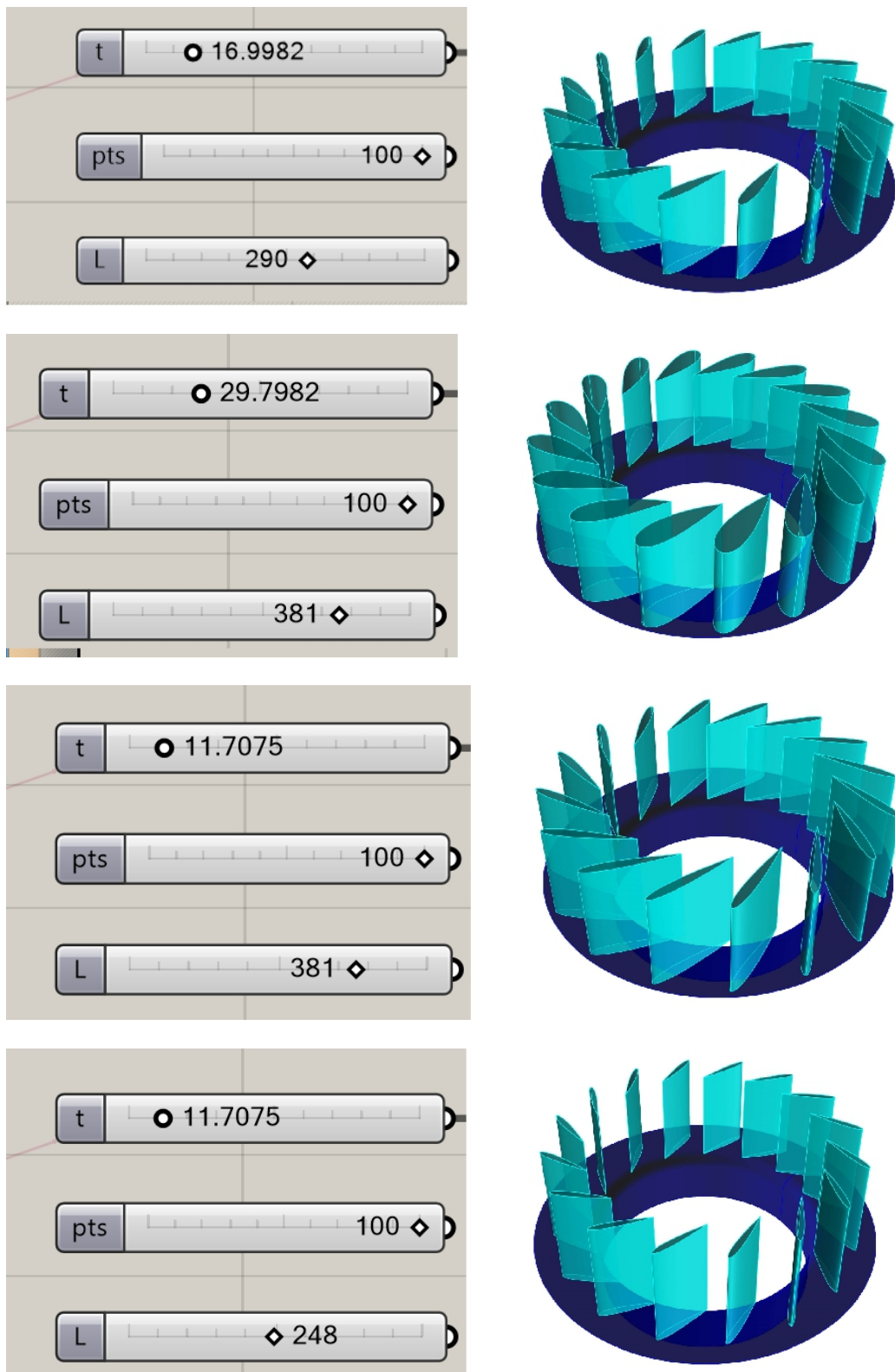
### 3.2.2.3 Stanovení přesné maximální šířky lopatky

Poslední speciální funkce je založena na stejném principu jako funkce popsaná v kapitole 3.2.2.2 pro hledání přesné pozice bodu otáčení lopatky, jen s rozdílem, že hledanou hodnotou je maximální šířka profilu lopatky. Nejdříve byl nalezen bod, jemuž přísluší maximální tloušťka profilu  $y_t$ , tato hodnota po vynásobení 2 slouží jako vstupní hodnota okrajové podmínky  $b_{max}$ . Poté řešitel upravuje hodnotu parametru „t“ tak, aby se co nejvíce přiblížil řešení následující okrajové podmínky:

$$0 = |b_{max} - b_{max,w}| \quad (3.3)$$

kde  $b_{max}$  je vypočtená hodnota maximální šířky lopatky a  $b_{max,w}$  je požadovaná maximální tloušťka profilu.

Fungování modelu ilustruje obrázek 3.9.



**Obrázek 3.9:** *Různá nastavení vstupních parametrů parametrického modelu RK s výslednou geometrií těchto nastavení.*

### 3.3 Geometrie pro CFD analýzu

V této části bakalářské práce bude přiblížena problematika tvorby prostorových modelů. Tyto modely následně slouží k CFD analýze. Veškerá geometrie vytvářená pro účely této bakalářské práce, byla vytvářena v softwarovém prostředí „Rhinceros®“. K rychlému generování geometrie při optimalizaci tvaru jednotlivých částí přiváděče se osvědčily parametrické modely popsané v kapitolách 3.1 a 3.2.

#### 3.3.1 Rozváděcí kolo

Aby bylo možné se zabývat optimalizací tvaru některých prvků hydraulického obvodu MVE, je zpočátku nutné stanovit fixní hodnoty parametrů RK. Optimalizace jednotlivých parametrů RK není předmětem této bakalářské práce.

Jako první se stanoví fixní hodnoty parametrů lopatek RK. Tyto hodnoty byly stanoveny po konzultaci s vedoucím této práce. Hodnoty parametrů lopatek RK definuje následující tabulka:

*Tabulka 3.3: Fixní hodnoty parametrů lopatek RK.*

Označení parametru	Popis parametru	Hodnota parametru	Jednotky
L	Délka lopatky	290,00	[mm]
b	Maximální šířka lopatky	49,30	[mm]
Místo největší tloušťky lopatky	Místo, kde je lopatka nejširší	87,41	[mm]
m	Maximální vzepětí lopatky	0,00	[-]
p	Pozice maximálního vzepětí	-	[mm]

Následně byly stanoveny hodnoty parametrů RK. Tyto hodnoty definuje následující tabulka:

*Tabulka 3.4: Fixní hodnoty parametrů RK.*

Označení parametru	Popis parametru	Hodnota parametru	Jednotky
Bod otáčení lopatky	Pozice osy, kolem které se lopatka natáčí	159,50	[mm]
Úhel dovřené lopatky	Úhel, při kterém je RK uzavřeno. Tento úhel je vztažen k poloměru OK, který prochází bodem otáčení lopatky	82,93	[°]
Nominální úhel lopatky	Stanovený výchozí stav natočení lopatek RK, odpovídající jmenovitému průtoku turbínou.	45,00	[°]
Délka lopatky v komoře OK	Délka části lopatky, která zasahuje do prostoru OK	71,75	[mm]
Počet lopatek RK	Počet lopatek RK	16	[ks]

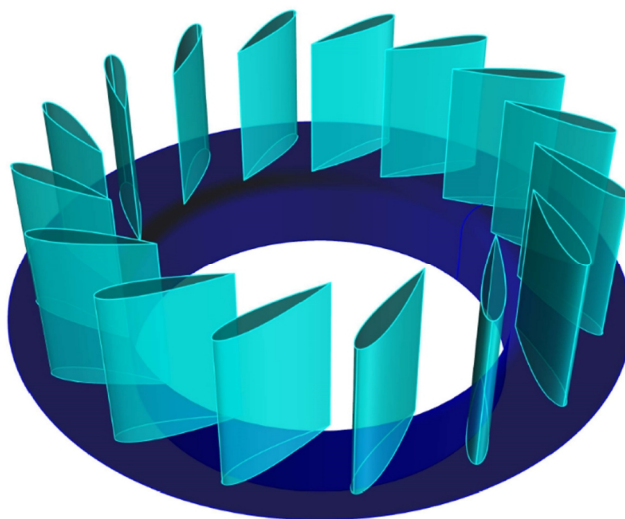
Roztečná kružnice RK	Poloměr kružnice, která prochází osami otáčení lopatek RK	1200,00	[mm]
H <sub>roz</sub>	Výška RK	410,00	[mm]

Pro úplnou definici geometrie RK je ještě nutné provést fixaci hodnot parametrů spodního turbínového víka. Horní turbínové víko nebude dále uvažováno v této práci, jelikož návrh kašny a následně i spirály uvažuje umístění RK u stropní konstrukce. Pevné hodnoty spodního turbínového víka popisuje následující tabulka:

*Tabulka 3.5: Fixní hodnoty parametrů spodního turbínového víka.*

Označení parametru	Popis parametru	Hodnota parametru	Jednotky
D <sub>ok</sub>	Průměr oběžného kola	1000,00	[mm]
D <sub>rk</sub>	Vnější průměr spodního turbínového víka při určitém natočení lopatek RK	1580,00	[mm]
R <sub>kom</sub>	Poloměr přechodu mezi spodním víkem a válcovou komorou OK	60,00	[mm]

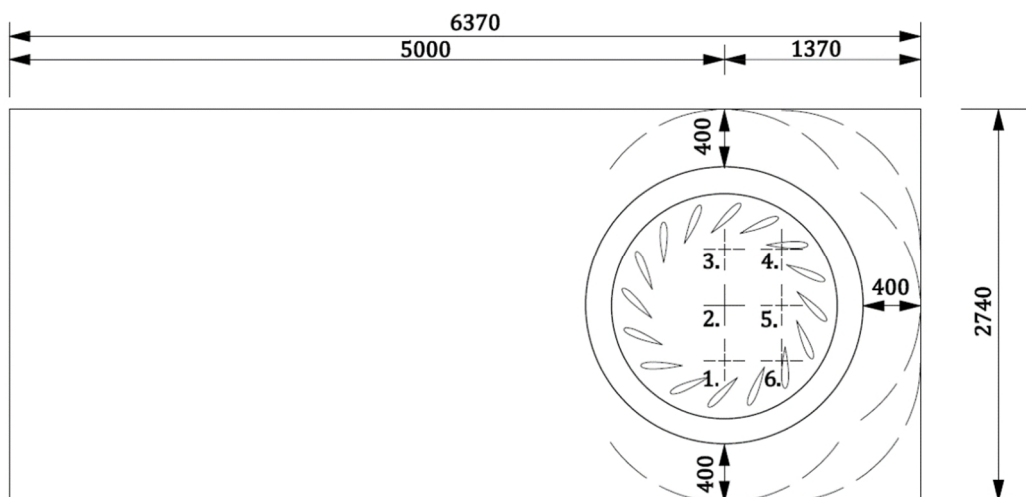
Nyní je geometrie RK plně definována a je možné tyto hodnoty zadat do parametrického modelu RK a vygenerovat kýžený prostorový model RK. Na *obrázku 3.10* je vidět výsledný prostorový model.



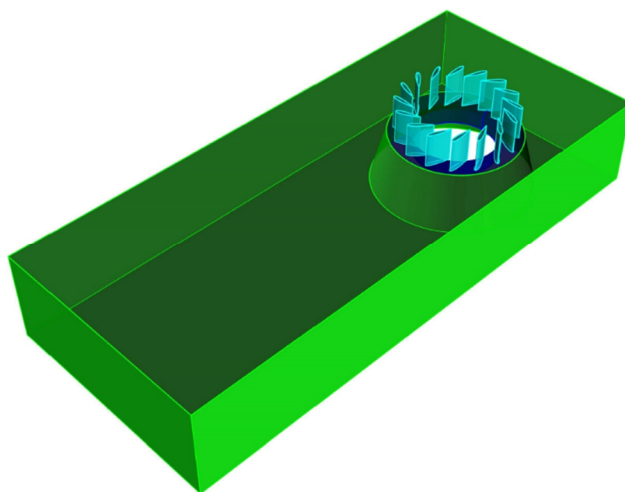
*Obrázek 3.10: Prostorový model RK, jež vygeneroval parametrický model RK.*

### 3.3.2 Kašnový přivaděč bez spirály

Pro prvotní CFD analýzu bylo vytvořeno 6 variant přivaděče kašnového typu s obdélníkovým půdorysem i průřezem. Jednotlivé varianty se liší pouze umístěním stroje v kašně. Rozměr kašny je 6,37 m x 2,74 m x 1,085 m (d/š/v). Díky analýze těchto variant bylo následně vybráno vhodné umístění turbíny v kašně a bylo tak možné modelovat řešení s betonovou spirálou. Výsledky CFD analýzy popisuje samostatná kapitola dále v této práci. Jednotlivá umístění stroje po půdoryse kašny vyobrazuje *obrázek 3.11*.



**Obrázek 3.11:** Půdorysné schéma betonové kašny. Ve schématu je naznačeno 6 poloh umístění osy OK (symbol kříže s číslem).



**Obrázek 3.12:** Prostorový model 2. polohy bez stropní konstrukce.



### 3.3.3 Kašnový přivaděč se spirálou

Na základě výsledků CFD analýzy 6 základních variant a konzultace s vedoucím bakalářské práce bylo pro model kašnového přivaděče se spirálou vybráno excentrické umístění osy turbíny. Umístění je pro všechny řešení se spirálou v 1/5 šířky kašny. Aby byla zachována rychlost proudění kapaliny v přivaděči, byl brán ohled i na zachování hodnoty plochy nátoku do přivaděče. Plocha vtoku do přivaděče byla zafixována na hodnotě 2,97 m<sup>2</sup>. Vtok přivaděče má tedy rozměry 2,060 m x 1,442 m (š/v).

Pro vytvoření představy o tom, jak je proudění ve spirále náchylné na změnu některých parametrů, jež jsou uvedeny v *tabulce 3.1*, byly vytvořeny 4 počáteční geometrie. Varianty se od sebe liší hodnotami vybraných parametrů, ale umístění stroje v kašně i rozměry vtoku zůstávají pro všechny varianty stejné. U všech základních variant se jedná o spirálu bez ostruhy. Následující tabulka definuje vybrané parametry, které jsou pro všechny počáteční varianty neměnné:

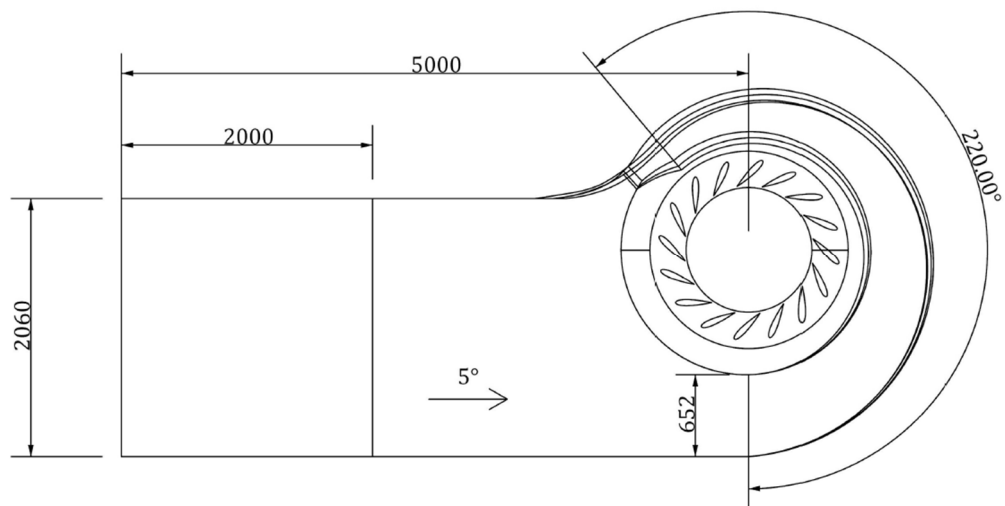
*Tabulka 3.6: Fixní hodnoty vybraných parametrů pro všechny varianty geometrie kašnového přivaděče se spirálou.*

Označení parametru	Popis parametru	Hodnota parametru	Jednotky
$\gamma$	Zkosení lichoběžníkového profilu spirály	15	[°]
$\varphi_0, \max$	Maximální úhel obchvatu spirály	220	[°]
Hroz	Výška RK	410	[mm]
Hin	Výška přivaděče	1442	[mm]
Bin	Šířka přivaděče	2060	[mm]
Spoč	Plocha vstupního profilu spirály	79543	[mm <sup>2</sup> ]
b0	Vzdálenost vnitřního obrysu spirály ve vstupním profilu od osy stroje	996	[mm]
bspir,0	Šířka dna spirály ve vstupním profilu spirály	652	[mm]

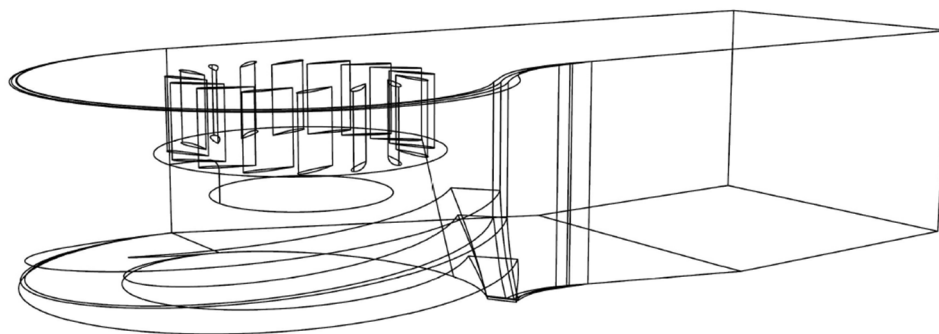
Následující tabulka definuje hodnoty vybraných parametrů betonové spirály pro základní varianty modelu:

*Tabulka 3.7: Hodnoty proměnných parametrů betonové spirály počátečních variant modelu.*

Označení varianty	a [-]	$x_{spir}$ [-]
Spir_a01_x100	0,1	100
Spir_a75_x100	7,5	100
Spir_a35_x100	35	100
Spir_a75_x120	7,5	120



**Obrázek 3.13:** Půdorysné schéma kašnového přivaděče se spirálou. Na schématu jsou viditelné všechny 4 počáteční varianty spirály.



**Obrázek 3.14:** Axonometrický pohled na všechny 4 varianty kašny se spirálou.

### 3.4 Výpočetní síť pro CFD analýzu

Po vytvoření geometrie jednotlivých variant kašen je nyní zapotřebí vytvořit výpočetní síť pro CFD analýzu. Veškerá výpočetní síť pro účely této bakalářské práce pochází ze softwarového prostředí „ANSYS ICEM CFD“, s výjimkou výpočetní sítě RK. Výpočetní síť RK byla poskytnuta Ing. Jiřím Součkem a je dále rozebírána v příslušné kapitole níže.

Významnou část výpočetní sítě tvoří prizmatické elementy. Detailní popis této problematiky není předmětem této práce, proto nebude detailněji popisována. Pro výpočet velikosti prvního elementu byla použita online kalkulačka. [10] Velikost prvního elementu byla kalkulačkou stanovena na 3 mm. Pro celkový charakter úlohy byla po konzultaci s vedoucím této práce velikost prvního elementu pozměněna na 2 mm.

Výpočetní síť všech variant se dělí na 4 části. Tyto části jsou i stejně pojmenované pro možnost používání nahrávání skriptů. Nahrané skripty mají za úkol zrychlit celý proces tvorby výpočetní sítě. Skript umožňuje nahrát pohyb v softwaru a pak jej následně přehrávat, takže je možné nahrát nastavování sítě a následně tento skript přehrát u všech geometrií. Rozdělení sítě na 4 části ukazuje *obrázek 3.15*. Na obrázku jsou také patrné zvolené velikosti prvků sítě jednotlivých částí. Část s názvem „SUKNE“ je část kužele pod RK. Část s názvem „RK“ slouží pro připojení výpočetní sítě RK.

Part	Prism	Hexa-core	Maximum size	Height	Height ratio	Num layers
__SHELL_1_1	<input type="checkbox"/>		0		1.2	10
__SHELL_1_1_MATPOINT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
KASNA_WALL	<input checked="" type="checkbox"/>		0.1	0.002	1.2	10
RK	<input type="checkbox"/>		0.02	0	1.2	10
SUKNE	<input checked="" type="checkbox"/>		0.03	0.002	1.2	10
VTOK	<input type="checkbox"/>		0.1	0	1.2	10

Show size params using scale factor  
 Apply inflation parameters to curves  
 Remove inflation parameters from curves

Highlighted parts have at least one blank field because not all entities in that part have identical parameters

**Obrázek 3.15:** Nastavení jednotlivých částí sítě. Sloupec s názvem „Maximum size“ charakterizuje největší možný element povrchové sítě, sloupec Height výšku prvního elementu, sloupec „Height“ ratio charakterizuje koeficient rychlosti růstu prizmatické vrstvy s každou vrstvou a sloupec „Num layer“ definuje počet vrstev prizmatické sítě.

Ve všech modelech bylo také nastaveno lokální zhuštění výpočetní sítě v okolí RK pro zvětšení rozlišení výpočtu v místech, kde bude docházet k prudkým změnám charakteru rychlostního pole.

Po prvním uskutečněném výpočtu, s přihlédnutím na výpočetní čas, byla celá síť u všech variant modelů zjemněna za pomoci globálního měřítka sítě na hodnotu 0,5. Tím došlo ke zvětšení rozlišení celého výpočtu. Průběh výpočtu je diskutován dále v této práci.

### 3.4.1 Výpočetní síť rozváděcího kola

Výpočetní síť rozváděcího kola byla vytvořena v softwaru „TurboGrid“. Síť byla vytvořena jako strukturovaná a byla vytvořena pouze pro jednu lopatku RK. Síť se následně nahrála do „CFX-PRE“, kde byla rozkopírována 15 x. Tím se dosáhlo celku RK. Toto řešení se ukázalo jako nejméně náročné pro tento typ úlohy. Síť byla, podobně jako u výpočetní sítě pro zbytek modelu, vytvořena nejdříve hrubá a následně se přistoupilo k jejímu zjemnění. Výpočetní síť poskytl Ing. Jiří Souček.

### 3.4.2 Výpočetní síť přivaděče

Postup tvorby výpočetní sítě je pro řešení bez spirály a se spirálou identické. Celá výpočetní síť byla u všech variant tvořena jako nestrukturovaná, především pro nesymetričnost modelů a pro časovou náročnost tvorby strukturované výpočetní sítě. Kvalita, kterou představuje strukturovaná síť, byla zastoupena jemnější výpočetní sítí. Tímto krokem došlo ke zvýšení počtu elementů sítě a ke zvýšení výpočetního času, ale délka výpočtu s jemnou sítí byla únosná. Proto nebylo nutné vytvářet strukturovanou síť.

V prvním kroku po nastavení výpočetní sítě, je nutné vytvořit síť povrchovou. Jako typ povrchové sítě byl zvolen „All Tri“ a metoda generování povrchové sítě „Patch independent“. Při tomto nastavení je povrchová síť tvořena výhradně trojúhelníky různých velikostí. Velikost těchto prvků je shora omezena nastavenou maximální velikostí prvku. Povrchová síť z trojúhelníků výborně dokáže slušně kopírovat i složité tvary. Proto je pro tento typ úlohy nanejvýš vhodná. Výsledná povrchová síť byla „vyhlazena“ a došlo tak ke zlepšení celkové kvality sítě.

Po vytvoření povrchové výpočetní sítě následuje tvorba sítě objemové. Jako typ sítě byl zvolen „Tetra/Mixed“ a metoda generování této sítě jako „Quick (Delaunay)“. Tato varianta umožňuje generovat objemovou síť z již vygenerované povrchové sítě. Hodnota největšího přípustného elementu je 64 m. Při generování sítě dochází k hrubému pokrytí modelu elementy, ty se následně dělí na menší, dle definovaných oblastí. Výsledná síť byla také vyhlazena.

Posledním krokem při vytváření sítě tímto způsobem je tvorba prizmatické sítě. Prizmatická síť byla generována pro oblast stěn a kuželu RK. Počet vrstev elementů byl zafixován na hodnotě 10, a to pro všechny modely.

Počet elementů výpočetní sítě se u všech variant pohyboval okolo 7,5 milionů, počet uzlů se pohyboval okolo 4 milionů. Tyto hodnoty zahrnují počet elementů a uzlů výpočetní sítě RK.

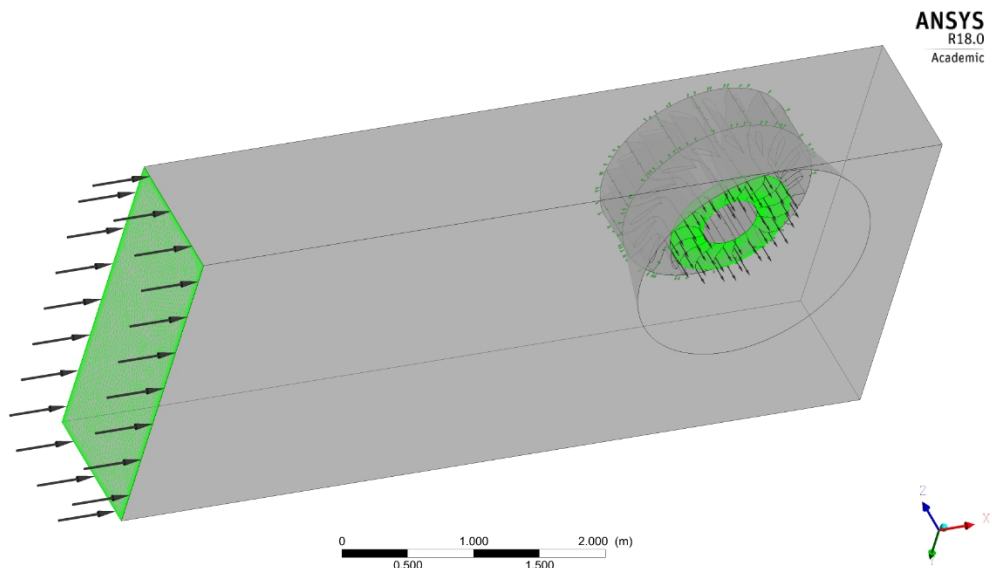
### 3.5 CFD analýza

Protože výsledný tvar konstrukce přivádějící vodu na OK turbíny je klíčový z hlediska budoucího fungování celého konceptu MVE, nelze se spoléhat pouze na návrhové postupy, jak je uvádí literatura. Konstrukce tvarující tok kapaliny jsou často velice náročné z hlediska jejich realizace, tudíž jsou i ekonomicky nákladné. Je tedy na místě návrh podobné konstrukce ověřit fyzikálním nebo matematickým modelováním, případně kombinací obojího. Dnešním trendem je modelování matematické pro jeho relativní jednoduchost a názornost. Přesto je však nutné přistupovat k výsledkům matematického modelu velice obezřetně, jelikož k ovlivnění výpočtu může dojít již u chybně vytvořené výpočetní sítě. V této části bakalářské práce bude popsáno nastavení fyzikálních parametrů matematického modelu, definování okrajových podmínek a nastavení samotného výpočtu. Veškeré výpočty CFD byly realizovány za pomoci softwarového prostředku „ANSYS CFX“

#### 3.5.1 Okrajové podmínky výpočtu

Předpokladem celého výpočtu je tlakový režim proudění v přiváděči. Proto byla jako horní okrajová podmínka nastavena možnost „Normal Speed“. Toto nastavení způsobí, že zadaná hodnota rychlosti bude normálou pro každý element sítě na vtokové části. Hodnota rychlosti byla nastavena na  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Popis turbulence definuje nastavení „Medium (Intensity = 5 %)“.

Výstupní okrajovou podmínkou je tlaková podmínka výtoku v oblasti lopatek OK s nastavením „Average Static Pressure“ a nastavenou hodnotou tlaku 0 Pa.



**Obrázek 3.16:** Pohled na 1. variantu kašny bez spirály zespodu. Zeleně jsou zvýrazněné okrajové podmínky výpočtu. Vlevo vstupní okrajová podmínka, vpravo výstupní okrajová podmínka.

### 3.5.2 Nastavení fyzikálních parametrů výpočtu

Celý výpočet byl nastaven jako ustálený stav proudění a jako model turbulence bylo zvoleno nastavení „*Shear Stress Transport*“ s automatickou stěnovou funkcí. Všechny varianty výpočtu byly řešeny jako jednofázové proudění, tedy pouze proudění vody. Z tohoto předpokladu vyplývá, že v celém přivaděči bylo uvažováno tlakové proudění kapaliny. Jako proudící kapalina byla zvolena voda o konstantní teplotě 10 °C. Nastavení kapaliny neuvažuje stlačitelnost. Nastavení stěn je jako „*No Slip Wall*“ a drsnost stěny jako „*Smooth Wall*“. Takto nastavená drsnost stěn reprezentuje hladký povrch.

### 3.5.3 Nastavení výpočtu

Řešitel pro všechny varianty nesl toto nastavení: Advection scheme – High resolution, Turbulence numerics – High Resolution. Maximální počet iterací byl po konzultaci s vedoucím bakalářské práce fixován na hodnotě 300. Dále bylo nastaveno: Timescale control – Automatic, Length scale option – Conservative, Timescale factor – 2.

Jako konvergenční kritérium bylo zvoleno „*RMS (Root Mean Square)*“. Pro typ této úlohy je vhodné nastavit cílovou konvergenci reziduí na hodnotu  $1 \cdot 10^{-5}$ .

Výpočet probíhal na školním serveru 147.32.134.250 a pro výpočet bylo využito vždy 16 z 24 jader procesoru. Takto nastavené výpočty trvaly od 1 do 5 hodin. Ukázalo se, že výpočetní čas se značně odvíjel od charakteru proudění v kašně. Pokud zde docházelo k nepříznivým jevům, tak výpočet v některých případech nebyl schopen dokonvergovat.

## 3.6 Vyhodnocení výsledků výpočtů prvotních variant

V tomto úseku bakalářské práce bude definováno hodnotící kritérium vhodnosti jednotlivých variant přivaděče. Dále budou zhodnoceny konvergence výpočtů a jejich výsledky pro vybrané prvotní návrhy.

### 3.6.1 Stanovení hodnotícího kritéria

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.1 hlavním cílem modelování přivaděče je zajistit co nejvíce symetrické natékání na RK turbíny, aby nedocházelo k přílišným ztrátám nebo k přílišnému excentrickému zatěžování OK turbíny. Z tohoto poznatku tedy vyplývá, že hlavním hodnotícím kritériem musí být symetričnost nátoky po obvodu RK. Pro vyhodnocení tohoto jevu se jako vhodná jeví směrodatná odchylka průtoku mezi jednotlivými lopatkami RK po celém obvodu RK. Směrodatnou odchylku definuje následující vzorec:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.4)$$

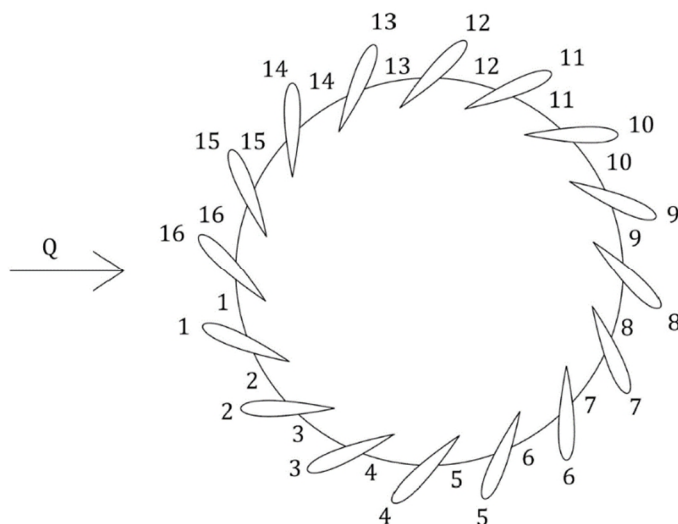
kde  $n$  je počet naměřených hodnot,  $x_i$  je naměřená hodnota a  $\bar{x}$  je aritmetický průměr naměřených hodnot.

Pro získání průtoku mezi jednotlivými lopatkami bylo nutné nejdříve vypočítat v „CFX-Post“ hodnotu hmotnostního průtoku mezi jednotlivými lopatkami. Po získání hodnoty hmotnostního průtoku převedeme průtok na průtok objemový. Převod hmotnostního průtoku na průtok objemový je možný za pomoci následující rovnice:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \quad (3.5)$$

kde  $Q_v$  je objemový průtok [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $Q_m$  je hmotnostní průtok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ] a  $\rho$  je objemová hmotnost kapaliny [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Pro přehlednost prezentování výsledků bylo zavedeno číslování lopatek RK a prostoru mezi nimi, jak znázorňuje *obrázek 3.17*.



**Obrázek 3.17:** Půdorysné schéma RK s číslováním lopatek RK a rovin na kterých byl měřen hmotnostní průtok.

Pro představu o symetričnosti nátokových podmínek na RK byly pro jednotlivé varianty sestrojeny polární grafy, kam byly hodnoty průtoků vyneseny.

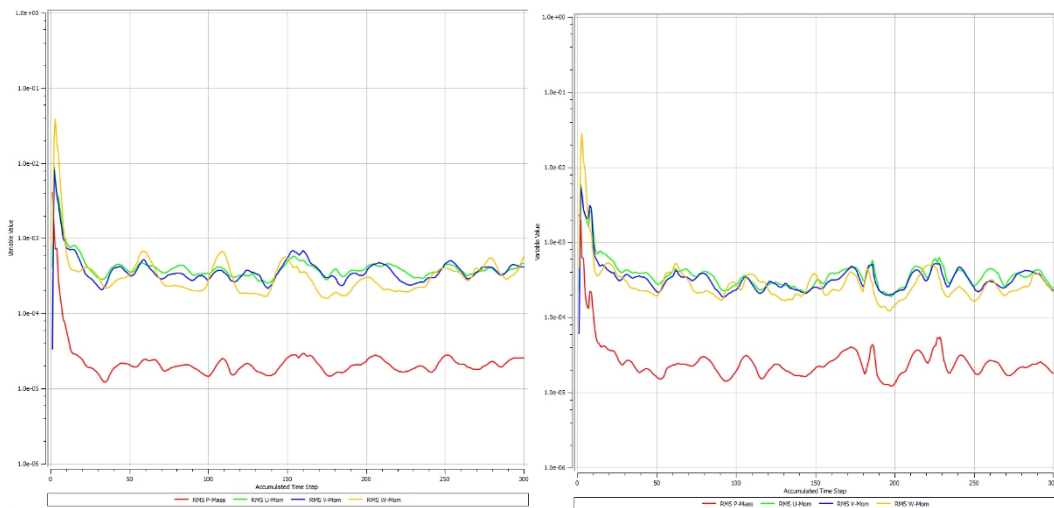
### 3.6.2 Vyhodnocení CFD analýzy pro betonovou kašnu bez spirály

Všechny varianty umístění osy stroje, jak je znázorněno na *obrázku 3.11*, prošly CFD výpočtem. Jak už bylo v této práci zmiňováno, tyto varianty sloužily především k ověření poznatků z literatury [2] o umístění turbíny v betonové kašně.

Z výsledků výpočtů je patrné, že obdélníkový půdorys kašny se jeví jako velice nevhodný, kvůli vzniku „mrtvých míst“. Že jsou navržené varianty nadměru nevhodné, bylo zjevné již z průběhu konvergence reziduí, kdy i u relativně správného umístění stroje docházelo ke značné nestabilitě výpočtu. Nestabilita výpočtu je pravděpodobně dána častým výskytem pulzujících úplavů, které ustálený model nedokáže postihnout. Výskyt těchto jevů je zmiňován již v *kapitole 2.1*.

#### 3.6.2.1 Porovnání hrubé a jemné výpočetní sítě

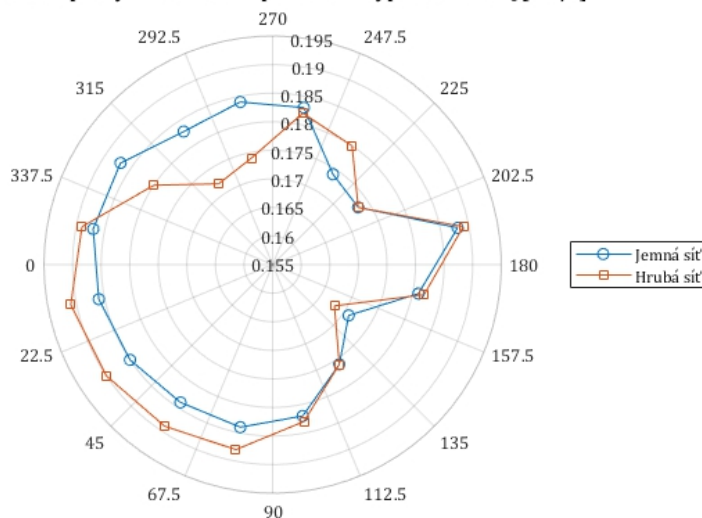
Jako první verze byla vypočtena 2. varianta geometrie s hrubší sítí. Hrubá síť má 1 693 741 elementů. Po vyhodnocení byla výpočetní síť zjemněna na hodnotu globálního měřítka sítě 0,5, jemnější síť tak má 7 315 818 elementů. Jak je z *obrázku 3.18* patrné, tak hrubost sítě má značný vliv již na průběh samotné konvergence reziduí. Rozdíl v rozlišení výpočtů je znatelný i ze směrodatné odchylky průtoku mezi jednotlivými lopatkami RK. Zatímco při hrubé síti je směrodatná odchylka rovna  $7,12 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , tak při jemné síti se směrodatná odchylka dostává na hodnotu  $5,17 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tento rozdíl je patrný také z *grafu 3.1*.



**Obrázek 3.18:** Porovnání konvergence reziduí. Vlevo hrubá síť, vpravo síť zjemněná.

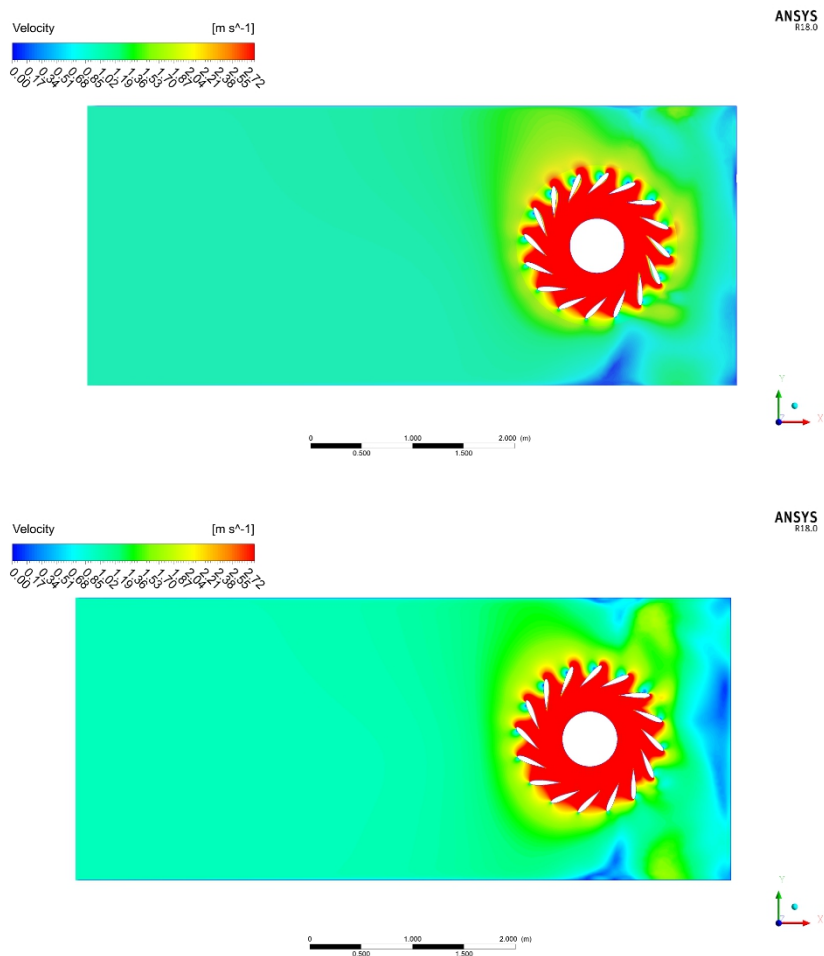


**Kašna bez spirály - 2. varianta - porovnání výpočetní sítě Q [m3/s]**



**Graf 3.1:** Porovnání průtoků ve 2. variantě návrhu umístění stroje, při použití hrubé a jemné výpočetní sítě.

Protože výpočetní čas s jemnou sítí je stále únosný, byla pro všechny návrhy dále použita pouze zjemněná výpočetní síť.



**Obrázek 3.19:** Srovnání rychlostního pole v 1/2 výšce RK 2. varianty. Hrubá síť (nahore) a jemná (dole).

Z obrázku 3.19 je rozdíl v hrubosti sítě patrný nejcitelněji. Především u zadní stěny (vpravo) je na variantě s jemnější sítí vidět oblast s téměř nulovou rychlostí, kdežto u varianty s hrubší sítí, se tato oblast téměř nerozvinula. Je ale nutné podotknout, že se charakter proudění může po výšce RK měnit. Přesto je však použití jemnější sítě zcela opodstatněné.

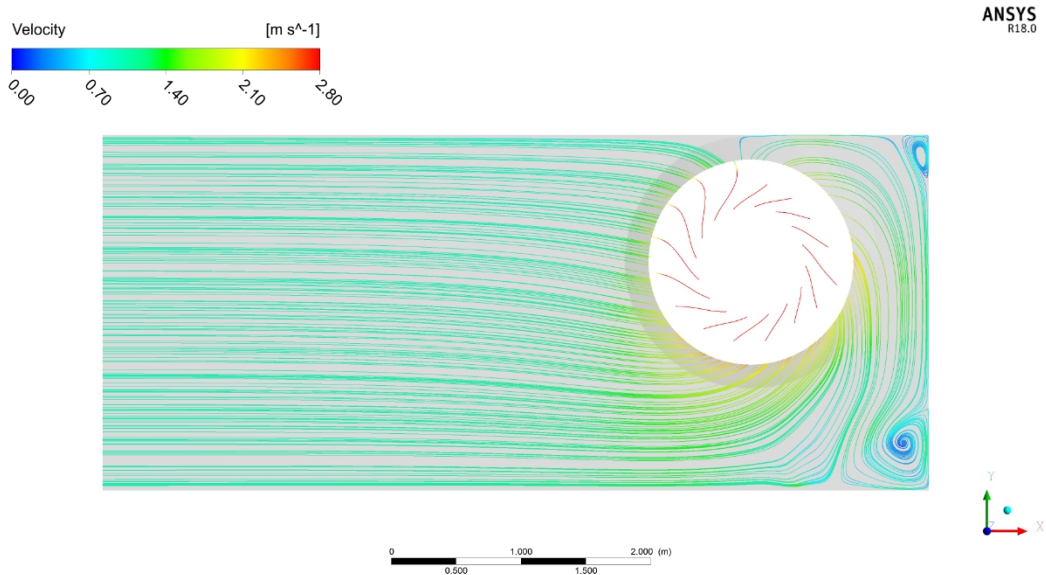
### 3.6.2.2 Vyhodnocení varianty 1 – 6

Jak uvádí literatura [2] je zjevné, že umístění stroje ve variantách 1, 2, 5, 6 se jeví jako nevhodné. Pokud se ale podíváme na směrodatné odchyly průtoku v tabulce 3.8, tak variantní návrhy číslo 1 a 5 mají nejmenší hodnotu směrodatné odchyly průtoku ze všech navržených variant. Zde je nutné připomenout, že při výpočtu nedošlo ani u jedné ze 6 variant během 300 iterací k požadované konvergenci reziduí, přesto 5. varianta dosáhla nejlepší konvergence výpočtu. Výpočet byl nastaven tak, že se po 300 iteracích ukončil. Proto nelze s jistotou říci, že bychom tuto hodnotu směrodatné odchyly dostali i po pokračování výpočetního cyklu. Navíc je umístění stroje v 1. variantě naprosto nelogické z hlediska směřování lopatek RK. Voda v této variantě musí RK spíše překonávat, než že by docházelo k hladkému natékání.

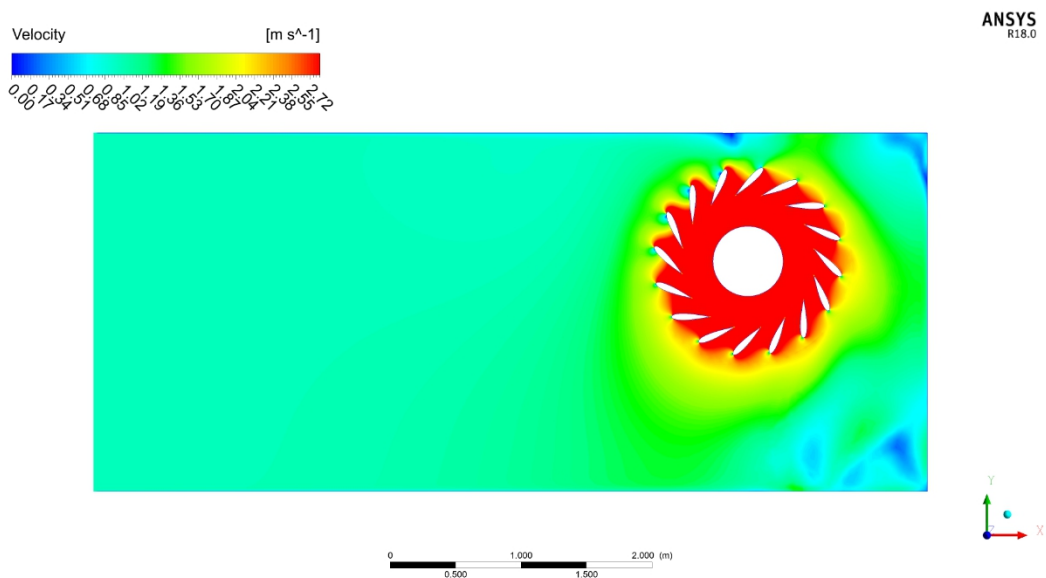
**Tabulka 3.8:** Směrodatné odchyly průtoku pro 6 variant návrhů betonové kašny bez spirály.

Označení varianty	1	2	3	4	5	6
Směrodatná odchyly průtoku [l*s-1]	2,89	5,17	3,34	8,32	2,90	7,39

Velice dobrých výsledků z hlediska hodnoty směrodatné odchyly průtoku dosáhla dle očekávání varianta číslo 3. Jedná se totiž o obdobné umístění turbíny, jako doporučuje literatura [2]. Pokud se podíváme na obrázek 3.20, je zřejmé, že dalším krokem pro zlepšení nátokových poměrů by byla úprava kašny do spirálního půdorysu kašny. Tato úprava by se uskutečnila betonáží míst, kde jsou dle obrázku 3.20 nulové rychlosti proudění. V těchto místech také očekáváme vznik nestabilních úplavů, které jsou velmi nežádoucím jevem. Tento poznatek opět potvrzuje literatura [2].

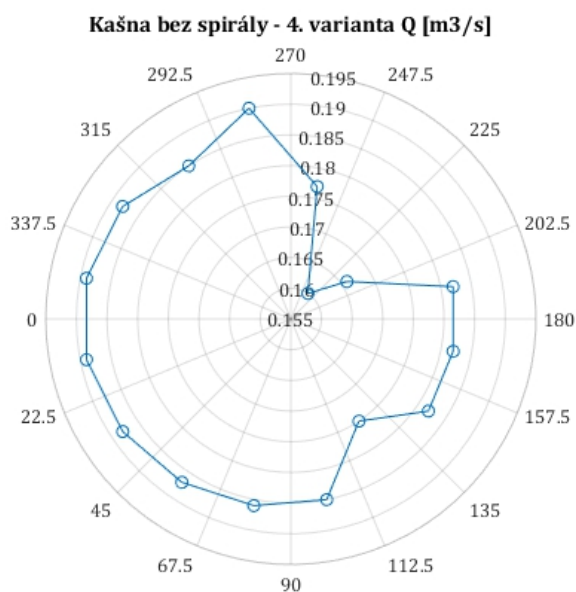


**Obrázek 3.20:** Proudnicе nesoucí informaci o rychlostech proudění v kašně v rovině 1/2 výšky RK. Varianta 3.

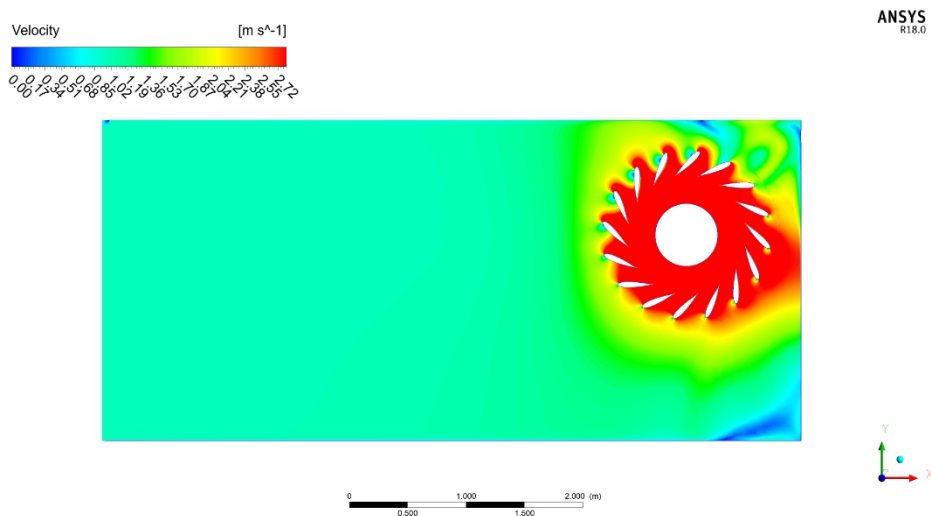


**Obrázek 3.21:** Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, 3. varianta.

Z hlediska hodnot směrodatných odchylek dopadly nejhůře varianty 4 a 6. U varianty číslo 6 došlo k nejhorší konvergenci reziduí, což bylo, vzhledem k umístění turbíny, v souladu s očekáváním. Varianta má stejně jako varianta 1 vzhledem ke svému umístění špatně orientované lopatky RK. Při pohledu na *obrázek 3.22* došlo k takto špatným nátokovým poměrům u 4. varianty kvůli nepřiměřenému zúžení průtočného profilu v oblasti u zadní stěny, což, pokud vezmeme v úvahu rovnici kontinuity, způsobilo skokové zvýšení rychlosti proudění vody v tomto zúženém profilu. Po tomto skokovém nárůstu rychlosti proudění došlo opět ke zpomalení v důsledku výtoku do prostoru většího za tímto zúžením, což zapříčinilo vznik velkých úplavů v těchto místech. Kvůli úplavům došlo také k velké nesymetričnosti natékání mezi lopatkami 11 a 8, viz *graf 3.2*.

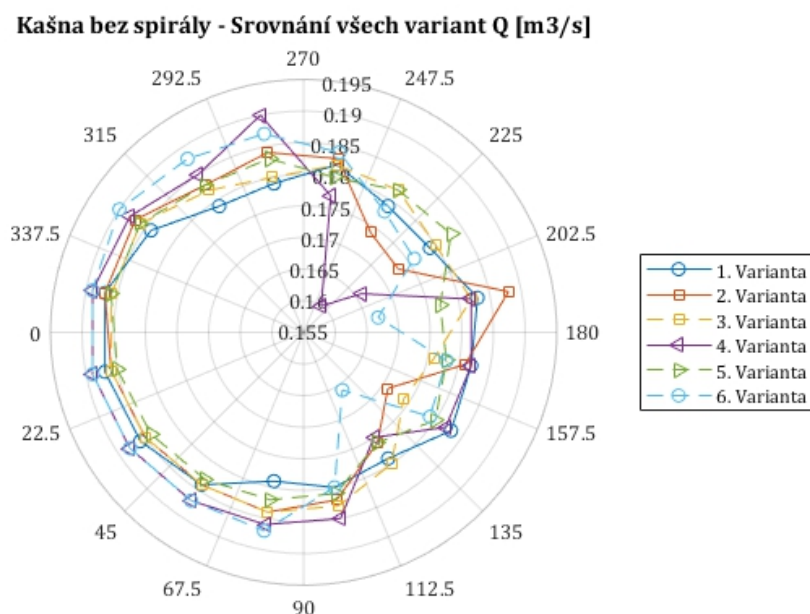


**Graf 3.2:** Rozdělení průtoku po obvodu RK, 4. varianta.



**Obrázek 3.22:** Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, 4. varianta.

Aby bylo možné dosáhnout lepších nátokových podmínek, je zcela zjevně nutné upravit tvar kašny. Pro další úpravy tvaru kašny bude turbína osou umístěna v 1/5 šířky vtoku kašny, viz *obrázek 3.13*. Jak se ukazuje dle literatury [2] a také dle výsledků provedené CFD analýzy, je přechod tvaru do tvaru spirály zcela na místě. Porovnání nátokových podmínek všech variant je vidět na *grafu 3.3*. Z tohoto grafu také vyplývá, že problémovou oblastí jsou již několikrát zmiňované rohy kašny.



**Graf 3.3:** Srovnání nátokových podmínek všech variant.

Obdélníkový půdorys kašny může mít své opodstatnění u malých projektů, kde modelový návrh optimálního tvaru kašny není ekonomicky možný. Pokud by se jednalo o takový projekt, zdá se být vhodné se držet umístění osy stroje zhruba v 1/3 šířky kašny, stejně jako uvádí literatura [5]. Dále by k lepším nátokovým poměrům určitě přispělo vybetonování rohů kašny. Veškeré výsledky jsou součástí přílohy.

### 3.6.3 Vyhodnocení CFD analýzy pro betonovou kašnu se spirálou

Pomocí parametrického modelu bylo vytvořeno několik modelů spirál. Spirály se liší rychlostí zmenšování plochy spirály nebo rychlostí zúžení dna betonové spirály. Pro citlivostní analýzu byly navrženy 4 základní spirály, které následně prošly CFD analýzou.

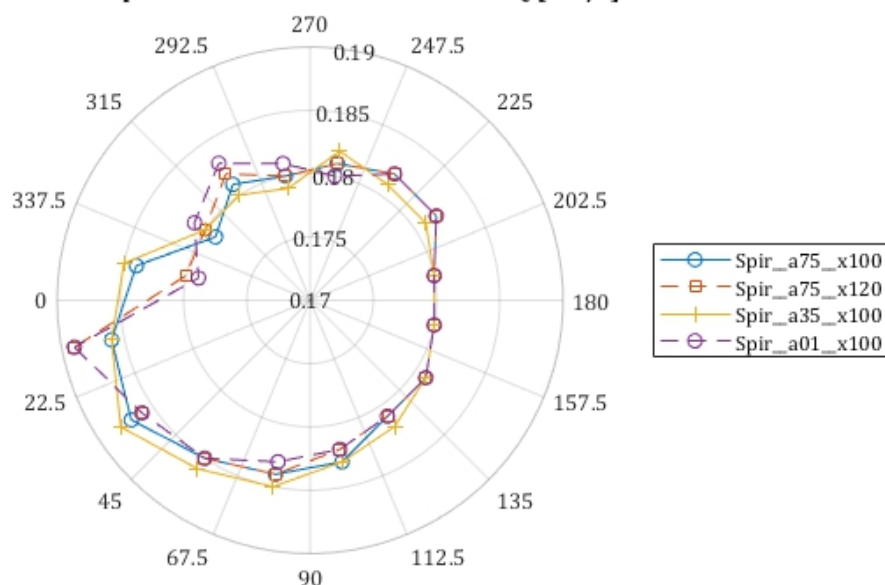
Jak je patrné z *tabulky 3.9*, tak hodnoty směrodatných odchylek se pro jednotlivé varianty od sebe liší pouze minimálně. Krom zlepšení symetrie nátoku na RK došlo také ke konvergování výpočtu. Za zlepšením stability modelu stojí především redukce „mrtvých koutů“, kde bylo riziko vzniku úplavů vysoké. Řešením se spirálou tak téměř vymizely náhlé změny směrů a také nedochází k náhlým zúžením průtočných profilů, což by tvořilo další riziková místa pro vznik nadměrných turbulencí v proudění. Nejrychleji konvergoval model

s označením „Spir\_a75\_x100“. Výpočet tohoto modelu nabyl kýžené konvergence reziduí při 102. iteraci. Takto konvergující výpočet trval 1 hodinu a 40 minut. Jediným modelem, který nenabyl žádoucí konvergence je model nesoucí označení „Spir\_a01\_x100“.

**Tabulka 3.9:** Směrodatné odchylky průtoku pro 4 varianty návrhu betonové kašny se spirálou.

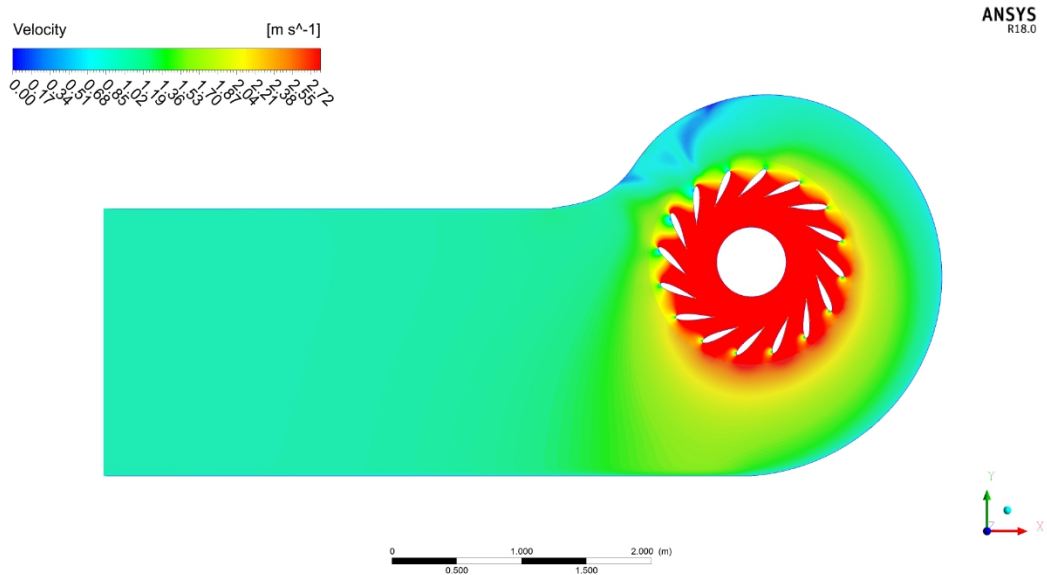
Označení varianty	Spir_a01_x100	Spir_a75_x100	Spir_a35_x100	Spir_a75_x120
Směrodatná odchylka průtoku [l*s-1]	2,51	2,28	2,65	2,51

**Kašna se spirálou - srovnání všech variant Q [m3/s]**

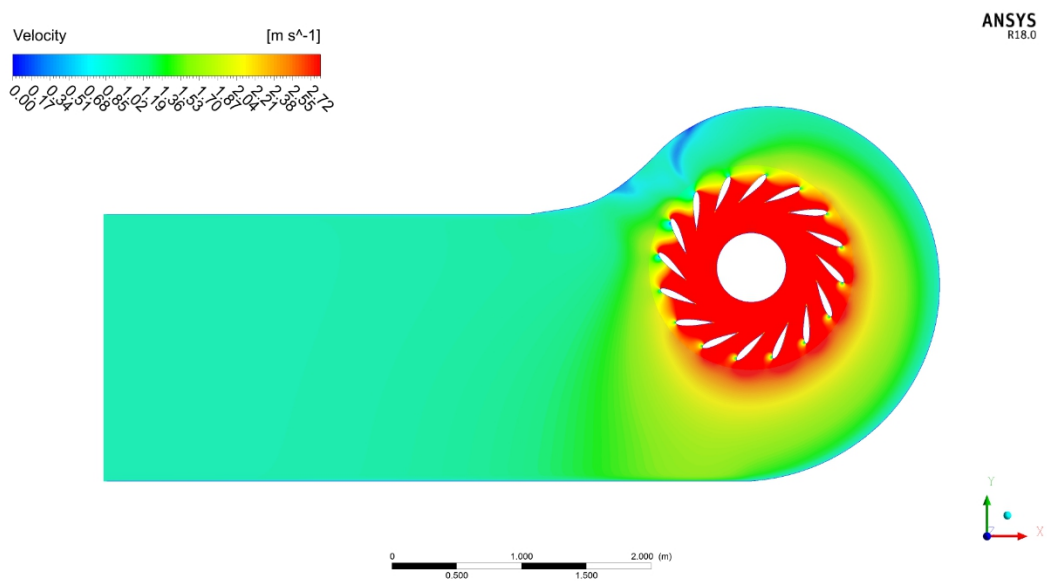


**Graf 3.4:** Srovnání nátokových podmínek všech variant spirálního řešení kašny.

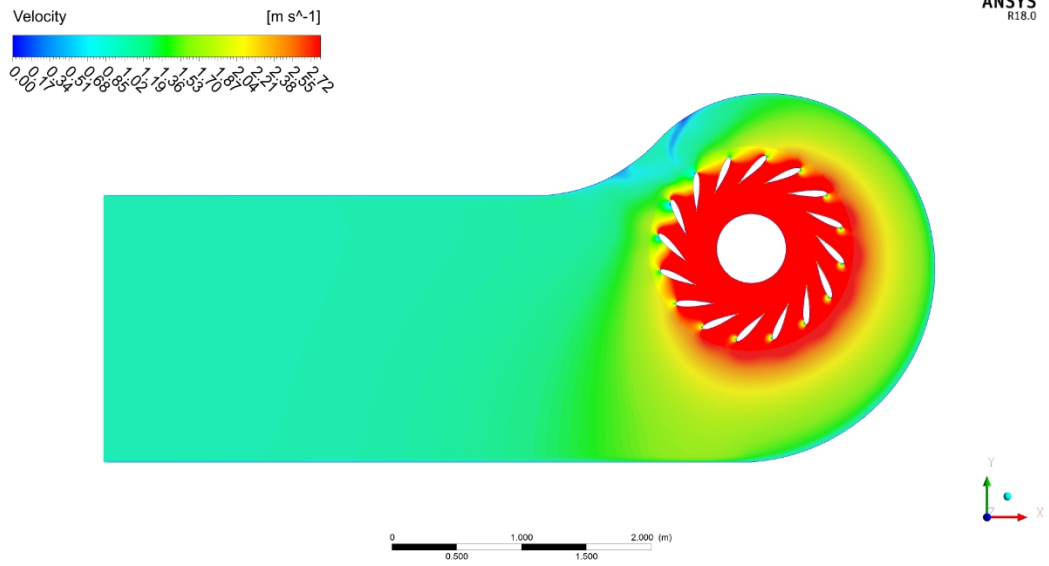
Protože se směrodatné odchylky liší pouze nepatrně, je třeba přihlídnout k rozložení průtoků po obvodě RK, zda-li nedochází k nějaké výrazné nehomogenitě. Z grafu 3.4 a z obrázků 3.23 – 3.26 je zjevné, že výraznější nehomogenitu tvoří samotné technické řešení spirály bez ostruhy. Při pohledu na výše zmíněné reference je zjevný nedostatek průtočného množství mezi lopatkami číslo 13 – 15. Směrodatné odchylky se příliš neliší a všechny varianty poukazují na tentýž nedostatek, tedy absenci ostruhy spirály. Proto byla optimalizace tvaru betonové spirály za pomoci parametrického modelu ukončena. Dále se tvar spirály optimalizoval manuálně.



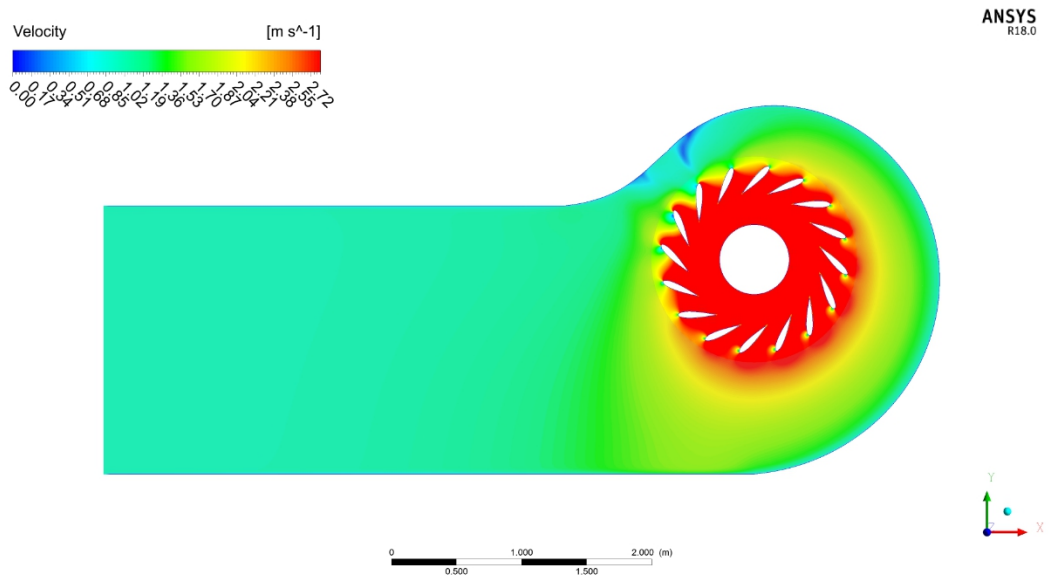
**Obrázek 3.23:** Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, varianta „Spir\_a01\_x100“



**Obrázek 3.24:** Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, varianta „Spir\_a75\_x100“



**Obrázek 3.25:** Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, varianta „Spir\_a35\_x100“.



**Obrázek 3.26:** Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, varianta „Spir\_a75\_x120“.



Ze získaných výsledků CFD analýzy 4 základních návrhů betonové spirály lze konstatovat, že konstrukce má své opodstatnění a jedná se o konstrukci, která výrazně zlepšuje nátokové podmínky po obvodu RK. Velkou excentricitou osy stroje v kašně došlo k redukci rozměrů vtokové části do kašny, tím se prakticky snižují nároky na zábor pozemku stavbou MVE. Snížením šířky kašny také dojde ke snížení rozměrů česlí, což také povede k výraznému snížení nákladů stavby a na provoz stavby. Naopak ke zvýšení nákladů dojde v důsledku větší stavební hloubky konstrukce. Na místě je také úvaha, zda výhody spirálního řešení předčí vyšší náklady na její výstavbu a návrh, když vezmeme v úvahu celkovou velikost potenciálního projektu.

Původní myšlenkou spirály bez ostruhy bylo navržení nízkonákladové konstrukce, která bude snadno přístupná pro jakýkoliv druh údržby. Z výsledků je však zjevné, že právě ostruha spirály je stěžejní částí celé konstrukce a pouze s ostruhou bude možné dosáhnout požadované homogenity nátoků po obvodu RK turbíny. Dalším postupem optimalizace tvaru betonové spirály bylo tedy doplnění ostruhy do návrhu s nejmenší směrodatnou odchylkou průtoku. Ostruha byla tedy navržena do varianty „Spir\_a75\_x100“. Tento návrh také podstoupil CFD analýzu.

### **3.7 Další tvarové modifikace betonové spirály**

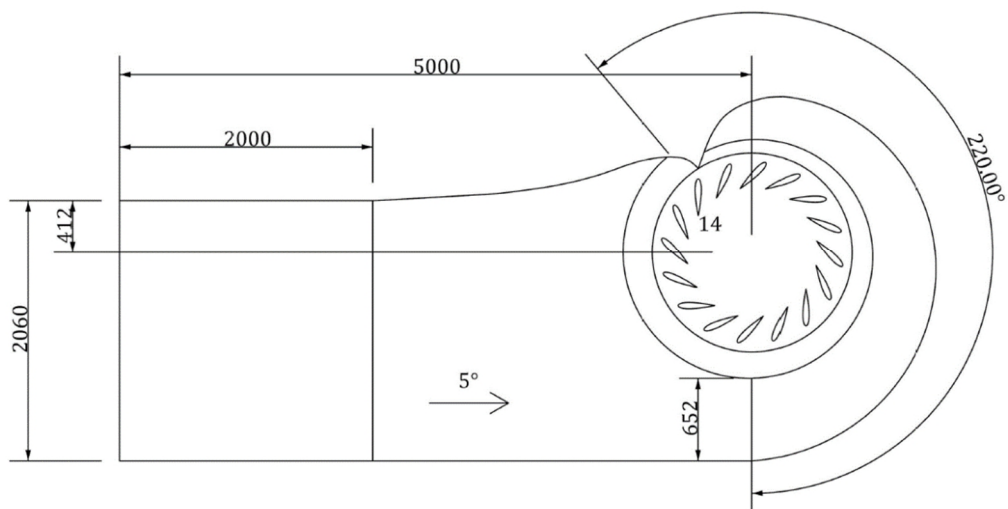
V této kapitole bude blíže popsán vývoj dalších návrhů tvaru betonové spirály. Na všech variantách uvedených v této kapitole byla provedena CFD analýza. Tvorba geometrie pro tyto varianty byla prováděna ručně, nikoliv parametrickým modelem. Tvorba výpočetní sítě a nastavení výpočtů bylo zvoleno stejné jako u variant předešlých.

#### **3.7.1 Návrh „Spir\_a75\_x100“ s ostruhou**

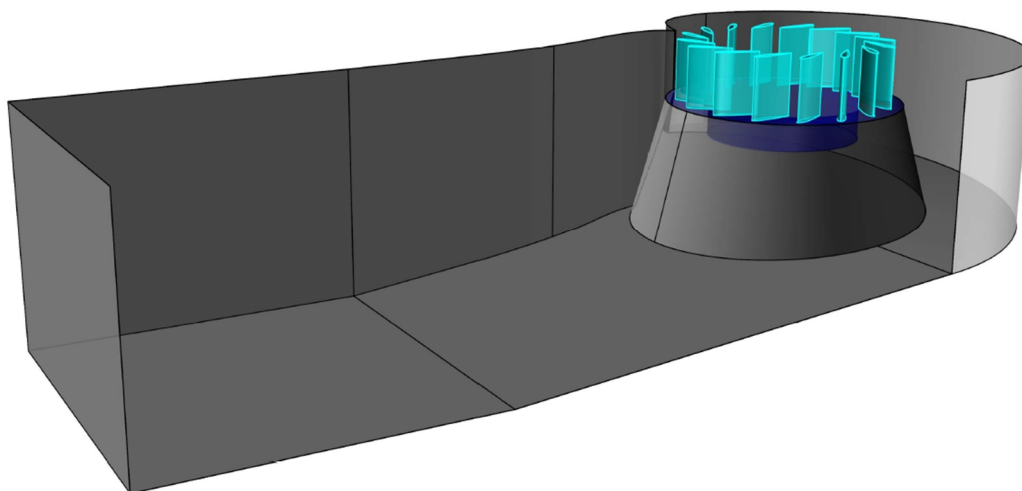
Jak bylo konstatováno v kapitole 3.6.3, tak dalším vývojem tvaru spirály je přidání konstrukce ostruhy. K přidání ostruhy byla vybrána varianta „Spir\_a75\_x100“ z důvodu nejnižší hodnoty směrodatné odchylky průtoku.

Napojení ostruhy bylo provedeno na osu 14. lopatky RK, viz *obrázek 3.27*. Geometrie byla modifikována ručně v softwaru „Rhinoceros®“. Výsledná geometrie je vidět na *obrázcích 3.27 a 3.28*.

Výpočetní síť byla vygenerována stejným způsobem se stejným nastavením jako v předešlých variantách. Nastavení výpočtu bylo také identické s předešlými návrhy betonové spirály.

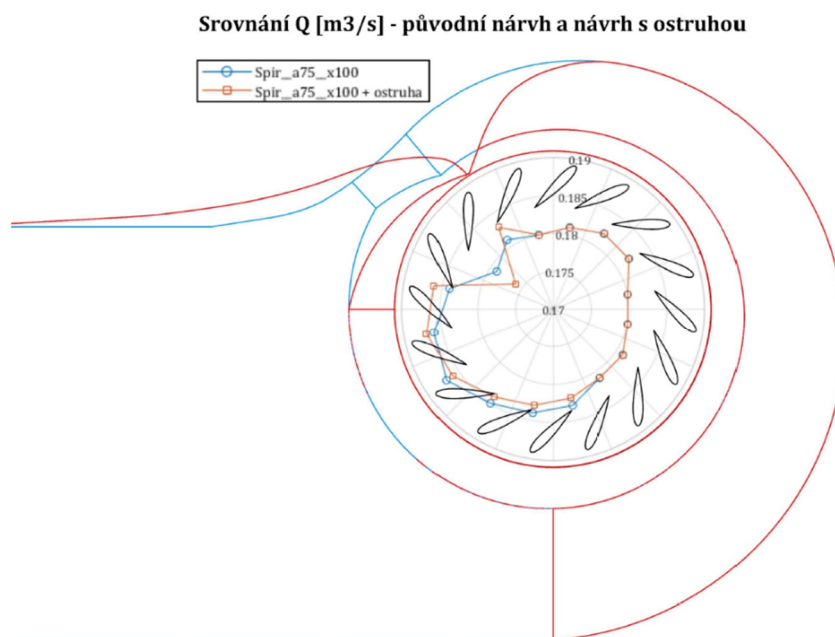


**Obrázek 3.27:** Půdorysné schéma kašny se spirálou, která je ukončena ostruhou.



**Obrázek 3.28:** Axonometrický pohled na prostorový model spirály s ostruhou, který je připraven pro CFD analýzu.

Výsledky matematického modelu pro tento návrh ukazují nejhorší směrodatnou odchylku průtoku ze všech 4 prvních variant, nabývá totiž hodnoty  $2,67 \text{ l*s}^{-1}$ . Na *grafu 3.5* je patrná příčina této disbalance. Namísto zlepšení větší homogenity nátoku, došlo k výraznému poklesu hodnoty průtoku v mezilopatkovém prostoru číslo 15. Průtok v tomto meziprostoru nabývá hodnoty pouze  $176 \text{ l*s}^{-1}$ . To je zapříčiněno tím, že voda v místech ostruhy naráží do její konstrukce a vzniká tak problémové místo z hlediska vznikání neustálených jevů v proudu.



**Graf 3.5:** Porovnání Q původního návrhu a návrhu s ostruhou.

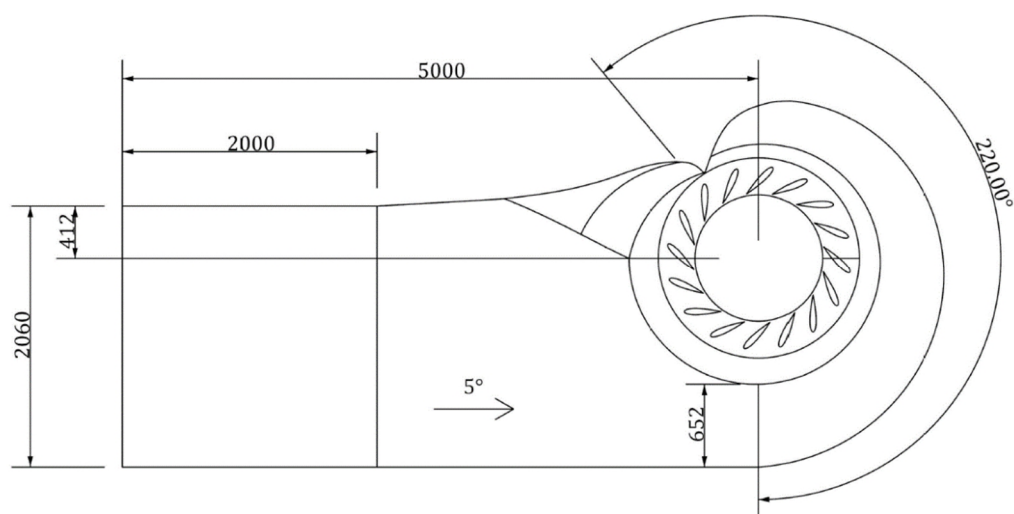
Takto navržená spirála s ostruhou je hrubě nedostačující z hlediska homogenity natékání na RK. Problém s průtočným množstvím ve 14. kanálu RK se dokonce značně zhoršil oproti původnímu návrhu varianty „Spir\_a75\_x100“. Bylo tedy přistoupeno k návrhu betonové rampy, která má za úkol eliminovat problémové místo u ostruhy spirály a zlepšit situaci s natékáním do 14. kanálu RK.

### 3.7.2 Návrh „Spir\_a75\_x100“ s ostruhou a betonovou rampou

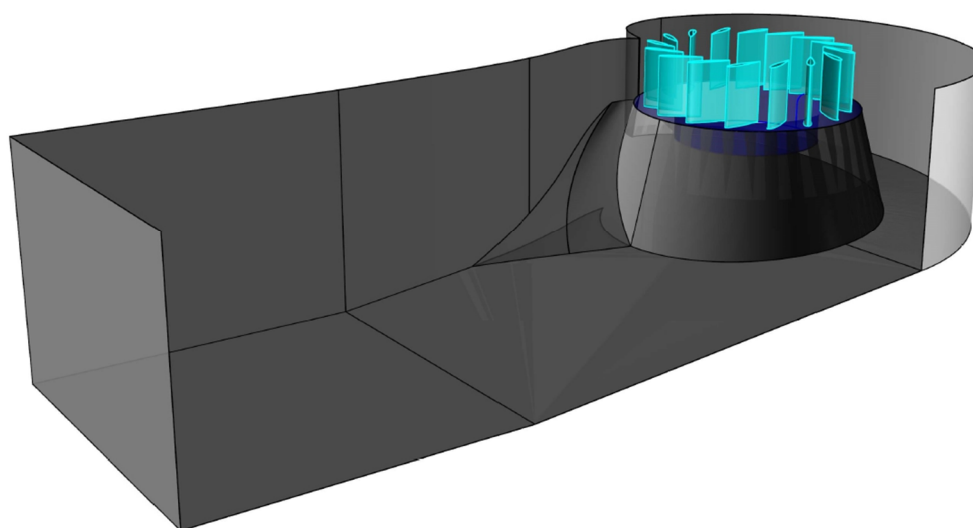
Tento návrh měl za úkol vylepšit nátokové poměry na RK, zejména v oblasti 14. kanálu, kam se nedostává dostatečné množství vody, a tím je hrubě narušena homogenita natékání RK, což může vést k zbytečným hydraulickým ztrátám. Vlivem nátokové nehomogenity může také dojít k excentrickému zatížení OK, což by vedlo ke snížení životnosti celého projektu.

Geometrie byla vytvořena ručně pomocí modeláře „Rhinoceros®“. Tento geometrický model následně sloužil k CFD analýze. Výsledná geometrie je vidět na *obrázcích 3.29 a 3.30*.

Výpočetní síť byla generována stejně jako v předešlých variantách. Nastavení matematického modelu bylo taktéž identické.

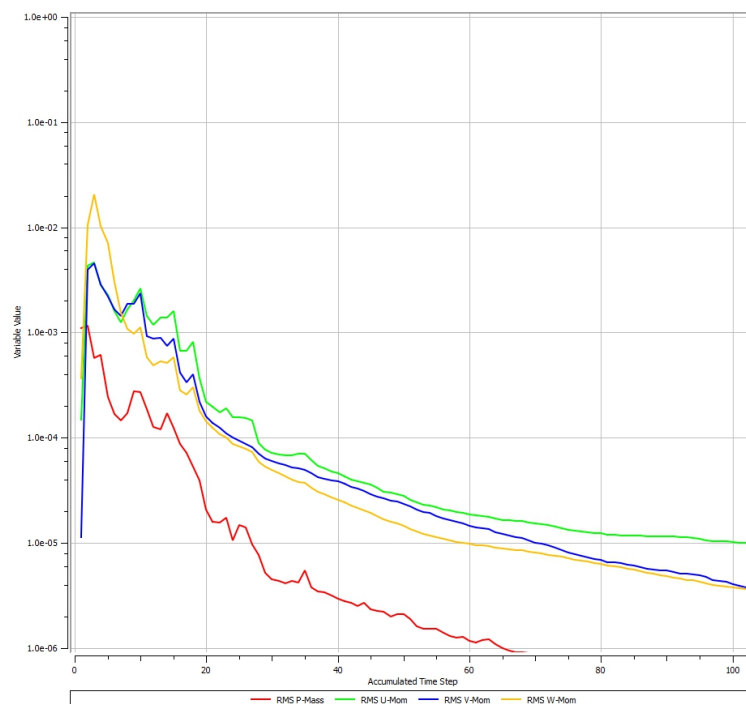


**Obrázek 3.29:** Půdorysné schéma kašny se spirálou, ostruhou a rampou.



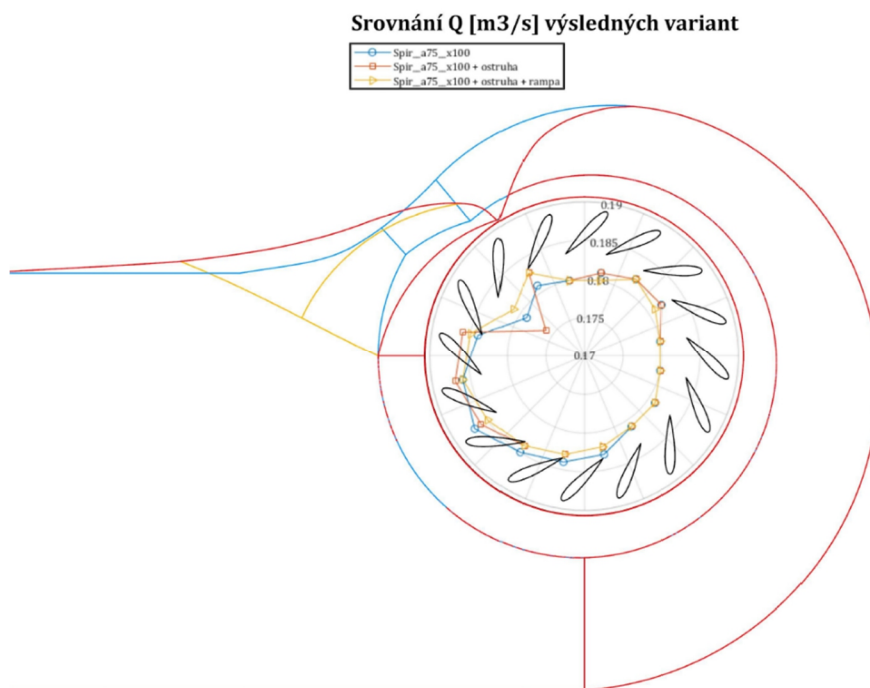
**Obrázek 3.30:** Axonometrický pohled na prostorový model spirály s ostruhou, který je připraven pro CFD analýzu.

Dle výsledků CFD analýzy se jeví tento návrh jako nejlepší ze všech posuzovaných variant z hlediska symetričnosti nátoku. O symetričnosti natékání vypovídá i nejnižší směrodatná odchylka průtoku, ta má hodnotu  $1,93 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . O tom, že se jedná o ustálenější model, vypovídá i průběh konvergence reziduí. Výpočet konvergoval při 103. iteračním kroku a délka trvání výpočtu byla 1 hodina a 52 minut. Průběh konvergence byl proti ostatním variantám plynulý, viz *obrázek 3.31*.

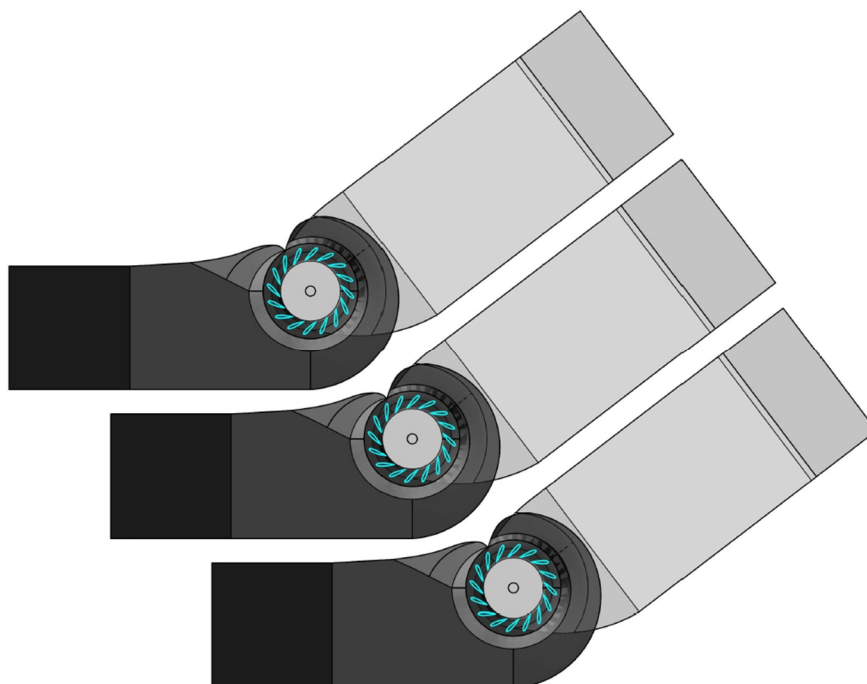


**Obrázek 3.31:** Průběh konvergence reziduí výsledného návrhu.

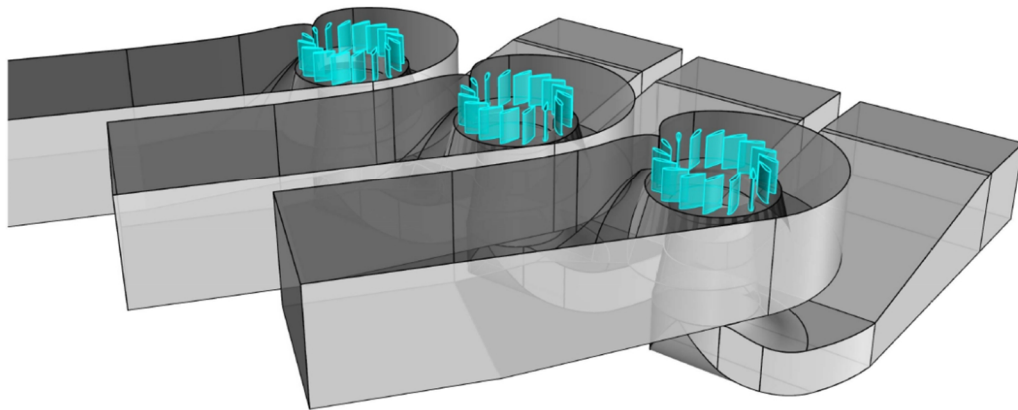
Při srovnání symetričnosti průtoků po obvodu RK u variant „*Spir\_a75\_x100*“, „*Spir\_a75\_x100 + ostruha*“, „*Spir\_a75\_x100 + ostruha + rampa*“, lze variantu s rampou eliminující mrtvý kout u ostruhy spirály považovat za finální návrh tvaru kašny s betonovou spirálou. Srovnání průběhu průtoků ukazuje *graf 3.6*. *Obrázek 3.35* zobrazuje prostorové proudnice v modelu. Výsledný návrh má i další výhody. Mezi ně patří například možnost modulárního uspořádání několika kašnových přivaděčů vedle sebe při návrhu několika soustrojí. Při modulárním uspořádání dochází k velké úspoře potřebné plochy pro výstavbu MVE. Modulární uspořádání je možné díky značně excentrickému umístění osy turbíny v kašně. Modulární uspořádání několika kašen je vidět na *obrázcích 3.32 až 3.34*.



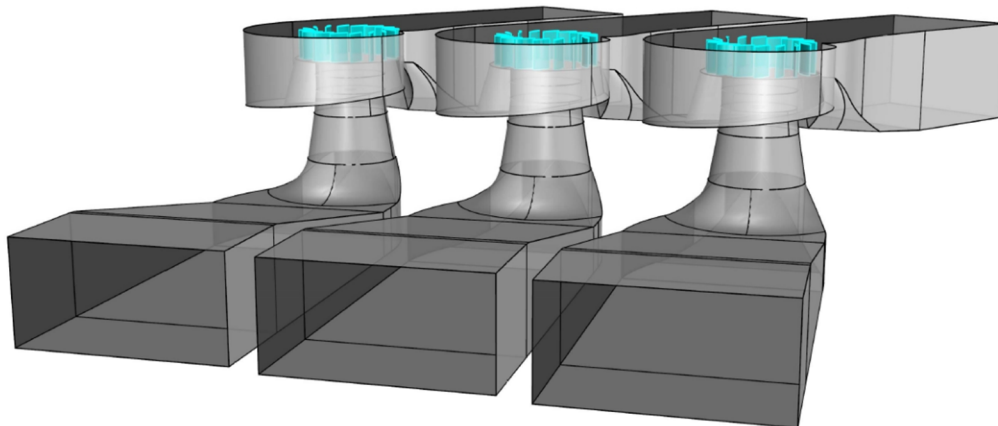
**Graf 3.6:** Srovnání průtoků výsledných variant.



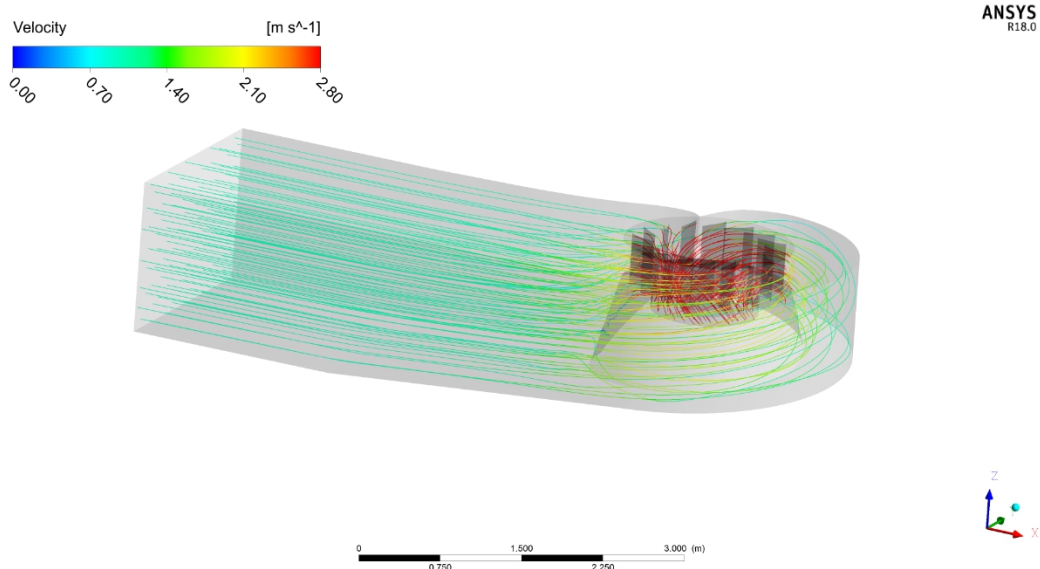
**Obrázek 3.32:** Půdorysný pohled na prostorový model modulárního uspořádání o třech soustrojích. Model savky poskytl Ing. Jiří Souček.



**Obrázek 3.33:** Axonometrický pohled po vodě na prostorový model modulárního uspořádání o třech soustrojích. Model savky poskytl Ing. Jiří Souček.



**Obrázek 3.34:** Axonometrický pohled proti vodě na prostorový model modulárního uspořádání o třech soustrojích. Model savky poskytl Ing. Jiří Souček.



**Obrázek 3.35:** Axonometrický pohled na model výsledné varianty s proudnicemi, které nesou informaci o rychlosti proudění.

### 3.8 Zobrazení výsledného návrhu pomocí VR technologie

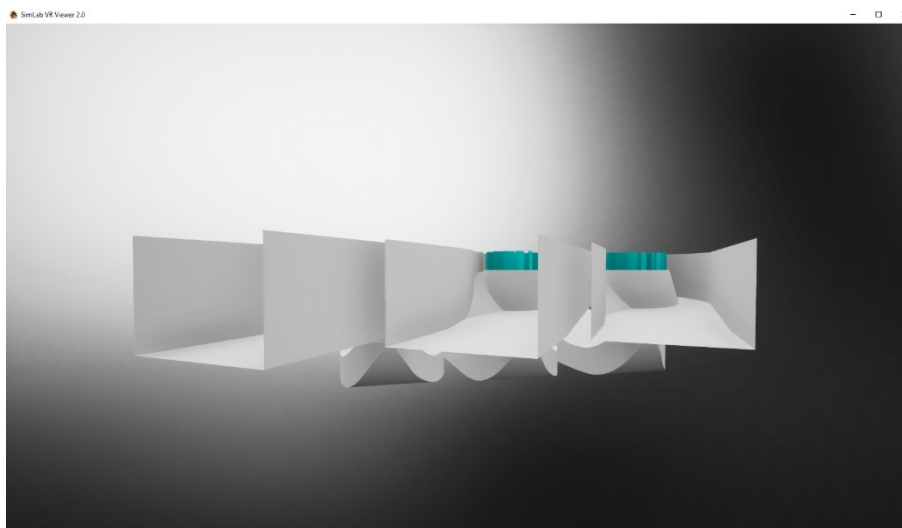
Dnešním trendem je digitalizace a snaha o celkovou propojenost jednotlivých fází projektu, od počáteční myšlenky až po provoz samotného díla. Trend v užívání technologie virtuální reality (VR) se začíná promítat i do odvětví průmyslu. Nevyhnutelným krokem je součást této technologie při navrhování a optimalizaci jednotlivých částí konstrukce daného produktu. V kombinaci se stále se zlepšující dostupnou výpočetní technikou, která umožňuje i rozsáhlejší CFD analýzy, se jeví VR technologie jako velice užitečná. Protože samotná technologie VR je v počátečních fázích implementace do průmyslového odvětví, není tedy ještě zcela možné využít plný rozsah této technologie s postprocessingem CFD modelu.

Pro zobrazení výsledné geometrie kašny byl použit software „*SimLab Composer*“. Tento software se používá především pro prezentaci produktů v oblasti strojírenství a stavebnictví.

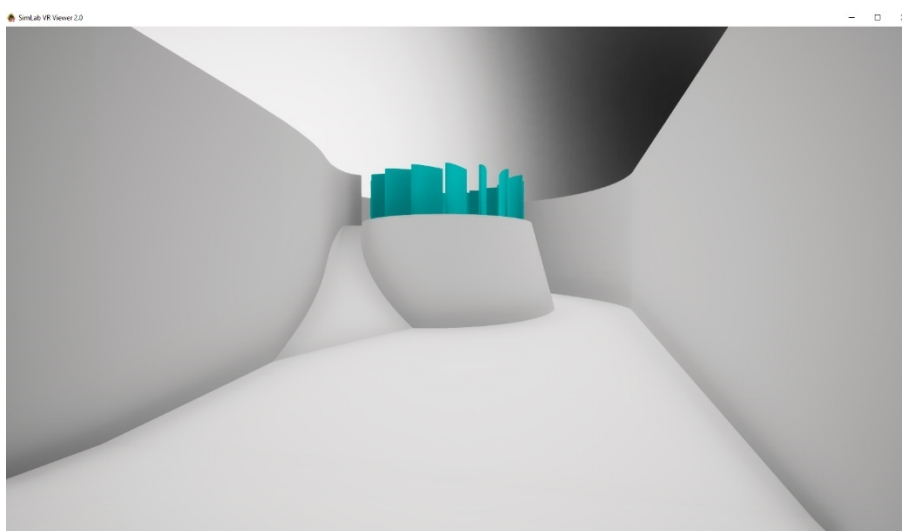
Model byl do softwaru importován ve formátu „*3dm*“. Zobrazení modelu v prostředí virtuální reality proběhlo za pomoci nadstavbového softwaru „*SimLab VR Viewer*“. Zobrazení výsledné varianty ve virtuální realitě je vidět na *obrázcích 3.36 až 3.38*.

Virtuální realita ještě plně neposkytuje potřebné uživatelské rozhraní, které by jednoduše umožňovalo sjednotit proces geometrického návrhu a prezentování výsledků CFD analýzy. Využití VR technologie prozatím spatřuji v oblasti prezentace výsledných produktů, případně k rychlému hledání kolizí různých konstrukcí a v neposlední řadě najde technologie uplatnění v oblasti vzdělávání.

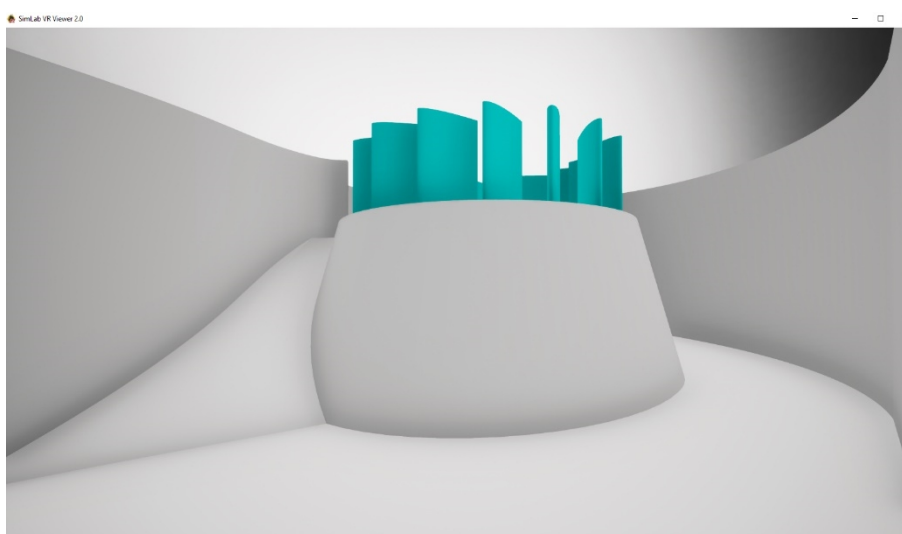




**Obrázek 3.36:** Pohled na výslednou variantu v modulárním uspořádání v prostředí VR.



**Obrázek 3.37:** Detailní pohled na výsledný návrh v prostředí VR.



**Obrázek 3.38:** Detailní pohled na betonovou rampu ve výsledném návrhu v prostředí VR.

## 4 Závěr

Za účelem této bakalářské práce vznikly parametrické modely betonové spirály a RK. Zejména parametrický model RK nabízí širokou škálu měnitelných vstupních parametrů a je možné za jeho pomoci velice přesně a efektivně generovat geometrii RK. Parametrický model RK dokáže použitím evolučního řešitele rychle nalézt úhel lopatek RK, při kterém je RK uzavřeno. Zafixováním vybraných parametrů byla generována geometrie, která následně sloužila pro všechny CFD výpočty, jež byly provedeny v rámci této bakalářské práce. Parametrický model RK umožňuje značně urychlit práce spojené s návrhem RK, zejména při matematickém modelování.

Dalším modelem, který vznikl v rámci této bakalářské práce je parametrický model betonové spirály s lichoběžníkovým profilem. Zde je možné pomocí dvou parametrů ovlivňovat průběh plochy po celé délce spirály. Dále je také možno nastavit maximální úhel obchvatu turbíny. V rámci této bakalářské práce byl model použit pro generování 4 variant návrhu betonové spirály. Geometrie následně přímo sloužila k sestavení matematických modelů. Parametrický model velice zrychlil práci při matematickém modelování. Oba parametrické modely jsou přiloženy na CD.

Prvním krokem v části matematického modelování byla optimalizace polohy osy OK v betonové kašně. Pro nalezení vhodné polohy bylo navrženo 6 poloh, které následně byly podrobeny CFD analýze. Z analýzy vyplynula téměř nutnost návrhu spirálního nátoku na RK, vzhledem ke vzniku rozsáhlých oblastí s pulzujícími úplavy. Z výsledků lze doporučit u nízkonákladových projektů alespoň betonáž rohů kašny, aby nedocházelo ke vzniku příliš rozsáhlých oblastí s velkou mírou turbulence. Excentrické umístění osy OK se jeví z výsledků CFD výpočtů jako vhodné.

Dalším krokem bylo navrhnout a optimalizovat tvar betonové spirály. Pro citlivostní analýzu byly navrženy 4 základní geometrie pomocí parametrického modelu spirály. Spirála byla volena bez ostruhy z důvodu snížení nákladů na výstavbu potenciálního projektu takové elektrárny. To se ale z výsledků matematického modelu ukázalo jako nevhodné řešení vzhledem k relativně velké nehomogenitě průtoku v oblasti 14. kanálu RK. Pro další optimalizaci tvaru byla vybrána varianta „*Spir\_a75\_x100*“, protože se jednalo o variantu s nejnižší směrodatnou odchylkou průtoku ( $2,28 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Následně byla navržena varianta s ostruhou. Vzhledem k nejvyšší hodnotě směrodatné odchylky ze všech dosud navržených variant betonové spirály ( $2,67 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ) bylo nutné návrh vylepšit. Jako výsledný návrh byl zvolen návrh s ostruhou a betonovou rampou, která eliminovala nehomogenitu průtoku. Výsledný návrh dosáhl směrodatné odchylky  $1,93 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Celkový průtok kašnou je  $2,97 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .

Výsledným návrhem se dosáhlo velice příznivého poměru stran vtoku do přivaděče. Zúžením profilu se sníží náklady na česle a zároveň se sníží požadavek na zábor pozemku. Díky velké excentricitě při umístění osy OK v kašně vznikla také možnost modulárního sesazení v případě návrhu elektrárny, která uvažuje více než jedno soustrojí.

V poslední části této práce byl výsledný návrh kašny s betonovou spirálou zobrazen pomocí technologie VR. V prostředí VR je možno se volně pohybovat a lépe tak pochopit geometrii výsledného návrhu. Model pro zobrazování pomocí VR technologie je součástí přiloženého CD.

## 5 Použitá literatura a zdroje informací

- [1] BEDNÁŘ, Josef. Turbíny [malé vodní elektrárny]. Českovice, Blansko: Nakladatelství Marcela Bednářová, 2013. ISBN 978-80-905437-0-6.
- [2] GABRIEL, P., KUČEROVÁ, J. Navrhování vodních elektráren (1. vyd.). Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01304-9.
- [3] GABRIEL, P., ČIHÁK, F., KUČEROVÁ, J. Malé vodní elektrárny (1. vyd.). Praha: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-01-00875-4.
- [4] BROŽA, V., GABRIEL, P., ČIHÁK, F., KUČEROVÁ, J., PROCHÁZKA, A. Využití vodní energie (1. vyd.). Praha: České vysoké učení technické, 1990.
- [5] NECHLEBA, M. Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství (2. vyd.). Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
- [6] DIVE Turbinen, GmbH & Co.KG [Online]. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://www.dive-turbine.de/Referenz/>
- [7] National Aeronautics and Space Administration (NASA) [Online]. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z <https://history.nasa.gov>
- [8] AIRFOIL TOOLS [online]. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/>
- [9] Grasshopper 3D [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.grasshopper3d.com/>
- [10] Y+ CALCULATOR [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.pointwise.com/yplus/>

## 6 Seznam obrázků

<b>Obrázek 2.1:</b> Rozsah použití přívodů vody k tlakové turbíně [2].....	5
<b>Obrázek 2.2:</b> Rozložení rychlostí proudění v kašně obdélníkového půdorysu při symetrickém umístění osy stroje. Modré oblasti popisují místa s téměř nulovou rychlostí proudění, v těchto místech lze očekávat tvorbu vírů. Obrázek je pořízen z CFD analýzy.....	5
<b>Obrázek 2.3:</b> Rozložení rychlostí proudění v kašně obdélníkového půdorysu při excentrickém umístění osy stroje. Pokud bychom vyplnily modré oblasti, tak uvidíme náznak spirálního tvaru kašny. Z obrázku je také patrné, že došlo k lepšímu rozložení rychlostí okolo RK. Obrázek je pořízen z CFD analýzy.....	6
<b>Obrázek 2.4:</b> Charakteristické příčné řezy betonových spirál [2].....	7
<b>Obrázek 2.5:</b> Vliv úhlu obchvatu na šířku spirály [2] .....	7
<b>Obrázek 2.6:</b> Závislost rychlostního součinitele na spádu. [2] .....	9
<b>Obrázek 2.7:</b> Charakteristický příčný řez betonovou spirálou bez strojní části, s popisem základních geometrických charakteristik. ....	11
<b>Obrázek 2.8:</b> Prostorový modelu přivaděče se spirálou při maximálním úhlu obchvatu 220°, bez ostruhy a strojní části. ....	13
<b>Obrázek 2.9:</b> Montáž RK, Francie. [6].....	13
<b>Obrázek 2.10:</b> Render prostorového modelu RK bez OK určeného pro CFD výpočty.....	13
<b>Obrázek 2.11:</b> Schéma uložení rozváděcí lopatky vůči hornímu a spodnímu turbínovému víku. [5] .....	14
<b>Obrázek 2.12:</b> Jednotkový „NACA 4-DIGIT“ profil s uzavřeným koncem, cosinovou distribucí bodů a popsány základními vstupními parametry.....	16
<b>Obrázek 2.13:</b> Porovnání způsobu distribuce bodů u profilu NACA 4312 s uzavřeným koncem a vypočtenými 50 body. Na horním profilu bylo zvoleno lineární rozložení bodů, u profilu dole byla zvolena distribuce bodů dle rovnice (2.14). [8].....	16
<b>Obrázek 2.14:</b> Prostorový model RK a jeho jednotlivé části. Odshora: horní turbínové víko, lopatky RK, spodní turbínové víko s přechodem do komory OK.....	19
<b>Obrázek 2.15:</b> Instalace OK s generátorem, Francie. [6] .....	19
<b>Obrázek 2.16:</b> Půdorysné schéma RK s vyznačenými parametry. ....	22
<b>Obrázek 3.1:</b> Ukázka z pracovního prostředí softwaru „Grasshopper®“ .....	23
<b>Obrázek 3.2:</b> Ukázka funkce „Circle CNR“ z pracovního prostředí „Grasshopper®“. Na obrázku vidíme samotný box s funkcí a 3 vstupní parametry „C, N, R“. Výsledkem takto nastavených vstupních parametrů je křivka kružnice se středem v bodě {0,0,0}, normálovým vektorem {0,0,1} a poloměrem 5 jednotek (v tomto případě 5 mm). Náhled kružnice s těmito parametry se nachází v pravé části obrázku. Jedná se o výřez z pracovního okna „Rhinceros®“, kam jsou náhledy výsledku funkcí generovány v reálném čase.....	24

<b>Obrázek 3.3:</b> Vývojový diagram parametrického modelu betonové spirály. Zelené boxy charakterizují ručně zadávané hodnoty vstupních parametrů modelu, parametrický model jimi spouští výpočet.....	25
<b>Obrázek 3.4:</b> Prostorový model, který obsahuje 3 varianty dna betonové spirály s maximálním obchvatem 220°. Varianty se liší hodnotami vstupních parametrů v parametrickém modelu betonové spirály.....	26
<b>Obrázek 3.5:</b> Vývojový diagram parametrického modelu RK. Zelené boxy charakterizují ručně zadávané hodnoty vstupních parametrů modelu, parametrický model jimi spouští výpočet.....	28
<b>Obrázek 3.6:</b> Výřez z pracovního prostředí „Grasshopper®“ s ukázkou zapojení evolučního řešitele k nalezení úhlu natočení lopatek, při kterém je rozvaděč uzavřen. Při tomto zapojení má proměnný parametr rozlišení 4 desetinná místa a požadovaná vzájemná vzdálenost lopatek $x_w$ je 0,1 mm.....	30
<b>Obrázek 3.7:</b> Vlevo evoluční řešitel hledající optimální hodnotu úhlu natočení lopatek pro splnění okrajové podmínky, vpravo půdorysný pohled na RK během hledání řešení. ....	30
<b>Obrázek 3.8:</b> Vlevo evoluční řešitel po dosažení okrajové podmínky dle možností stanoveného intervalu a rozlišení proměnného parametru, vpravo půdorysný pohled na uzavřený rozvaděč.....	31
<b>Obrázek 3.9:</b> Různá nastavení vstupních parametrů parametrického modelu RK s výslednou geometrií těchto nastavení.....	32
<b>Obrázek 3.10:</b> Prostorový model RK, jež vygeneroval parametrický model RK.....	34
<b>Obrázek 3.11:</b> Půdorysné schéma betonové kašny. Ve schématu je naznačeno 6 poloh umístění osy OK (symbol kříže s číslem).....	35
<b>Obrázek 3.12:</b> Prostorový model 2. polohy bez stropní konstrukce.....	35
<b>Obrázek 3.13:</b> Půdorysné schéma kašnového přivaděče se spirálou. Na schématu jsou viditelné všechny 4 počáteční varianty spirály.....	37
<b>Obrázek 3.14:</b> Axonometrický pohled na všechny 4 varianty kašny se spirálou.....	37
<b>Obrázek 3.15:</b> Nastavení jednotlivých částí sítě. Sloupec s názvem „Maximum size“ charakterizuje největší možný element povrchové sítě, sloupec Height výšku prvního elementu, sloupec „Height“ ratio charakterizuje koeficient rychlosti růstu prizmatické vrstvy s každou vrstvou a sloupec „Num layer“ definuje počet vrstev prizmatické sítě. ....	38
<b>Obrázek 3.16:</b> Pohled na 1. variantu kašny bez spirály zesponu. Zeleně jsou zvýrazněné okrajové podmínky výpočtu. Vlevo vstupní okrajová podmínka, vpravo výstupní okrajová podmínka.....	40
<b>Obrázek 3.17:</b> Půdorysné schéma RK s číslováním lopatek RK a rovin na kterých byl měřen hmotnostní průtok.....	42
<b>Obrázek 3.18:</b> Porovnání konvergence reziduí. Vlevo hrubá síť, vpravo síť zjemněná.....	43

<b>Obrázek 3.19:</b> Srovnání rychlostního pole v 1/2 výšky RK 2. varianty. Hrubá síť (nahore) a jemná (dole).....	44
<b>Obrázek 3.20:</b> Proudnice nesoucí informaci o rychlostech proudění v kašně v rovině 1/2 výšky RK. Varianta 3.....	46
<b>Obrázek 3.21:</b> Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, 3. varianta.....	46
<b>Obrázek 3.22:</b> Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, 4. varianta.....	47
<b>Obrázek 3.23:</b> Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, varianta „Spir_a01_x100“.....	50
<b>Obrázek 3.24:</b> Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, varianta „Spir_a75_x100“.....	50
<b>Obrázek 3.25:</b> Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, varianta „Spir_a35_x100“.....	51
<b>Obrázek 3.26:</b> Rychlostní pole v 1/2 výšky RK, varianta „Spir_a75_x120“.....	51
<b>Obrázek 3.27:</b> Půdorysné schéma kašny se spirálou, která je ukončena ostruhou.....	53
<b>Obrázek 3.28:</b> Axonometrický pohled na prostorový model spirály s ostruhou, který je připraven pro CFD analýzu.....	53
<b>Obrázek 3.29:</b> Půdorysné schéma kašny se spirálou, ostruhou a rampou.....	55
<b>Obrázek 3.30:</b> Axonometrický pohled na prostorový model spirály s ostruhou, který je připraven pro CFD analýzu.....	55
<b>Obrázek 3.31:</b> Průběh konvergence reziduí výsledného návrhu.....	56
<b>Obrázek 3.32:</b> Půdorysný pohled na prostorový model modulárního uspořádání o třech soustrojích. Model savky poskytl Ing. Jiří Souček.....	57
<b>Obrázek 3.33:</b> Axonometrický pohled po vodě na prostorový model modulárního uspořádání o třech soustrojích. Model savky poskytl Ing. Jiří Souček.....	58
<b>Obrázek 3.34:</b> Axonometrický pohled proti vodě na prostorový model modulárního uspořádání o třech soustrojích. Model savky poskytl Ing. Jiří Souček.....	58
<b>Obrázek 3.35:</b> Axonometrický pohled na model výsledné varianty s proudnicemi, které nesou informaci o rychlosti proudění.....	59
<b>Obrázek 3.36:</b> Pohled na výslednou variantu v modulárním uspořádání v prostředí VR.....	60
<b>Obrázek 3.37:</b> Detailní pohled na výsledný návrh v prostředí VR.....	60
<b>Obrázek 3.38:</b> Detailní pohled na betonovou rampu ve výsledném návrhu v prostředí VR.....	60

## 7 Seznam tabulek

<b>Tabulka 2.1:</b> Klíčové parametry betonové spirály s jednoduchým lichoběžníkovým profilem .....	10
<b>Tabulka 2.2:</b> Parametry jednotkového profilu „NACA 4-DIGIT“ .....	15
<b>Tabulka 2.3:</b> Hodnoty jednotlivých parametrů rovnice (2.17).....	17
<b>Tabulka 2.4:</b> Klíčové parametry horního turbínového víka. ....	20
<b>Tabulka 2.5:</b> Klíčové parametry lopatek RK.....	20
<b>Tabulka 2.6:</b> Klíčové parametry RK. ....	20
<b>Tabulka 2.7:</b> Klíčové parametry spodního turbínového víka.....	21
<b>Tabulka 3.1:</b> Přehled proměnných parametrů parametrického modelu betonové spirály s jejich popisem. ....	24
<b>Tabulka 3.2:</b> Přehled základních proměnných parametrů parametrického modelu RK...	27
<b>Tabulka 3.3:</b> Fixní hodnoty parametrů lopatek RK.....	33
<b>Tabulka 3.4:</b> Fixní hodnoty parametrů RK.....	33
<b>Tabulka 3.5:</b> Fixní hodnoty parametrů spodního turbínového víka. ....	34
<b>Tabulka 3.6:</b> Fixní hodnoty vybraných parametrů pro všechny varianty geometrie kašnového přivaděče se spirálou.....	36
<b>Tabulka 3.7:</b> Hodnoty proměnných parametrů betonové spirály počátečních variant modelu. ....	36
<b>Tabulka 3.8:</b> Směrodatné odchylky průtoku pro 6 variant návrhů betonové kašny bez spirály.....	45
<b>Tabulka 3.9:</b> Směrodatné odchylky průtoku pro 4 varianty návrhu betonové kašny se spirálou.....	49



## 8 Seznam grafů

<b>Graf 3.1:</b> Porovnání průtoků ve 2. variantě návrhu umístění stroje, při použití hrubé a jemné výpočetní sítě. ....	44
<b>Graf 3.2:</b> Rozdělení průtoků po obvodu RK, 4. varianta. ....	47
<b>Graf 3.3:</b> Srovnání nátokových podmínek všech variant. ....	48
<b>Graf 3.4:</b> Srovnání nátokových podmínek všech variant spirálního řešení kašny. ....	49
<b>Graf 3.5:</b> Porovnání Q původního návrhu a návrhu s ostruhou. ....	54
<b>Graf 3.6:</b> Srovnání průtoků výsledných variant. ....	57