



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# OPTIMALIZACE POLOHY PROPELEROVÉ TURBÍNY V KAŠNĚ

OPTIMIZATION OF PROLLER TURBINE POSITION IN A PIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

*Bc. PETR DUDA*

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

*doc.Ing. PAVEL RUDOLF, Ph.D.*

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/14

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Petr Duda

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Fluidní inženýrství (2301T036)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Optimalizace polohy propelerové turbíny v kašně**

v anglickém jazyce:

### **Optimization of the proller turbine position in a pit**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provoz vodní turbíny v kašně je silně ovlivněn jejím vhodným umístěním. Vlivem blízkosti stěn kašny může docházet k jejímu špatnému plnění, blízkost hladiny může vyvolat vznik hladinového víru a přísávání vzduchu do oběžného kola. U instalace s více turbínami může docházet ke vzájemnému ovlivňování strojů v případě jejich malé vzájemné vzdálenosti.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je optimalizace umístění propelerových turbín (typ METAZ) v kašně tak , aby bylo zajištěno jejich optimální plnění. Primárně bude řešena problematika vhodné polohy turbíny vůči stěnám kašny. Práce bude vycházet z výpočtového modelování proudění.

Seznam odborné literatury:

- [1] Melichar, J., Vojtek, J., Bláha, J.: Malé vodní turbíny (konstrukce a provoz), Praha, 1998
- [2] Bednář, J.: Malé vodní elektrárny, SNTL Praha, 1989

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 25.11.2013



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## ABSTRAKT

Diplomová práce obsahuje základní informace o propelerových turbínách. Zabývá se správným umístěním v kašně tak aby bylo zajištěno optimální plnění. Část práce je věnována vzniku hladinových vírů a prvkům pro odstranění těchto vírů. Dále je v závislosti na zanoření rozváděcího kola sledován s pomocí výpočtové simulace vývoj vírů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Propelerová turbína, kašnová turbína, hladinový vír, rozvaděč, CFD program

## ABSTRACT

The thesis contains basic information about propeller turbines. It deals with the correct location in the fountain so as to ensure the highest possible performance. Part of the work is devoted to the creation of intake swirls and elements for the elimination of these vortices. Depending on the plunging guide vanes submersion is monitored development of vortices.

## KEYWORDS

Propeller turbine, pit turbine, vortex, guide vanes, CFD software

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DUDA, P. *Optimalizace propelerové turbíny v kašně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 75 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 12. května 2014

.....

Petr Duda

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za metodické, pedagogické a odborné vedení, při tvorbě a psaní diplomové práce. Zvláštní poděkování patří Bc. Šárce Křivinkové za odborné rady při tvorbě v Autocadu. Na závěr bych chtěl poděkovat mojí rodině a přátelům, kteří mě podpořili a stále podporují v mé snaze.

## OBSAH

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Úvod .....                                                                | 11 |
| 1 Propelerová turbína.....                                                | 12 |
| 1.1 MAVEL TM3, TM5[1,2].....                                              | 12 |
| 1.2 Uspořádání turbín MAVEL [2,7].....                                    | 13 |
| 2 Vstupní zařízení do turbíny [5,6]:.....                                 | 15 |
| 2.1 Kašna turbíny [5] .....                                               | 15 |
| 2.2 Rozměry kašny .....                                                   | 17 |
| 2.3 Vývoj odkrytých kašen turbín [5,6].....                               | 18 |
| 2.4 Vývoj krytých kašen turbín [5] .....                                  | 20 |
| 3 Nežádoucí prvky vznikající v kašně.....                                 | 21 |
| 3.1 Vtokový vír [11,8] .....                                              | 21 |
| 3.1.1 Vznik a vývoj vírů [12,13,19] .....                                 | 22 |
| 3.1.2 Vliv zanoření na vznik vírů .....                                   | 23 |
| 3.1.3 Stanovení minimální provozní hladiny turbíny v kašně [11] .....     | 24 |
| 3.1.4 Tvorba víru v různých kašnách [11,14].....                          | 24 |
| 3.1.5 Vtokové poměry do turbíny [15,16].....                              | 25 |
| 4 Přídavné prvky zlepšující vlastnosti kašny [2].....                     | 28 |
| 4.1 Pomocné brzdící lopatky [2].....                                      | 28 |
| 4.2 Vtokové těleso [2].....                                               | 28 |
| 4.3 Profilovaná žebra a pomocná mříž [7].....                             | 29 |
| 4.4 Upravené rozměry kašny do podoby spirály [7].....                     | 29 |
| 4.5 Ostruha [15] .....                                                    | 30 |
| 4.6 Stěna podél rozvaděče [16].....                                       | 30 |
| 4.7 Pokusy s konstrukčními prvky zlepšujícími vedení proudu [15,16] ..... | 31 |
| 5 Příprava modelu v modeláři .....                                        | 32 |
| 6 Modelování proudění v kašně pomocí CFD.....                             | 33 |
| 6.1 Preprocesor Gambit .....                                              | 33 |
| 6.1.1 Okrajové podmínky .....                                             | 35 |
| 6.1.2 Umísťování v kašně.....                                             | 35 |
| 6.2 Vlastní výpočet v softwaru Fluent .....                               | 37 |
| 6.2.1 Rovnice proudění a doplnění turbulence[18] .....                    | 37 |
| 6.3 Postprocesing .....                                                   | 39 |
| 6.3.1 Výška zanoření 1000 .....                                           | 41 |
| 6.4 Závěr : .....                                                         | 42 |
| 6.5 Použité informační zdroje .....                                       | 44 |

|        |                                                              |    |
|--------|--------------------------------------------------------------|----|
| 6.6    | Přílohy.....                                                 | 45 |
| 6.6.1  | Rychlosti před rozváděcím kolem pro zanoření 1000 .....      | 45 |
| 6.6.2  | Rychlosti za rozváděcím kolem pro zanoření 1000 .....        | 48 |
| 6.6.3  | Rychlosti před rozváděcím kolem pro zanoření 600 .....       | 51 |
| 6.6.4  | Rychlosti za rozváděcím kolem pro zanoření 600 .....         | 54 |
| 6.6.5  | Rychlosti před rozváděcím kolem pro zanoření 200 .....       | 57 |
| 6.6.6  | Rychlosti za rozváděcím kolem pro zanoření 200 .....         | 60 |
| 6.6.7  | Rozdíly celkových tlaků pro zanoření 1000 .....              | 63 |
| 6.6.8  | Rozdíly celkových tlaků pro zanoření 600 pro pozice 1-9..... | 64 |
| 6.6.9  | Rozdíly celkových tlaků pro zanoření 200 pro pozice 1-9..... | 65 |
| 6.6.10 | Poloha vírů pro zanoření 1000.....                           | 66 |
| 6.6.11 | Poloha vírů pro zanoření 600.....                            | 69 |
| 6.6.12 | Poloha vírů pro zanoření 200.....                            | 72 |
| 6.6.13 | Poloha víru pro zanoření 1800.....                           | 75 |

## Úvod

Poslední dobou je snaha o maximální efektivitu a mít snížení nákladů na výstavbu vodních elektráren, to však vede při jejím návrhu vtokových objektů ke snaze o co nejmenší celkové rozměry a často i o co nejmenší hloubku zanoření přivaděče vodní turbíny. Avšak přílišná redukce rozměrů vtokových objektů a zanoření může vést k tvorbě vtokových vírů, které vyvolají cirkulaci proudu v přivaděči a mohou v krajních případech strhávat vzduch do vtoku. Výsledkem těchto jevů bývá snížení efektivního provozu vodní elektrárny, vyvolané poklesem kapacity vtoků a účinnosti turbíny či snížení spolehlivosti celého vodního díla. Trend ke zjednodušování a zlevnění vtokových objektů se výrazněji projevuje u malých vodních elektráren o výkonu pod 1 MW. Celkový výzkum se jeví jako pro mnohé firmy jako neúnosně nákladný a tedy při realizaci vodních děl se vychází z dostupných zkušeností, převážně literárně publikovaných. Tyto zkušenosti byly brány v potaz při vyhodnocování výsledků. Umístění rozvaděče v kašně bylo spočteno v programu FLUENT pro několik pozic. Následně z výsledků bylo určeno několik doporučení ve kterých rozměrech by měla být umístěna. Tato diplomová práce by měla poskytnout návod firmě MAVEL a.s. pro umístění turbíny TM5 v kašnách tak, aby optimálně vyhovovaly pro daný provoz.

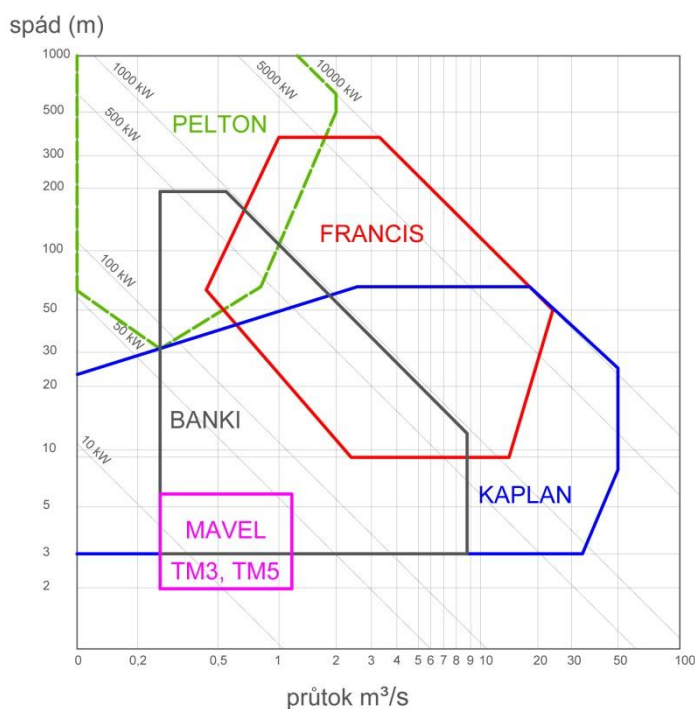
Celá diplomová práce je rozdělena do několika kapitol a řazení za sebou odpovídá postupu řešení diplomové práce. V první kapitole je pojednáno o různých typech násoskových turbín, druhá kapitola popisuje matematické modelování pomocí CFD. V závěru jsou shrnuty nejdůležitější poznatky a doporučení jak turbínu MAVEL TM5 umisťovat.

# 1 PROPELEROVÁ TURBÍNA

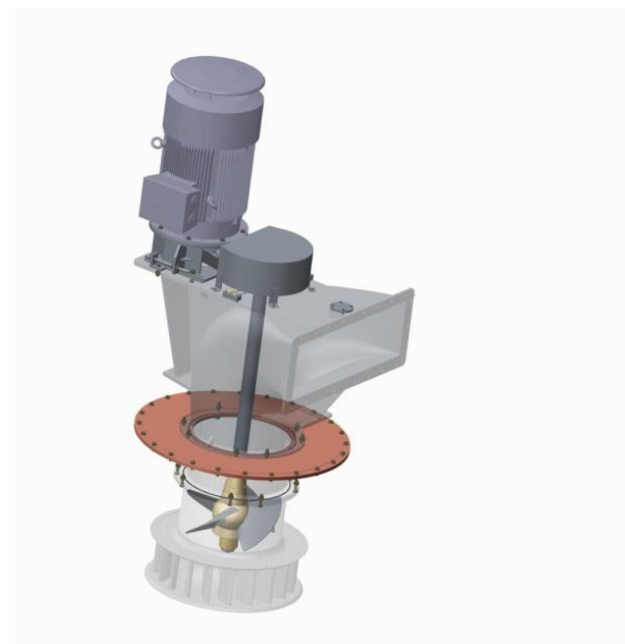
## 1.1 MAVEL TM3, TM5[1,2]

Jde o velmi jednoduché vrtulové turbíny, které se využívají pro energetické mikro zdroje. Turbíny, které u nás vyrábí firma MAVEL jsou vyráběny ve dvou velikostech. Turbína TM 3 s průměrem oběžného kola 300 mm a TM 5 s průměrem 550 mm. Jsou to násoskové turbíny s litinovou komorou a plechovou svařovanou sací rourou, jejíž rozměr je upraven podle podmínek v dané lokalitě. Násosková turbína je konstrukčně podobná Kaplanové turbíně, nicméně rozváděcí i oběžné lopatky jsou pevné, neregulovatelné. Ve zvláštních případech se může objevit oběžné kolo s přestavitelnými lopatky. Význačnou vlastností turbín METAZ je jejich jednoduchost, technologická nenáročnost a ekonomická výhodnost.

Rozváděcí kolo je pevné, nepřestavitelné. Oběžná kola se vyrábějí s několika profily otevření tak, aby pro dané průtočné poměry bylo možné zvolit optimální variantu. Turbíny pracují s asynchronními motory v generátorovém chodu – čili vždy v součinnosti s energetickou sítí. Mikrosoustrojí s násoskou je uváděno do provozu pomocí vlastního elektromotoru. Při zapnutí do sítě pracuje turbína cca 15 sekund jako čerpadlo a po zaplnění násosky vodou, soustrojí přechází automaticky do turbinového chodu v němž elektromotor již pracuje jako generátor. Celé soustrojí se odstavuje zavzdušněním. [2]



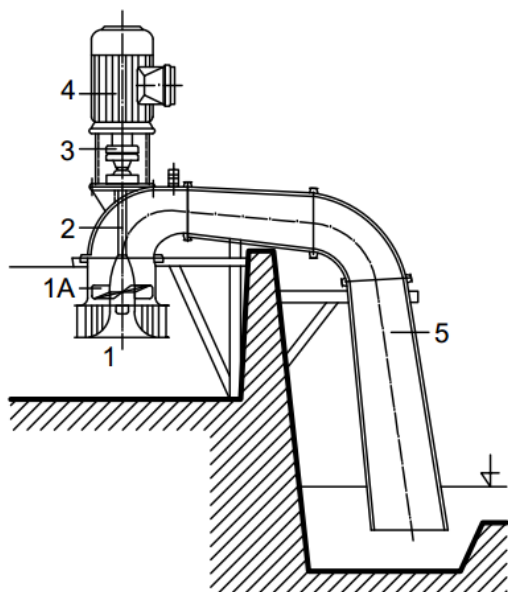
Obrázek 1 Orientační oblast použití turbíny MAVEL TM3, TM5[2]



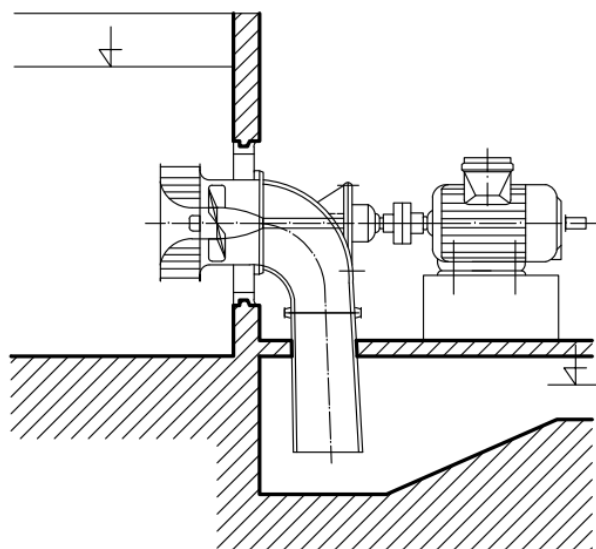
Obrázek 2 Násoskové uspořádání[1]

## 1.2 USPOŘÁDÁNÍ TURBÍN MAVEL [2,7]

Turbíny MAVEL se do kašny mohou umístit jak s vertikálně, tak i horizontálně vyvedeným hřídelem. Nejčastější uspořádání turbíny METAZ je v poloze s vertikálně umístěnou hřídelí. Pro toto uspořádání bude prováděná optimalizace. Obr. 4



Obrázek 4 Vertikální uspořádání[2]



Obrázek 3 Horizontální uspořádání [2]

Popis : 1. Pevný nestavitelný stator. 1A Rotor 2. Hřídel 3. Pružná spojka k zachycení hydrodynamických rázů 4. Střídavý alternátor 3x380 voltů/10kW 5. Násoska

Samozřejmě lze použít uspořádání s horizontálně umístěným hřídelem Obr.3, v hydraulickém systému je však nutno navrhnout uzavěr průtoku, jinak by nešlo turbínu odstavit. Jednou z velkých výhod násoskových turbín jsou pořizovací náklady a schopnost ponechat si vysoké měrné otáčky pro návrhové parametry. Propelerová turbína je citlivá na kolísání průtoků, to způsobuje, že turbína pracuje s vysokými účinnosti pouze v úzkých oblastech průtoků. Mimo ně účinnost znatelně klesá. [2]

Pohyblivé části turbíny jsou samomazné (dolní vodící ložisko), nebo se zabezpečením proti úniku maziva – mimo kontakt s říční vodou(horní závěsné ložisko). Díky tomu jsou tyto turbíny ekologicky nezávadné a způsobí i pro provoz ve vodárenských přivaděčích. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost stálého ponoření savky do spodní vody, pokud tato podmínka není splněna, turbína nebude fungovat. [7]

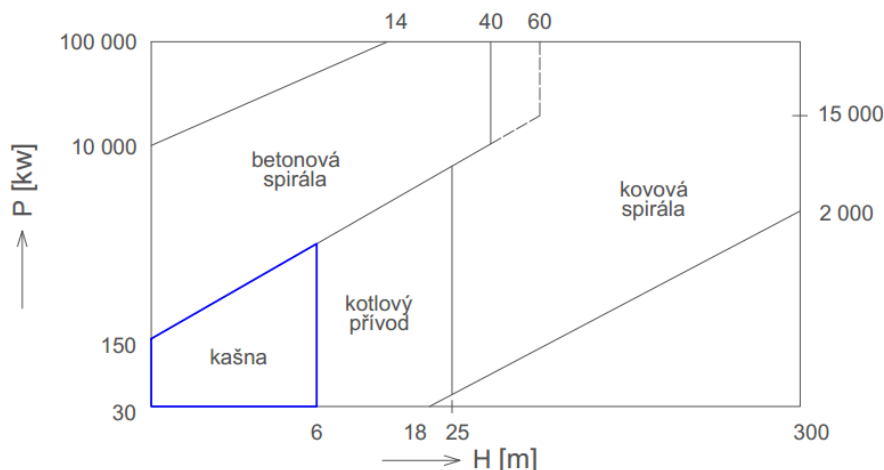
Turbíny MAVEL se vyrábějí od roku 1983, původně jako turbíny METAZ ve stejnojmenné firmě v Týnci nad Sázavou. Těchto strojů pracuje u nás spolehlivě cca 700 kusů, na spádech od 2 do 6 m. Jsou vhodné např. do lokalit, kde nahrazují původní vodní kolo na svrchní vodu. Zde se pak pouze vybuduje opěrná zeď, čímž vznikne kašna. V ní se poměrně jednoduchým způsobem instaluje turbína MAVEL. Výrobce dodává kompletní soustrojí včetně generátoru a elektrického rozvaděče. Podmínkou omezující nasazení těchto jednoduchých turbín je pokud možno konstantní průtok a jen málo se měnící úroveň horní hladiny. Typ MAVEL TM3 lze ekonomicky nasadit od spádu 3 m a průtoku 0.3 m<sup>3</sup>/s, typ MAVEL TM5 od spádu 2 m a

průtoku kolem  $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Horní hranice spádu u obou velikostí je hodnota 6 m. Tyto turbíny mají účinnost okolo 74 až 82 %.[4]

V sací komoře se nachází i vrtule turbíny, která se díky proudění vody otáčí. Na druhém konci hřídele je připojen asynchronní motor, který funguje nejdříve v motorickém režimu a nasává tak vodu do násosky, tímto sníží dobu potřebnou k vyčerpání vzduchu v násosce. Při zcela plném zavodnění násosky se turbína roztáčí plným výkonem a motor se dostává do nadsynchronních otáček. Při těchto otáčkách se už chová asynchronní motor jako generátor.[4]

## 2 VSTUPNÍ ZAŘÍZENÍ DO TURBÍNY [5,6]:

Nedílnou součástí turbíny je její vstupní část. Z hlediska účinnosti a správné funkce celé turbíny má důležitou roli. Úkolem každého vstupního zařízení by mělo být s co nejmenšími ztrátami přivádět rovnoměrně vodu a to po celém obvodu rozvaděče. Trendem moderní doby je snaha o dosažení efektivního využití energie bez zbytečných ztrát a jiných negativních jevů. Díky moderním systémům CFD jsme schopni podchytit tyto jevy a navrhnout optimální řešení. V této kapitole bude detailněji rozebrána kašna turbíny a její návrhy na zlepšení. V literatuře [5] je uvedena závislost výkonu na spádu a dle toho uvedena řešení vstupního prostoru.



Obrázek 5 Oblast používání jednotlivých typů přívodů [5]

### 2.1 KAŠNA TURBÍNY [5]

Jedno z prvních řešení přivedení vody na vodní motor byla odkrytá dřevěná nebo betonová kašna. Byla využívána již před vznikem moderních turbín a sloužila k přivedení vody na vodní kolo. Po vynalezení turbín byly tyto kašny osazovány horizontálními i vertikálními turbínami bez toho, aby bylo řešeno optimální umístění turbíny v kašně. Z hlediska rostoucích nároků na zvyšování účinnosti celého soustrojí došlo postupně k jejímu zdokonalování, tím se dosáhlo značných zlepšení v rovnoměrnosti nátoky vody na oběžné kolo, tím také došlo ke snížení ztrát.

Lze říci, že jejím zdokonalováním se z ní postupem času vyvinulo řešení, které vedlo ke vzniku spirální turbíny.

I v dnešní době je kašna dobrou alternativou ke spirálám. V mnoha případech je dokonce vhodnějším řešením než spirála. Jedním z hlavních důvodů jejího stále častého využívání je možnost levného zřízení vodní elektrárny. Značných úspor je dosaženo obnovením zaniklých malých vodních elektráren, které se v dobách největšího rozvoje hydroenergetiky stavěly zpravidla jako nízkotlaká kašnová díla. Možné je také přestavění jiných vodních děl, která sloužila k pohonu různých zařízení (např. pohon pily, mlýnu apod.).[5]

Při opětovném využití kašny je nutné brát zřetel na citlivé umístění turbíny. Pokud je turbína dobře umístěna a kašna vhodně upravena tak, aby v ní bylo proudění vyhovující, lze dosáhnout vysokých účinností při nevelkých stavebních nákladech. Elektrárna poté pracuje z hlediska nátoky vody na turbínu spolehlivě a návratnost investice je rychlá.

Přítok vody do kašny je zajistěn přivaděčem, který může být proveden jako beztlakový nebo tlakový.

Při rychlém zastavení průtoku dochází k prudkému zvýšení hladiny, která se rozkolísá, ale po jisté době se ustálí na konstantní hodnotě. Výška hladiny v kašně je po ustálení dána polohou hladiny ve vzdouvacím zařízení (princip dvou spojených nádob). Toto maximální zvýšení je důležité z hlediska návrhu výšky kašny. Pro případ přelítí se kašna opatřuje nejčastěji jalovým přepadem.

Při otevření lopatek slouží kašna jako zásobník vody. To znamená, že voda z kašny doplňuje objem vody vstupující do turbíny, který není ze začátku schopný dodávat přivaděč. V tomto případě se voda ustálí na výšce, která odpovídá velikosti odběru vody turbínou. Tato výška je menší než při nulovém odběru vody. Je menší pouze o hodnotu velikosti ztrát v přírodním potrubí a to o tzv. ztrátovou výšku spádu  $H_z$ .

Tento pokles hladiny je zejména důležitý ve chvíli, kdy je ve vzdouvacím zařízení minimální hladina, při které je ještě elektrárna provozována. Při otevření by mohlo totiž dojít k tak značnému poklesu vody v kašně, že by hrozilo vnikání vzduchu do turbíny, což by snižovalo její hltlost a tím velikost dodávaného výkonu.

Co se týče vodního rázu, pokud má elektrárna otevřenou kašnu, nemůže dojít k poškození tlakového přivaděče vodním rázem, protože se veškerá energie „vybije“ na hladině v kašně.

Uzavřené kašny se používají u těch vodních děl, kde by výška odkryté kašny byla značná (tj. pro elektrárny využívající velký spád). Velká výška kašny by znamenala nadměrné zvýšení investičních nákladů na výstavbu elektrárny.

U kašnové elektrárny s beztlakovým přivaděčem při změnách odběrů dochází také ke kolísání hladiny v kašně. Následkem toho dochází ke vzniku vln, které se odráží od stěny kašny a vrací se zpět směrem do přivaděče. Podobně jako u kašny s tlakovým přivaděčem dojde k ustálení výšky hladiny. Při značném poklesu hladiny by mohlo dojít k nebezpečí strhávání vzduchu do turbíny. Nebezpečí může také vzniknout při zastavení odběru, protože v kašně a v přivaděči dočasně stoupne voda a odražená vlna by se mohla vylít mimo přivaděč. S tím je také nutno při jeho stavbě počítat. Přivaděč bývá opatřen těsně před vstupem do samotné elektrárny jalovým přepadem, který by případný nadbytek vody odvedl zpět do řečiště.

Jak již bylo zmíněno, největších změn výšky hladiny v kašně je dosaženo ve chvílích zastavení a započetí odběru vody. Výška kašny a výškové umístění turbíny v kašně musí tyto výkyvy zohledňovat.

Řešení kašny musí umožňovat při zastavení přívodu vody také své vyprázdnění. Zpravidla bývá kašna opatřena výpustí, která je vyvedena do vývařiště. Při jejím otevření by měla z kašny samovolně odtéct naprostá většina vody. Vypuštěná kašna by měla být dobře přístupná pro kontrolu nainstalovaného zařízení a pro jeho případnou opravu.

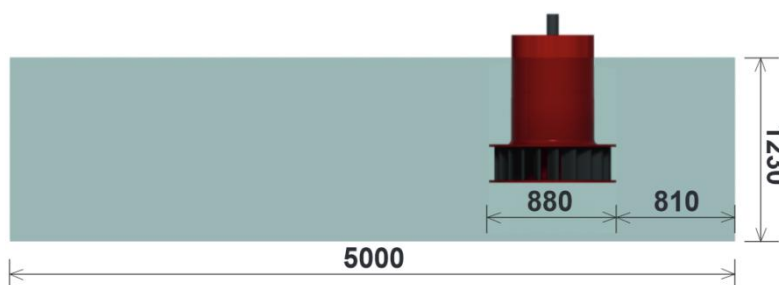
## 2.2 ROZMĚRY KAŠNY

Kašna má poněkud větší rozměry proto, aby mohlo dojít k ustálení vody po jejím příchodu do kašny. To je důležité především z toho důvodu, aby nedocházelo k vstupu nadměrně zvířené kapaliny do rozvaděče oběžného kola. Při větším víření v kašně by mohlo dojít k zhoršení proudění na vstupu do rozvaděče a mezilopátkový kanál statorové mříže (prostor mezi rozváděcími lopatkami) by se stal hůře průchozím, čímž by se snížila hltlost turbíny a snížily by se i maximální dosažené výkony. [17]

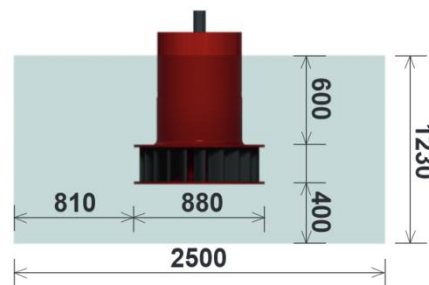
Z hlediska proudění vody v kašně a nátoku vody na turbíny má zásadní roli umístění turbíny v kašně a to zejména z půdorysného pohledu. Důležitá je vzdálenost rozvaděče turbíny od místa vstupu vody do kašny. Větší vzdálenost přívodu vody přispívá k tomu, že voda má dostatek času na uklidnění před vstupem do rozvaděče. Tato časová prodleva umožňuje vytvoření rovnoměrného rychlostního pole. To se vytvoří tak, že voda přichází z kanálu o menším průřezu do kašny, která má větší průřez. V kašně dochází k zpomalení proudění a vyrovnání rychlostí po průřezu. Pokud je vzdálenost nedostatečná, k vyrovnání rychlostního pole před rozvaděčem nedojde. Následkem nerovnoměrnosti proudění se zvětší ztráty při natékání vody do rozvaděče a účinnost turbíny klesne. [17]

Turbíny malých rozměrů (do průměru oběžného kola  $D = 2$  m) pracující při spádech do 6 m (výjimečně i do 10 m) je ekonomicky vhodné umístit do odkrytých betonových kašen. [6]

Základní rozměry kašny do které bylo umístěno rozváděcí kolo jsou uvedeny na Obr. 6, 7. Rozměry kašny byly dodány firmou MAVEL dle jejich konkrétního projektu. Rozváděcí kolo má základní pozici číslo 5. Přesnější pozicování je rozepsáno v kapitole Modelování pomocí CFD.



Obrázek 6 Rozměry kašny narys



Obrázek 7 Rozměry kašny bokorys

Doporučení, které je možno najít v literatuře [1], kde Nechleba uvedl vztah pro volbu šířky kašny pro turbíny s menším průměrem oběžného kola. Podmínka pro šířku kašny:

$$\check{S} = D + 1,3 \text{ až } 1,5 \text{ m}$$

Kde  $D$  je vstupní průměr oběžného kola. Pokud by jsme se řídily tímto doporučením, pro náš případ by platilo, že minimální šířka kašny by měla být 1,8 až 2,1 m. Z tohoto hlediska tedy šířka kašny vyhovuje.

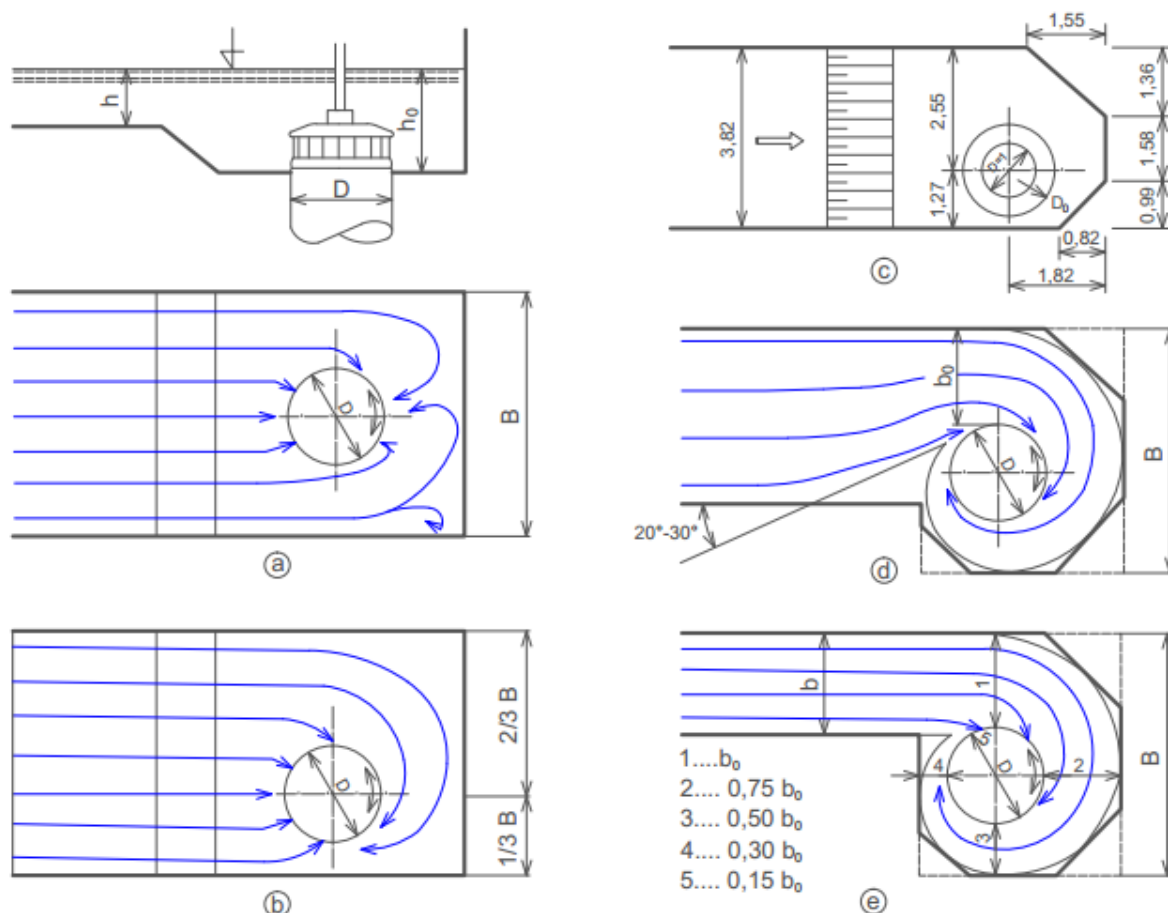
## 2.3 VÝVOJ ODKRYTÝCH KAŠEN TURBÍN [5,6]

V průběhu historie prodělaly kašny značný vývoj. Nejdříve se rozměrově a výkonově malé turbíny (tj. turbíny přibližně s průměrem do  $D = 1.2$  m, měrnými energiemi  $Y < 50 \text{ J.kg}^{-1}$ ) umísťovaly do odkrytých kašen. Tyto kašny byly dřevěné nebo betonové.

Běžné, avšak velice nevhodné, řešení takové kašny je možné vidět na Obr.8a. Při tomto způsobu umístění turbíny dochází v její blízkosti k negativním jevům, kterými jsou značně nevhodné proudění a tvorba vertikálních vírů.

Pravidelně vznikající vertikální vtokové víry by strhávaly vzduch do turbíny. Nevhodné proudění by ve svém důsledku způsobilo víření v mezilopatkových kanálech. Mezi jednotlivými lopatkami rozvaděče by protékalo různé množství vody a oběžné kolo by bylo nerovnoměrně silově zatíženo. Tyto negativní jevy mohou zapříčinit pokles hltnosti turbíny. S menším průtokem turbínou klesá i její účinnost. Nevýhodou takového provedení je nadměrná velikost kašny. Při symetrickém umístění turbíny (Obr.8a) by měla být kašna navržena tak, aby se v ní voda pohybovala v rozmezí rychlostí  $v = 0.8 - 1.0 \text{ m.s}^{-1}$ .

K určitému zlepšení však přispěje excentrické umístění turbíny v kašně (Obr.8b). Z důvodu zlepšení natékání vody do rozvaděče je možno volit rychlosti větší přibližně o 20 %. Při takovém umístění dochází k zrovnoměrnění nátoky vody na turbínu. V rozích kašny se však stále vyskytuje nevhodné proudění. V těchto oblastech voda cirkuluje a zhoršuje účinnost turbíny. Z toho důvodu je vhodné tyto rohy vyplnit viz obr 8.c.



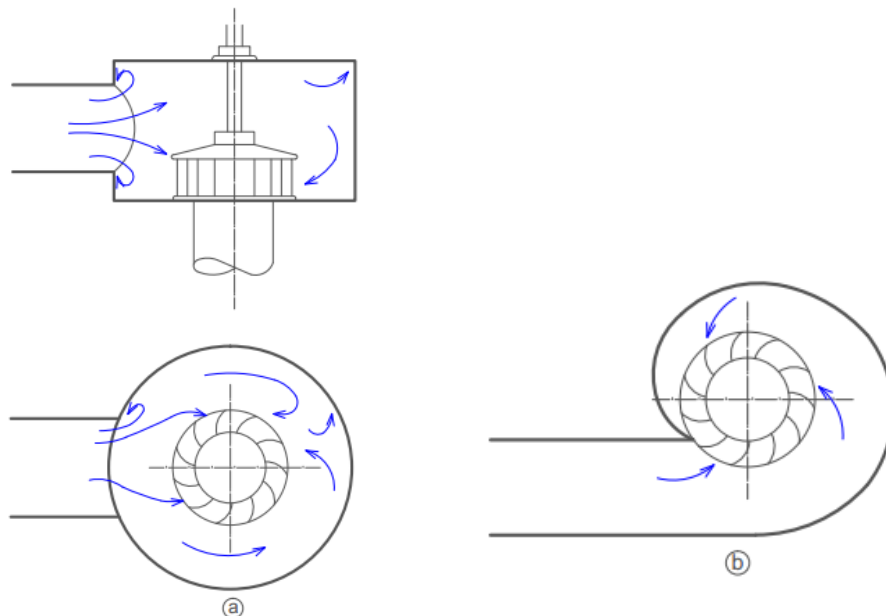
Obrázek 8 Vývoj otevřené kašny[6]

Snahou je docílit co nejplynulejšího přechodu mezi rohy kašny. Čím více se provede zkosení, tím více se tvar kašny blíží v půdorysu spirále. (Obr 8.d) Vzhledem ke zlepšení proudění je možné, aby došlo k dalšímu urychlení proudění v kašně. Ke zvýšení rychlosti dojde zúžením vstupní části kašny. Výsledkem těchto úprav je kašna, která je zobrazena na Obr 8. e.

Při tomto způsobu řešení se dosáhne výrazného zlepšení rovnoměrnosti nátoky vody na turbínu a dojde ke zmenšení turbínového bloku. Proudící voda má již určitou obvodovou rychlost při vstupu do rozvaděče, proto v rozvaděči nedochází již k velké změně směru proudění a ztráty jsou menší. Další výhodou je, že místo většího množství pohyblivých vertikálních vírů vzniká v kašně pouze jen jeden pomalý vír a ten má svou osu rotace totožnou s osou rotace hřídele. Takový vír není již nebezpečný (vzhledem k strhávání vzduchu) protože vzdálenost jeho osy od vstupu do rozvaděče je poměrně značná. Výsledkem těchto úprav je mj. zmenšení rozměru kašny. Nevýhodou i tak upravených kašen zůstává jejich výška, která je závislá od velikosti zpracovávaného spádu. [6]

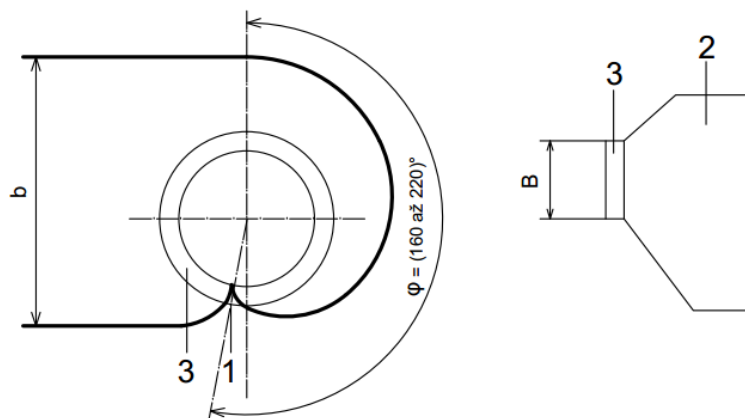
## 2.4 VÝVOJ KRYTÝCH KAŠEN TURBÍN [5]

Při značných spádech (tj. spádech nad 6 až 10 m) se používá kašna krytá (kašna bez volné hladiny viz Obr. 9) Výhodou takové kašny je snížení investičních nákladů na její výstavbu. I kryté kašny prošly obdobným vývojem jako kašny otevřené (Obr. 9 a, b).



Obrázek 9 Vývoj krytých kašen turbín  
a) umístěny ve středu kašny b) excentrické umístění [5,6]

Postupným vývojem uzavřených kašen se došlo až k tvaru, který je na Obr. 10



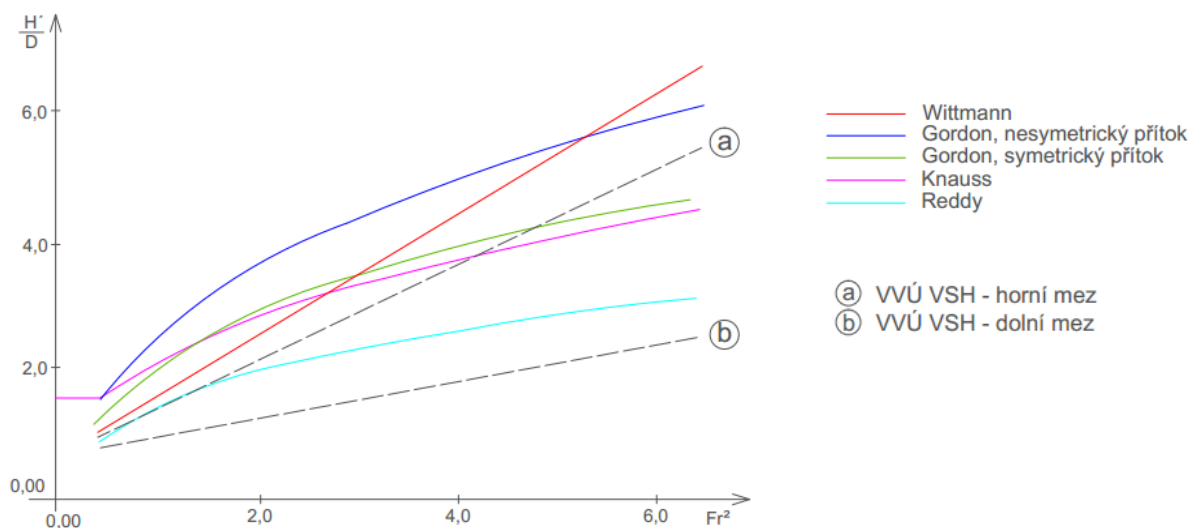
Obrázek 10 Spirální kašna [2]  
1 – ostruha spirály, 2- profil spirály, 3 – výztužné těleso s lopatkami

Tato varianta je svým provedením (profilem kanálu Obr. 10) prakticky shodný s betonovou spirálou nekruhového průřezu kanálu. Používá se pro turbíny větších rozměrů. Vzhledem k vhodnému proudění v takto provedené kašně lze vodu přivádět poměrně vysokou rychlostí tj ( $v < 3 \text{ m.s}^{-1}$ ). Pro větší turbíny by vycházely rozměry jiných typů kašen (v porovnání se spirální kašnou) poměrně značně velké.[2]

### 3 NEŽÁDOUCÍ PRVKY VZNIKAJÍCÍ V KAŠNĚ

#### 3.1 VTOKOVÝ VÍR [11,8]

Výškové umístění vtoku, zejména jeho horní vtokové plochy pod hladinu vody má zásadní význam pro zabezpečení vtoku před strháváním vzduchu a před tvorbou vodních vírů. Určením hloubky umístění vtoku se zabývala řada autorů. Z doporučených vztahů pro určení hloubky zanoření stropu přivaděče na vodní elektrárnu se používají zpravidla experimentálně odvozené vztahy J.L.Gordona nebo Vr.Reddyho. (Obr.11) [11]



Obrázek 11 Závislost mezi vznikem vtokových vírů dle různých autorů[11]

Vodní víry se vyskytují hlavně při výtoku otvorem ve dně nebo ve stěnách nádrží. Souhrnně se nazývají vtokové víry. Podle formy, kterou nabývají, je můžeme rozdělit do čtyř hlavních kategorií. Při modelovém výzkumu vtoků vodních elektráren jde zpravidla o dostatečně spolehlivé stanovení podmínek, za kterých nedochází k strhávání vzduchu vírem do vtoku.[8]

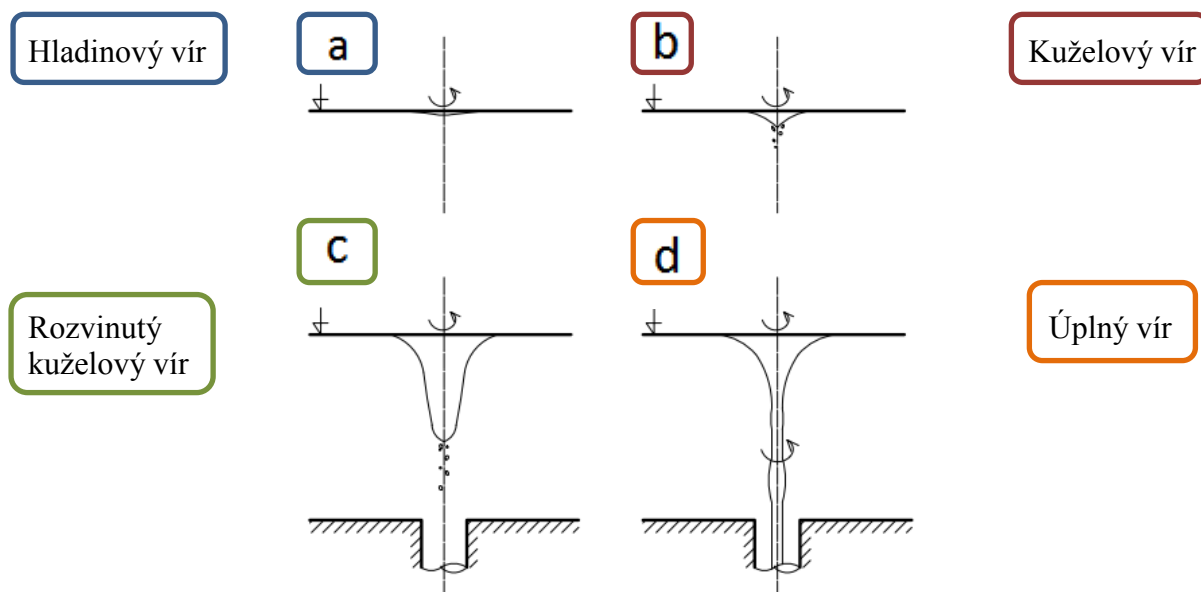
V sacích jímkách s volnou hladinou se voda pohybuje převážně působením gravitační síly. Avšak proudění ovlivňují do jisté míry i síly vnitřního tření a síly povrchového napětí. Účinek vnitřního tření se projevuje ztrátami tlaku způsobenými třením proudu o stěny nádoby a vnější povrch sacího potrubí. Vnitřní tření v kapalině také spolupůsobí při vzniku a vývoji vírů v nádobě. Síly povrchového napětí mají význam hlavně při vzniku a počátečním stádiu vývoje víru, kdy brzdí působí proti snahám a deformaci hladiny. I v případech, kdy vzniká před vtokem neúplný vír, který je příliš slabý na to, aby strhával vzduch do vtoku, je jeho vliv provoz vodní elektrárny obvykle záporný. Nutno dodat, že kromě vtokových vírů, jejichž jeden konec je fixován na hladinu, mohou existovat víry s koncem fixovaným na dno či na stěnu nádrže. Tyto víry sice nemohou strhávat vzduch do potrubí, mohou však napomáhat vnikání dnových naplavenin do potrubí a vyvolávají většinou nežádoucí příčnou cirkulaci v přivaděči. Řešením nepříznivých podmínek na díle může být dodatečná instalace opatření proti vzniku vtokových vírů v sacím prostoru. Instalace normé stěny, instalace žeber nebo hladinové rošty. [8]

Stanovení kritické hloubky pro vytváření vtokových vírů bylo důležitou součástí pro optimalizaci hloubky zanoření rozvaděče v této práci.

### 3.1.1 VZNIK A VÝVOJ VÍRŮ [12,13,19]

Vír spojující hladinu s vtokem potrubí se nevytváří náhle, ale je výsledkem postupného vývoje, v němž vír prochází mnoha vývojovými stádii. Počáteční podnět ke vzniku víru mohou dát vírová vlákna přinesená proudem do blízkosti sacího potrubí. Jiným zdrojem vírových vláken jsou mrtvá zákoutí, kde se proud výrazně zpomaluje, dále mezní vrstva u stěn nádrže a úplav vznikající obtékáním sacího potrubí. Počáteční vír při vhodných podmínkách zesílí a prochází dalšími stádii až do konečného, kterým je nálevkový sací vír – (vortex), nebo také o oblast úplných vírů. [19]

U vývoje vtokového víru rozlišujeme několik stádií. Vznikající vír se z počátku projevuje jako pomalé kroužení na hladině. Jestliže vír zesiluje, objevuje se zprvu nepatrná, později však stále zřetelnější prohlubeň na hladině tzv. hladinový vír. (Obr.12.a) Zesilováním cirkulace se mění tvar víru, zvětšuje se jeho hloubka a vzniká tzv. kuželový jasně ohraničený vír, s ostrým hrotem. (Obr.12.b) Další stádium víru je charakterizováno tím, že se délka víru dále zvětšuje a jednotlivé vzduchové bubliny nebo tuhé částičky se oddělují od hrotu víru a vnikají do sacího potrubí. (Obr.12.c) Tento typ víru se obecně označuje jako neúplný nálevkový vír. Pokračuje-li růst víru dále, dosáhne souvislé vzduchové jádro do sacího potrubí a umožní tak plynulý tok vzduchu z atmosféry, mluvíme o úplném víru. (Obr.12. d) [19] Poslední stádium úplného vtokového víru přechází dalším snižováním hladiny (při téže průtoku) do stavu, kdy vzniká při hloubce  $H_p$  deformace hladiny – propad. U propadu značně stoupá množství vzduchu pohlceného proudem, odhaduje se asi na 30 – 50 % průtoku. [11]



Obrázek 12 Vývoj vírů[19]

Na obrázcích 11, 12 jsou vyneseny hloubky zanoření vůči průměru kola v závislosti na Froudeho čísle:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (1)$$

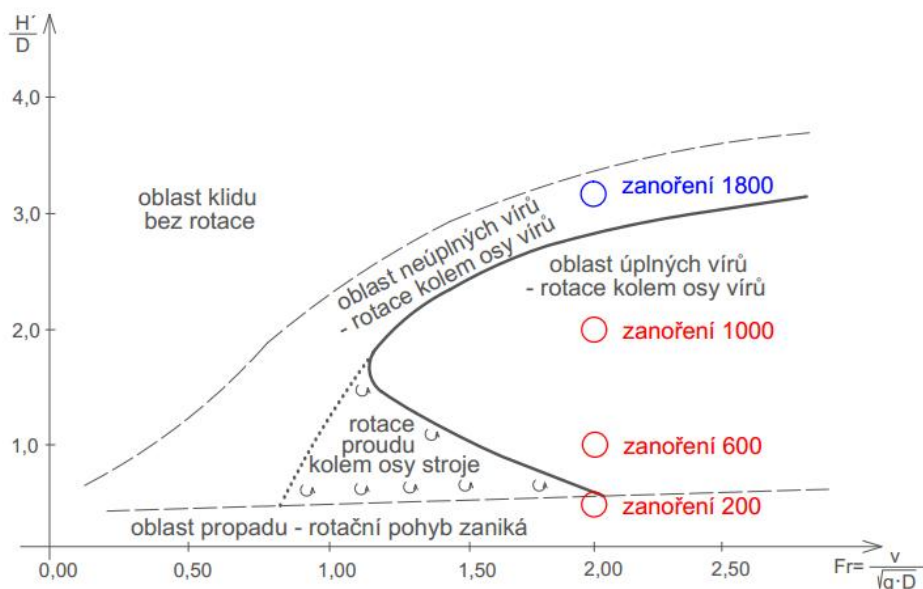
Kde  $D$  je průměr oběžného kola a  $v$  je průřezová rychlost v průtočném průřezu  $\pi D^2/4$ . Pro jednoznačnost je vhodné doplnit  $v = 4Q/(\pi D^2)$ . [12]

### 3.1.2 VLIV ZANOŘENÍ NA VZNIK VÍRŮ

Pro posouzení a odhadnutí vírů bylo zvoleno rozdělení oblastí podle charakteru proudění dle literatury [11] od Jana Šulce. Pro odhadnutí vírové oblasti bylo nutno dopočíst Freudovo číslo a poměr zanoření vůči průměru oběžného kola.

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 1,08}{\pi \cdot 0,55^2} = 4,55 \text{ m/s}$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}} = \frac{4,55}{\sqrt{g \cdot 0,55}} = 1,96$$



Obrázek 13 Schématické rozdělení oblastí dle charakteru proudění na hladině v kašně vertikálních turbín[12]

Zanoření 1800

$$\frac{H'}{D} = \frac{1800}{550} = 3,27$$

Zanoření 1000

$$\frac{H'}{D} = \frac{1000}{550} = 1,81$$

Zanoření 600

$$\frac{H'}{D} = \frac{600}{550} = 1,1$$

Zanoření 200

$$\frac{H'}{D} = \frac{200}{550} = 0,37$$

### 3.1.3 STANOVENÍ MINIMÁLNÍ PROVOZNÍ HLADINY TURBÍNY V KAŠNĚ [11]

Tvorba úplných vtokových vírů, doprovázených vtahováním vzduchu do prostoru rozvaděče a oběžného kola, probíhá v kašnách vertikálních zcela odlišně než u vtoků do klasických přivaděčů. Kritickou hloubku ponoru vtoku kašnové turbíny výrazně ovlivňují zejména šířka, půdorysné uspořádání, umístění rozvaděče vzhledem k nabíhajícímu proudu. [15]

K určení polohy minimální provozní hladiny  $H'_{\min}$  nad horním okrajem rozváděcího kola můžeme najít v knize [10] pro spády  $H \leq 4$  m pro turbíny s vertikální osou vztah :

$$H' = 0,5 D$$

Tento vztah byl také v minulosti potvrzen doporučením firmou VOITH k malým vodním turbínám. [11] Nicméně tento vztah platí pro minimální provozní hladinu tzn. že se budeme pohybovat v oblastech těsně nad oblastí propadu, čili v oblastech úplných vírů.

Dalším používaným kritériem pro určení hloubky ponoru  $H'_{\min}$  je Raabeho vztah :

$$H' = 0,75 D$$

Který je doporučován pro soustrojí s vertikální i horizontální osou. [11]

Je také nutno podotknout, že tato kritéria byla odvozena pro nižší spády a konkrétní typy turbín s úzkým rozsahem specifických rychlostí. Informace o kritických hloubkách ponoru budou později doplněny při CFD simulacích, kde budeme detailněji sledovat vznik vírů v závislosti na zanoření.

Při propadu hladiny nezamezíme vniku vzduchu žádným dodatečným opatřením. Touto hranicí je také omezena možnost použití sekundárních opatření zamezujících tvorbě úplných vírů doprovázených vnikem vzduchu. [11] Prvky na zmírnění či odstranění vírů budou detailněji popsáno níže.

### 3.1.4 TVORBA VÍRU V RŮZNÝCH KAŠNÁCH [11,14]

U klasických vtoků se intenzita víru (při stejném průtoku) při poklesu hladiny zvyšuje, tím se mění i jednotlivé stadia od vírových důlků přes úplné víry až po propad hladiny.

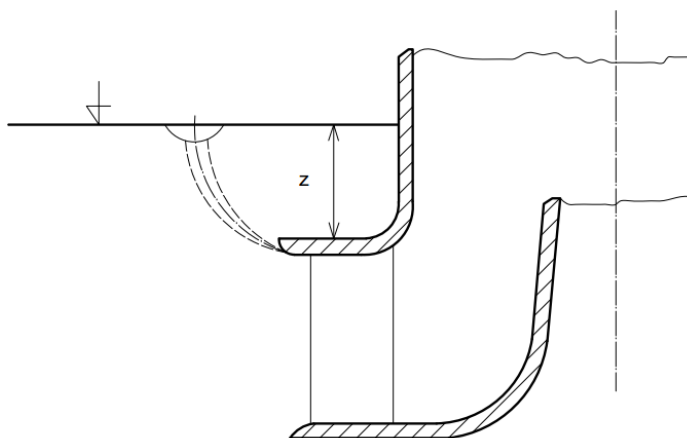
U kašnových turbín s vertikální osou se mohou vyskytnout dvě relativně oddělené oblasti tvorby vírů. V kašně větších rozměrů s nižšími rychlostmi je možno nalézt pro jeden průtok dvě rozmezí hloubek, při nichž dojde k výskytu vírů. Tato rozmezí jsou oddělena oblastí vzniku vírů nižších intenzit. Viz obr. 12[14]

### 3.1.5 VTKOVÉ POMĚRY DO TURBÍNY [15,16]

Turbíny METAZ jsou kašnového typu, přičemž voda do rozvaděče není vedena. To má za následek jednak nerovnoměrné rozdělení vody po obvodě rozvaděče a jednak tvoření vírů před vstupem do rozvaděče. Je otázka do jaké míry tyto poměry ovlivní proudění ve vlastní turbíně a jaký vliv mají na účinnost turbíny.

Hlavní výhodou turbín METAZ je jejich jednoduchost při výhodných parametrech: velká hltlost, vysoké otáčky a celkově dobrá účinnost. Jednoduchost se týká především vtokových poměrů do turbíny, turbína kašnového typu, bez spirály a bez jakéhokoliv zařízení pro vedení vody k rozvaděči. Umísťuje se nejčastěji pouhým ponořením do horní vody před jezem a „přehozením“ savky přes jez do spodní vody. [15]

Pouhým pozorováním hladiny v okruhu blízko nad rozvaděčem turbíny lze konstatovat, že proudění do rozvaděče není po obvodu rovnoměrné, tvoří se víry a proudění není ani časově ustálené. Tyto poměry jsou důsledkem jak náhlé změny velikosti rychlosti, tak zejména změny směru rychlosti. Ve žlabu před turbínou má totiž veškerá voda stejný směr daný stěnami přívodního kanálu a v poměrně krátkém dráhovém úseku těsně před rozvaděčem se náhle mění směr a to nejen v obvodovém směru (při zcela rozdílných změnách v různých místech obvodu), ale i v jednotlivých meridiálních profilech. Zvláště výrazná meridiální změna směru a velikosti rychlosti je v oblasti obvodu přírub rozvaděče v místě hrany příruby (Obr.14). [15]



Obrázek 14 Odtržení po obvodu přívaděče [15]

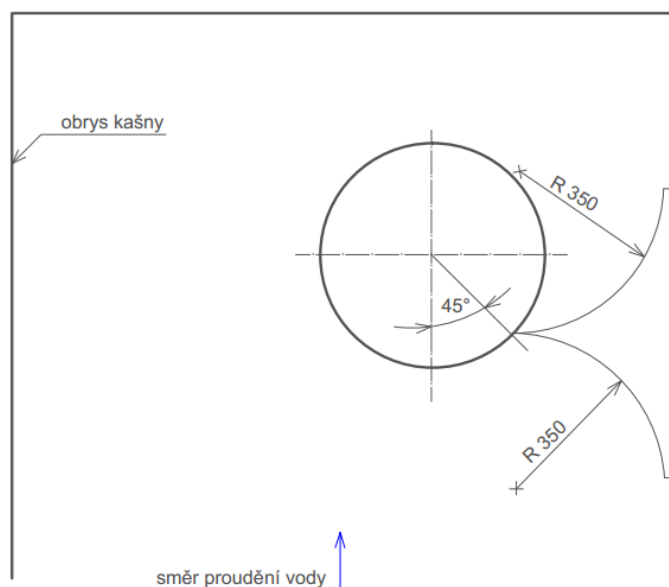
Zde dojde v některých místech na obvodu k odtržení proudu, kteréžto odtržení dá vznik víru. Druhý konec víru může končit jediné na hladině nebo na stěně. Vír, který v místě vzniku na hraně má malý průměr, se vlivem vnitřního tření rozšiřuje za současného snižování obvodové rychlosti. Na jeho konci na hladině se cirkulace projeví prohlubní. Sniží-li se hladina nad rozvaděčem, má to tyto důsledky:

1. Zvýší se poněkud rychlost obtékání hrany příruby rozvaděče.
2. Zkrátí se délka víru a tím se zmenší průměr konce víru na hladině při jeho větší obvodové rychlosti.
3. Zmenší statický tlak vody na vír (v jeho spodní části).

Všechny tyto okolnosti pak způsobují, že tlak uvnitř víru klesá, prohlubeň víru se zvětšuje a při určité hladině klesne tlak uvnitř víru až do místa jeho vzniku až na tlak atmosférický a vírem se začne přisávat vzduch. Na druhé straně odtrhávání proudu od stěny je charakteru nestabilního- periodického. Tuto nestabilitu podporuje nestabilita proudění vody v předpolí před rozvaděčem, což má i za následek, že k odtrhávání proudu dochází na různých místech obvodu rozvaděče. Toto vše pak způsobuje, že víry v určitých časových intervalech vznikají a zanikají a mění i své místo. Pro hrubou informaci bylo ve zprávě uvedeno, že naměřená periodičita byla asi 5-15 s u turbíny METAZ TM3. [15]

Je třeba si uvědomit, že výška hladiny nad rozvaděčem prakticky nemá žádný vliv na proudění těsně před rozvaděčem a na vznik vírů. Rozdíl je jen v tom, jak bylo výše vysvětleno, že při výškové hladině je vír na hladině zmírněn třením a rozšířením, eventuálně se v důsledku toho stane i nepozorovatelným a to může vést ke klamně domněnce, že při vyšší hladině je proudění na vstupu do rozvaděče příznivější – bez vírů. Dále je třeba si uvědomit, že k podobnému vytvoření víru jako u horní příruby rozvaděče dochází i u příruby spodní, s tím rozdílem, že druhý konec těchto spodních vírů končí na dnu nebo na stěně kašny. [15]

Pro vyšetření tohoto problému byl proto nejprve proveden výše uvedený podrobný rozbor vtokových poměrů a na jeho základě navrženo pak k odzkoušení dokonalejší vedení vody před rozvaděčem. První měl tvar ostruhy podle obr.15. [16]



Obrázek 15 Ostruha pro dokonalejší vedení vody[16]

Účelem ostruhy bylo usměrnit proudění v pravé polovině kašny těsně před rozvaděčem tak, aby se úhly rychlosti vody do rozvaděče přiblížily vstupnímu úhlu rozváděcích lopatek. Nakreslený profil ostruhy byl po celé výšce ode dna až po horní hladinu.

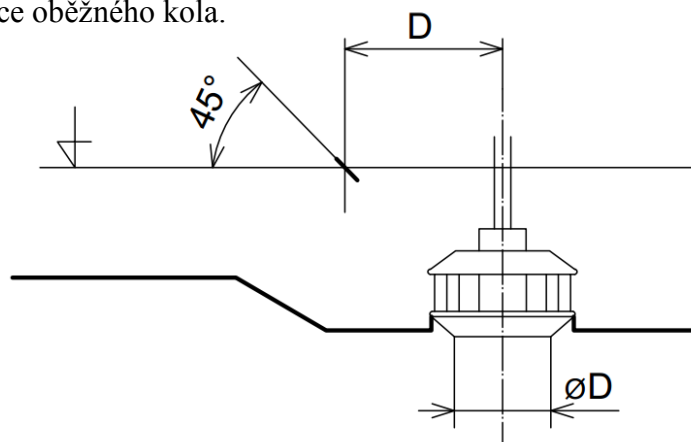
Pokud je hladina dosti vysoko nad rozvaděčem a víry se nepřisávají vzduch do turbíny, nemá tvorba takovýchto vírů prakticky žádný vliv ani na účinnost turbíny ani na její průtok a tedy ani na výkon. Jestliže je hladina níže a vír si přisává vzduch, pak účinnost a výkon klesá. Přisáváním vzduchu se dá lehce zabránit instalací desky položené na horní přírubu rozvaděče, jak bude popsáno v následující kapitole o přídatných prvcích zlepšující vlastnosti kašny. [16]

## 4 PŘÍDAVNÉ PRVKY ZLEPŠUJÍCÍ VLASTNOSTI KAŠNY [2]

Pro zlepšení proudění v kašně a pro vhodnější natékání rozvaděče a posléze oběžného kola se mohou použít nejrůznější přídatné prvky a stavební úpravy. Jsou zde uvedené některé možnosti, které mohou přispět k zlepšení proudění v kašně. Jejich přesné provedení vždy záleží na konkrétním řešení každé elektrárny a v ní vzniklých problémech s natékáním vody do rozvaděče.

### 4.1 POMOCNÉ BRZDICÍ LOPATKY [2]

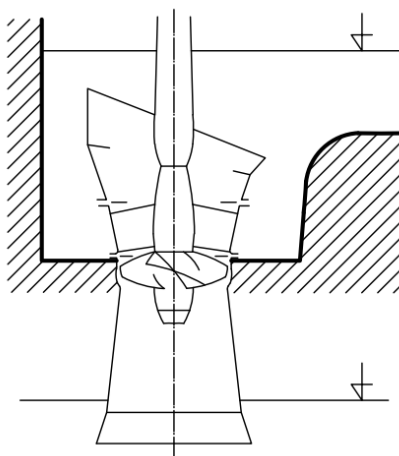
Lopatky se používají proto, aby zamezily nebo popřípadě omezily pohyb vytvářejících se vertikálních vírů. Používají se u kašen s poměrně vysokým rizikem vzniku vírů, tj. u symetrických kašen, nebo u kašen s mírnou excentricitou umístění osy rotace oběžného kola.



Obrázek 16 Umístění pomocné lopatky [2]

### 4.2 VTOKOVÉ TĚLESO [2]

Na obr 17. je znázorněno použití vtokového kusu u Thomannovy turbíny. Jeho účelem je zajistit zlepšení proudění v kašně a na vstupu do rozvaděče. Současně umožňuje zmenšování rozměrů kašny.

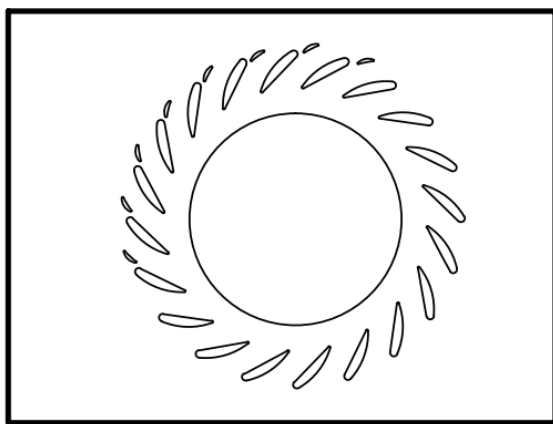


Obrázek 17 Provedení s vtokovým tělesem [2]

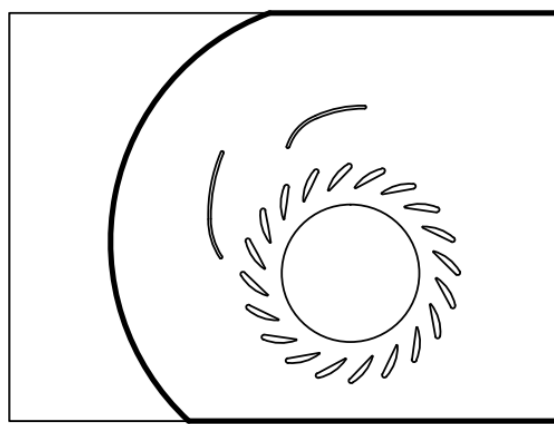
### 4.3 PROFILOVANÁ ŽEBRA A POMOCNÁ MŘÍŽ [7]

Pro zlepšení natékání vody z kruhové spirály do kašnového rozvaděče lze použít profilovaná žebra viz obr 18. Jejich použitím by se mělo docílit přitlačení vody k rozvaděči a zlepšit jeho natékání. Nevýhodou žeber ovšem je, že dochází k odtržení vody a vzniku úplavu za žebry. Nevhodné proudění ve spirále za žebry je zapříčiněno jejich značným ohnutím. To je nutné pro zlepšení natékání vody do rozvaděče v úseku, který byl před vložením žeber natékán značně nevhodně. Úplav za žebrem způsobuje v určité části rozvaděče zhoršení natékání vody. Proto je zapotřebí pečlivě uvážit, zda získané výhody převažují nad zápory.

Mnohem lepšího natékání lze docílit větším počtem žeber (použitím pomocné mříže), které vodu stáčíjí do kanálů rozvaděče, ale přitom výrazně natékanými lopatkami viz obr 19.



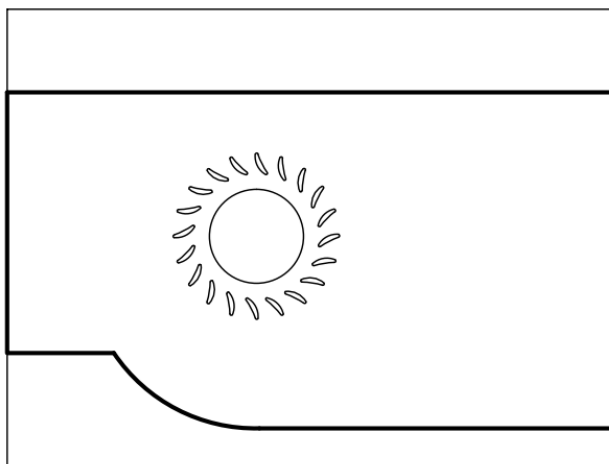
Obrázek 19 Pomocná mříž[7]



Obrázek 18 Profilovaná žebra[7]

### 4.4 UPRAVENÉ ROZMĚRY KAŠNY DO PODOBY SPIRÁLY [7]

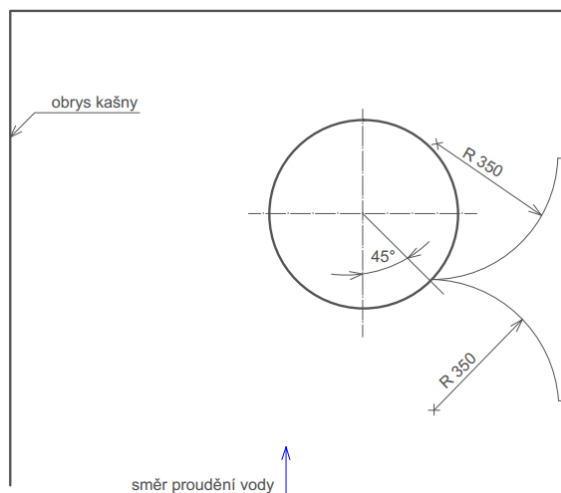
Změna rozměrů kašny do podoby spirály (Obr.20) může výrazně přispět k zlepšení vlastností proudění v kašně. Úprava napomáhá stáčet vodu podél stěny kašny a umožňuje lepší natékání rozvaděče. Použitím této úpravy dochází k rovnoměrnému rozdělení vody před turbínou.



Obrázek 20 Upravená kašna[7]

#### 4.5 OSTRUHA [15]

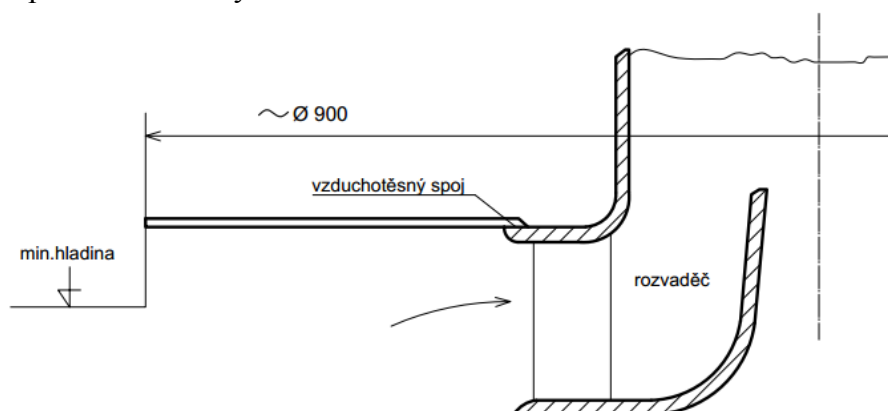
Účelem ostruhy je usměrnit proudění v pravé polovině kašny těsně před rozvaděčem tak, aby se úhly rychlosti vody do rozvaděče přiblížily vstupnímu úhlu rozváděcích lopatek. Profil ostruhy je po celé výšce kašny ode dna až po horní hladinu stejný.



Obrázek 21 Ostruha[15]

#### 4.6 STĚNA PODÉL ROZVADĚČE [16]

Velmi příznivý efekt má umístění stěny přímo na přírubě rozvaděče. V této poloze zabraňuje vytváření vírů u horní hrany rozvaděče a k přisávání vzduchu do turbíny dochází, až když hladina klesne pod úroveň stěny.



Obrázek 22 Stěna podél přivaděče do turbíny[16]

#### 4.7 POKUSY S KONSTRUKČNÍMI PRVKY ZLEPŠUJÍCÍMI VEDENÍ PROUDU [15,16]

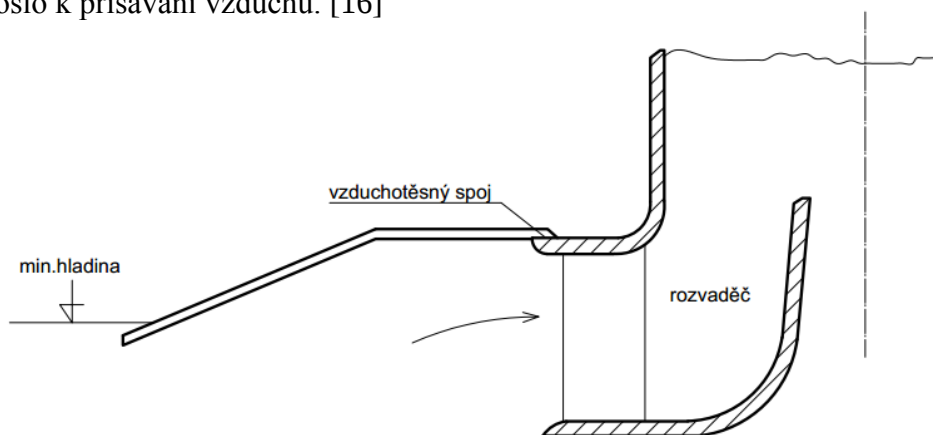
U jednotlivých pokusů, tj. při různých přípravcích, různých jejich kombinacích a při různých hladinách vody nad rozvaděčem, byly vyčísleny relativní účinnosti  $\eta_r$  a relativní průtoky  $Q_{r1}$  a vzájemně posouzeny. Z hlediska účinnosti a ani z hlediska průtoku nepřinesly přípravy ať jednotlivě, tak ani v kombinaci zaručené zlepšení. Obecně bylo možné sice konstatovat malé zvýšení účinnosti a menší rozkolísanost výkonu, hodnoty zlepšení však byly v toleranci nepřesnosti měření a rozptylu několikrát za sebou odečtených hodnot a nejsou tedy spolehlivě a v každém případě tak malé, že nejsou ekonomicky pozoruhodné. Proti očekávání jsou tedy výsledky těchto zkoušek negativní, a proto ani nebyly v této zprávě podrobně dále rozvedeny. Přes tento negativní výsledek poskytují zkoušky důležitou informaci:

nepříznivé vtokové poměry do rozvaděče, charakteru turbín METAZ, nemají negativní vliv na přeměnu energie v turbíně. Dá se to vysvětlit tak, že v průběhu proudění vody od vstupu do rozvaděče až po oběžné kolo, v kterémžto průběhu se rychlost zvyšuje, se rychlostní profil tak zrovnoměrňuje, že přeměna energie v oběžném kole proběhne bez nepříznivého vlivu vtokových disproporcí. [15]

Turbína byla umístěna jednou v 1/3 od levé stěny kašny a podruhé v 1/3 od pravé strany kašny, v obou případech při téměř smyslu točení turbíny a nebyly zjištěny rozdíly v účinnostech. Pokud jde o vytvoření vírů a přisávání vzduchu jimi bylo konstatováno následující.

Ostruha víry prakticky neovlivnila, pouze rozmístění vírů bylo poněkud jiné. Dá se to vysvětlit tak, že ostruha ovlivnila jen proudění v obvodovém směru a to jen v pravé polovině kašny, neovlivnila proudění meridiální, které se hlavně podílí na vytváření vírů.

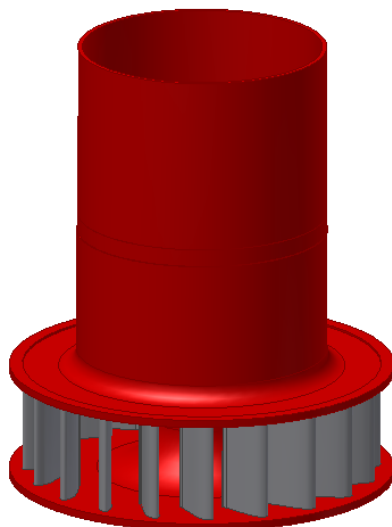
Velmi příznivý efekt má umístění stěny přímo na přírubě rozvaděče. V této poloze zabraňuje vytváření vírů u horní hrany rozvaděče a k přisávání vzduchu do turbíny dochází, až když hladina klesne pod úroveň stěny, tj. pod horní přírubu rozvaděče. Kdyby se stěna provedla ve tvaru zvonu podle Obr.23, nepřisával by se vzduch ani při dalším poklesu hladiny. Tímto způsobem je možné zabránit přisávání vzduchu do turbíny v případech, kdy je nutné v důsledku velkého kolísání horní hladiny instalovat savku a turbínu hodně vysoko a kdy při normálním provedení turbíny (bez mezikusu za komorou oběž.kola) a při hladině na koruně jezu by došlo k přisávání vzduchu. [16]



Obrázek 23 Stěna ve tvaru zvonu [16]

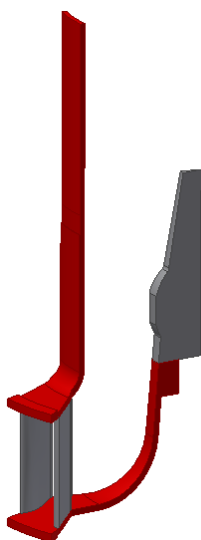
## 5 PŘÍPRAVA MODELU V MODELÁŘI

Dle konstrukčních výkresu od firmy MAVEL byl v modeláři Autodesk Inventor vytvořen celkový model rozváděcího kola turbíny TM5.

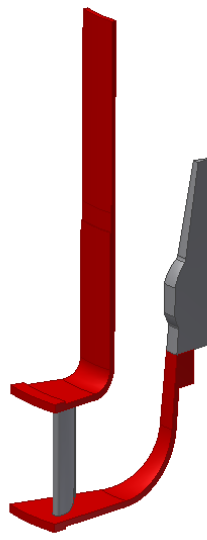


Obrázek 25 Rozváděcí kolo v Autodesk Inventor

Jelikož se jedná o rotačně symetrický celek, tak se mohlo přistoupit ke zjednodušení a mohla se vzít jedna dvacetina celku, která se následně exportovala. Na řezu je dobře vidět i vymodelovaná hruška, která je v reálu osazena ještě lopatkami a tvoří oběžné kolo turbíny.



Obrázek 27 První dekompozice



Obrázek 26 Druhá dekompozice

Model se následně exportoval do formátu STL, se kterým probíhala další práce v systému Gambit. Nicméně z důvodu zjednodušení se po pár neúspěšných pokusech vrátilo znova do Inventoru a provedla se jiná dekompozice, která výrazně pomohla k rychlejší konstrukci strukturované sítě v programu Gambit.

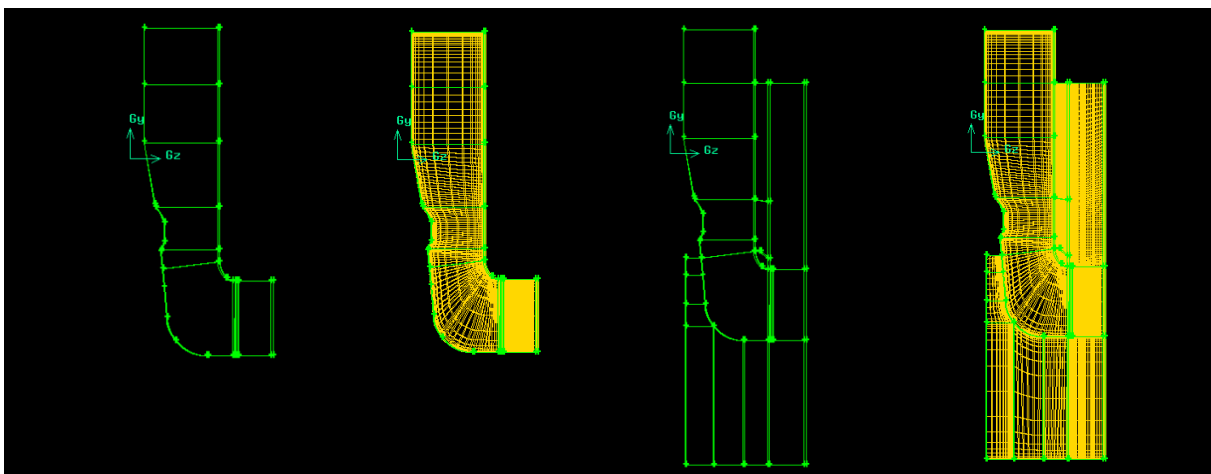
## 6 MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V KAŠNĚ POMOCÍ CFD

Jednou z možností jak sledovat proudění v kašně je modelování v CFD.

CFD (Computational Fluid Dynamics) jako metoda matematického modelování založená na metodě konečných prvků nebo konečných objemů, se stále víc se uplatňuje v různých odvětvích. Složitost výpočtu a náročnost metody se odvíjí od charakteru modelu a použitých rozměrových a tvarových omezení. CFD programy jsou v současné době pro odhad proudění v dané oblasti používají Navier–Stokes rovnice, rovnice kontinuity a zákonu zachování energie. CFD Analýza se skládá ze třech jednotlivých částí: preprocesing (vytvoření geometrie a vysítování), vlastní výpočet (nastavení počátečních, okrajových podmínek a samotný výpočet) a postprocesing (vyhodnocení výsledků). V diplomové práci bylo pracováno se softwarem Fluent.

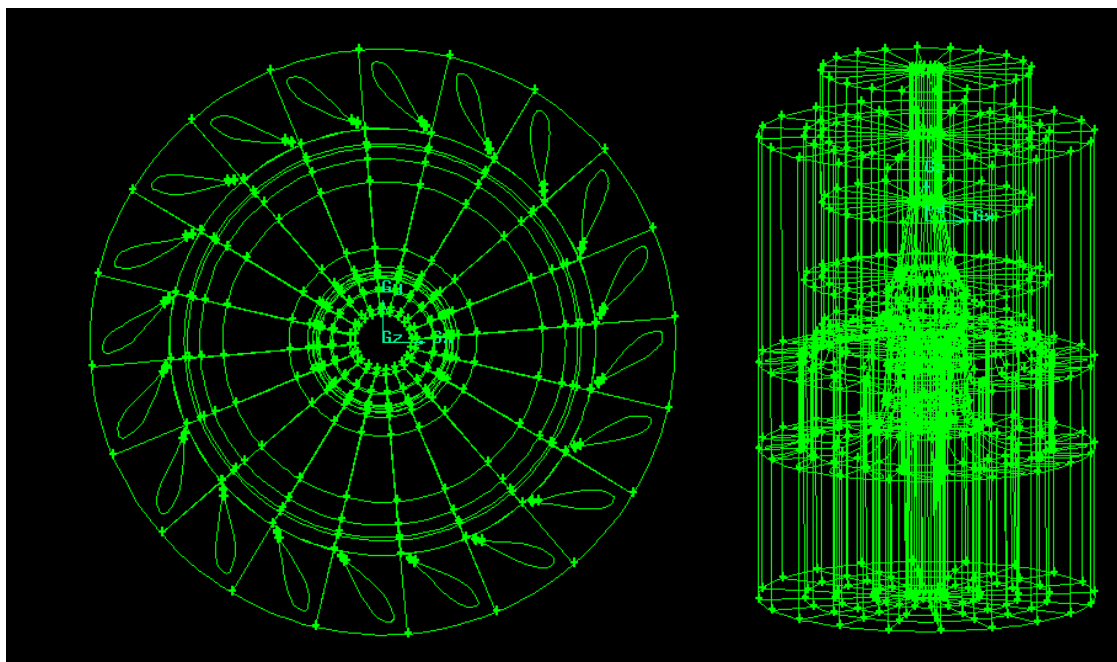
### 6.1 PREPROCESSOR GAMBIT

Software Gambit je primárně určený k tvorbě výpočetní sítě pro zadanou geometrii. Nejdříve však bylo potřeba převést geometrii turbíny z programu Inventor do preprocesoru Gambit. Jako výstupní formát z 3D modeláře byl zvolen STL (.stl), protože zaručuje dostačující převod geometrie, se kterou se dá dále pracovat a upravovat ji.



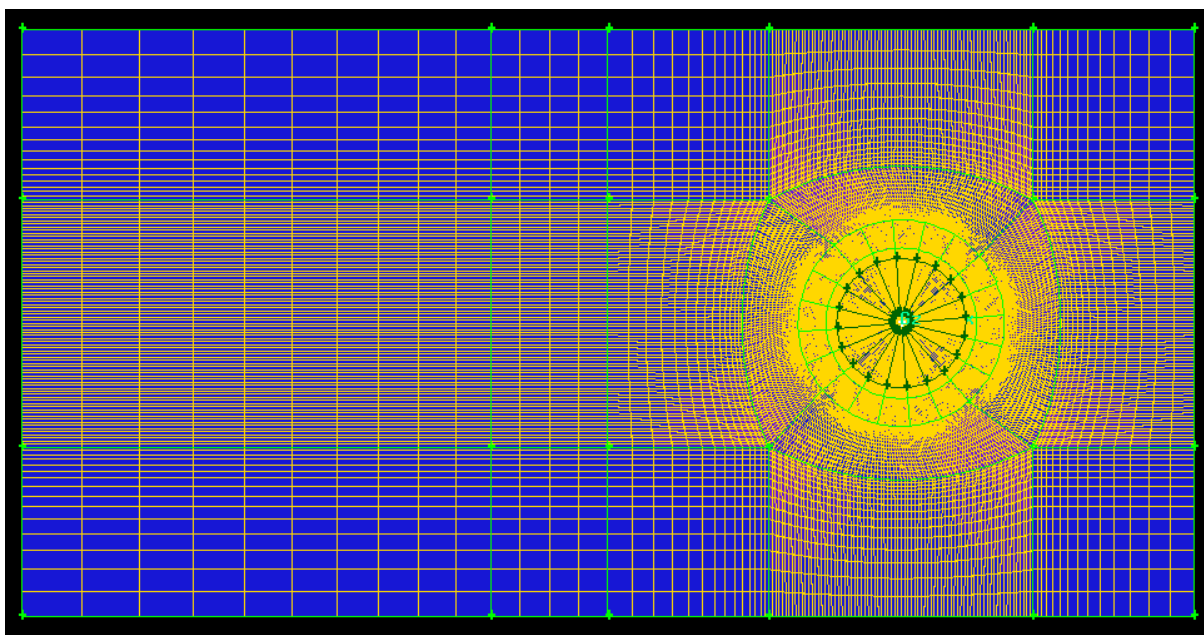
Obrázek 28 Rozváděcí kanál před rotací

Před rotací jednoho prvku rozváděcího kola, byly kolem dokola vytvořeny objemy, které symbolizují vnitřní objemy kašny, jsou vytvořeny tak, aby po následné rotaci vytvořily válcové těleso. Sít' lopatkových kanálů rozváděcího kola zůstávala stále stejná a měnila se pouze sít' kašny při různém umístění rozváděcího kola.



Obrázek 29 Rozváděcí kanály po rotaci

Celková kompozice turbíny MAVEL MT 5 vytvořená v programu Gambit měla počet buněk cca 3 000 000. Následně byla kolem rozváděcího kola vytvořena kašna, dle rozměrů skutečného projektu. Po doplnění sítě v kašně měla celková kompozice turbíny s kašnou počet buněk cca 5 000 000. Pro zhodnocení kvality sítě byla použita funkce EquiSize skew, která udává míru zkosení jednotlivých prvků sítě. Rozmezí této funkce je v intervalu 0 až 1, kde 0 nám představuje dokonalý tvar krychle. Nejhorší prvek s velikostí 0.82 byl v blízkosti lopatky.



Obrázek 30 Umístěný rozvaděč v kašně

Při výpočtech byla síť propojena i s rozváděcím kolem. Pro zjednodušení výpočtu byla stěna rozváděcího kola oddělena od kašny velmi tenkovou stěnou o velikosti 0.

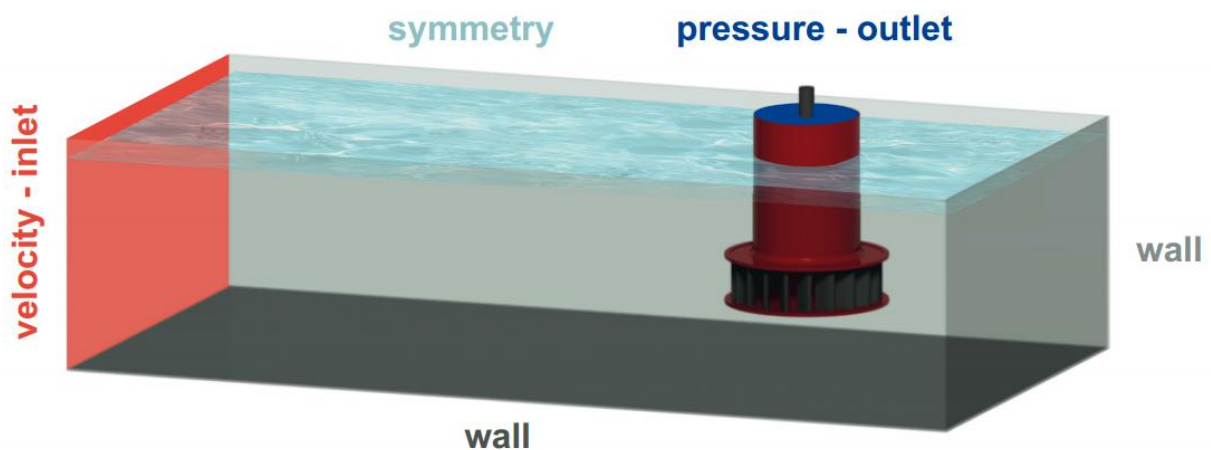
### 6.1.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Vstup vody do modelu je definován podmínkou **velocity – inlet**

Výstup vody z modelu definován podmínkou **pressure – outlet**, předpokládá se výstup do atmosféry s nulovým přetlakem.

Model je v úrovni hladiny definován podmínkou **symmetry**, která je charakterizována jako stěna s nulovou drsností. Tato okrajová podmínky představuje nejvýraznější zjednodušení výpočtového modelování oproti realitě.

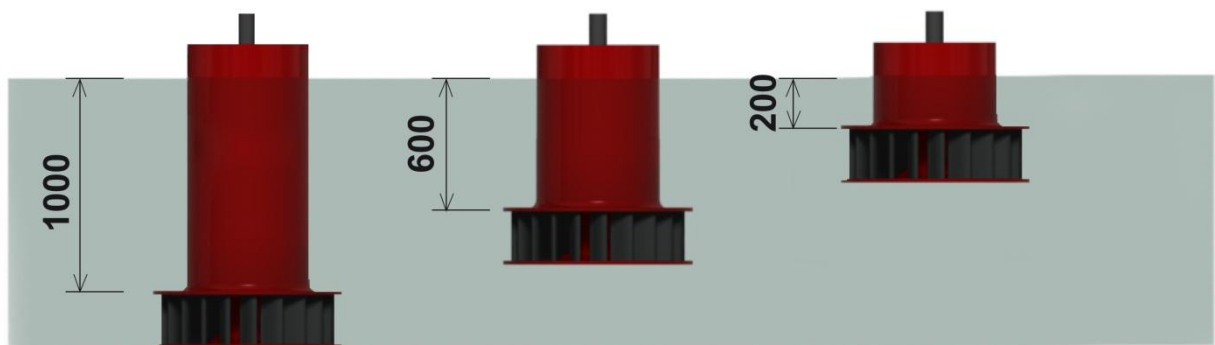
Dno kašny a stěny kašny jsou definovány jako pevná stěna s podmínkou ulpívání, podmínka **wall**



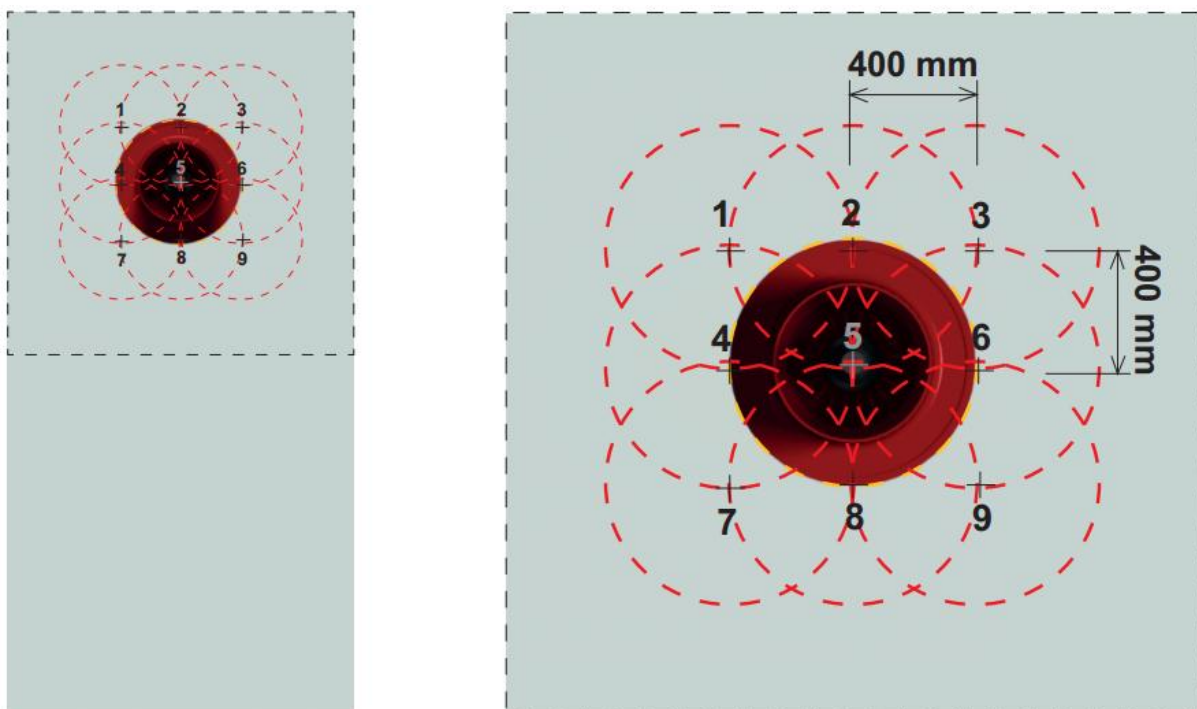
Obrázek 31 Okrajové podmínky

### 6.1.2 UMÍSTOVÁNÍ V KAŠNĚ

Turbína byla počítaná celkově pro 27 poloh. Nejdříve byla turbína zanořována do třech různých hloubek pro 9 různých půdorysných poloh. Vzdálenost mezi nimi byla v osách x,y 400 mm. Výpočetní síť vytvořené pro každou polohu byly svou kvalitou a velikostí podobné, tak aby bylo umožněno relativní srovnání výsledků mezi sebou.

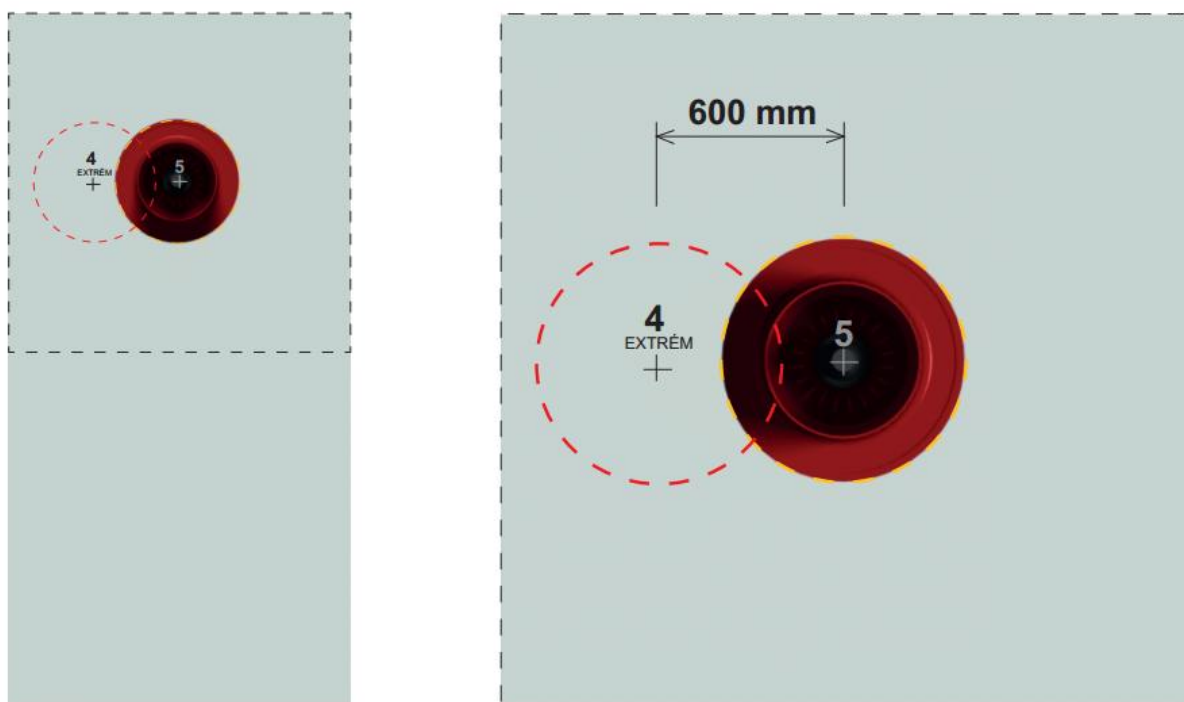


Obrázek 32 Různé varianty umístění v ose z



Obrázek 33 Různé varianty umístění v ose x a v ose y

V softwaru Gambit bylo rozváděcí kolo také rozděleno na krycí disk, nosný disk a lopatky, usnadnilo to poté manipulaci a postprocessing. V průběhu výpočtů a vyhodnocování výsledku se ještě doplnila další pozice s názvem 4-Extrém, tato pozice byla posunutá o dalších 200 mm směrem ke stěně.(Obr.34)



Obrázek 34 Přídavná pozice - 4. Extrém

## 6.2 VLASTNÍ VÝPOČET V SOFTWARE FLUENT

### 6.2.1 ROVNICE PROUDĚNÍ A DOPLNĚNÍ TURBULENCE[18]

Vytvořená síť byla následně exportována ze softwaru Gambit do programu ANSYS Fluent pro řešení kontinua.

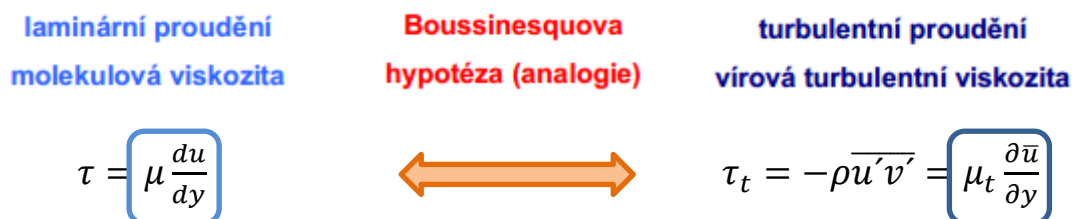
Při výpočtech bylo využito numerické řešení RANS pro turbulentní proudění, jde o Reynoldsem upravené tzv. časově středované Navier-Stokesovy rovnice.

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_i \cdot \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\bar{u}_i' \cdot \bar{u}_j')}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p})}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2(\bar{u}_i)}{\partial x_j \partial x_j} + \bar{f}_i \quad (2)$$

Rovnice obsahuje nový člen  $\bar{u}_i' \cdot \bar{u}_j'$ , který se po vynásobení hustotou nazývá tensor Reynoldsových napětí. Rovnice RANS musí být doplněna o další rovnici odvozenou Boussinesquovy hypotézou:

$$-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho_k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

Kde  $\mu_t$  je turbulentní viskozita. Tato hypotéza předpokládá, že podobně jako při laminárním proudění, kdy platí v zjednodušeném dvourozměrném proudění pro smykové napětí Newtonův vztah, jsou turbulentní napětí a turbulentní toky úměrné gradientu střední rychlosti, teploty, koncentrace apod, tj.



Na rozdíl od laminárního proudění turbulentní viskozita není fyzikální vlastností kapaliny, ale proudění. Je silně závislá na míře turbulence a může se výrazně lišit v rámci proudového pole.

Z hlediska modelování turbulentní viskozity v proudovém poli lze rozdělit modely turbulence do tří skupin, a to nularovnicové (algebraické), jednorovnicové a dvourovnicové modely, nazvané podle počtu doplňujících diferenciálních rovnic.[18] V našem případě byl užit sedmiorovnicový model Reynolds-Stress modul, který řeší transportní rovnice pro každý člen tenzoru Reynoldsova napětí. Výpočet je často přesnější, zvláště pro silně zavířené proudění než v případech užití jiných modelů.

Hydraulická optimalizace rozváděcího kola METAZ TM5 byla provedena tak, aby se jeho optimum pohybovalo v zadaných parametrech skutečného díla, tedy pro průtok  $Q = 1,08 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ten byl následně přepočítán na průřez kašny, která má na vstupu rozměry 2300x1230 mm.

Okrajové podmínky na hranicích:

Vstup : - Metoda specifikace rychlosti

- Metoda specifikace : Intenzita a hydraulický poloměr
  - o Intenzita zpětného proudění – 10 %
  - o Hydraulický průměr – 0.1 m

Výstup : - Metoda specifikace tlaku : Atmosferický

- Metoda specifikace : Intenzita a hydraulický poloměr
  - o Intenzita zpětného proudění – 10 %
  - o Hydraulický průměr pro případ zpětného proudění – 0.1 m

Metoda řešení : - metoda SIMPLE

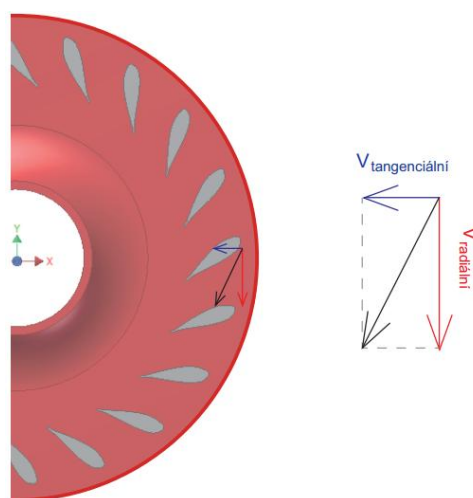
- Diskretizace
  - o Momentum – First Order Upwind
  - o Turbulent kinetic energy - First Order Upwind
  - o Turbulent dissipation rate – First Order Upwind
  - o Reynolds stresses – First Order Upwind
- Relaxační faktory : Pressure – 0,3 ; Momentum - 0,7

Zhruba po 1500 iterací byla metoda řešení přepnuta na vyšší řád přesnosti Second Order Upwind (Momentum, Turbulent kinetic energy, Turbulent dissipation rate, Reynolds stress) a úloha se nechala dokonvergovat zhruba do 3500 iterací. Pro post-procesing bylo ještě třeba si vytvořit ve Fluentu kruh v blízkosti sací náběžné hrany lopatky rozváděcího kola, ze kterého byly čerpány hodnoty tangenciální a radiální rychlosti.

### 6.3 POSTPROCESSING

Poslední část diplomové práce je věnována vyhodnocení proudění v kašně. Výsledky byly vyhodnoceny pro každou polohu a jsou k nahlédnutí v příloze. Pro zhodnocení, která poloha je neoptimálnější v kašně bylo použito dvou metod. První metoda zkoumala rozložení radiální a tangenciální rychlosti v rozváděcím kole. Vlivem proudění v kašně vzniká nesymetrické proudění, je to hlavně z důvodu nesymetrie lopatek v rozváděči, které rozvádějí lopatky a udělují rotační složku rychlosti, kterou dále zpracovává oběžné kolo.

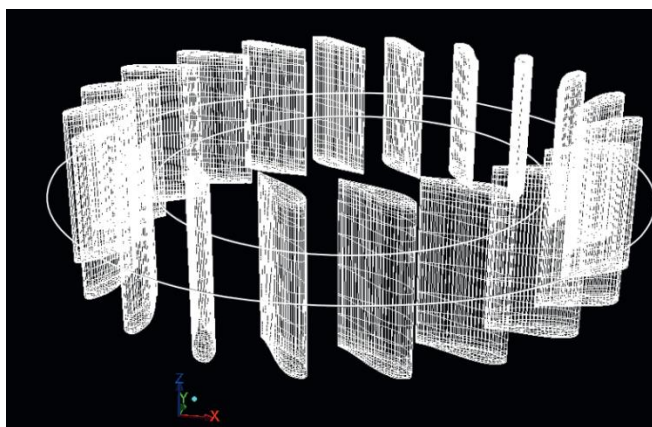
Snahou je aby toto proudění bylo co nejvíce symetrické aby oběžné kolo zpracovávalo vodu co nejrovnoměrněji. Nerovnoměrné proudění nám může dát podnět ke vzniku odtrhnutí proudu, spojeného se snížením účinnosti, nepříznivými pulzacemi a podobnými jevy nestacionarity.



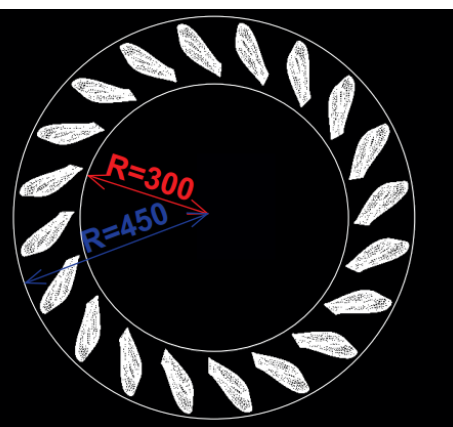
Obrázek 35 Vyhodnocovaná tangenciální a radiální rychlost

Na obrázku 35. Je znázorněná vtoková rychlost do rozváděcího kola, která je rozložena na radiální a tangenciální rychlost.

Jedny hodnoty rychlostí byly zjištěny na kruhu v před lopatkovém prostoru ( $R=450$  mm) ve výšce poloviny lopatky. Další hodnoty byly zjištěny na kruhu za lopatkovým prostorem ( $R=300$  mm). To z toho důvodu aby se zjistilo jak dobře nebo špatně zpracoval proud vody rozvaděč a zda se mu podařilo vytvořit rovnoměrné proudění.

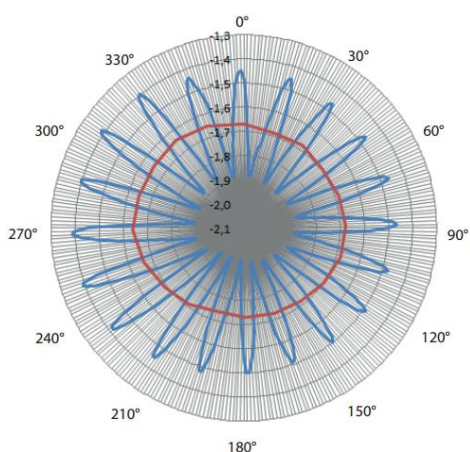


Obrázek 36 Kruh před a za rozváděcím kolem

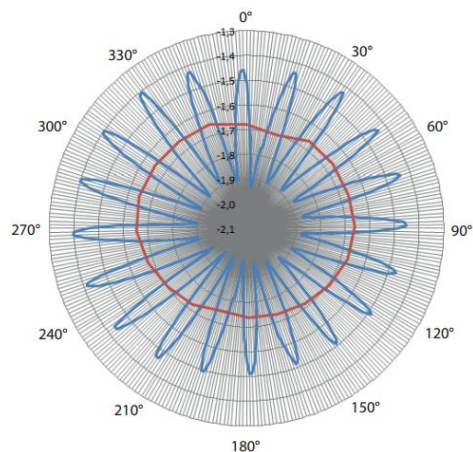


Obrázek 37 Průměry jednotlivých kruhů

V grafech jsou radiální rychlosti vyznačené červenou barvou a tangenciální barvou modrou, střední hodnoty jsou pak vyznačeny barvou opačnou. Ideální tvar křivky středních hodnot by se měl blížit kruhu. Rozdíly mezi jednotlivými pozicemi byly neočekávaně malé, pro lepší vysvětlení je zviditelněn na obrázku 38 a 39 rozdíl mezi nejlepším rozložením radiální rychlostí (38) a nejhorším rozložením radiální rychlostí (39).

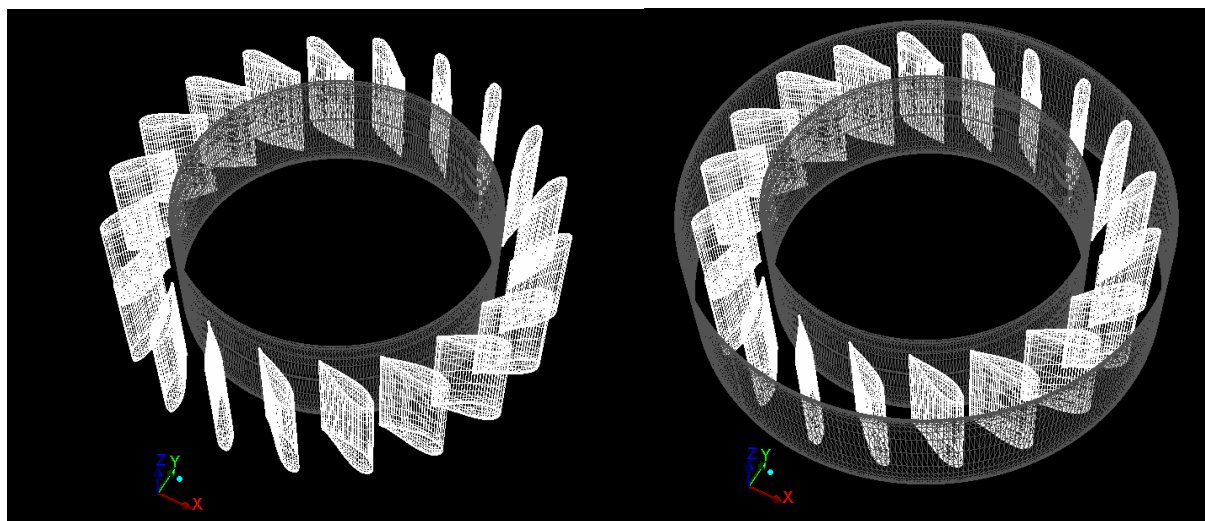


Obrázek 39 Pozice 3 radiální rychlost



Obrázek 38 Pozice 2 radiální rychlost

Druhá metoda vycházela z hodnocení totálních tlaků před rozváděcím a za rozváděcím kolem. Tato metoda vycházela z myšlenky, že tlaková ztráta na rozváděcím kole nám může dát zpětnou vazbu a to tak, že čím menší tlaková ztráta tím vyšší je čistý spád na oběžné kolo turbíny. Pro určení totálních tlaků byly vytvořeny prstence ve dvou průměrech. Jeden umístěný před lopatkami a druhý umístěný za nimi.



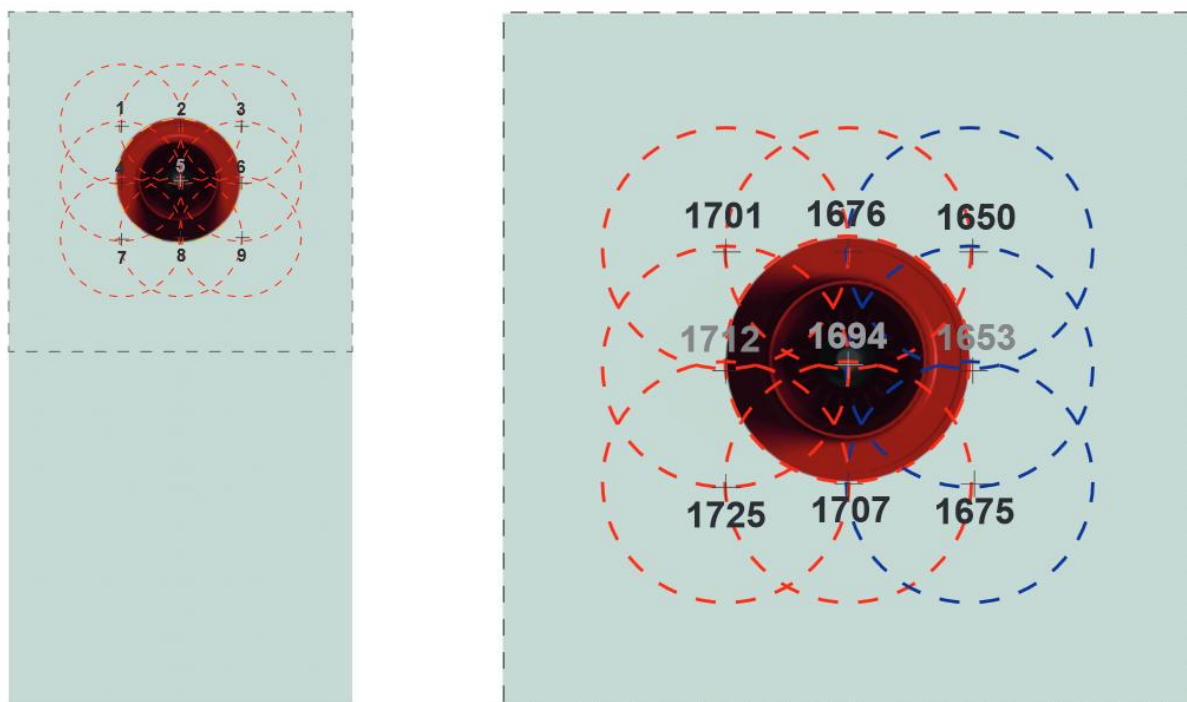
Obrázek 41 Kruh za rozváděcími lopatkami

Obrázek 40 Kruhy před a za lopatkami

Toto vyhodnocení se provádělo pro každou pozici 1 – 9 a pro každou hodnotu zanoření. Výsledky jsou rozděleny podle hloubky zanoření a hodnoty ztrát jsou napsány v jednotlivých kruzích k dané pozici.

Byla teda zjištěna hodnota totálního tlaku před rozváděčem a za ním a následná hodnota v kruhu značí jejich rozdíl. Zde je uvedeno vyhodnocení výsledků pro zanoření 1000 mm pod hladinu, zbylé výsledky jsou přiloženy v příloze. Dle barvy jsou rozlišeny jednotlivé pozice, červenou barvou jsou vyznačeny vyšší rozdíly totálních tlaků, naopak barvou modrou nižší rozdíly. Při pohledu na všechny hodnoty lze vidět, že rozdíly mezi nimi jsou zanedbatelné.

### 6.3.1 VÝŠKA ZANOŘENÍ 1000



Obrázek 42 Hodnoty totálního tlaku pro jednotlivé pozice

Na obr. 41 je vidět, že nejmenší ztrátu totálního tlaku mělo rozváděcí kolo umístěné na pozici 3, 6, 9. Pro zanoření 600 a 200 se hodnoty rozdílu tlaku měnily, nicméně polohy s nejmenším rozdílem tlaků zůstávaly stejné viz. Příloha. Poloha 4-Extrém není společně v jednom grafu s ostatními pozicemi, ale pro lepší přehlednost je pro ní udělán obrázek nový.

## 6.4 ZÁVĚR :

Provedená optimalizace byla pro 27 poloh rozváděcího kola, další 3 polohy rozvaděče byly extrémní. Extrémní poloha s názvem 4-Extrém byla přidána proto, aby se ověřil trend špatného zaplnění v blízkosti stěny kašny. Pozice 1-9 byly minimálně 400 mm vzdálené od stěn kašny, u pozice 4-Extrém byla minimální hodnota 200 mm od jedné stěny kašny.

V této pozici se potvrdilo, že v blízkosti stěny je nejhorší plnění přívaděče a rozdíly totálních tlaků zde vycházely největší. Nicméně rozdíly hodnot nebyly tak velké jak se předpokládalo. Pokud by jsme se podívali detailně na řadu zanoření 1000, kde byl rozdíl celkových tlaků mezi krajními polohami 200 Pa a přepočítali ho pomocí vzorce na výpočet hydrostatického tlaku dělal by rozdíl 2 cm ve spádu.

Při modelování proudění bylo přistoupeno k zjednodušení při stanovování okrajových podmínek. Na hladině byla zvolena okrajová podmínka SYMMETRY, která nepodporuje dvoufázové proudění, tímto krokem byly do jisté míry ovlivněny výpočty. Nejvýraznější toto ovlivnění je v řadě zanoření 200. Kde se na hladině neobjevují žádné hladinové víry, k zahlédnutí jsou pouze víry jejichž konce jsou fixovány ke stěnám kašny. Dle uvážení by však měli při tak malém zanoření vznikat především víry hladinové. Pro toto zanoření už také nemusel popřípadě fungovat správně námi zvolený model turbulence.

U řad zanoření 600, 1000 jsou hladinové víry zřetelně vidět, mění svůj tvar a počet při různém umístění v kašně. V těchto řadách zanoření se objevují také stěnové víry, které mají konec víru fixován vždy k nejbližším stěnám. V příloze jsou znázorněny pouze hladinové víry a to z důvodu, že stěnové víry nepřisávají do rozváděcího kola vzduch.

V jednotlivých pozicích lze u stejné řady zanoření pozorovat určitá podobnost hladinových vírů. Například u pozic 2, 5, 8, kde v pozici 2, 5 jsou vidět dva hladinové víry s koncem fixovaným na rozváděcí kolo, vlivem posunutí na pozici 8 se tyto dva víry sloučí a vytvoří tak jeden společný vír.

Vyhodnocení u ostatních pozic nám může napovědět, kde bychom mohli umístit rozváděcí kolo v případě zlepšení nátok. V našem případě byla nejlépe hodnocena pozice 3, při tomto umístění docházelo k zrovnoměrnění nátoky vody. Tato skutečnost může souviset s tím, že se pozice v kašně podobá půdorysnému umístění podobnému spirálovému řešení. Spirálový tvar kašny byl dle literatury [5,6] hodnocen jako neoptimálnější. Při pohledu na rozložení radiálních rychlostí v této pozici se natékání zdá být také rovnoměrnější než u ostatních pozic.

Z pohledu rozložení všech tangenciálních a radiálních rychlostí za rozváděcím kolem lze vidět, jak dobře je navrženo rozváděcí kolo, za rozváděcími lopatkami lze vidět poměrně slušné rozložení rychlostního pole, které je i v poloze 4-Extrém poměrně rovnoměrné. Toto rovnoměrné rozložení nátoky je rozhodující parametr pro bez rázový rotačně symetrický nátok a je tedy důležitý pro správný provoz turbíny.

Při porovnání jednotlivých pozic s výsledky rozdílu celkového tlaku se zdá být lepší varianta, kdy je na přívaděči viditelný pouze jeden hladinový vír, popřípadě dva blízko sebe. V případech kdy jsou vidět vzdálenější dva či více hladinových vírů, vycházejí rozdíly totálních tlaků větší.

Pro zanoření 200, 600 a 1000 dle výpočtů vyšlo, že by jsme se měli pohybovat v oblastech úplných vírů, dle simulací byl tento fakt potvrzen a na závěr byla spočtena teoretická výška, při které by nevznikal na hladině hladinový vír, který by měl fixován konec na hranu rozváděcího kola. Tato hodnota teoretického zanoření vycházela dle literatury [12] na 1800 mm. Dle CFD simulace se na hladině objevil tzv. rozšířený kuželový vír, který je k náhledu v příloze.

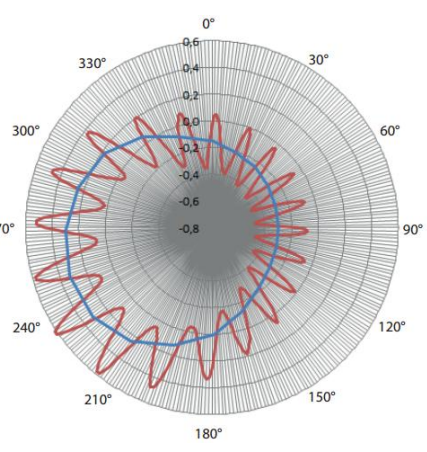
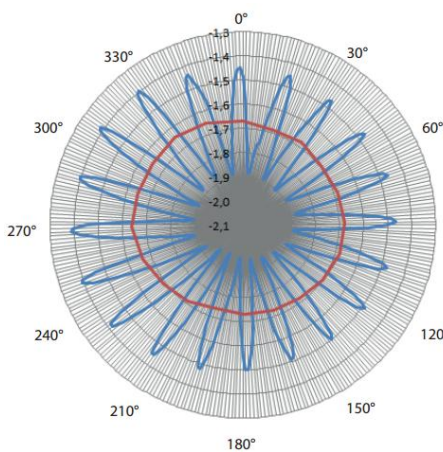
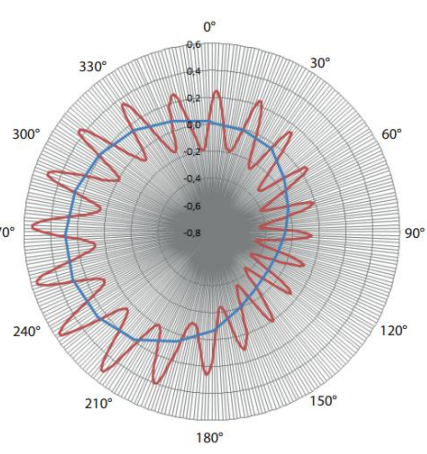
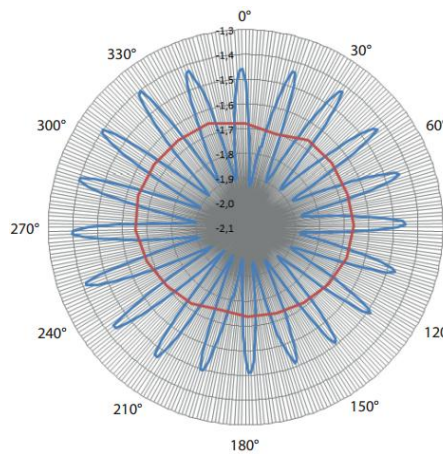
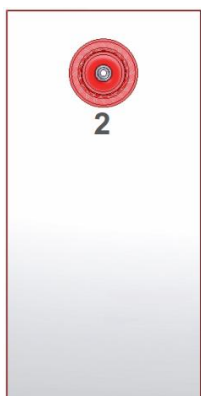
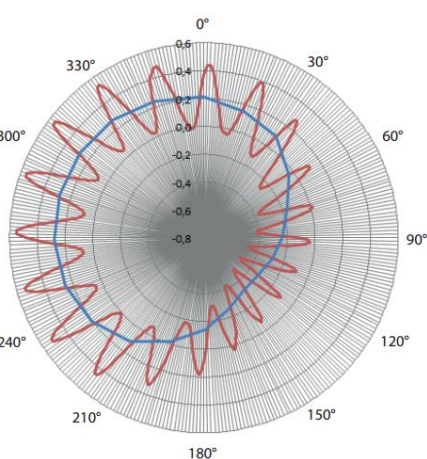
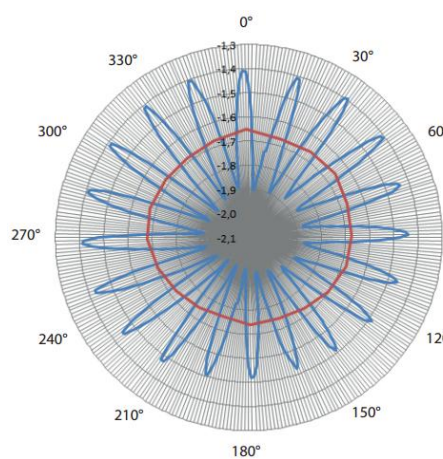
Je na zvážení zda při spádu 4000 mm je vhodné umísťovat rozváděcí kolo 1800 mm pod hladinu jen proto abychom jsme se zbavili úplných vírů. Pro přesnější závěry by chtělo tuto skutečnost ověřit při dokonalejší dvoufázové CFD simulaci, kde by fungovala interakce rozváděcího kola a oběžného kola či celé turbíny včetně savky.

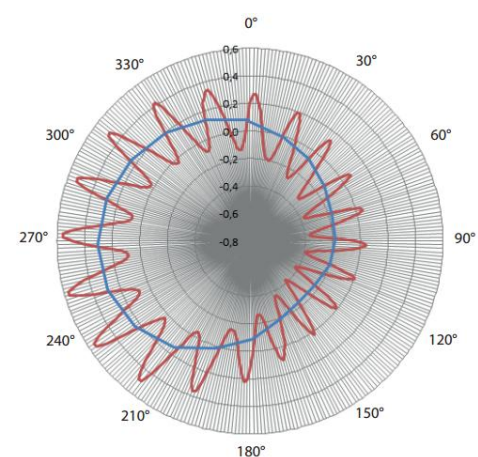
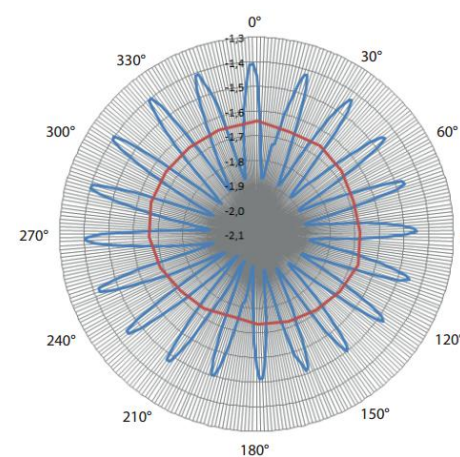
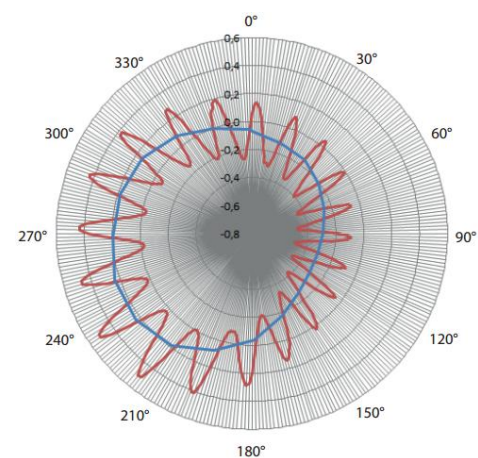
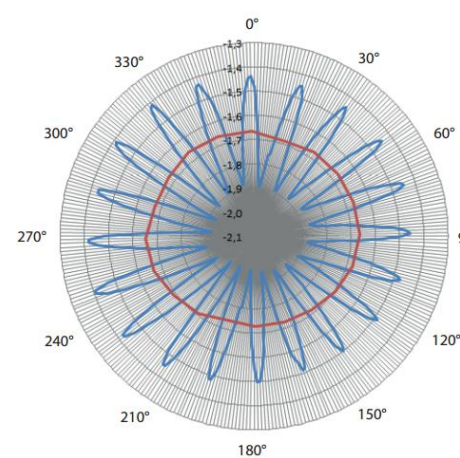
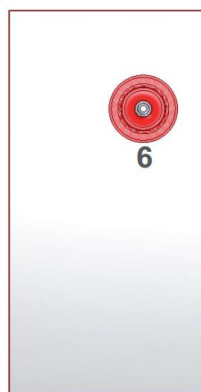
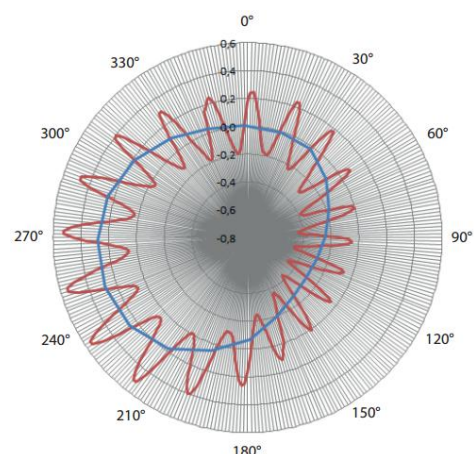
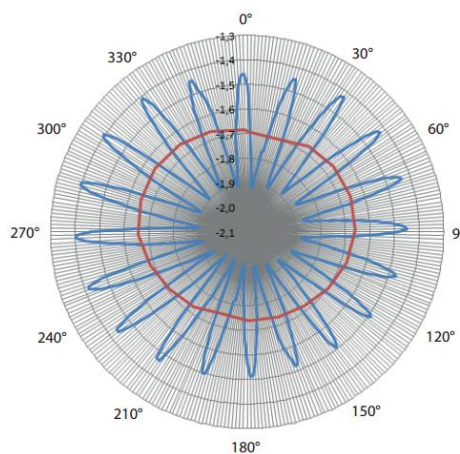
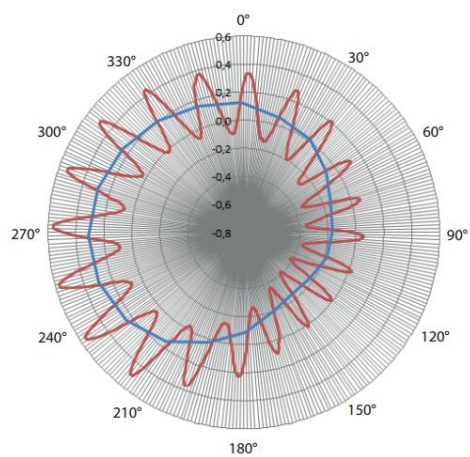
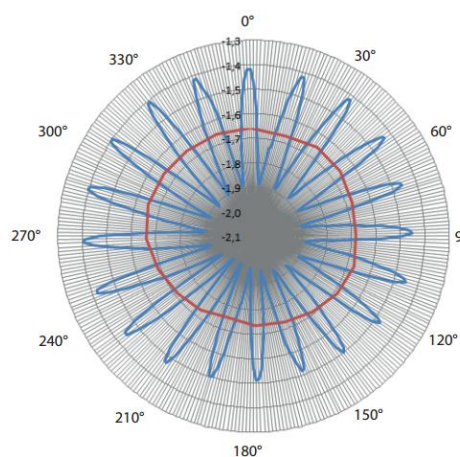
## 6.5 POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

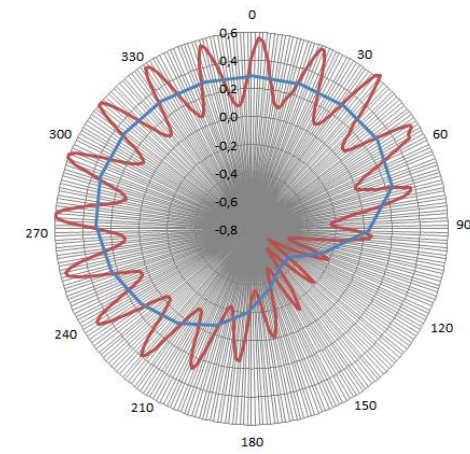
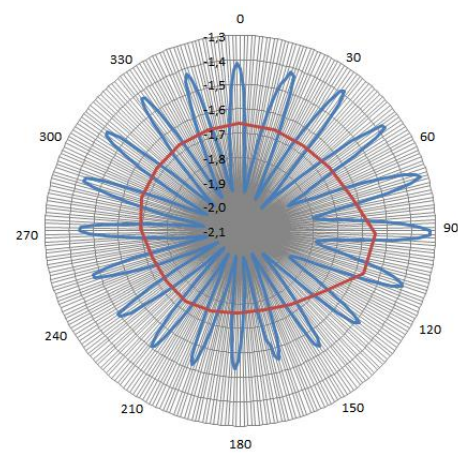
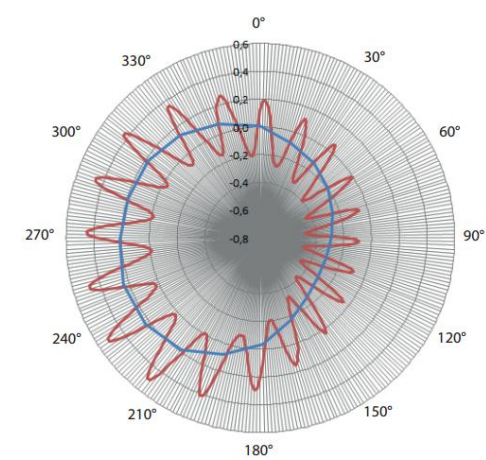
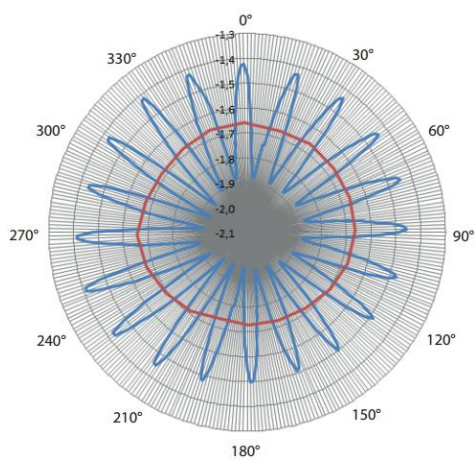
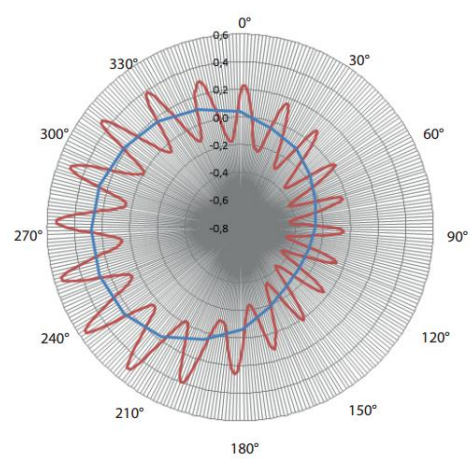
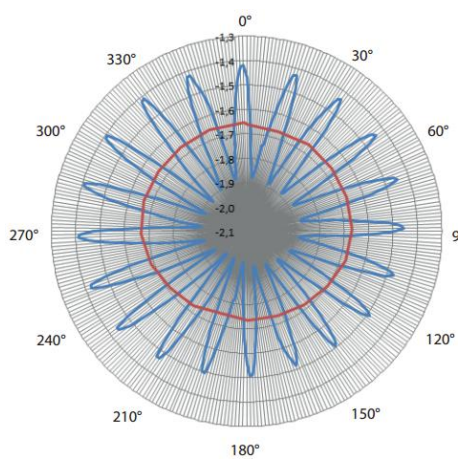
- [1] V., HEBELKA. *Technická dokumentace společnosti Mavel a.s.*
- [2] J., BEDNÁŘ. *Malé vodní elektrárny 2. Turbíny 1.* 1989 Vydání, Praha : vydalo SNTL, 1989. 256 s.
- [3] V., ŠKORPIL, M. KASÁRNÍK. *Obnovitelné zdroje energie I.: vodní elektrárny. 2.* V Plzni: Česká matice technická, 2000. 126 s.
- [4] Největší výrobci vodních turbín v ČR (online) 2014 (cit. 2014-03-26) dostupné z (<http://www.enviweb.cz/clanek/voda/47251/nejvetsi-vyrobc-vodnich-turbin-v-cr>)
- [5] Č., ŠTOLL, S. KRATOCHVÍL, M. HOLATA. *Využití vodní energie 1.* Vydání Praha : vydalo SNTL, 1977. 186 s.
- [6] M., HOLATA. *Malé vodní elektrárny. Projektování a provoz 1.* Vydání Praha : vydala Academia-nakladatelství Akademi věd České republiky, 2002. 234 s.
- [7] Abeceda malých vodních pohonů (online) 2009 (cit. 2014-03-06) dostupné z ([www.mve.energetika.cz](http://www.mve.energetika.cz))
- [8] M., HUDEC, (2008); „Optimalizace vtokových vírů u vírové turbíny“, FSI Junior konference 2008, VUT v Brně, 7 s.
- [9] M., NECHLEBA. *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*, SNTL, Praha, 1954. 186s.
- [10] J., HÝBL. *Vodní motory III.* Česká matice technická Praha, 1928
- [11] J., ŠULC. *Poznatky z modelového výzkumu vtokových vírů u vtoků vodních elektráren* Vydání : Brno, kružnice odborných a vědeckých spisů VUT v Brně 1990. 7 s.
- [12] M., ŽAJDLÍK. *Podmienky vzniku vírov vo vtokovžch objektoch.* 1981 Vydání: Bratislava. 1981. 256 s.
- [13] J., ŠULC. *Experimentální výzkum tvorby vírů před vybranými vtoky hydraulických děl. Výzkumná zpráva. VVÚ VSH – VUT v Brně*, 1987.
- [14] J., SKALIČKA. *Výzkum proudění s vtokovými víry na zmenšených fyzikálních modelech.* 1983.
- [15] V., KOPECKÝ, *Zdokonalení malých vodních turbín METAZ, Brno*, 1988, 81 s.
- [16] CH., MADENAS, *Měření horizontálního provedení turbíny METAZ, Brno*, 1990, 61 s.
- [17] M., VINTR, *Malé vodní elektrárny kašového typu: VUT v Brně, FSI*, 2009, 89s.
- [18] T., BLEJCHAR, *Turbulence modelování proudění, VŠB – Ostrava*, 2010 262 s.
- [19] M., HUDEC, *Optimalizace projektu hydraulických systémů z hlediska časové změny parametrů*, VUT Brno, 2013, 26 s.

## 6.6 PŘÍLOHY

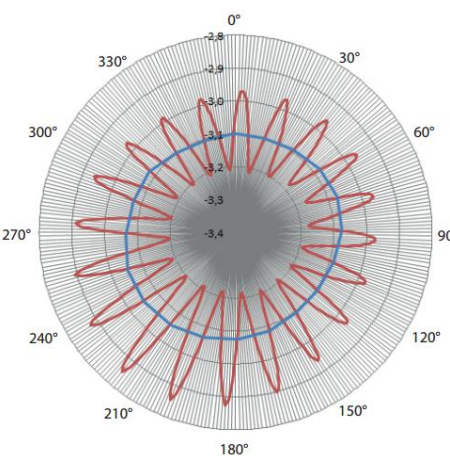
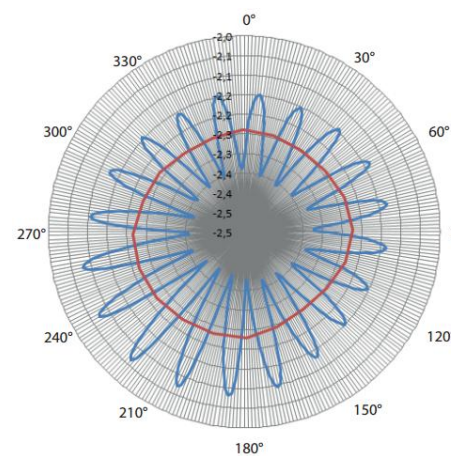
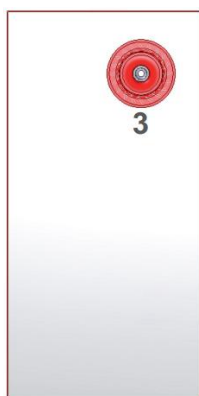
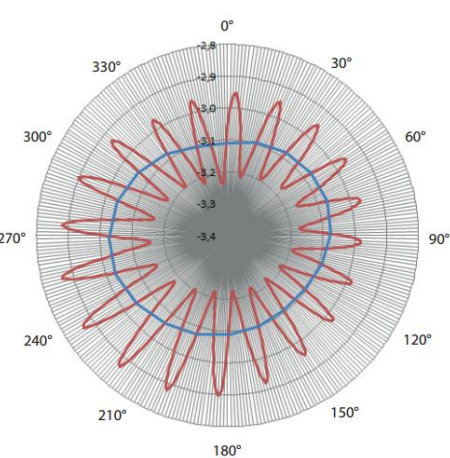
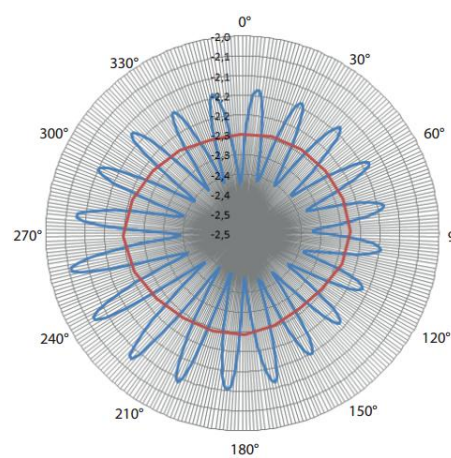
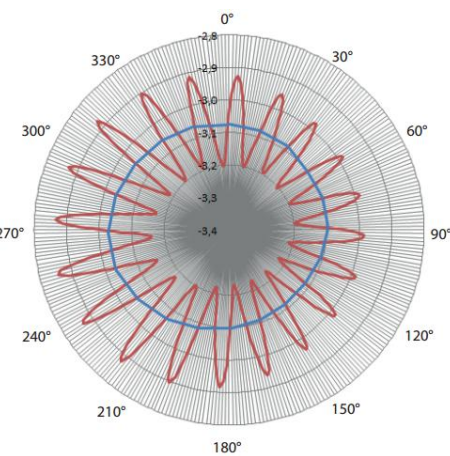
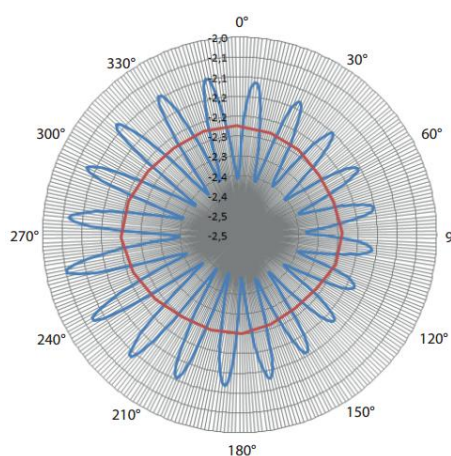
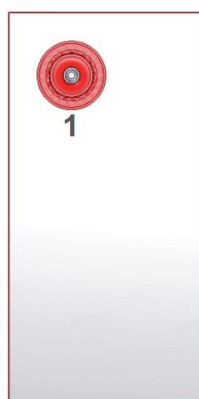
### 6.6.1 RYCHLOSTI PŘED ROZVÁDĚCÍM KOLEM PRO ZANOŘENÍ 1000

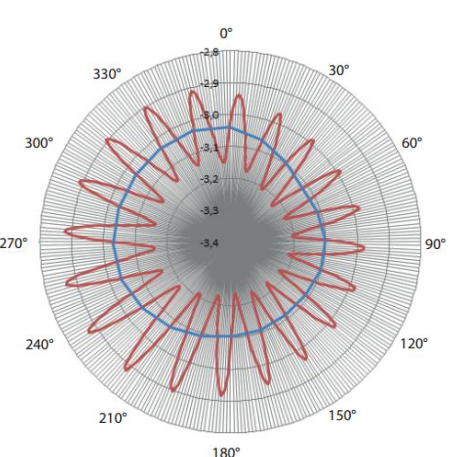
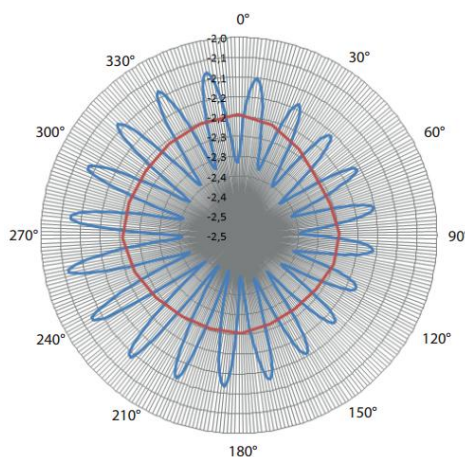
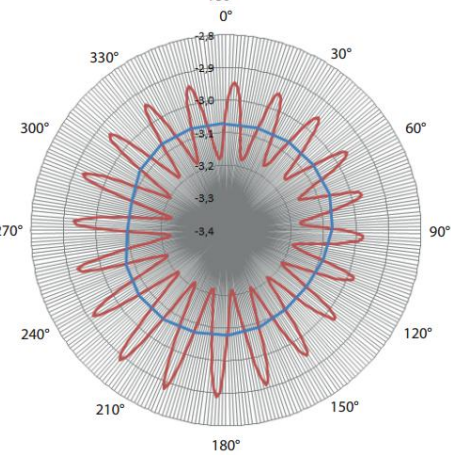
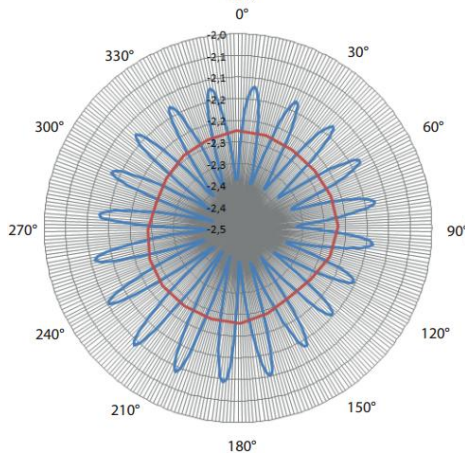
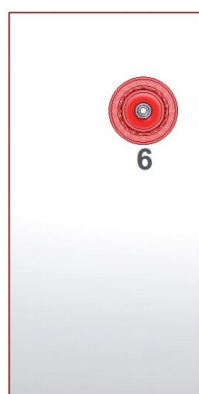
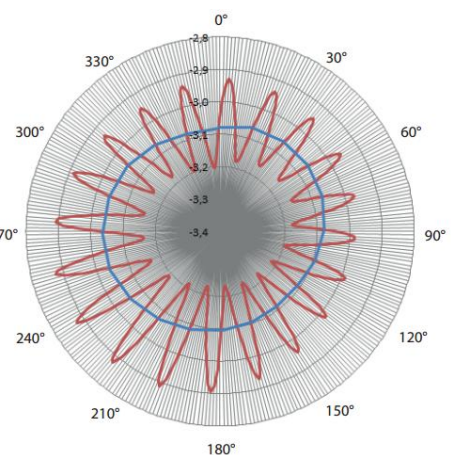
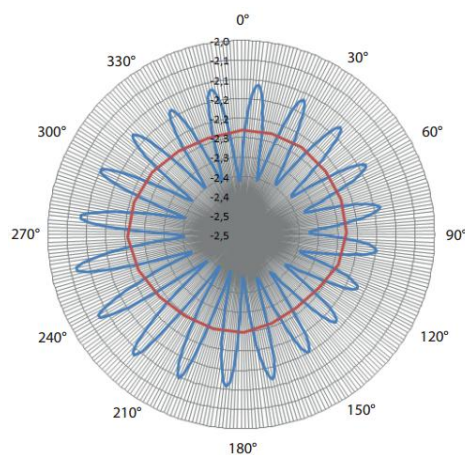
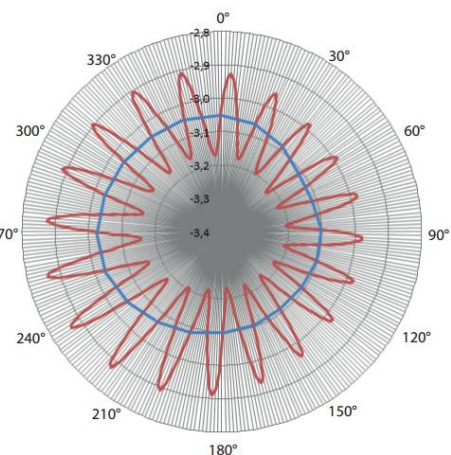
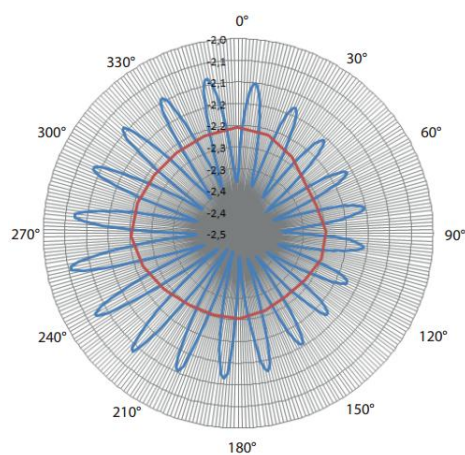


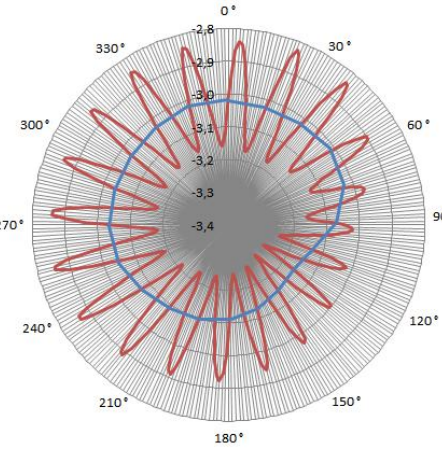
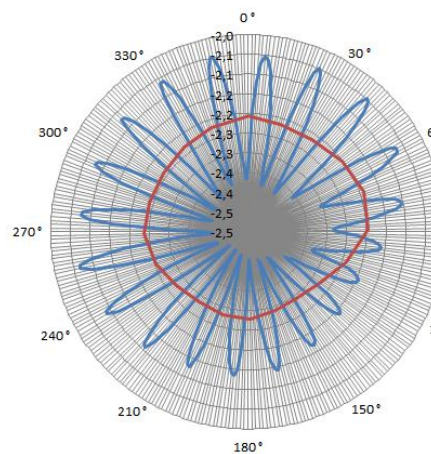
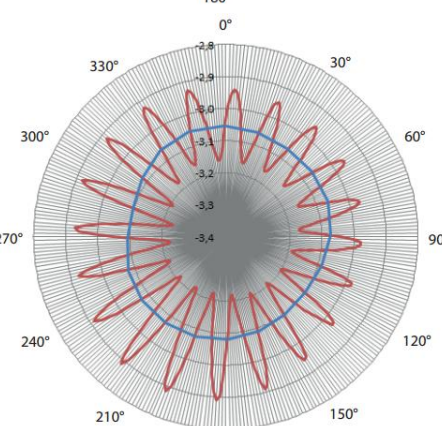
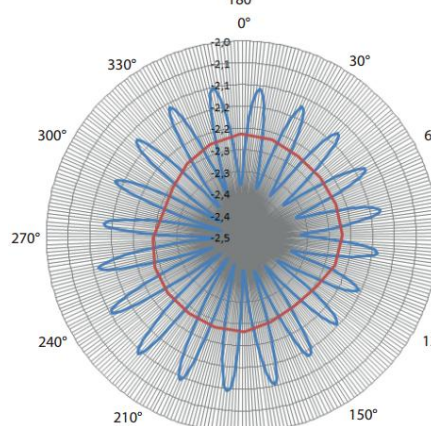
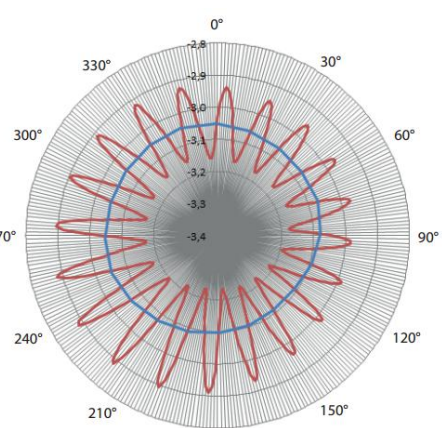
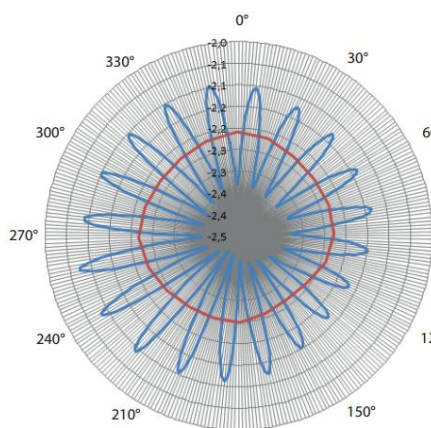




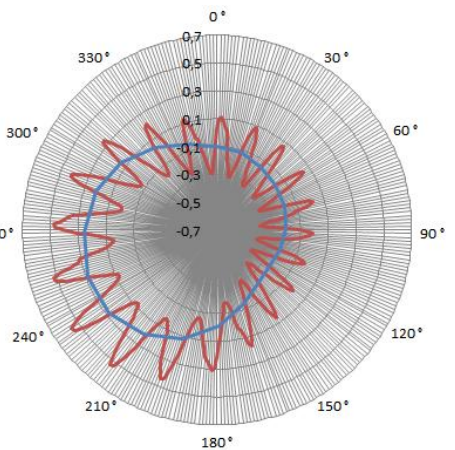
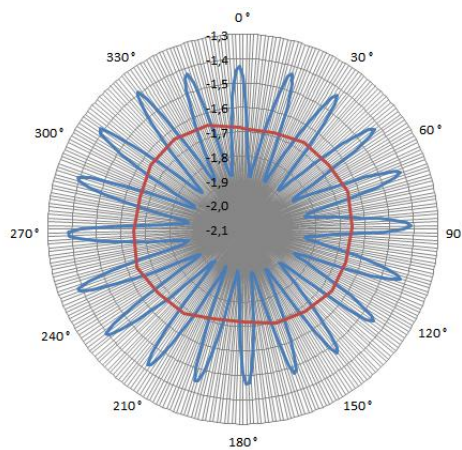
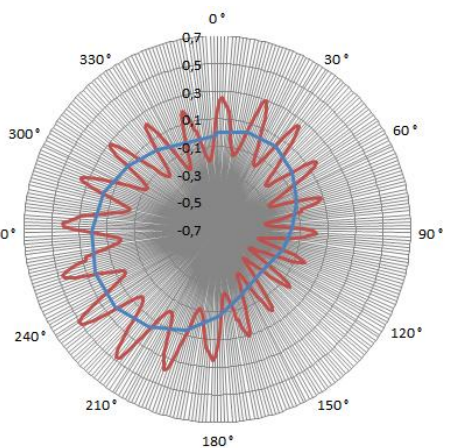
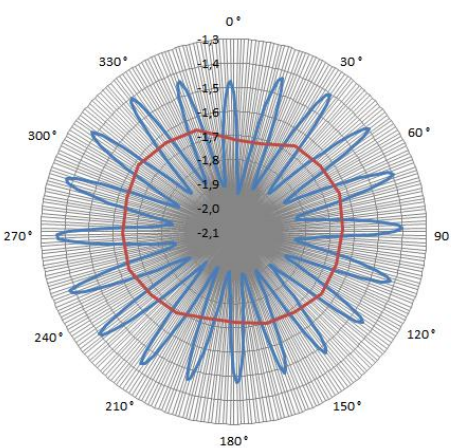
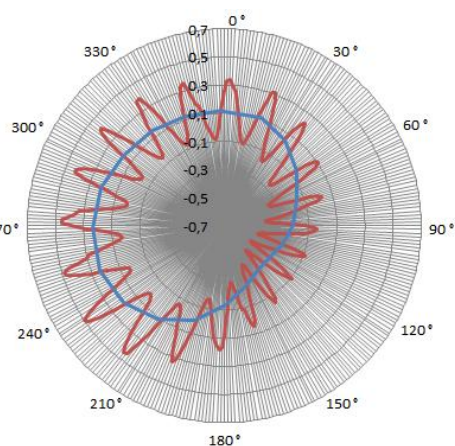
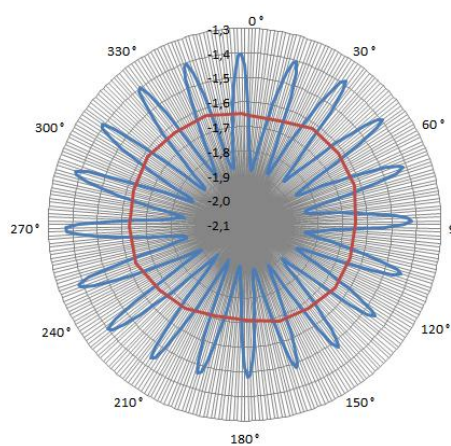
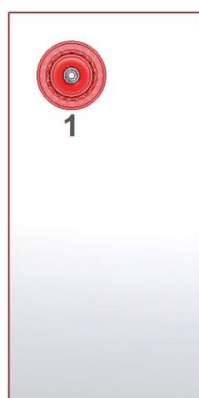
## 6.6.2 RYCHLOSTI ZA ROZVÁDĚCÍM KOLEM PRO ZANOŘENÍ 1000

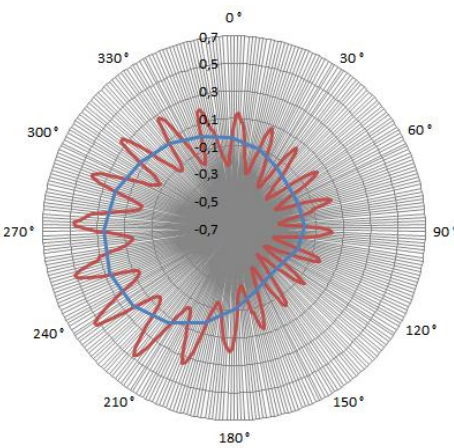
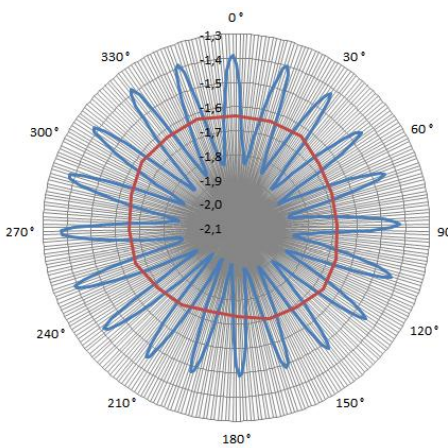
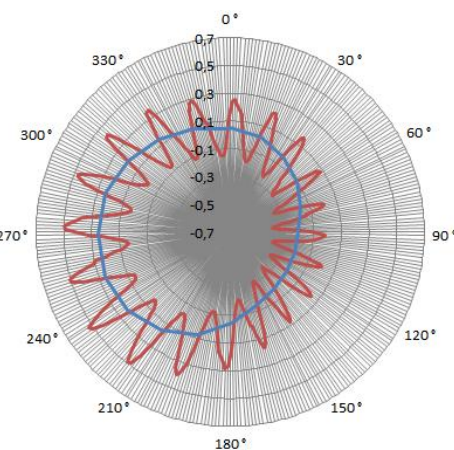
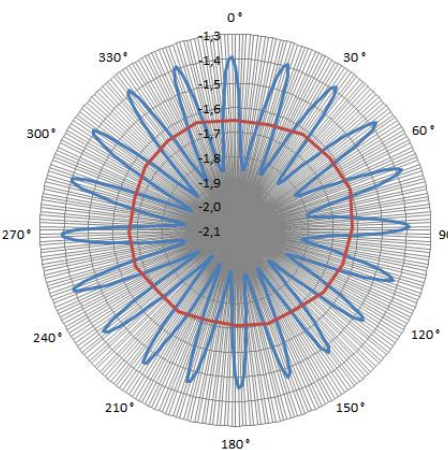
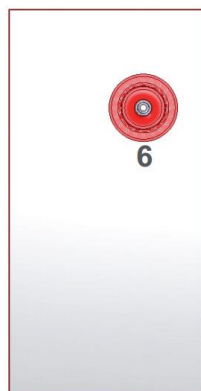
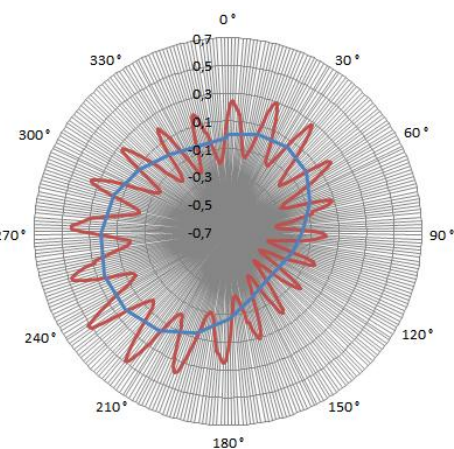
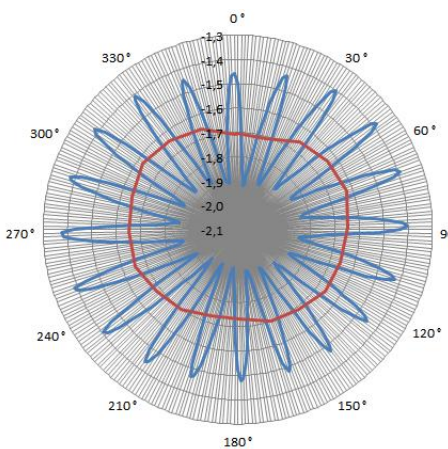
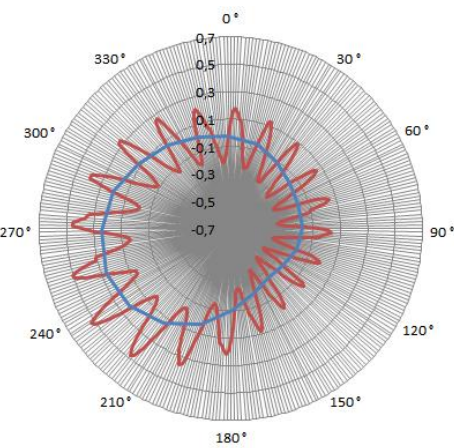
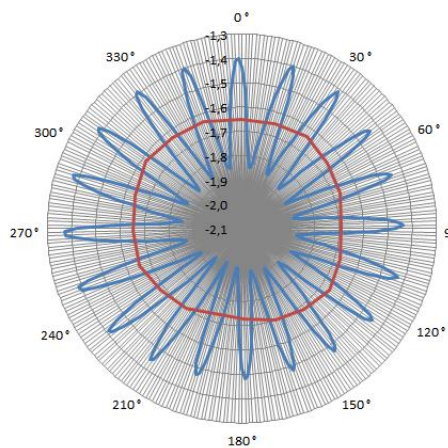


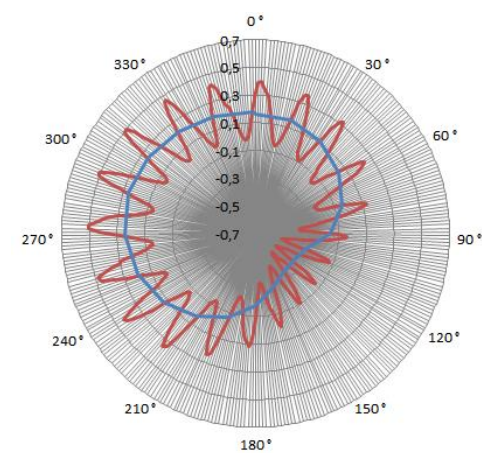
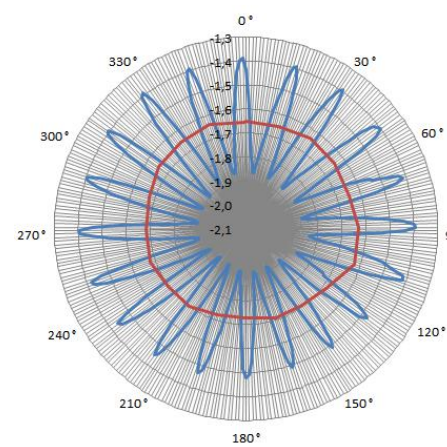
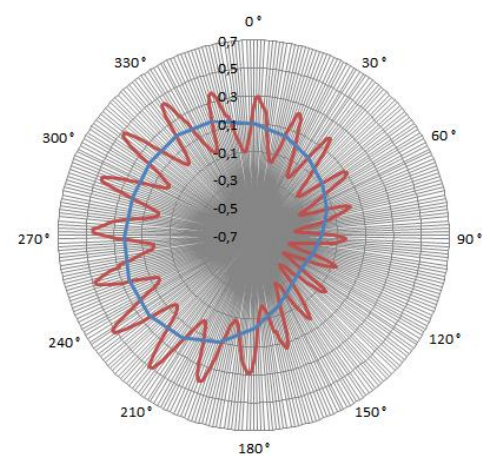
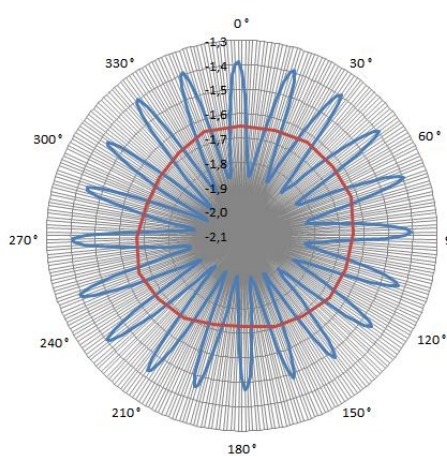
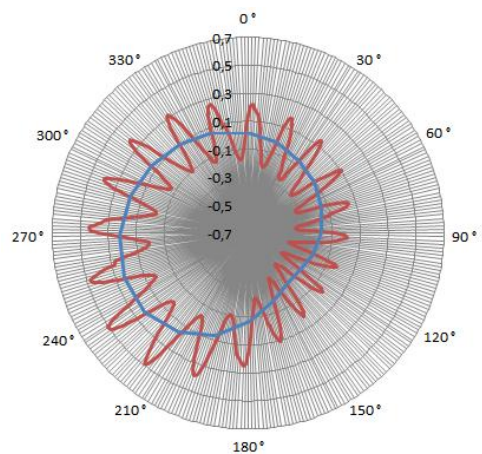
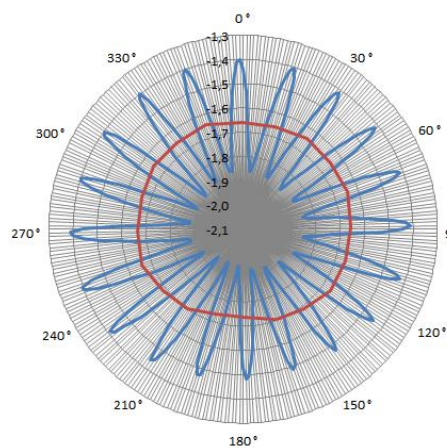




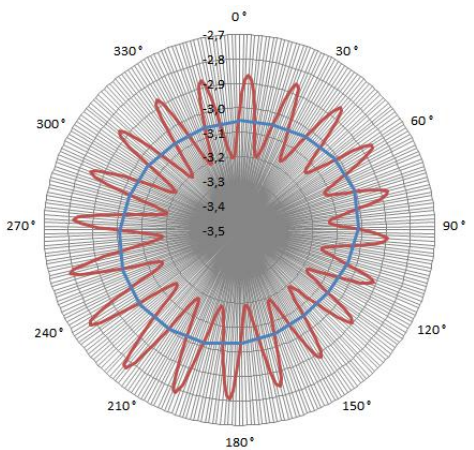
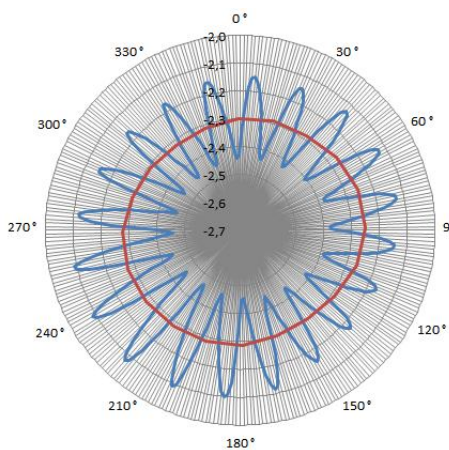
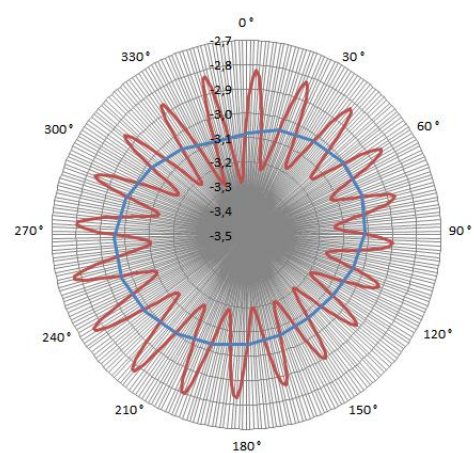
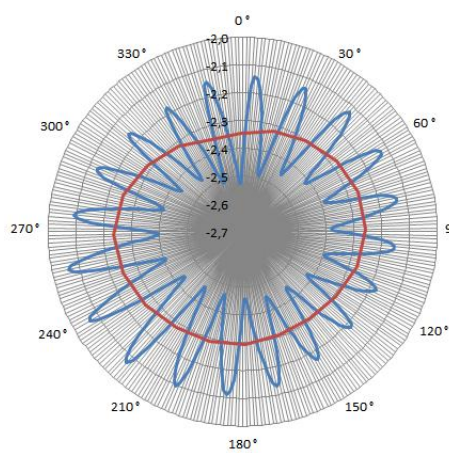
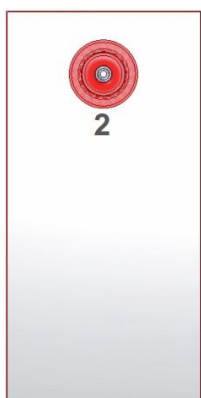
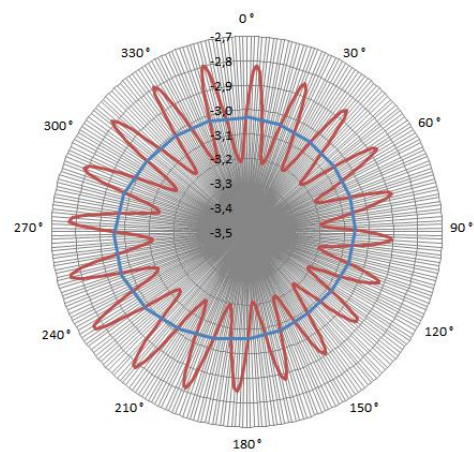
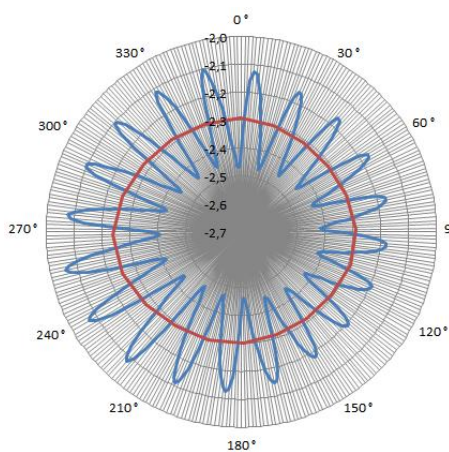
## 6.6.3 RYCHLOSTI PŘED ROZVÁDĚCÍM KOLEM PRO ZANOŘENÍ 600

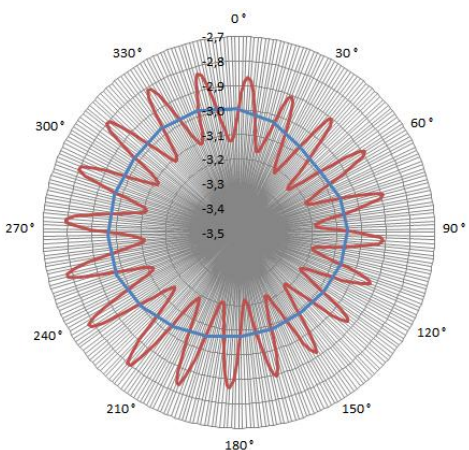
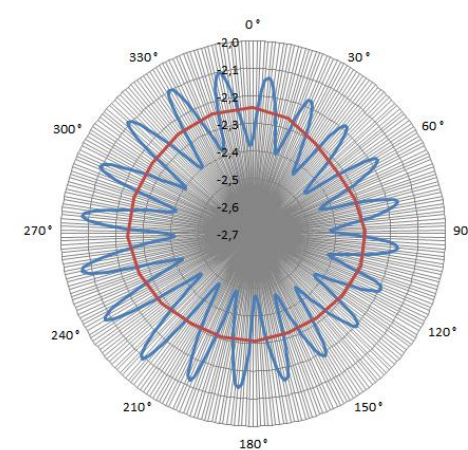
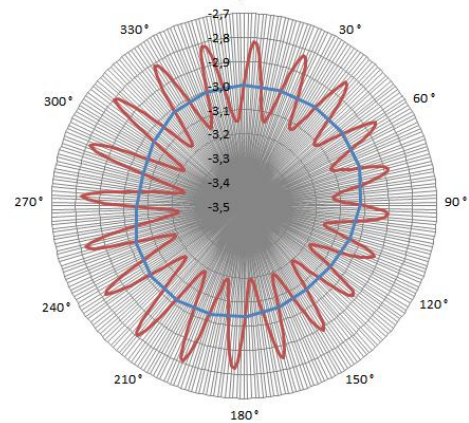
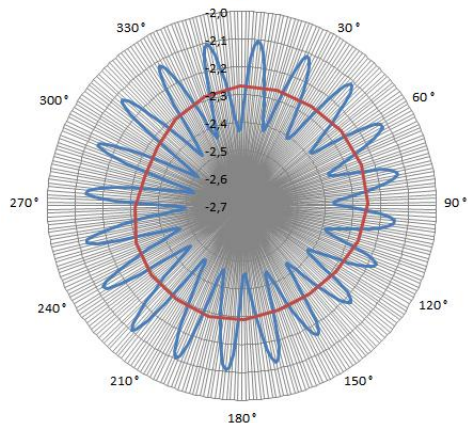
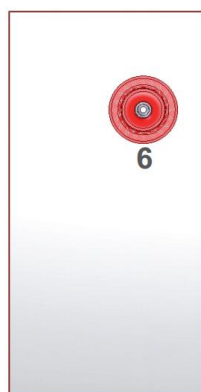
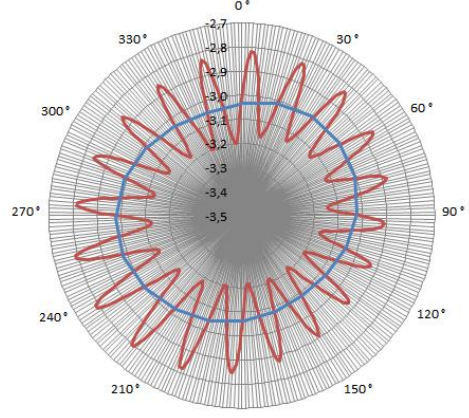
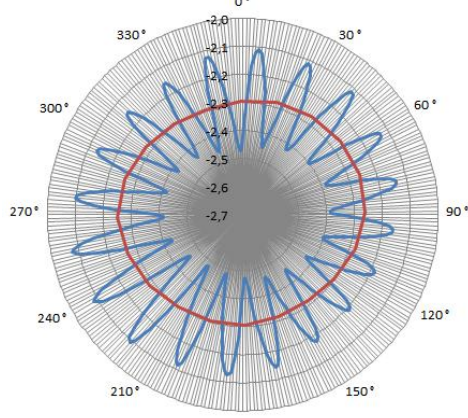
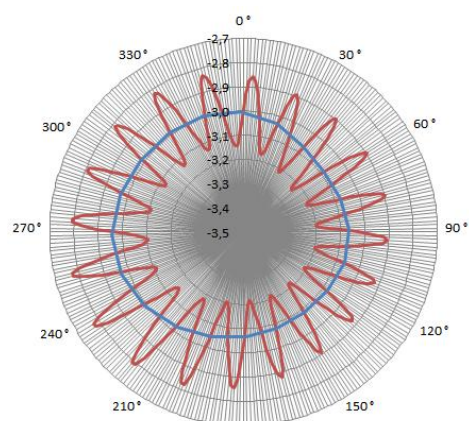
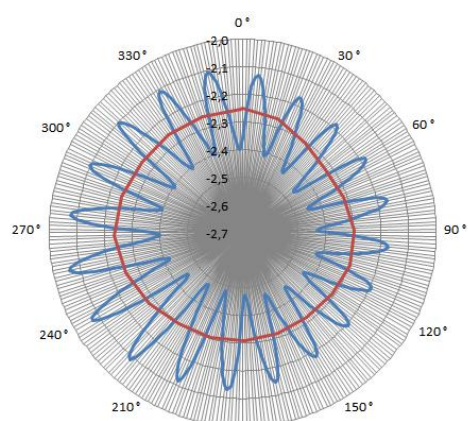


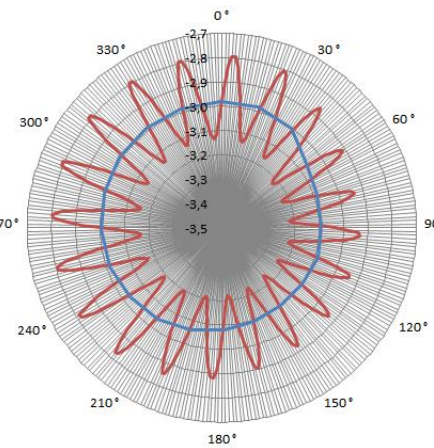
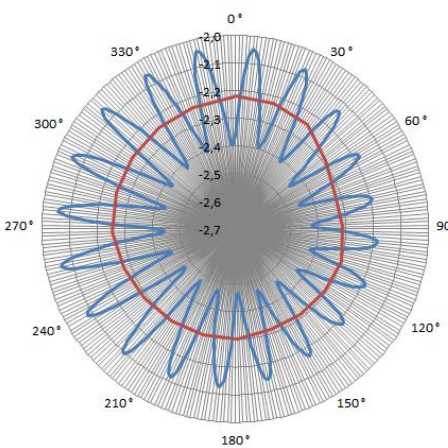
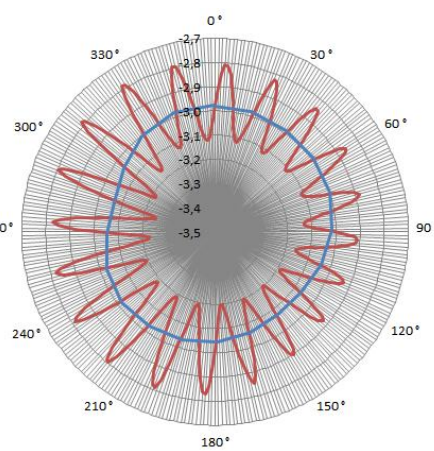
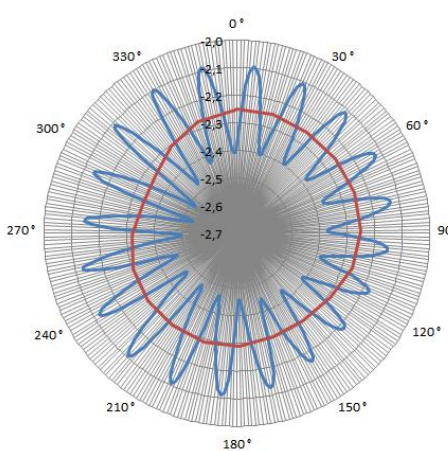
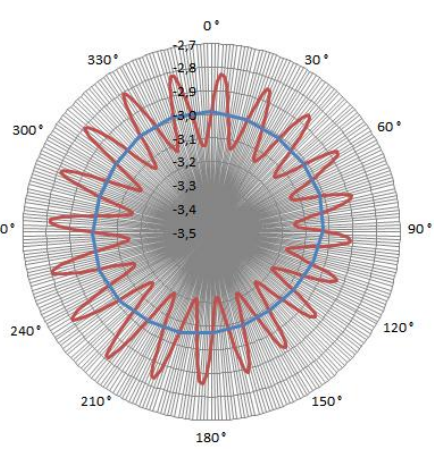
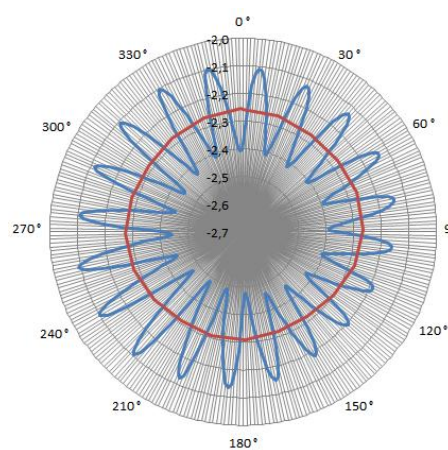




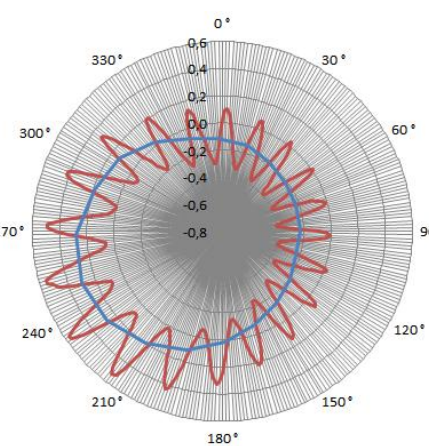
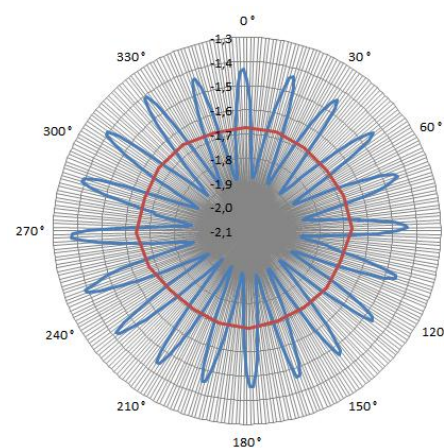
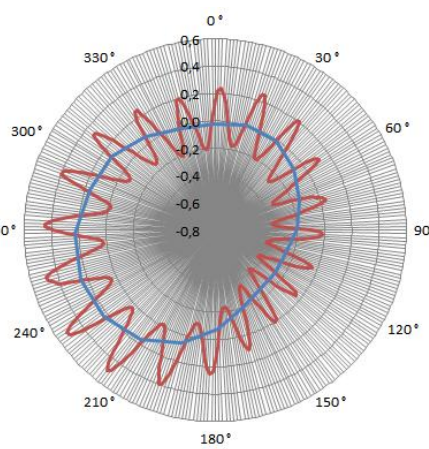
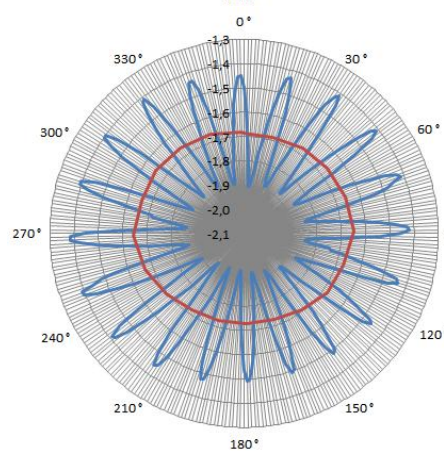
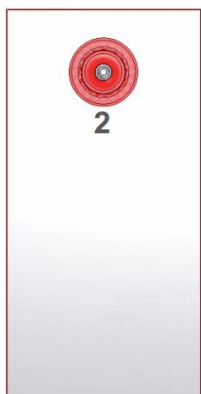
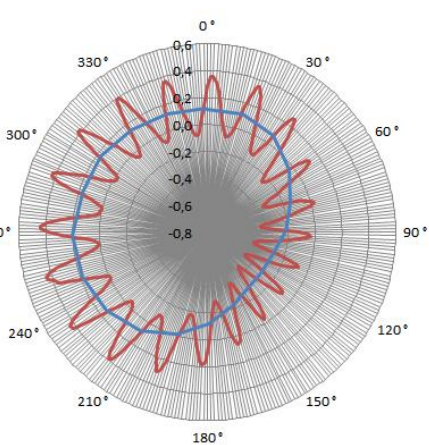
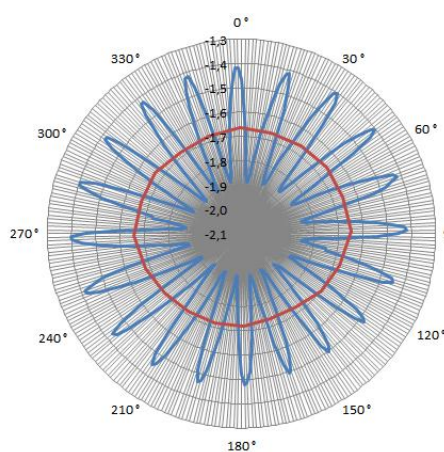
## 6.6.4 RYCHLOSTI ZA ROZVÁDĚCÍM KOLEM PRO ZANOŘENÍ 600

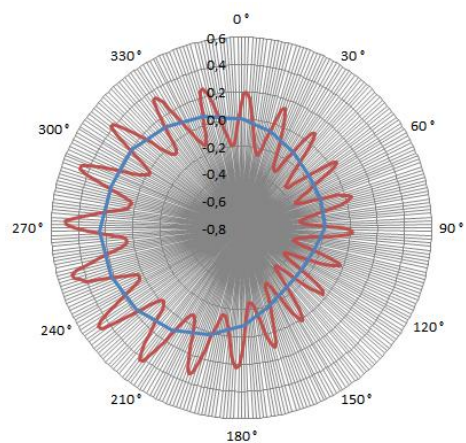
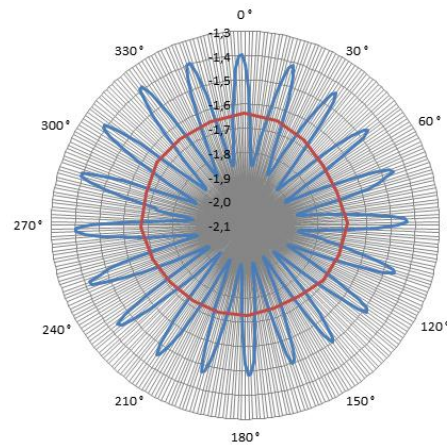
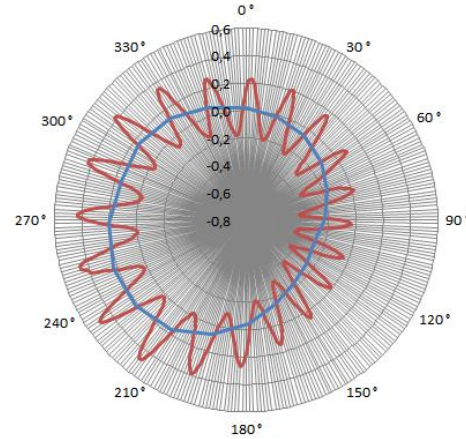
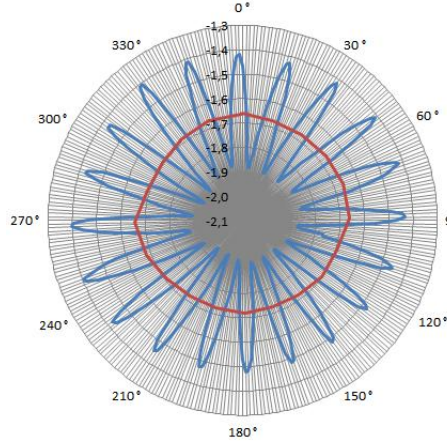
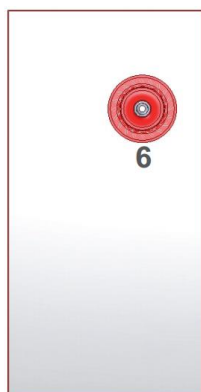
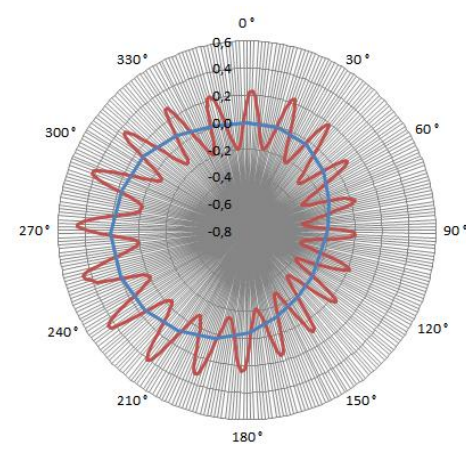
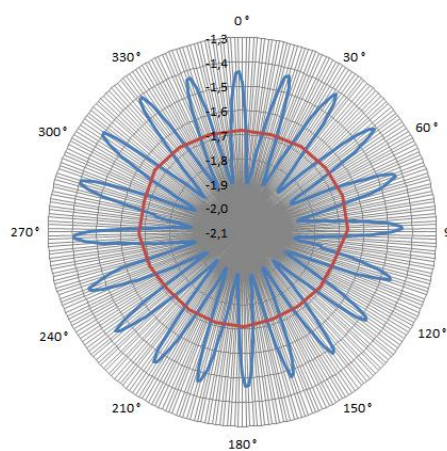
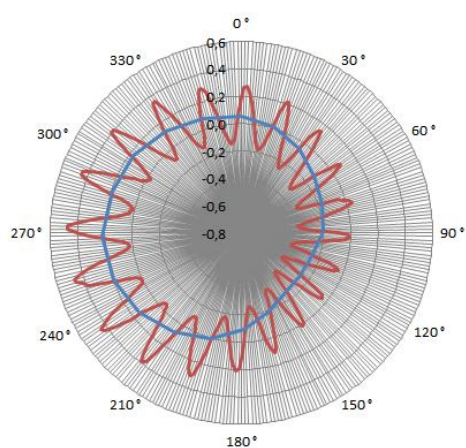
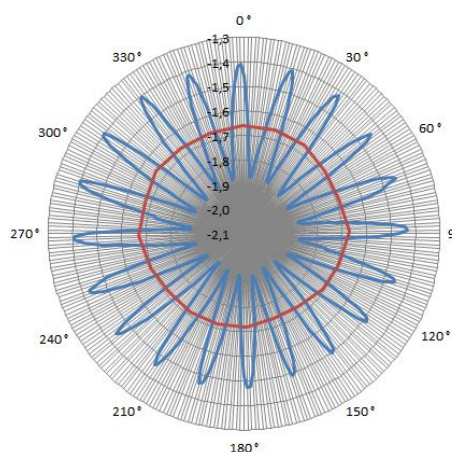


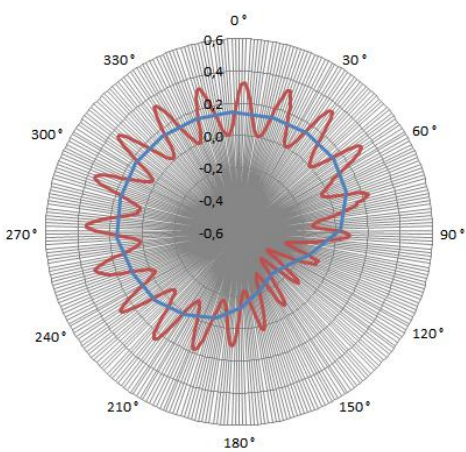
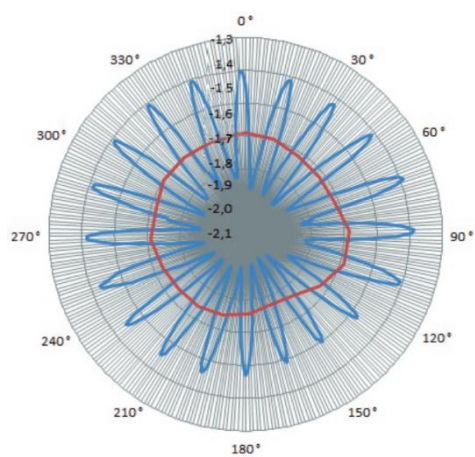
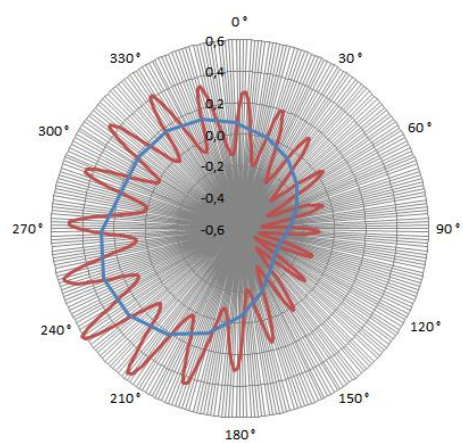
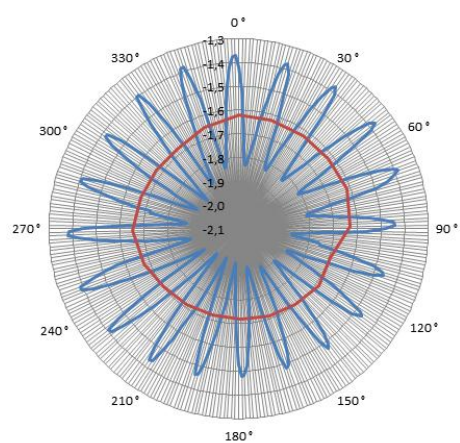
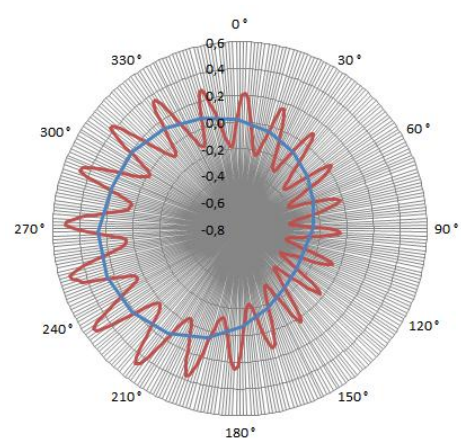
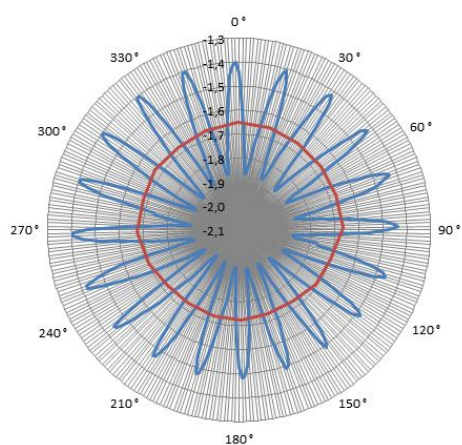




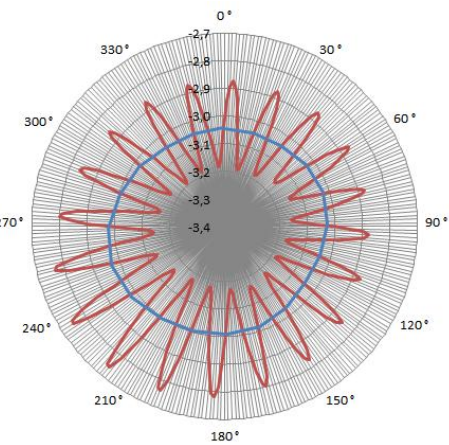
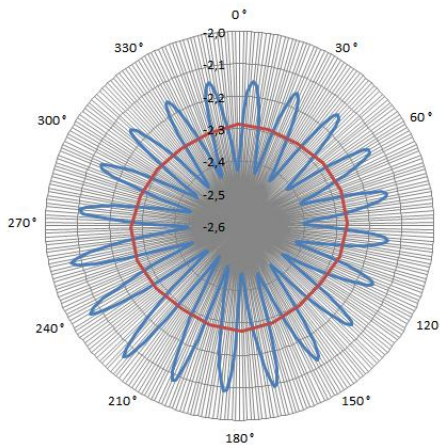
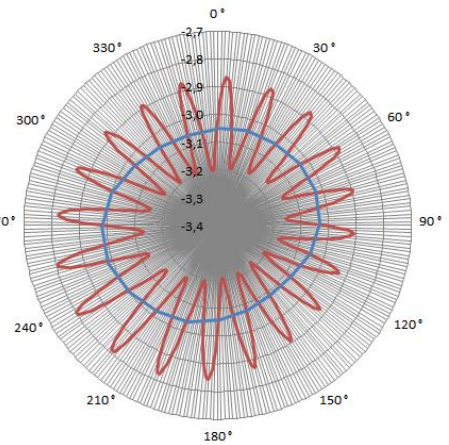
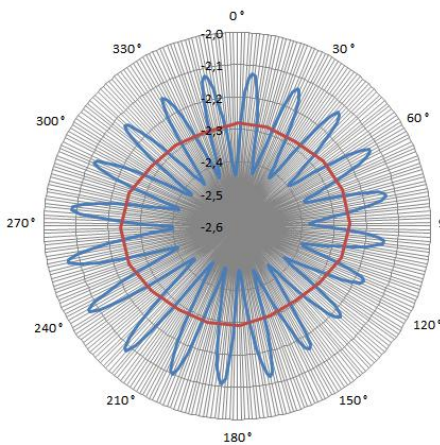
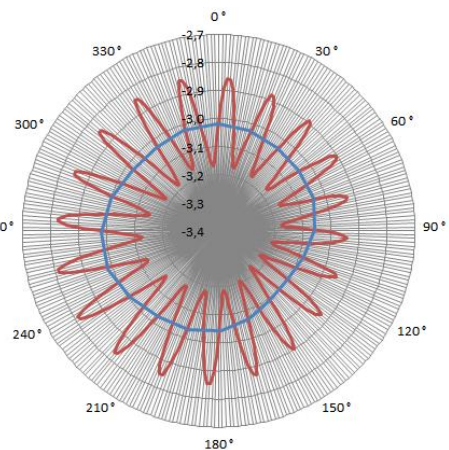
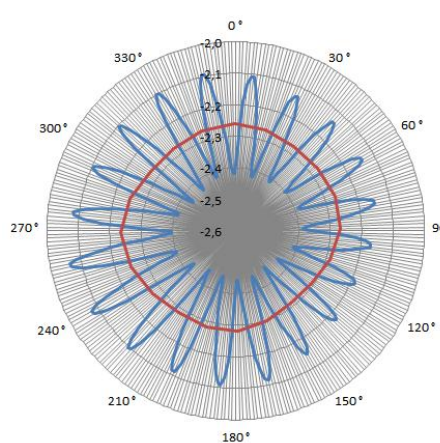
## 6.6.5 RYCHLOSTI PŘED ROZVÁDĚCÍM KOLEM PRO ZANOŘENÍ 200

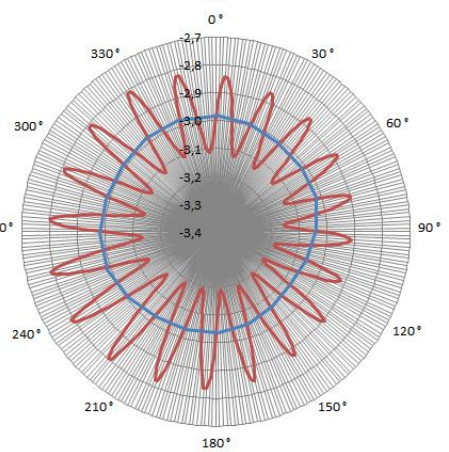
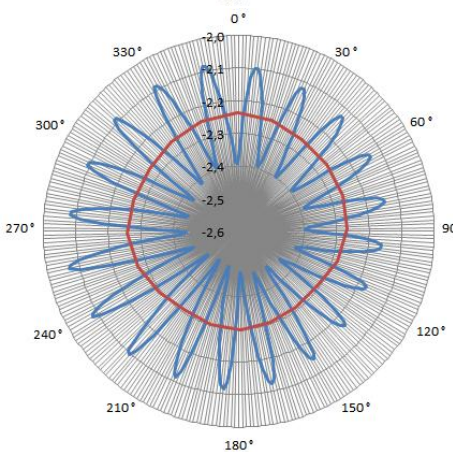
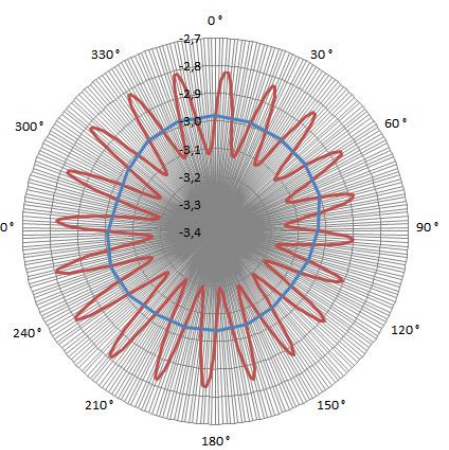
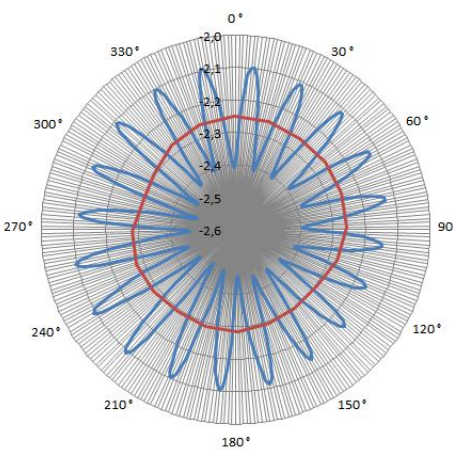
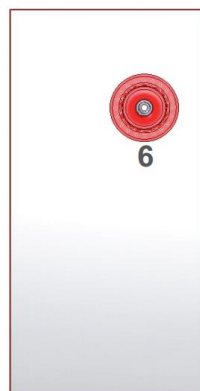
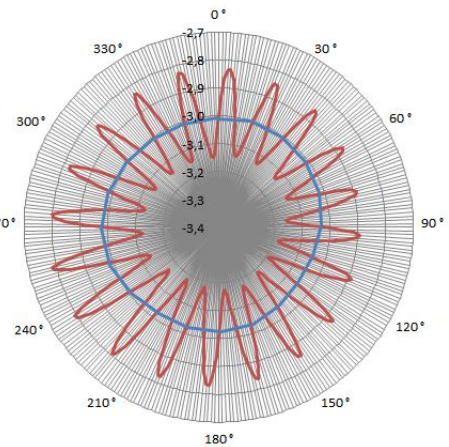
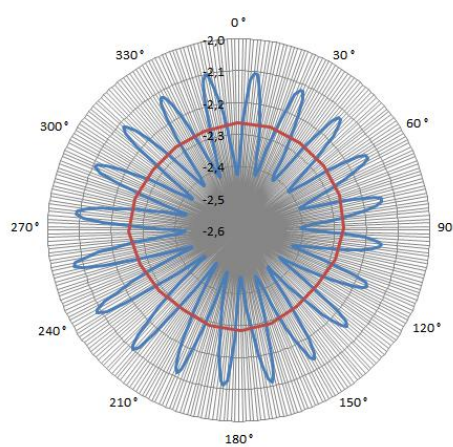
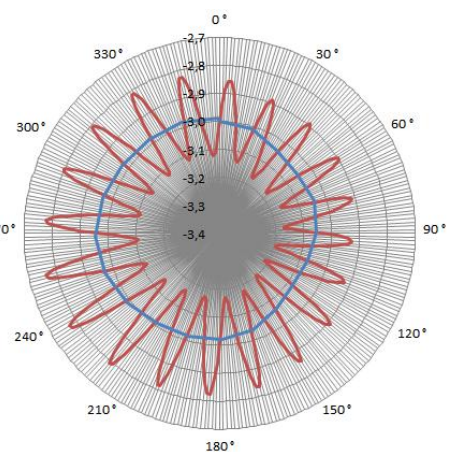
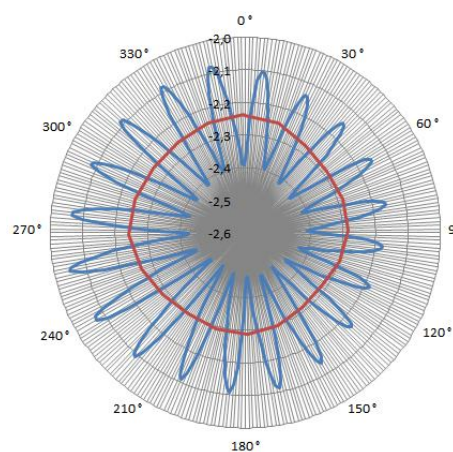


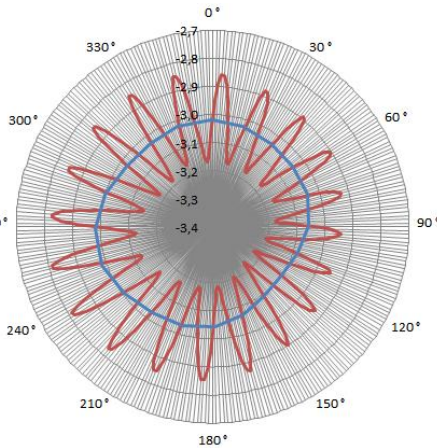
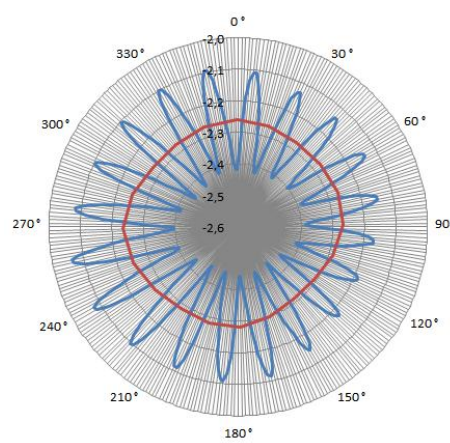
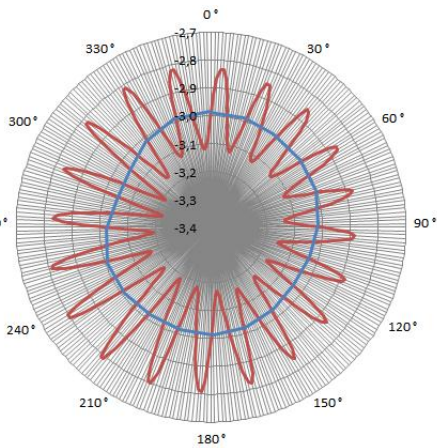
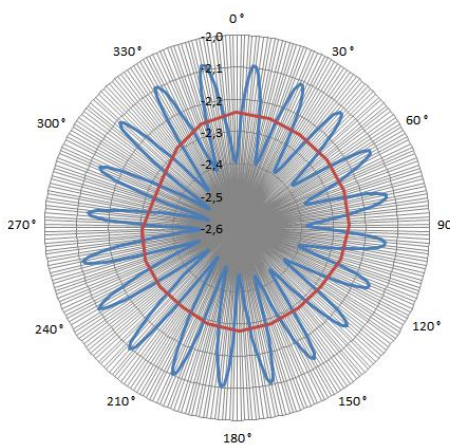
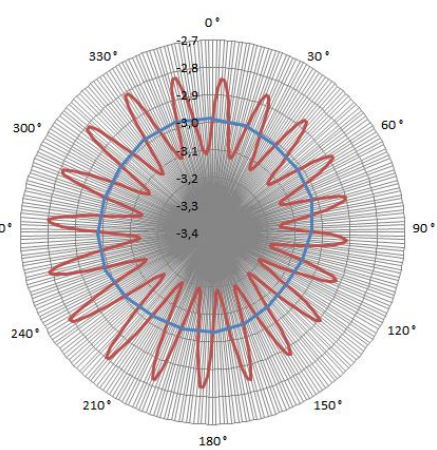
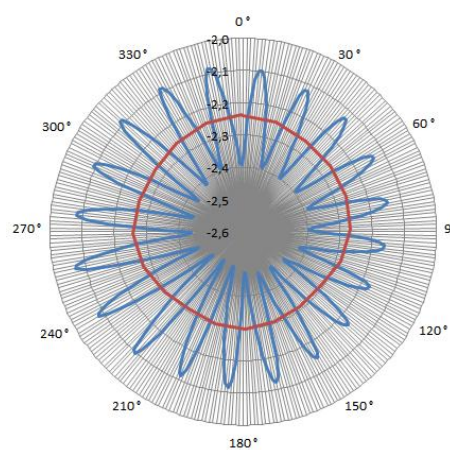




## 6.6.6 RYCHLOSTI ZA ROZVÁDĚCÍM KOLEM PRO ZANOŘENÍ 200

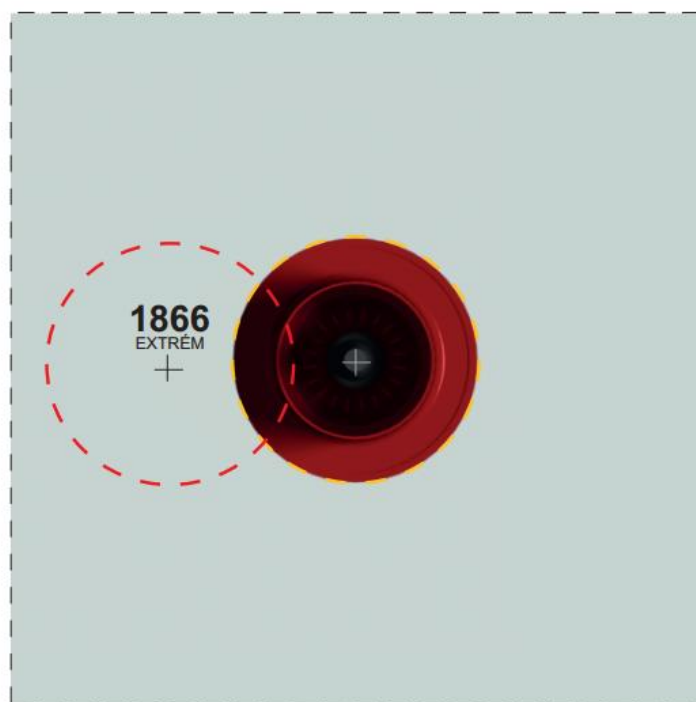
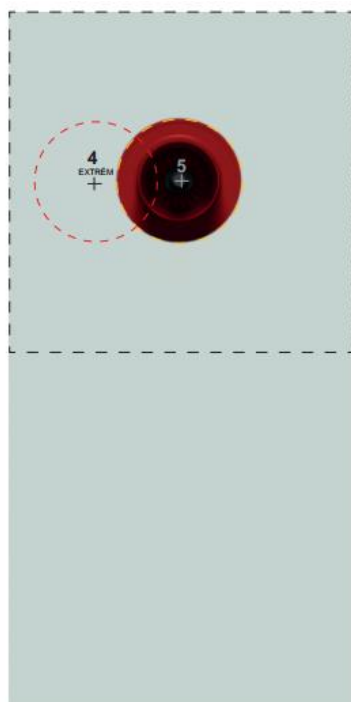
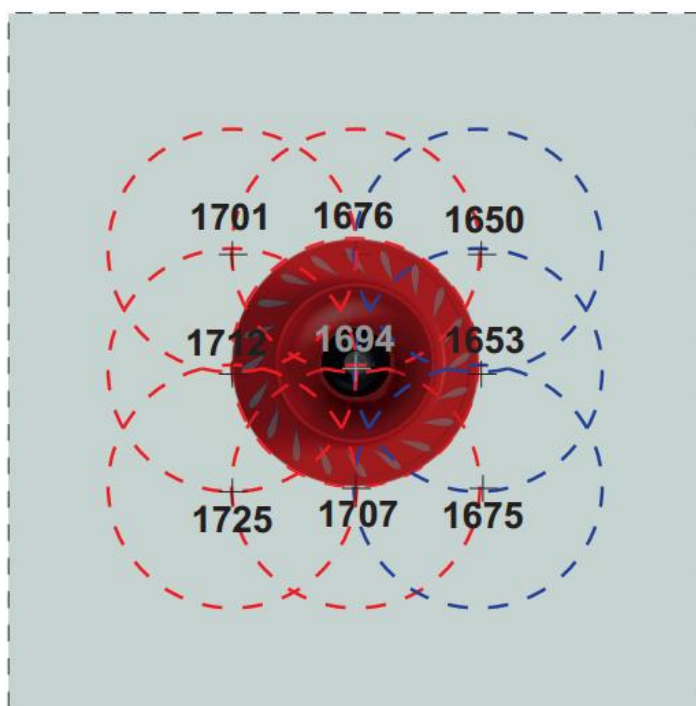
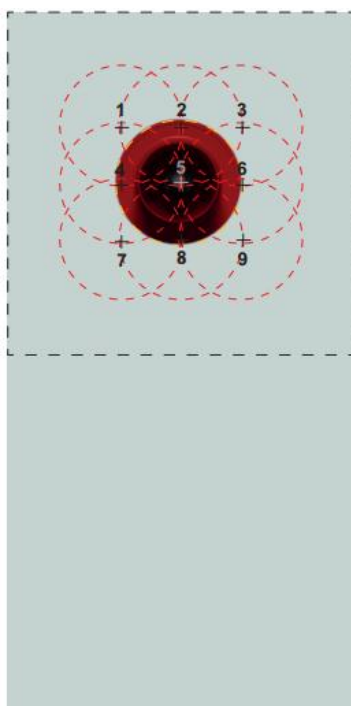


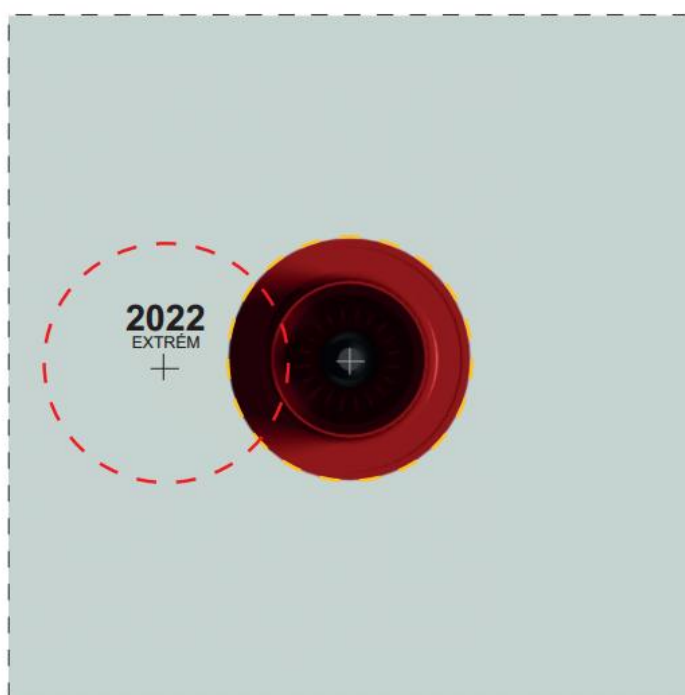
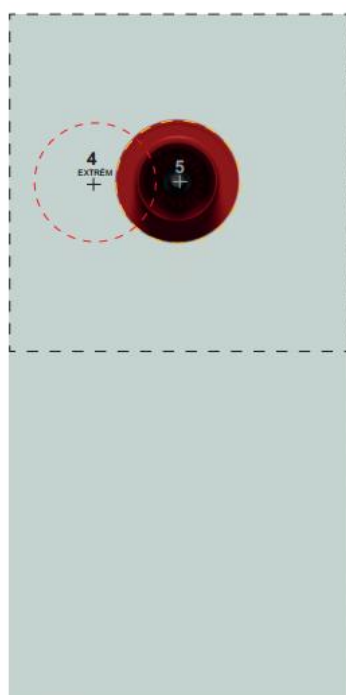
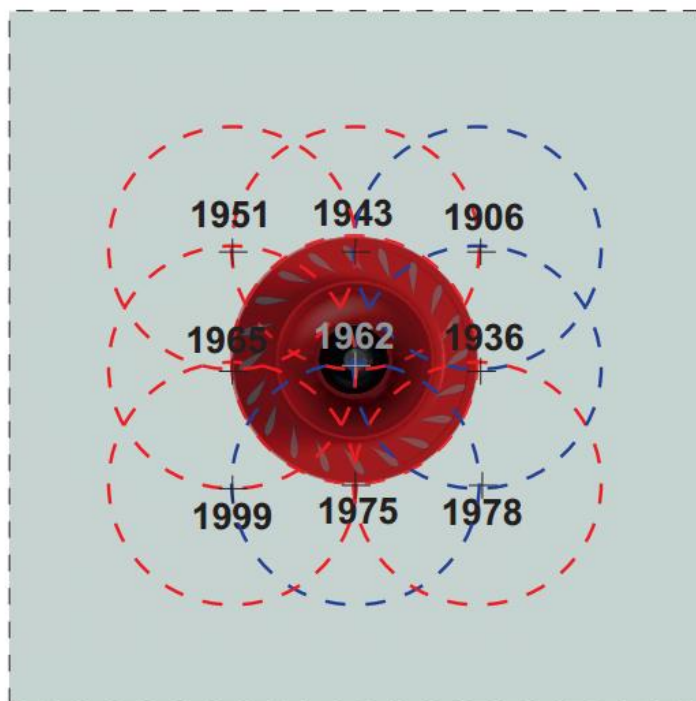
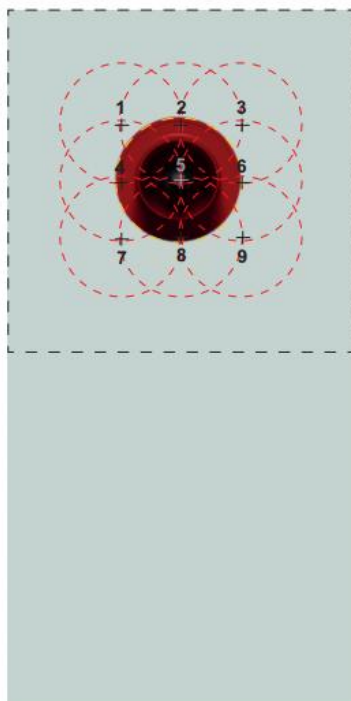


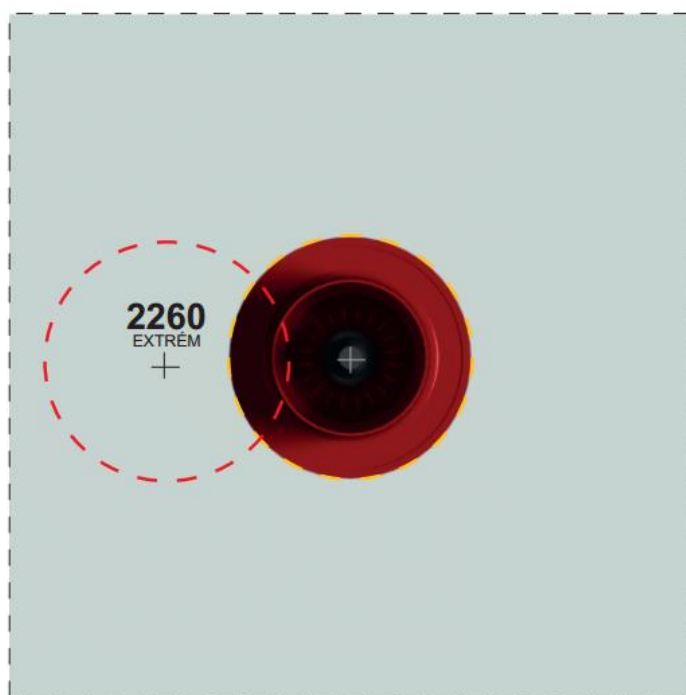
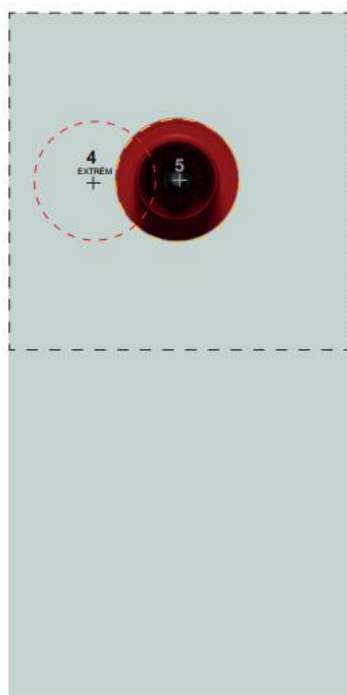
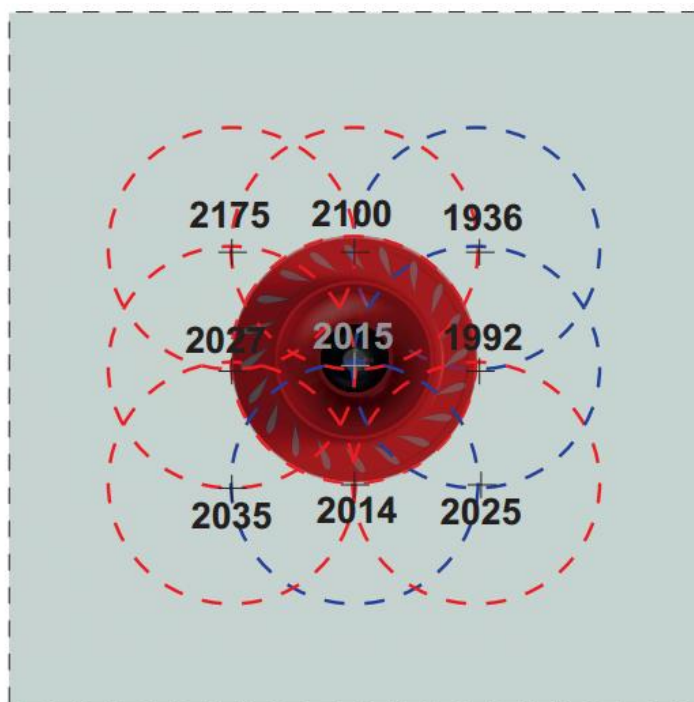
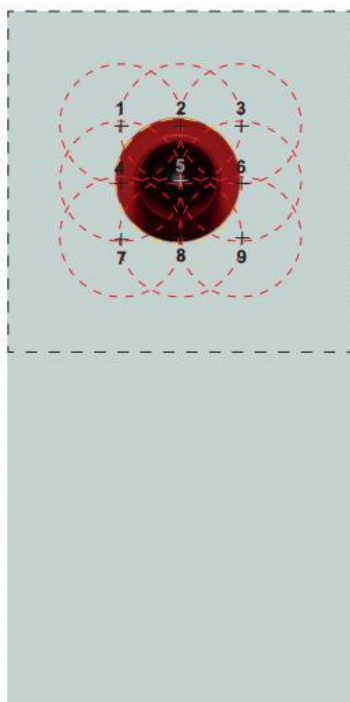


### 6.6.7 ROZDÍLY CELKOVÝCH TLAKŮ PRO ZANOŘENÍ 1000

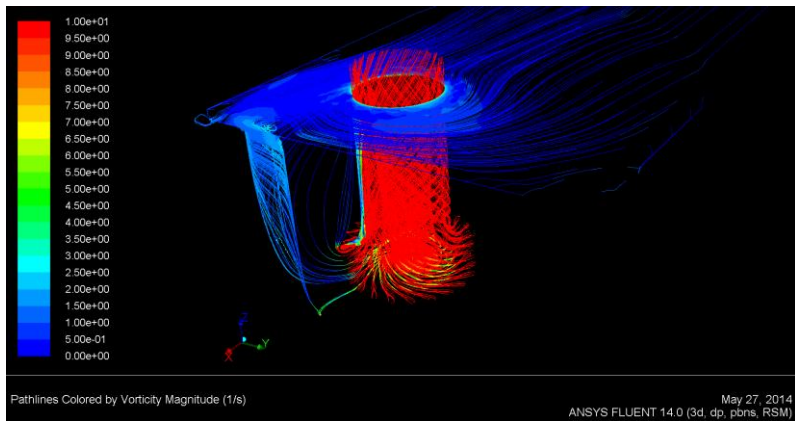
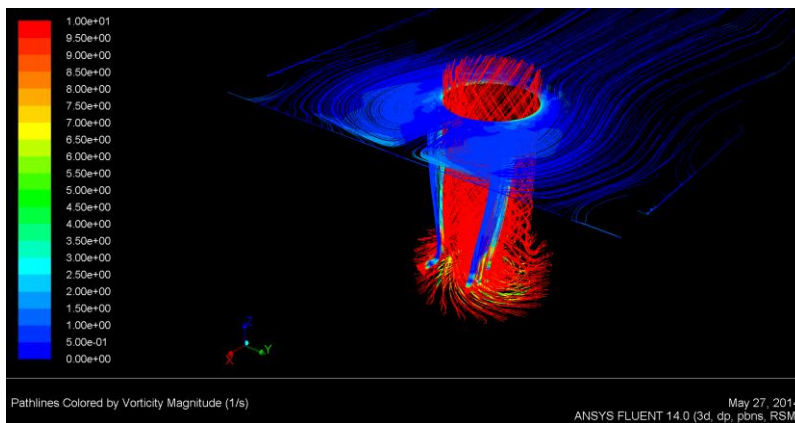
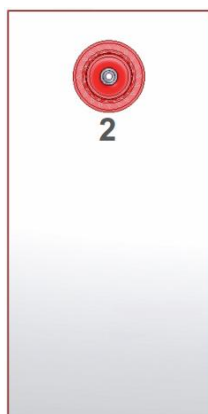
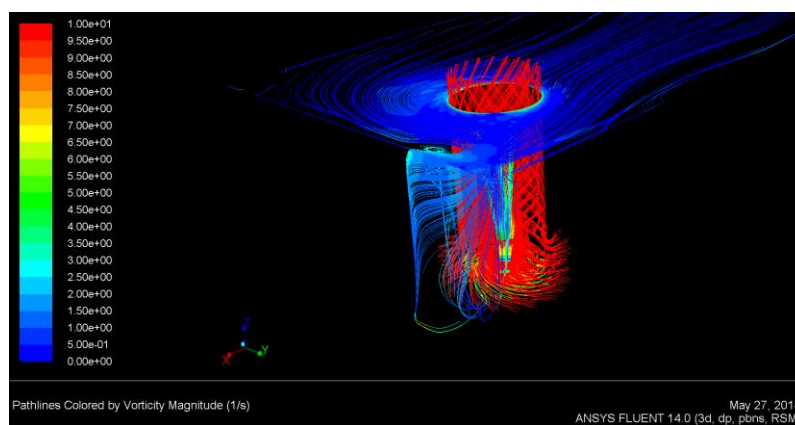
Pro každou pozici je vytvořen kruh v jejímž středu se nachází hodnota rozdílu celkového tlaku v Pascalech. Tyto tlaky byly brány před rozváděcím kolem na průměru 450 mm a za rozváděcím kolem na průměru 300 mm, vyhodnoceny jako Mass-Weighted Average. Pro lepší přehlednost je pozice 4-Extrém zaznačená v samostatném obrázku. Nejnižší rozdíly totálních tlaků jsou znázorněny v kolečku modrou barvou.

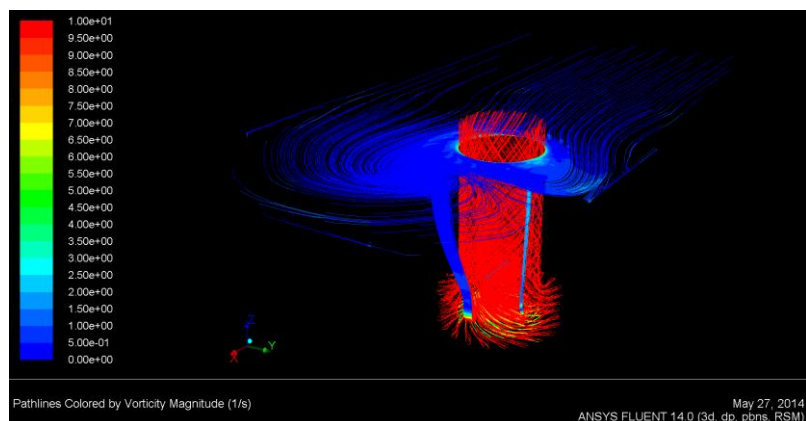
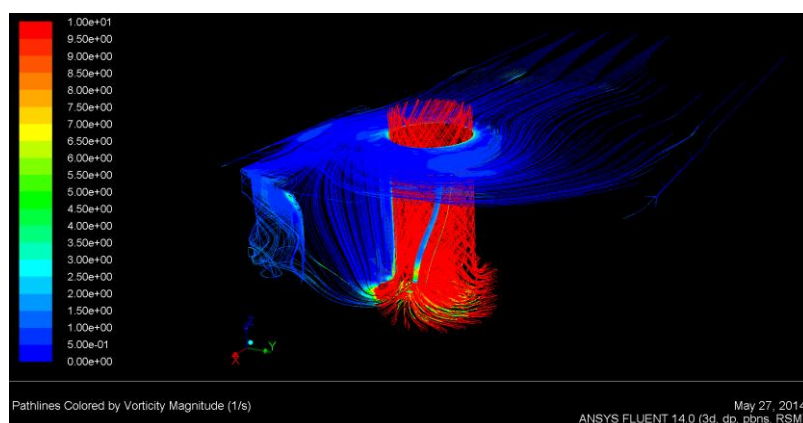
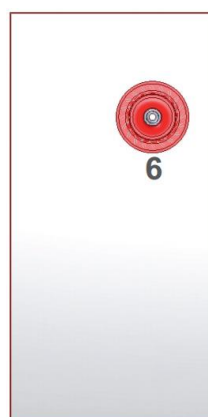
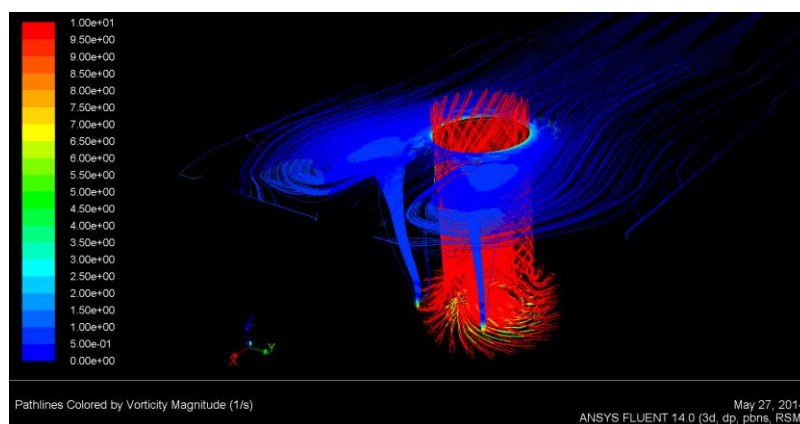
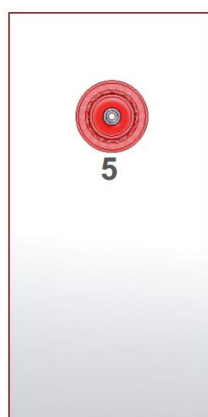
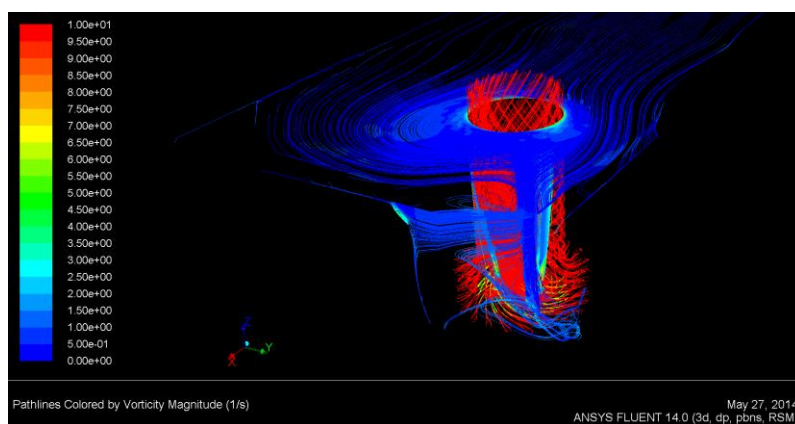


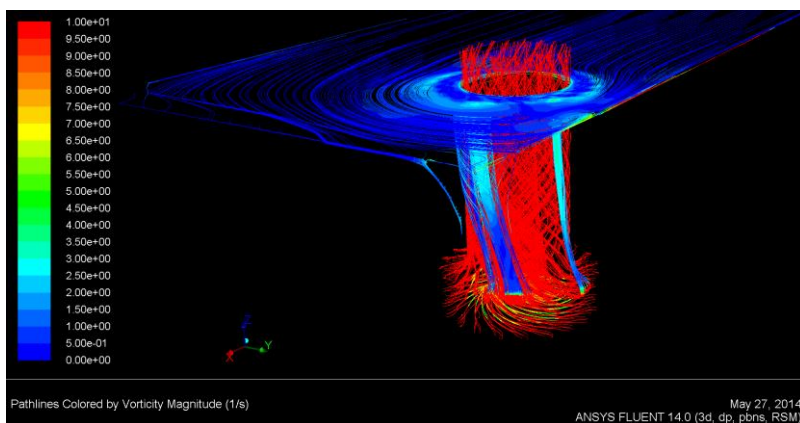
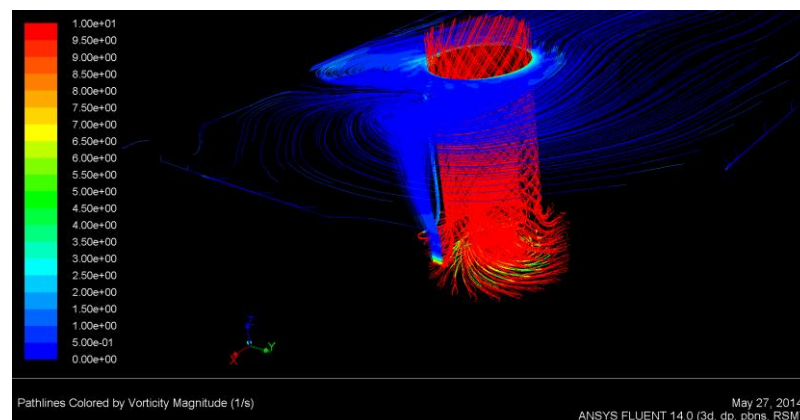
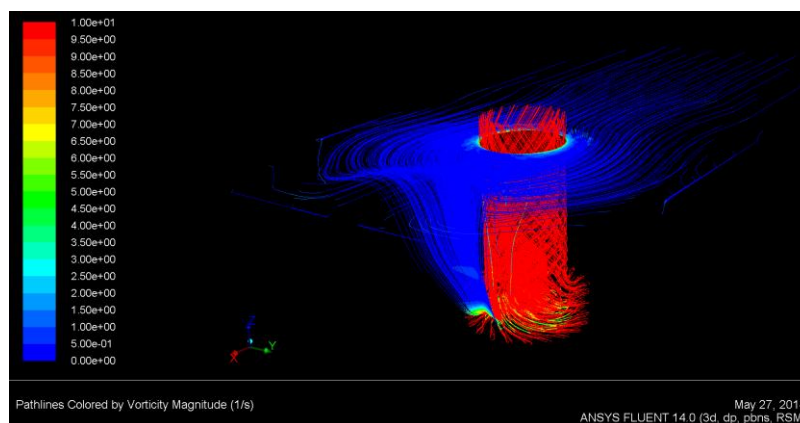
**6.6.8 ROZDÍLY CELKOVÝCH TLAKŮ PRO ZANOŘENÍ 600 PRO POZICE 1-9**

**6.6.9 ROZDÍLY CELKOVÝCH TLAKŮ PRO ZANOŘENÍ 200 PRO POZICE 1-9**

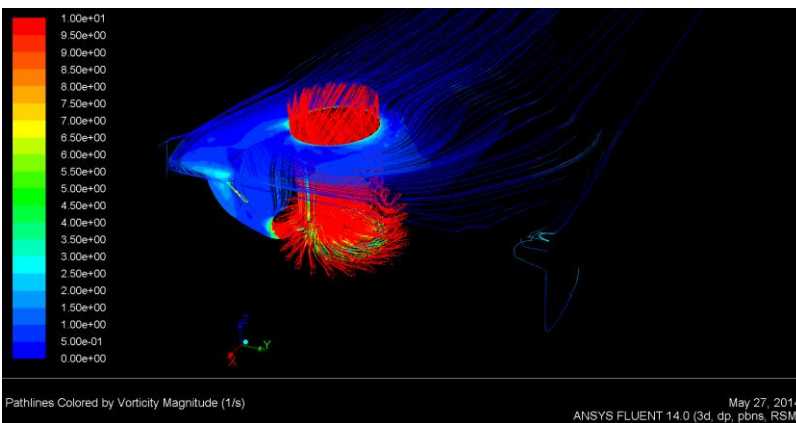
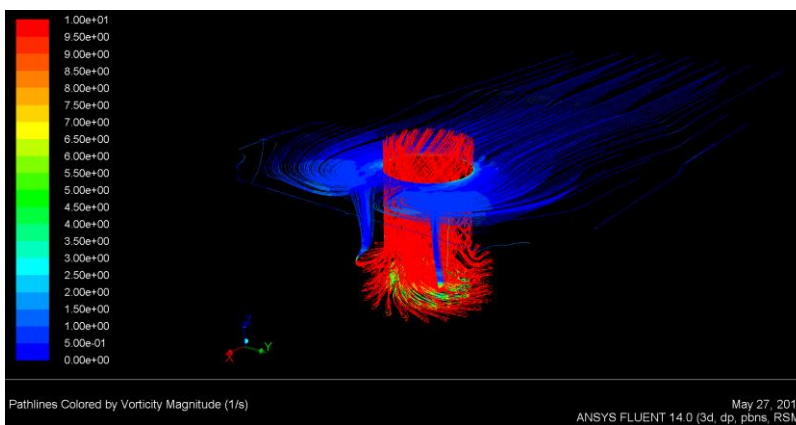
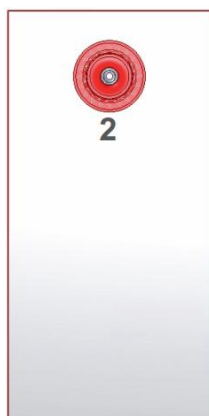
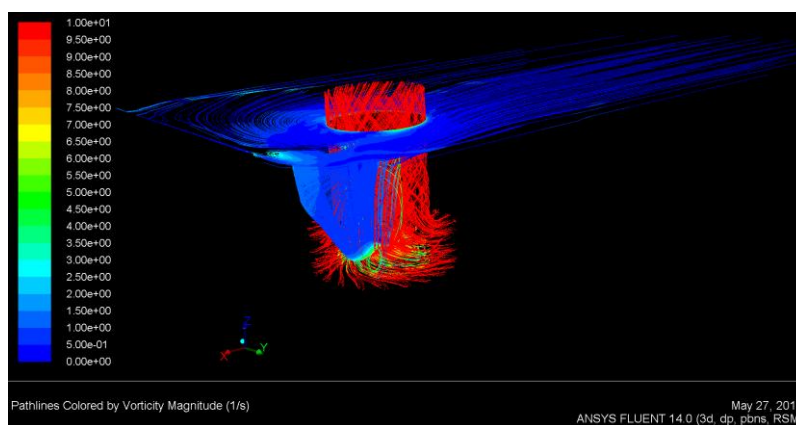
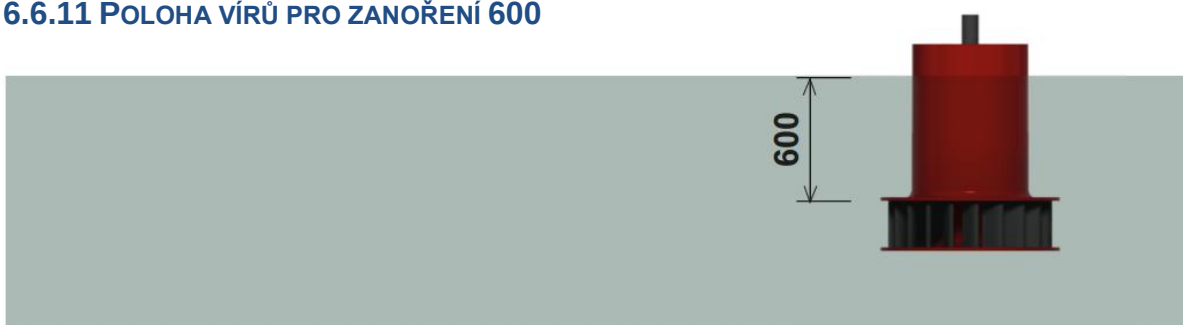
## 6.6.10 POLOHA VÍRŮ PRO ZANOŘENÍ 1000

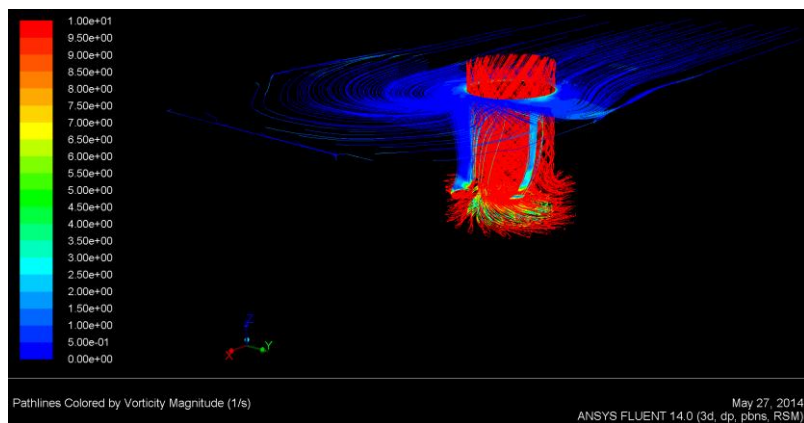
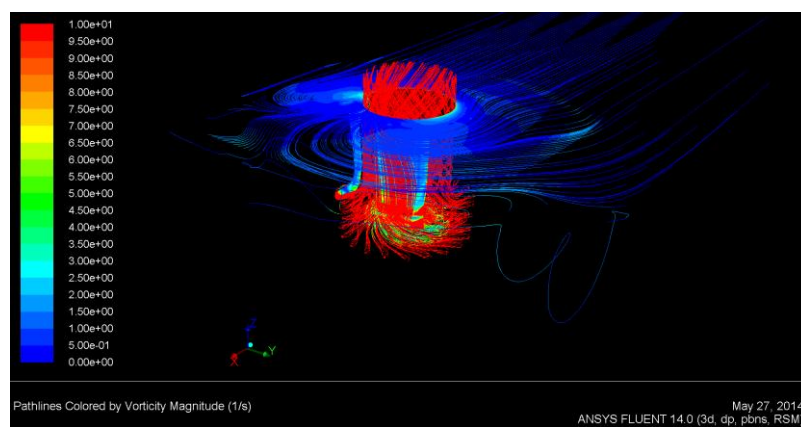
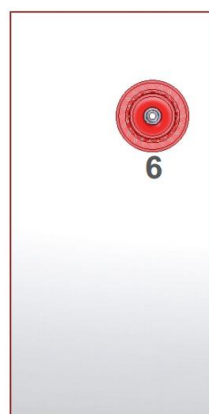
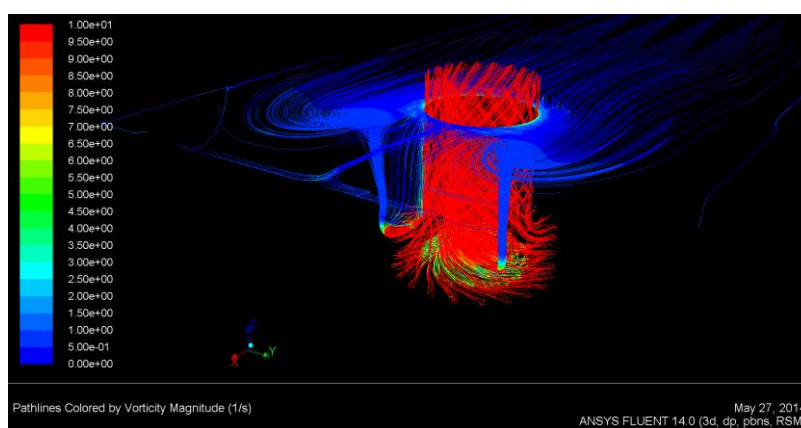
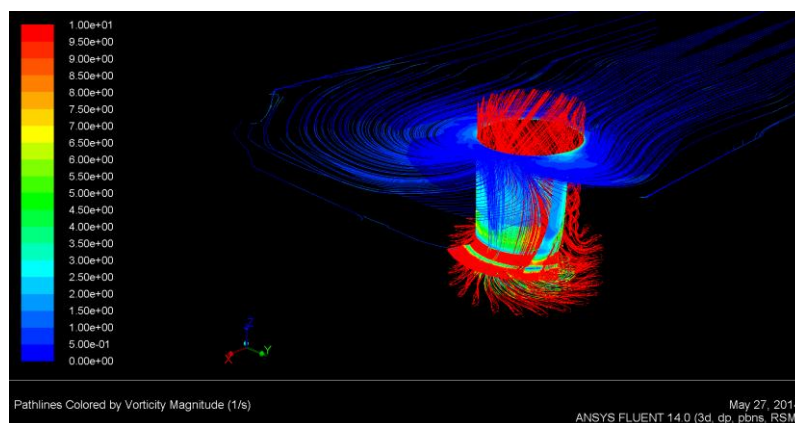


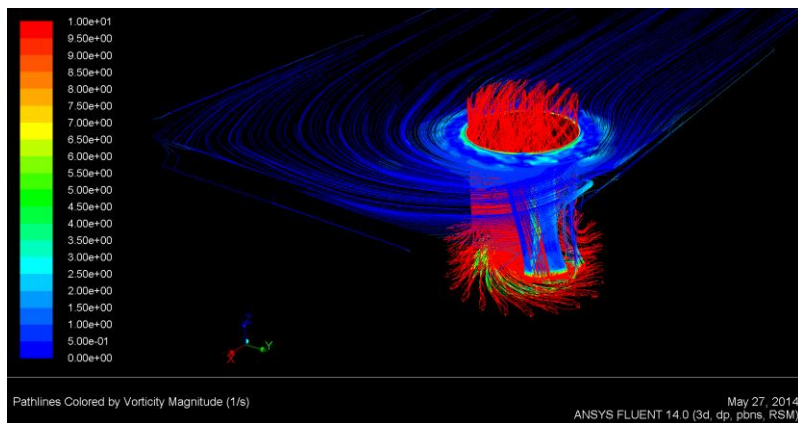
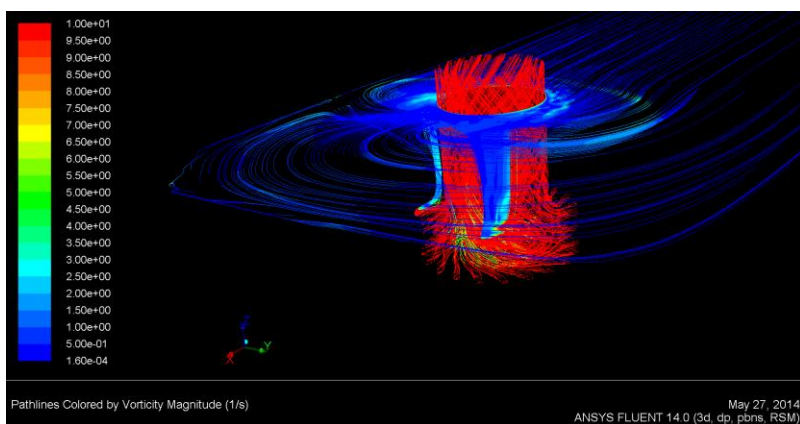
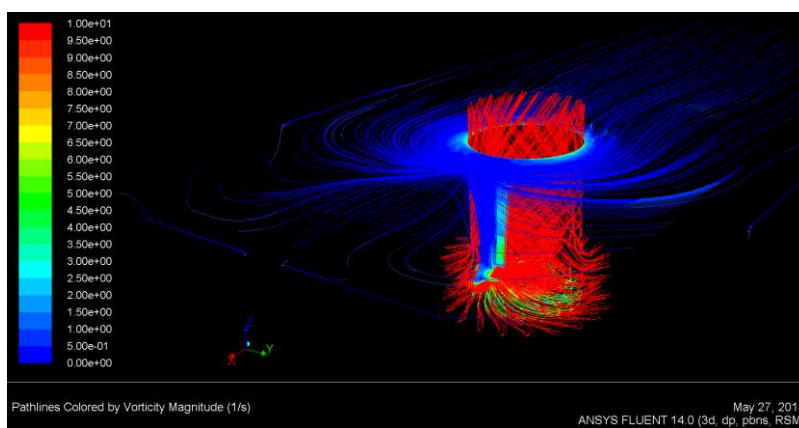




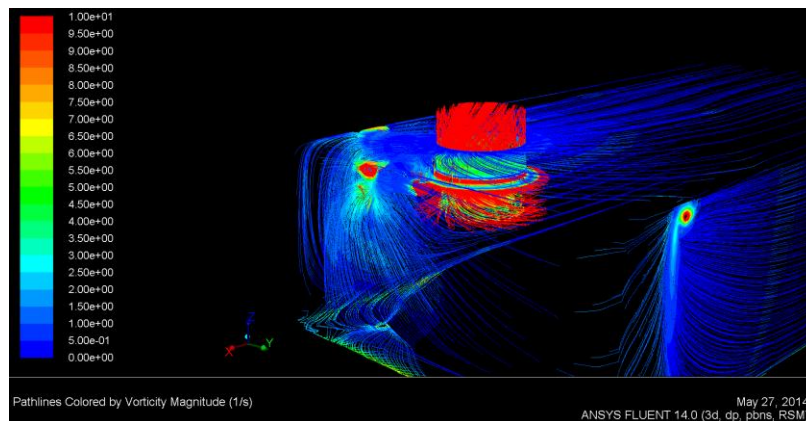
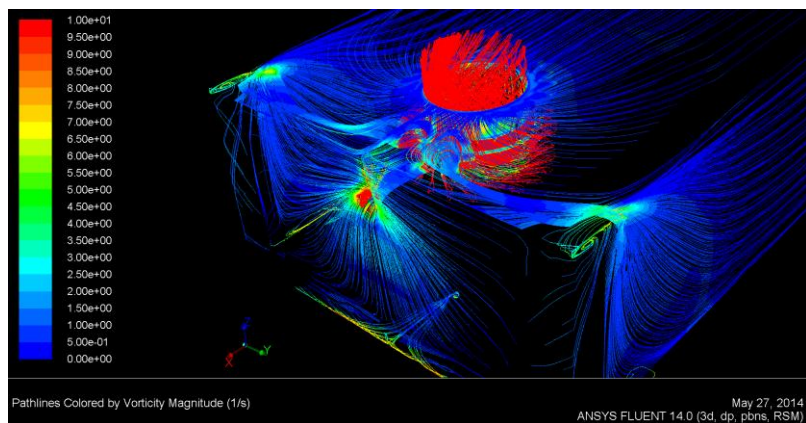
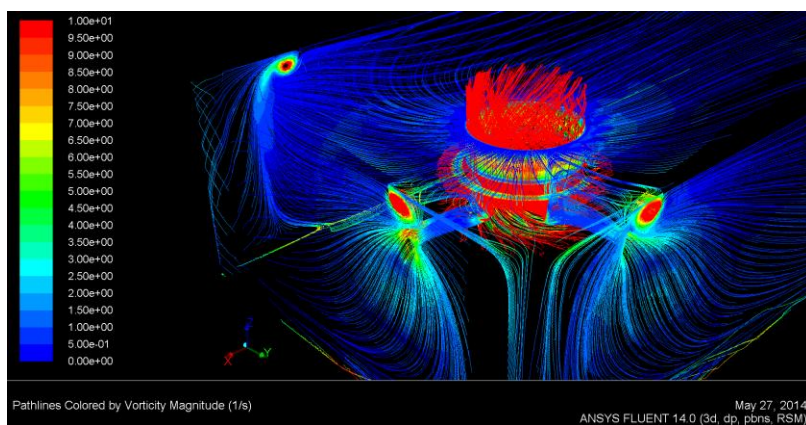
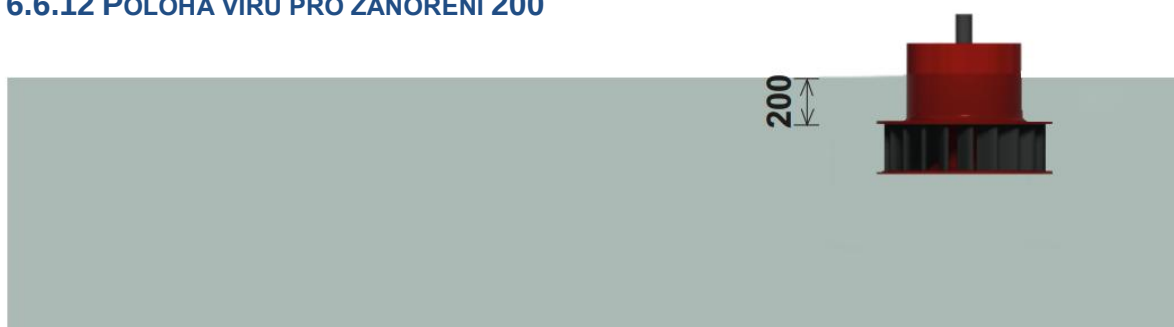
## 6.6.11 POLOHA VÍRŮ PRO ZANOŘENÍ 600

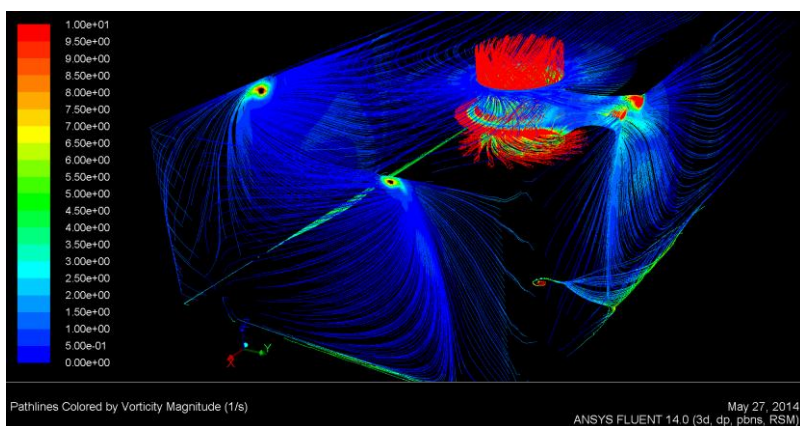
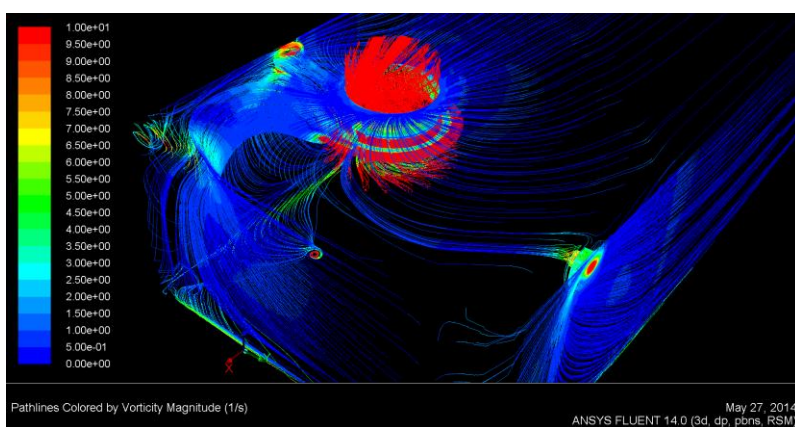
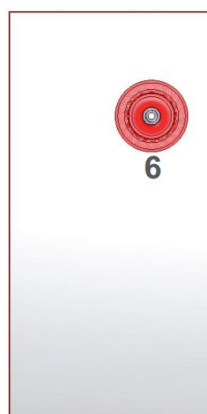
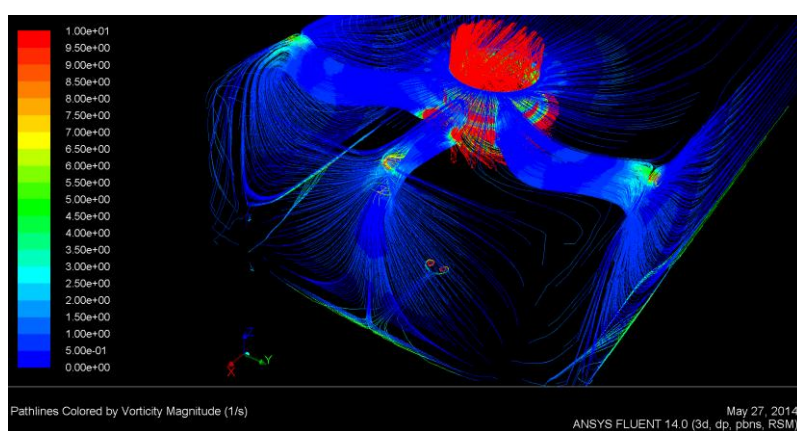
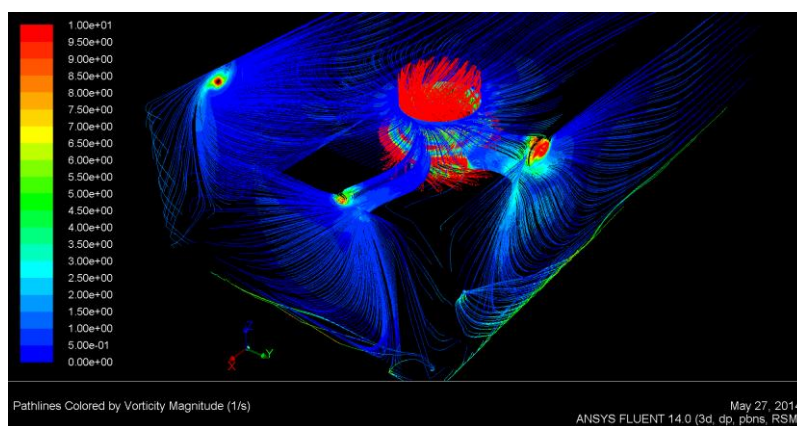


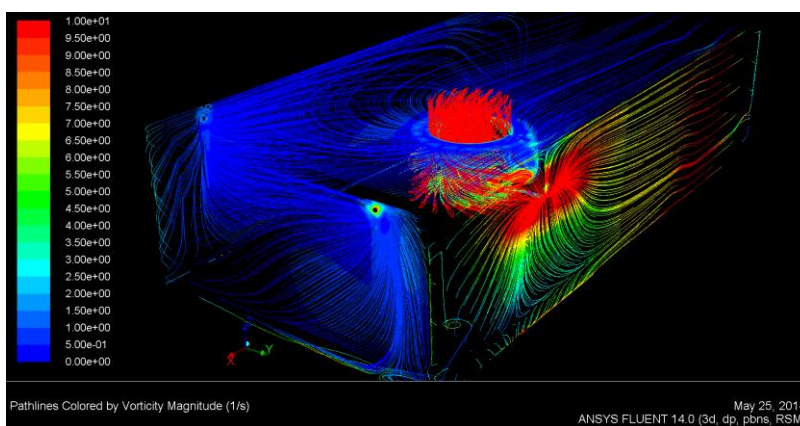
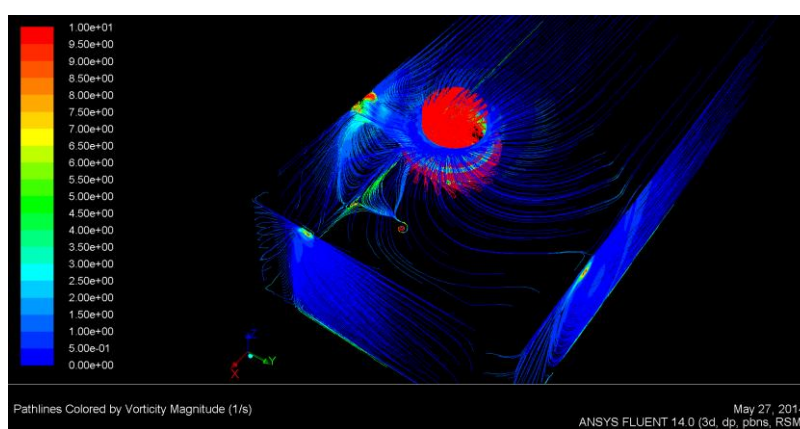
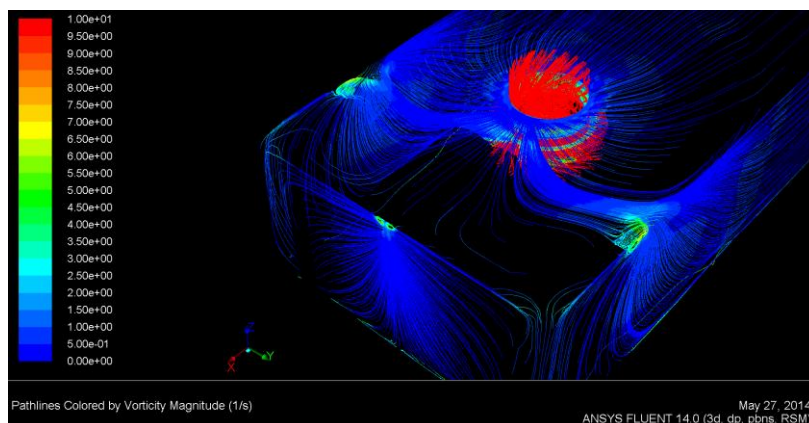




## 6.6.12 POLOHA VÍRŮ PRO ZANOŘENÍ 200







### 6.6.13 POLOHA VÍRU PRO ZANOŘENÍ 1800

