VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

# ANALÝZA NESROVNALOSTÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY BENEŠ

CONTRADICTIONS ANALYSIS OF SMALL WATER POWER PLANT BENEŠ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. JAN KUCHAŘ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. MILOSLAV HALUZA, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2009

## Anotace práce

Tato diplomová práce se zabývá malou vodní elektrárnou Beneš. První část práce hledá příčiny nízké účinnosti této elektrárny. Druhá část obsahuje návrhy konstrukčních změn sloužících ke zvýšení účinnosti – zejména návrh nových lopatek oběžného kola. Zmiňuje též základní parametry nového rozvaděče.

## Anotation of thesis

This master‘s thesis deals with small water power plant Beneš. The first part of the thesis tries to find causes of low efficiency of this power plant. The second part contains suggestions of construction changes for increasing of efficiency – design of new runner blades and basic parameters of new distributor.

## Klíčová slova

malá vodní elektrárna, turbína, oběžná lopatka, rozvaděč

## Key words

small water power plant, turbine, runner blade, distributor

## Bibliografická citace práce

Kuchař, J. *Analýza nesrovnalostí malé vodní elektrárny Beneš.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 43 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval sám. Při vypracovávání jsem použil literaturu uvedenou v části Seznam použité literatury a rady vedoucího práce.

Jan Kuchař

**Poděkování**

Děkuji tímto panu doc. Ing. Miloslavu Haluzovi, CSc. za pomoc, kterou mi poskytl při vypracovávání této práce.

autor práce

# Obsah

**1 Úvod . . . . . 13**

**2 Popis MVE Beneš . . . . . 14**

**3 Kontrola oběžné lopatky . . . . . 17**
3.1 Příprava geometrie pro výpočet . . . . . 17
3.1.1 Tvar střednicové plochy lopatky . . . . 17
3.1.2 Natáčení lopatky . . . . . 19
3.1.3 Konformní transformace . . . . . 22
3.2 Výpočet . . . . . 25
3.3 Výsledky výpočtu . . . . . 27

**4 Návrh nové oběžné lopatky . . . . . 29**
4.1 Návrh tvaru střednice . . . . . 29
4.2 Vzájemná poloha válcových řezů . . . . . 31
4.3 Profil válcových řezů . . . . . 32

**5 Rozvaděč . . . . . 38**
5.1 Meridiální řez . . . . . 38
5.2 Konformní transformace . . . . . 39
5.3 Tvar střednice . . . . . 40
5.4 Další poznámky ke konstrukci rozvaděče . . . . 41

**6 Závěr . . . . . 42**

Seznam použité literatury . . . . . 43

Seznam nejdůležitějších veličin . . . . . 43

Seznam příloh . . . . . 43

# 1 Úvod

Dá se říci, že obor malých vodních elektráren (MVE) prochází v dnešní době opět poměrně významným rozvojem. Malé vodní elektrárny byly v první polovině dvacátého století na našem území velmi rozšířeny, potom však při centralizaci výroby elektrické energie docházelo k jejich rušení. Důvodem dnešního zvýšeného zájmu o malé vodní elektrárny jsou jednak rostoucí ceny energetických surovin a tedy i energie a jednak celkově rostoucí zájem o vodní energetiku jako zdroj energie s velmi malými negativními dopady na životní prostředí. Hydroenergetický potenciál velkých řek v naší republice je již takřka vyčerpán, zatímco u menších vodních toků jsou rekonstruovány staré či stavěny nové malé elektrárny, často s využitím spádu vytvořeného již existujícím vzdouvacím zařízením.

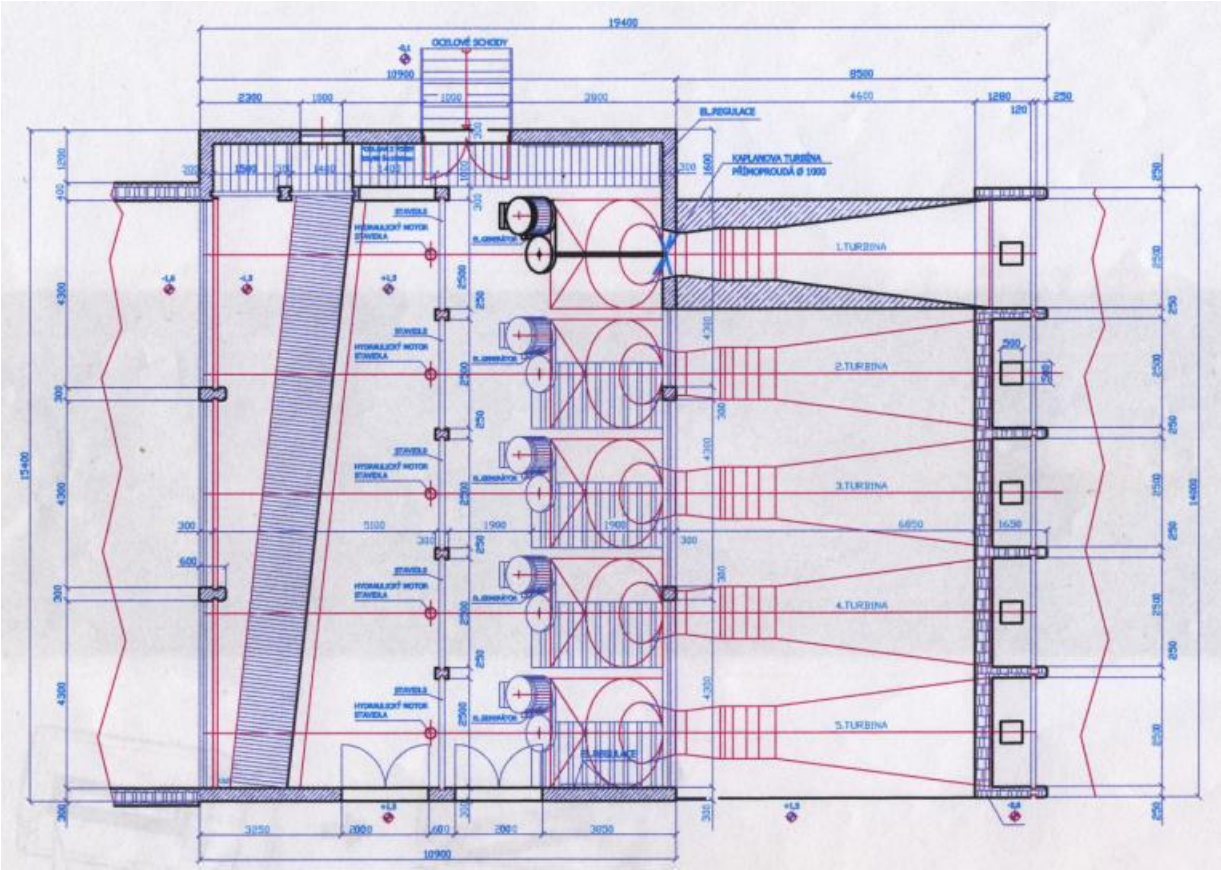
Požadavky na malé vodní elektrárny se většinou liší od nároků kladených na velké vodní elektrárny. Důležitými kritérii jsou u MVE jednoduchá konstrukce, nízké nároky na obsluhu a údržbu, malé investiční náklady – MVE jsou většinou provozovány soukromými osobami či malými organizacemi. Ačkoli požadavky na účinnost malých vodních elektráren nejsou tak vysoké jako u elektráren velkých, některé MVE z různých důvodů nedosahují očekávané účinnosti. Takovouto elektrárnou je i MVE Beneš, kterou se zabývá tato práce. Nejdříve hledá příčiny nízké účinnosti, poté navrhuje konstrukční změny, které by měly vést k jejímu zvýšení.

## 2 Popis MVE Beneš

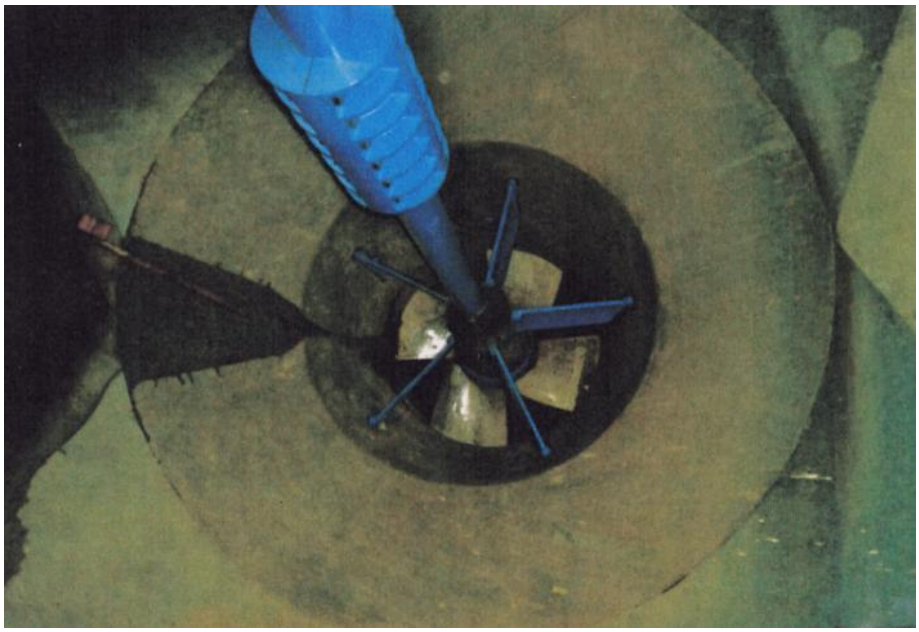
Malá vodní elektrárna Beneš se nachází na řece Lužnici poblíž města Tábor (obr. 1).

*Obr. 1 MVE Beneš – celkový pohled*

Půdorys strojovny elektrárny je na obr. 2. Elektrárna má pět přímoproudých turbín, z nichž tři mají pevné oběžné lopatky, zbylé dvě mají oběžné lopatky nastavitelné. Každé oběžné kolo má čtyři lopatky, průměr oběžných kol je 1000 mm. Před oběžným kolem je rozvaděč, který má pět rozváděcích lopatek. Na obr. 3 je vidět, že rozváděcí lopatky jsou velmi málo zakřiveny a jejich natočení vůči axiálnímu směru je také velmi malé. Voda tedy natéká na oběžné kolo takřka axiálně (uvážíme-li též malý počet rozváděcích lopatek). To bude zřejmě jedna z příčin nízké účinnosti elektrárny, o níž se zmíníme dále.

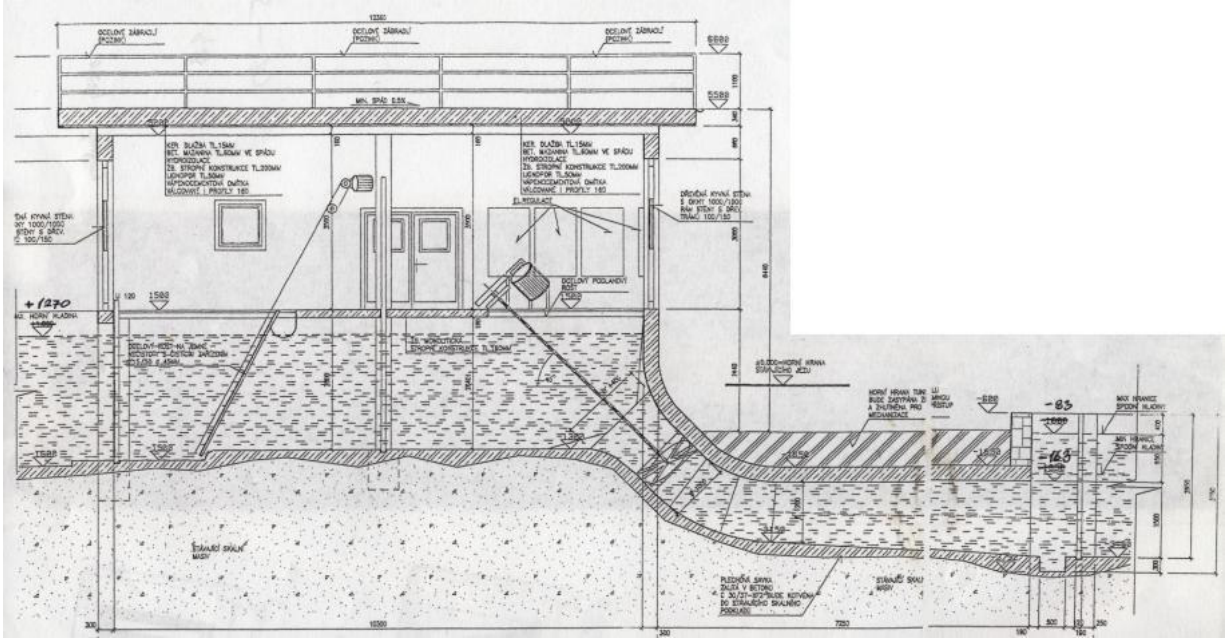



*Obr. 2 MVE Beneš – půdorys strojovny*



*Obr. 3 MVE Beneš – rozvaděč a oběžné kolo*

Ze svislého řezu strojovnou elektrárny (obr. 4) je patrné, že osa turbíny je šikmá. Krouticí moment je hřídelí vyveden nad horní hladinu, generátor je od hřídele poháněn pomocí plochého řemenu.




*Obr. 4 MVE Beneš – svislý řez strojovnou*

Návrhový bod elektrárny je dán průtokem Q = 3,5 $m^3/s$ a spádem H = 2,75 m. Otáčky turbíny jsou n = 283 $min^{-1}$.

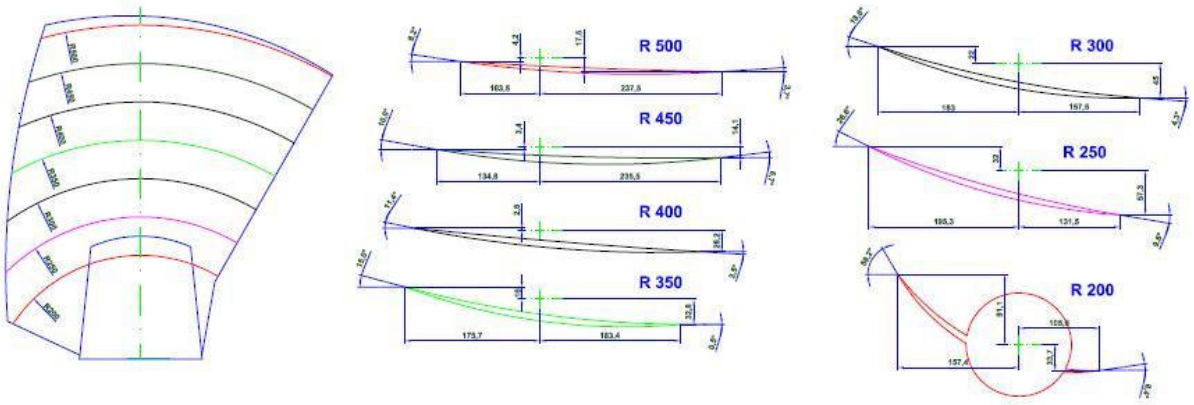
Hlavním problémem MVE Beneš je nízká účinnost, která se pohybuje mezi 50 a 60%. Na elektrárně byly zkoušeny dvě různé úpravy rozvaděče – prodlužování lopatek pomocí dvou různých tvarů plechů – v obou případech však turbína s upraveným rozvaděčem měla ještě nižší výkon než turbína s rozvaděčem původním.

# 3 Kontrola oběžné lopatky

Prvotním návrhem pro zvýšení účinnosti elektrárny bylo změnit tvar rozvaděče – zvýšit počet lopatek a vhodněji je tvarovat – tak, aby tento nový rozvaděč lépe pracoval v součinnosti se současným oběžným kolem. Před konstrukcí nového rozvaděče však bylo přistoupeno ke kontrole lopatek současného oběžného kola za účelem posouzení vhodnosti tohoto oběžného kola pro dané podmínky (návrhový bod).

## 3.1 Příprava geometrie pro výpočet

Základním vstupním podkladem pro kontrolní výpočet byly rozvinuté válcové řezy oběžné lopatky (obr. 5).




*Obr. 5 Rozvinuté válcové řezy oběžné lopatky*

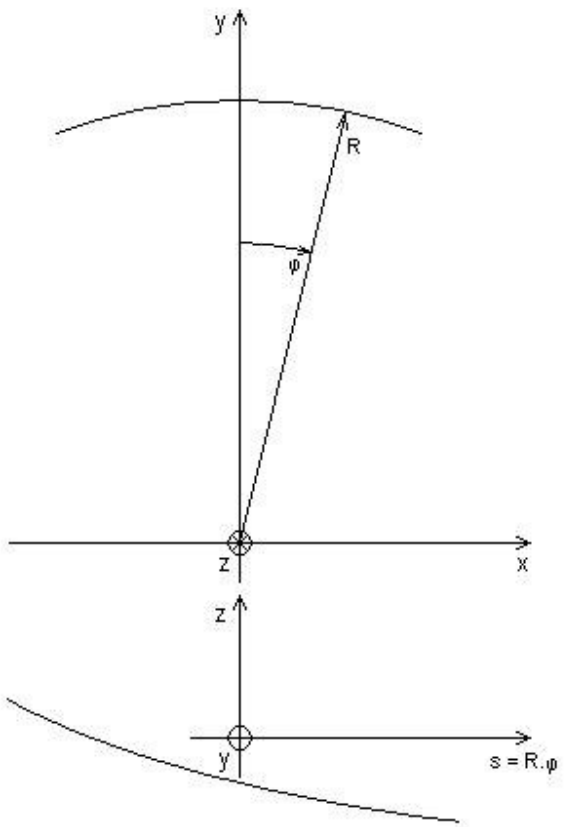
### 3.1.1 Tvar střednicové plochy lopatky

Pro další výpočet byly vybrány tři referenční řezy – R250, R350 a R500.

Nejprve bylo nutno získat tvar střednice jednotlivých řezů. To bylo provedeno následovně: Do každého profilu bylo vepsáno deset kružnic. Střednice profilu je potom tvořena středy těchto kružnic, tloušťka profilu v určitém bodě střednice je rovna průměru příslušné kružnice (obr. 6).

*Obr. 6 Střednice profilu*

Dalším krokem byla transformace z válcových souřadnic (R, φ, z) do souřadnic kartézských (x, y, z) (obr. 7).




*Obr. 7 Transformace z válcových do kartézských souřadnic*

Pro délku oblouku platí:

$$s = R \cdot \varphi \qquad (1)$$

Z tohoto vztahu můžeme vyjádřit úhel φ:

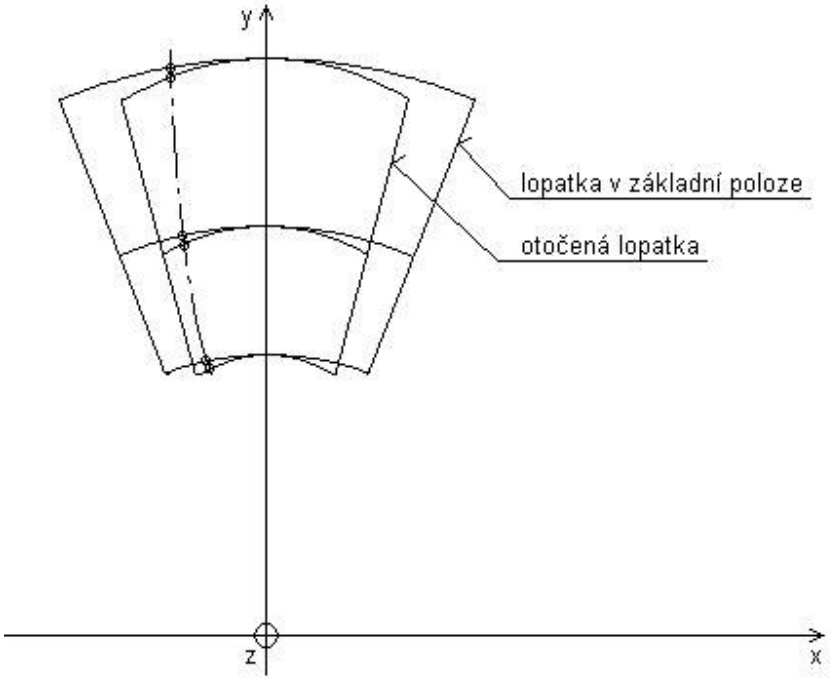
$$\varphi = \frac{s}{R} \tag{2}$$

Pro transformaci použijeme následující rovnice:

$$x = R \cdot \sin\varphi \tag{3}$$
$$y = R \cdot \cos\varphi \tag{4}$$

### 3.1.2 Natáčení lopatky

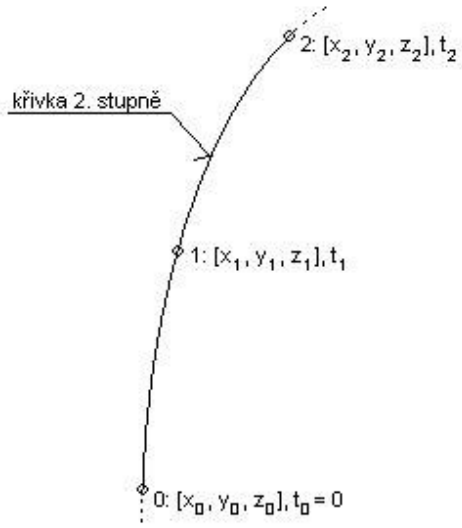
Výkres oběžné lopatky zobrazuje lopatku v základní poloze. Při provozu je ovšem lopatka vůči této poloze natočena o určitý úhel kolem osy y (osa otáčení čepu lopatky). Provedeme-li natočení střednic profilů kolem osy y, body, které neleží na ose y, se dostanou na válcové plochy o poloměrech různých od poloměru původního (obr. 8).




*Obr. 8 Natáčení lopatky*

Abychom získali válcové řezy R250, R350 a R500, byly otočené body proloženy deseti křivkami 2. stupně a poté byly zjištěny souřadnice průsečíků těchto křivek s válcovými plochami R250, R350 a R500.

**Proložení (obr. 9)**




*Obr. 9 Proložení bodů střednicové plochy lopatky*

Byly určovány koeficienty $a_{1x}$, $a_{2x}$, $a_{1y}$, $a_{2y}$, $a_{1z}$, $a_{2z}$ v rovnicích pro jednotlivé křivky:

$$x = x_0 + a_{1x} \cdot t + a_{2x} \cdot t^2$$
$$y = y_0 + a_{1y} \cdot t + a_{2y} \cdot t^2$$
$$z = z_0 + a_{1z} \cdot t + a_{2z} \cdot t^2 \qquad (5)$$

Parametr t v těchto rovnicích je vzdálenost po křivce od počátečního bodu [$x_0$, $y_0$, $z_0$].
Křivka byla vždy proložena třemi body:
0: [$x_0$, $y_0$, $z_0$] … otočený bod, který před otočením ležel na ploše R250
1: [$x_1$, $y_1$, $z_1$] … otočený bod, který před otočením ležel na ploše R350
2: [$x_2$, $y_2$, $z_2$] … otočený bod, který před otočením ležel na ploše R500
Pro souřadnici $x_1$ tedy platí:

$$x_1 = x_0 + a_{1x} \cdot t_1 + a_{2x} \cdot t_1^{\,2} \qquad (6)$$

Z této rovnice si můžeme vyjádřit koeficient $a_{1x}$:

$$a_{1x} = \frac{x_1 - x_0 - a_{2x} \cdot t_1^{\,2}}{t_1} \qquad (7)$$

Dosadíme do vztahu pro souřadnici $x_2$:

$$x_2 = x_0 + \frac{x_1 - x_0 - a_{2x} \cdot t_1^{\,2}}{t_1} \cdot t_2 + a_{2x} \cdot t_2^{\,2} = x_0 + \frac{x_1}{t_1} \cdot t_2 - \frac{x_0}{t_1} \cdot t_2 - a_{2x} \cdot t_1 \cdot t_2 + a_{2x} \cdot t_2^{\,2} \tag{8}$$

Nyní již můžeme vypočítat koeficient $a_{2x}$:

$$a_{2x} = \frac{x_2 - x_0 - \frac{x_1}{t_1} \cdot t_2 + \frac{x_0}{t_1} \cdot t_2}{t_2^{\,2} - t_1 \cdot t_2} \tag{9}$$

Koeficient $a_{1x}$ získáme zpětným dosazením do vztahu (7).

Obdobně určíme ostatní koeficienty.

Parametry $t_1$ a $t_2$ příslušející bodům 1 a 2 byly vypočteny přibližně jako přímá vzdálenost:

$$t_1 = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \tag{10}$$

$$t_2 = t_1 + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \tag{11}$$

**Hledání průsečíků**

Po určení koeficientů $a_{1x}$, $a_{2x}$, $a_{1y}$, $a_{2y}$, $a_{1z}$, $a_{2z}$ byly hledány průsečíky s plochami R250, R350 a R500, a to iterativně pomocí Newtonovy metody tečen:

Rovnice válcové plochy:

$$x^2 + y^2 = R^2 \tag{12}$$

Po dosazení a úpravě:

$$\left(x_0 + a_{1x} \cdot t + a_{2x} \cdot t^2\right)^2 + \left(y_0 + a_{1y} \cdot t + a_{2y} \cdot t^2\right)^2 - R^2 = f(t) = 0 \tag{13}$$

Newtonova metoda tečen:

$$t^{i+1} = t^i - \frac{f\left(t^i\right)}{f'\left(t^i\right)} \tag{14}$$

(horní indexy zde značí pořadí iterace)

Derivaci funkce f vypočteme takto:

$$f'(t) = 2 \cdot \left(x_0 + a_{1x} \cdot t + a_{2x} \cdot t^2\right) \cdot \left(a_{1x} + 2 \cdot a_{2x} \cdot t\right) + 2 \cdot \left(y_0 + a_{1y} \cdot t + a_{2y} \cdot t^2\right) \cdot \left(a_{1y} + 2 \cdot a_{2y} \cdot t\right) \tag{15}$$

Několika iteracemi Newtonovy metody nalezneme parametry t pro každou křivku a poloměry R250, R350 a R500 a souřadnice x, y, z potom určíme z rovnic jednotlivých křivek.

Tímto poměrně složitým postupem jsme tedy získali souřadnice střednicové plochy lopatky na poloměrech R250, R350 a R500 pro provozní natočení lopatky.

### 3.1.3 Konformní transformace

Posledním přípravným krokem kontrolního výpočtu oběžné lopatky je tzv. konformní transformace, tj. převedení tvaru střednice do souřadnic ξ, η. Obecně je nutno pro konformní transformaci použít tyto vztahy (obr. 10):

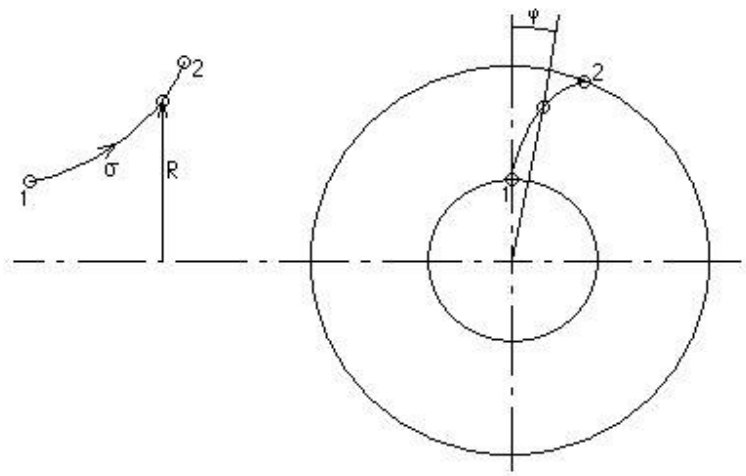
$$\xi = h \cdot \left( \frac{1}{a} \int_{\sigma_1}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r} - \frac{1}{2} \right) \tag{16}$$

$$\eta = \frac{h}{a} \cdot \varphi \tag{17}$$

Konstantu mříže a získáme následovně:

$$a = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{r} \tag{18}$$

Hodnota h je zvolená hloubka profilu – např. h = 100.




*Obr. 10 Ke konformní transformaci*

Jelikož však transformaci provádíme na konstantním poloměru, je možné souřadnice přepočítat pomocí tří jednoduchých dílčích kroků:

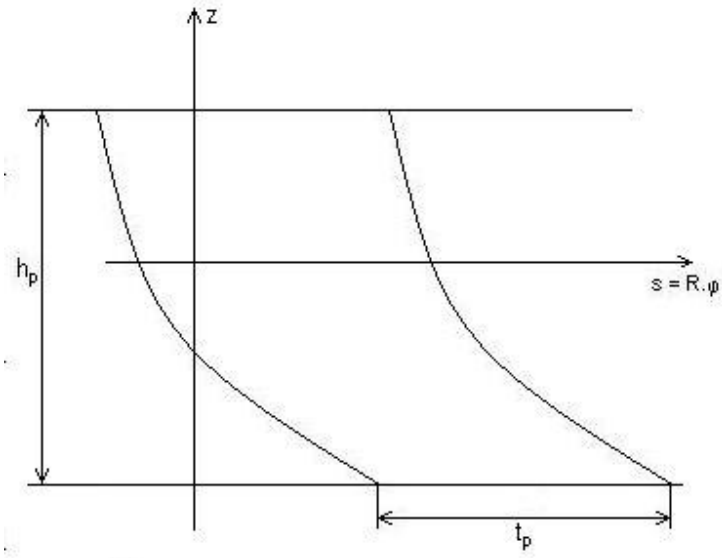
a) zpětná transformace ze souřadnic x, y, z do souřadnic R, φ, z

b) přepočet do pomocných souřadnic $\xi_p$, $\eta_p$
c) přepočet do souřadnic ξ, η

**Ad a)** zpětná transformace: poloměr R je dán (řez 250, 350 a 500), úhel φ vypočteme ze vztahu:

$$\tan\varphi = \frac{x}{y} \tag{19}$$

Rozvinutý válcový řez můžeme nyní zobrazit v souřadnicích s = R.φ, z (obr. 11).




*Obr. 11 Rozvinutý válcový řez*

Dále můžeme určit hloubku profilu:

$$h_p = z_1 - z_{10} \tag{20}$$

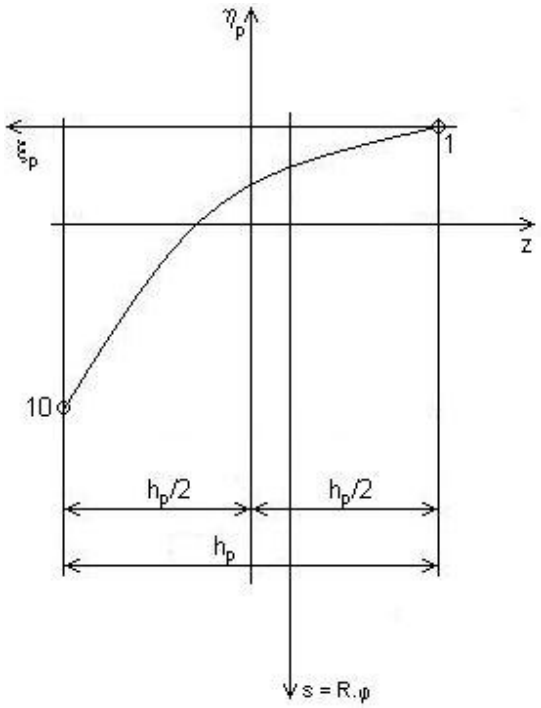
Rozteč $t_p$ vypočteme následovně:

$$t_p = \frac{2\pi R}{N} \tag{21}$$

**Ad b)** přepočet do pomocných souřadnic (obr. 12): osa $\xi_p$ vznikla posunutím osy z a změnou její orientace, osa $\eta_p$ vznikla posunutím osy s a taktéž změnou její orientace.
Platí:

$$\xi_p = -\frac{h_p}{2} + z_1 - z \tag{22}$$

$$\eta_p = s_1 - s \tag{23}$$




*Obr. 12 Střednice lopatky v pomocných souřadnicích $\xi_p$, $\eta_p$*

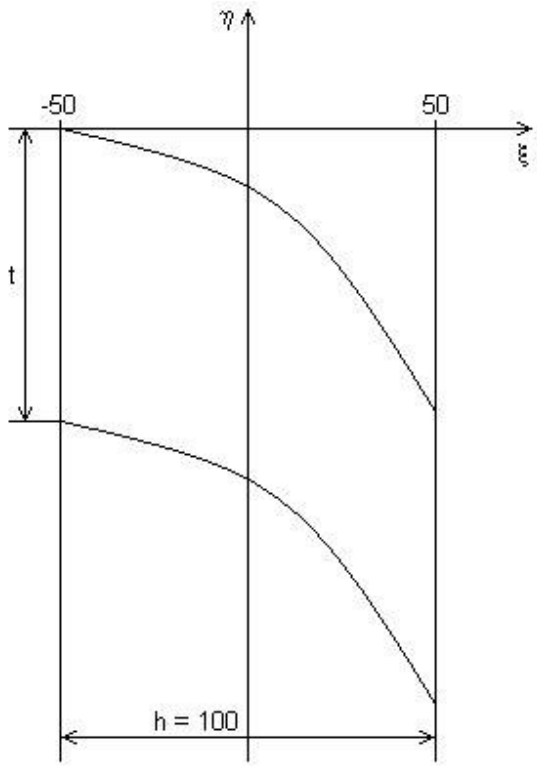
**Ad c)** konečný přepočet: zde se jedná pouze o vynásobení všech rozměrů koeficientem α tak, aby konečná hloubka profilu byla rovna 100 (obr. 13).

Koeficient α tedy určíme ze vztahu:

$$h = \alpha \cdot h_p \tag{24}$$

Dále můžeme psát:

$$\xi = \alpha \cdot \xi_p$$
$$\eta = \alpha \cdot \eta_p$$
$$t = \alpha \cdot t_p \tag{25}$$




*Obr. 13 Střednice lopatky v souřadnicích ξ, η*

## 3.2 Výpočet

Kontrolní výpočet proudění kolem oběžné lopatky byl proveden v několika variantách:

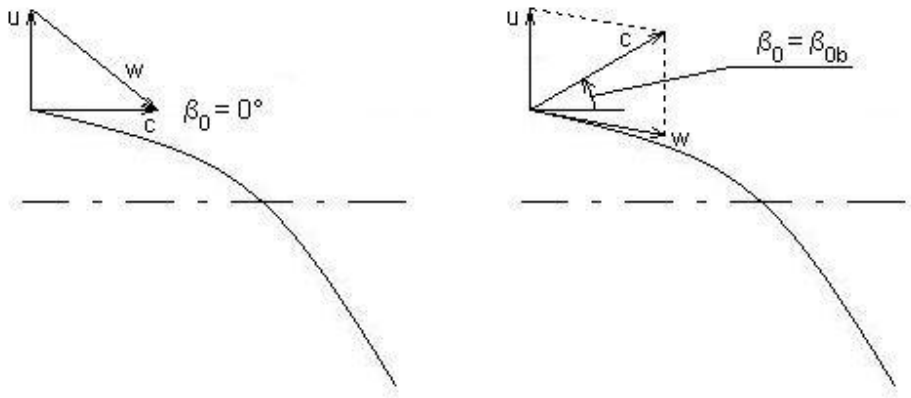
a) oběžná lopatka natočena o 15° vzhledem k základní poloze

b) oběžná lopatka natočena o 20° vzhledem k základní poloze

Pro každé natočení byly dále počítány dva případy (obr. 14):

i) úhel vstupní rychlosti $\beta_0$ = 0° – tento případ přibližně odpovídá současnému rozvaděči s malým počtem málo zakřivených lopatek

ii) úhel vstupní rychlosti $\beta_0$ je roven tzv. úhlu bezrázovému $\beta_{0b}$ – tento případ odpovídá ideálnímu rozvaděči – tedy rozvaděči, který zajistí takový úhel vstupní rychlosti, že nedojde k rázu na vstupní hraně oběžné lopatky




*Obr. 14 Úhel vstupní rychlosti*

Každý z těchto čtyřech výpočtů byl proveden pro tři poloměry (250, 350 a 500 mm).

K výpočtům obtékání profilů byl použit počítačový program založený na metodě singularit.

Vstupní data pro výpočet byla tato:

1) tvar střednice v souřadnicích ξ, η

2) rozteč t, konstanta mříže a (obr. 15), parametry $x_\delta$ a $y_\delta$:

$$a = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{r} = \frac{1}{r}\Delta\sigma \tag{26}$$

(poloměr r je konstantní, proto můžeme integraci zjednodušit)

$x_\delta$ je ξ-souřadnice místa s největší tloušťkou profilu

$$y_\delta = \frac{\delta}{2r} \cdot \frac{h}{a} \tag{27}$$

(δ je největší tloušťka profilu)

3) rychlostní číslo φ:

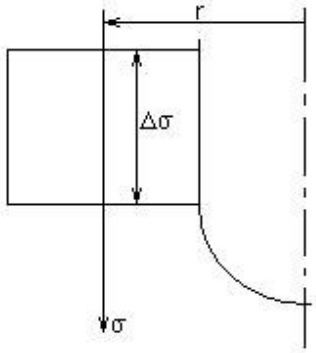
$$\varphi = \frac{c_m}{u} = \frac{\frac{Q}{S}}{2\pi rn} = \frac{\frac{Q}{\frac{\pi}{4}\left(D^2 - D_n{}^2\right)}}{2\pi rn} \tag{28}$$

(D je průměr oběžného kola, $D_n$ je průměr náboje)

4) úhel vstupní rychlosti $\beta_0$

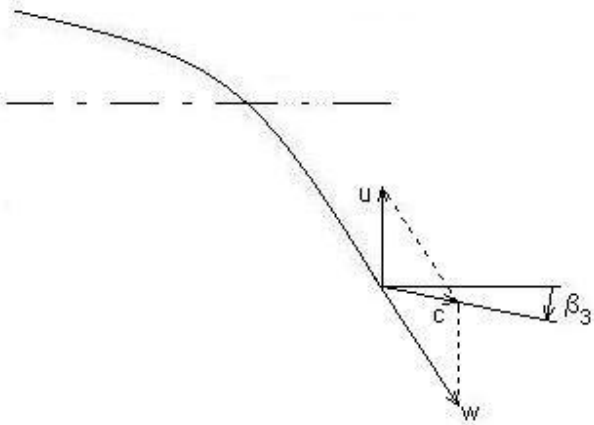
5) otáčky n

6) hydraulická účinnost $\eta_h$




*Obr. 15 K výpočtu konstanty mříže a*

Provedením výpočtu jsme získali tyto informace:
1) bezrázový úhel $\beta_{0b}$
2) úhel výstupní rychlosti $\beta_3$ (obr. 16)
3) zpracovávaný spád H




*Obr. 16 Úhel výstupní rychlosti*

## 3.3 Výsledky výpočtu

Výsledky provedených kontrolních výpočtů obtékání oběžné lopatky jsou shrnuty v tab. 1.

| $\beta_0$ [°] | natočení [°] | R [mm] | $\beta_{0b}$ [°] | $\beta_3$ [°] | $H_{100\%}$ [m] |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 15 | 250 | -6,05 | -31,63 | 2,25 |
| 0 | 15 | 350 | -6,47 | -33,32 | 3,36 |
| 0 | 15 | 500 | -9,32 | -13,38 | 1,74 |
| 0 | 20 | 250 | 9,79 | -17,06 | 1,12 |
| 0 | 20 | 350 | 18,84 | -14,68 | 1,34 |
| 0 | 20 | 500 | 31,69 | 6,30 | -0,81 |
| $\beta_{0b}$ | 15 | 250 | -6,05 | -32,34 | 1,93 |
| $\beta_{0b}$ | 15 | 350 | -6,47 | -35,18 | 3,02 |
| $\beta_{0b}$ | 15 | 500 | -9,32 | -19,13 | 1,33 |
| $\beta_{0b}$ | 20 | 250 | 9,79 | -15,73 | 1,66 |
| $\beta_{0b}$ | 20 | 350 | 18,84 | -8,07 | 2,47 |
| $\beta_{0b}$ | 20 | 500 | 31,69 | 25,35 | 1,05 |

*Tab. 1 Kontrolní výpočet oběžné lopatky*

Z výsledků lze vyvodit následující závěry:

1) Při obtékání se vstupním úhlem 0° (tedy přibližně současná situace na elektrárně) dochází při natočení 15° k mírnému a při natočení 20° již k výraznému vstupnímu rázu (rozdíl mezi $\beta_0$ a $\beta_{0b}$). Nežádoucí účinek vstupního rázu je ještě zesílen tím, že vstupní hrana oběžné lopatky má velmi malý poloměr zakřivení (viz obr. 5).

2) Ve všech případech vzniká na výstupu z oběžného kola velká rotace proudu (velké hodnoty $\beta_3$) – tuto skutečnost potvrdil i provozovatel elektrárny, který při provozu turbín pozoruje na výtoku ze savek poměrně intenzivní víření. Vidíme navíc, že velikost rotace se dosti mění v závislosti na poloměru, při natočení 20° dokonce mění směr (změna znaménka $\beta_3$).

3) Zpracovávaný spád (při účinnosti 100%) se poměrně výrazně liší od spádu návrhového bodu (2,75 m). Opět můžeme vidět velké rozdíly ve spádech na různých poloměrech, při $\beta_0$ = 0° a natočení 20° vychází spád dokonce záporný. Tyto rozdíly mají za následek proudění kapaliny napříč lopatkou, což je další nepříznivý vliv na účinnost stroje.

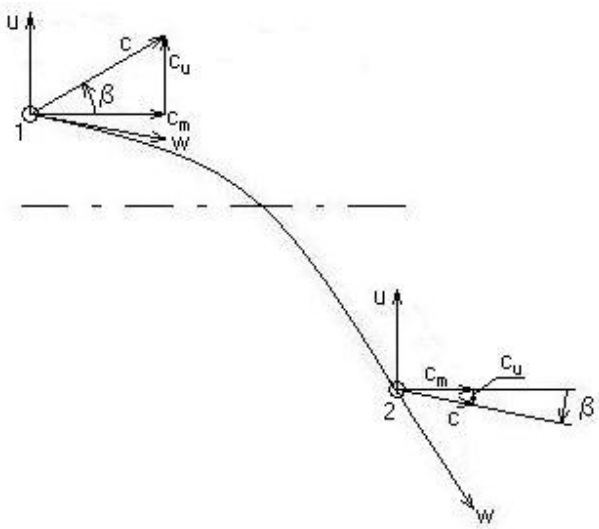
Pokud srovnáme obtékání se vstupním úhlem 0° a obtékání bezrázové, můžeme konstatovat, že použití ideálního (tedy bezrázového rozvaděče) se současným oběžným kolem by nepřineslo výrazné zlepšení. Proto bylo upuštěno od původní myšlenky konstruovat nový rozvaděč pro současné oběžné kolo a bylo rozhodnuto navrhnout nové lopatky oběžného kola a nový rozvaděč sladit s tímto novým oběžným kolem.

# 4 Návrh nové oběžné lopatky

## 4.1 Návrh tvaru střednice

Při návrhu tvaru střednicové plochy nové oběžné lopatky můžeme vycházet z Eulerovy turbínové rovnice (obr. 17):

$$gH\eta_h = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2} \tag{29}$$




*Obr. 17 K Eulerově turbínové rovnici*

Střednicovou plochu opět určíme pomocí tří válcových řezů R250, R350 a R500. Na válcovém řezu (R = konst) platí:

$$u_1 = u_2 = u \tag{30}$$

Eulerova rovnice bude potom vypadat takto:

$$gH\eta_h = uc_{u1} - uc_{u2} \tag{31}$$

Lopatku budeme konstruovat tak, aby výstupní rychlost měla axiální směr (tzn. $c_{u2} = 0$), tím se Eulerova rovnice dále zjednoduší:

$$gH\eta_h = uc_{u1} \tag{32}$$

Pro obvodovou složku vstupní rychlosti tedy můžeme psát:

$$c_{u1} = \frac{gH\eta_h}{u} \tag{33}$$

(hydraulická účinnost $\eta_h$ byla v těchto výpočtech uvažována 0,85)

Meridiální rychlost vypočítáme z průtoku:

$$c_m = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}\left(D^2 - D_n{}^2\right)} \tag{34}$$

Obvodovou rychlost určíme pomocí otáček:

$$u = 2\pi R n \tag{35}$$

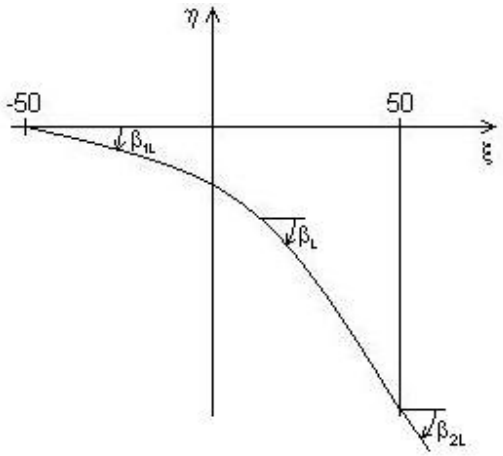
Nyní můžeme určit úhel vstupní rychlosti:

$$\beta_1 = \arctan \frac{c_{u1}}{c_m} \tag{36}$$

Další část návrhu tvaru střednice lopatky v souřadnicích ξ, η probíhala iterativním postupem:

1) Odhad vstupního a výstupního úhlu lopatky $\beta_{1L}$ a $\beta_{2L}$ (obr. 18)
2) Určení tvaru lopatky použitím lineární závislosti úhlu lopatky $\beta_L$ na souřadnici ξ
3) Provedení výpočtu obtékání lopatky obdobným způsobem jako při kontrole současné lopatky s těmito vstupními daty:
   - úhel vstupní rychlosti $\beta_0$ roven úhlu vypočtenému vztahem (36) (tzn. úhlu $\beta_1$)
   - hydraulická účinnost $\eta_h$ = 88%

   Výpočtem byly získány opět hodnoty bezrázového úhlu $\beta_{0b}$, úhlu výstupní rychlosti $\beta_3$ a zpracovávaného spádu H.
4) Porovnání hodnot $\beta_{0b}$, $\beta_3$ a H s hodnotami požadovanými
   Požadujeme, aby nedocházelo ke vstupnímu rázu, tj. aby $\beta_{0b} = \beta_0$, dále aby výstupní rychlost měla axiální směr, tj. aby $\beta_3 = 0°$, a nakonec aby zpracovávaný spád byl roven spádu návrhového bodu, tedy 2,75 m.
5) Pokud požadavky nejsou splněny s přijatelnou přesností, změníme jeden z úhlů $\beta_{1L}$ a $\beta_{2L}$, nebo oba tyto úhly a postup opakujeme.




*Obr. 18 Návrh tvaru střednice oběžné lopatky*

Dosažené hodnoty úhlů $\beta_{1L}$, $\beta_{2L}$, $\beta_{0b}$, $\beta_3$ a spádu H a vypočtené hodnoty úhlu $\beta_0$ jsou uvedeny v tab. 2.

| R [mm] | $\beta_0$ [°] | $\beta_{1L}$ [°] | $\beta_{2L}$ [°] | $\beta_{0b}$ [°] | $\beta_3$ [°] | $H_{88\%}$ [m] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 250 | 30,34 | -8 | -61 | 28,65 | -1,68 | 2,79 |
| 350 | 22,69 | -30 | -68,7 | 22,98 | -1,08 | 2,78 |
| 500 | 16,31 | -50 | -75,1 | 14,75 | -0,32 | 2,71 |

*Tab. 2 K návrhu tvaru střednice oběžné lopatky*

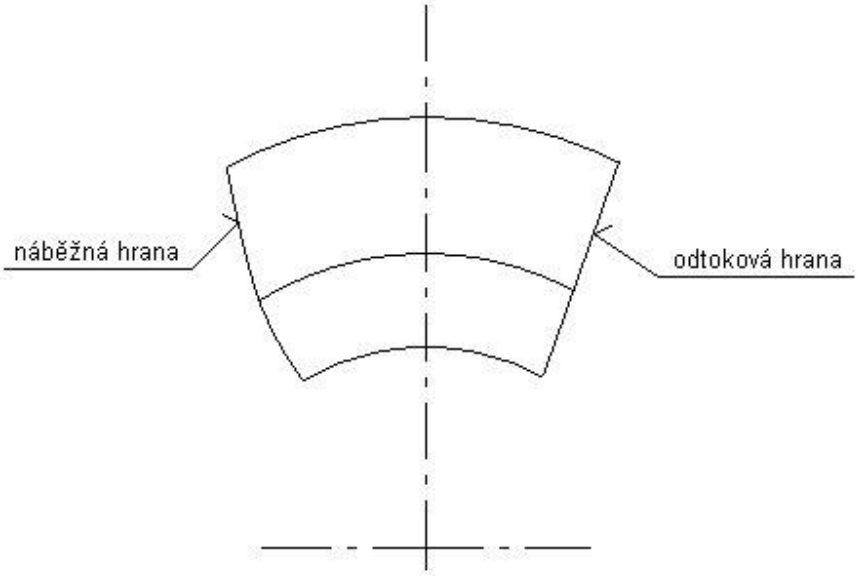
Tímto máme navržen tvar střednice lopatky v souřadnicích ξ, η. Nyní vytvoříme rozvinuté válcové řezy, tzn. provedeme transformaci do souřadnic s = R.φ, z. Tato spočívá opět pouze v posunutí souřadných os vůči profilu a vynásobení obou souřadnic určitým koeficientem tak, aby vypočtený profil nové lopatky měl stejnou hloubku jako profil původní lopatky v natočení 15°.

## 4.2 Vzájemná poloha válcových řezů

Vzájemná poloha rozvinutých válcových řezů nové oběžné lopatky (R250, R350 a R500) zatím není určena – s jednotlivými řezy je možno otáčet kolem osy rotace oběžného kola (tedy osy z) a také můžeme řezy vzájemně posouvat ve směru této osy.

Řezy byly ustaveny tak, aby odtoková hrana vzniklé lopatky tvořila přímku a náběžná hrana byla mírně prohnuta, jak je znázorněno na obr. 19. Tento tvar je výhodný z hlediska odplavování nečistot z náběžné hrany lopatky.

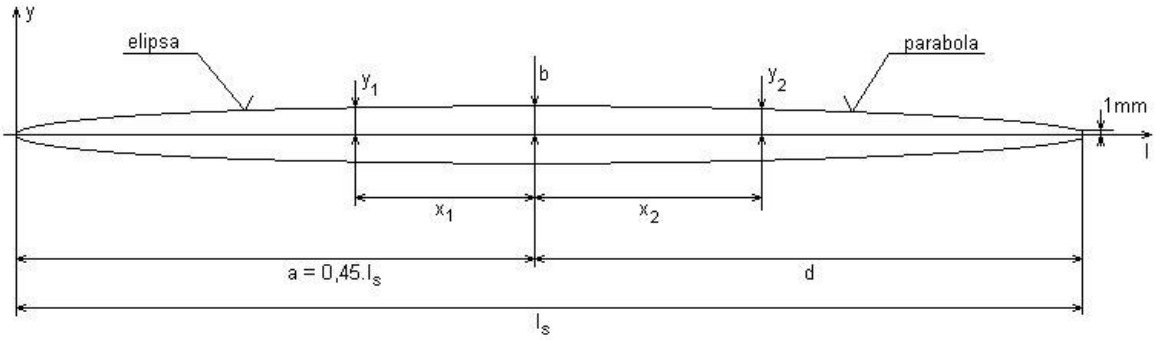
Poloha čepu lopatky je taková, že při pohledu ve směru osy z osa čepu protíná řez R250 uprostřed. Ve směru osy z je poloha čepu vzhledem ke koncovým bodům střednic přibližně stejná jako u původní lopatky. Malý rozdíl je způsoben tím, že původní lopatka měla mírně prohnutou odtokovou hranu.




*Obr. 19 Vzájemná poloha válcových řezů*

## 4.3 Profil válcových řezů

Nyní máme zkonstruovánu střednicovou plochu oběžné lopatky. Dále musíme střednicovou plochu obalit vhodnými profily. Profily byly vytvořeny následovně (obr. 20): první část profilu (od náběžné hrany do 0,45-násobku délky střednice) je polovinou elipsy, druhá část (od 0,45-násobku délky střednice po odtokovou hranu) je tvořena parabolou. Profil tedy dosahuje největší tloušťky v místě $0{,}45.l_s$. Maximální tloušťka 2b byla stanovena takto: na poloměru 250 mm 2b = 9 mm, na poloměru 500 mm 2b = 5 mm a na poloměru 350 mm potom vychází lineární interpolací 2b = 7,4 mm. Tyto tloušťky jsou podobné jako maximální tloušťky původní oběžné lopatky. Tloušťka odtokové hrany nové lopatky je 2 mm na všech poloměrech.




*Obr. 20 Tloušťka profilu oběžné lopatky*

Pro elipsu platí rovnice:

$$\frac{x_1^{\ 2}}{a^2} + \frac{y_1^{\ 2}}{b^2} = 1 \tag{37}$$

Můžeme vyjádřit tloušťku $y_1$:

$$y_1 = b \cdot \sqrt{1 - \frac{x_1^{\ 2}}{a^2}} = b \cdot \sqrt{1 - \frac{(a-l)^2}{a^2}} \tag{38}$$

Parabola má vrchol v místě $l = 0{,}45.l_s$, je tedy možno pro ni psát:

$$y_2 = b - c \cdot x_2^{\ 2} \tag{39}$$

Koeficient c určíme z rovnice pro koncový bod paraboly (na odtokové hraně lopatky):

$$1 = b - c \cdot d^2 \tag{40}$$

Úpravou:

$$c = \frac{b-1}{d^2} \tag{41}$$

Dosazením do rovnice (39) získáme:

$$y_2 = b - \frac{b-1}{d^2} \cdot x_2^{\ 2} = b - \frac{b-1}{d^2} \cdot (l-a)^2 \tag{42}$$

Tloušťka oběžné lopatky je nyní dána vztahy (38) a (42). Rovnice (38) platí od $l = 0$ do $l = 0{,}45.l_s$, rovnice (42) od $l = 0{,}45.l_s$ do $l = l_s$. Teď je nutno tuto tloušťku připočítat k střednici profilu. To provedeme podle obr. 21. V příslušném bodě střednice vztyčíme kolmici a tloušťku naneseme na tuto kolmici na obě strany od střednice. Tím dostaneme souřadnice s a z dvou bodů profilu.

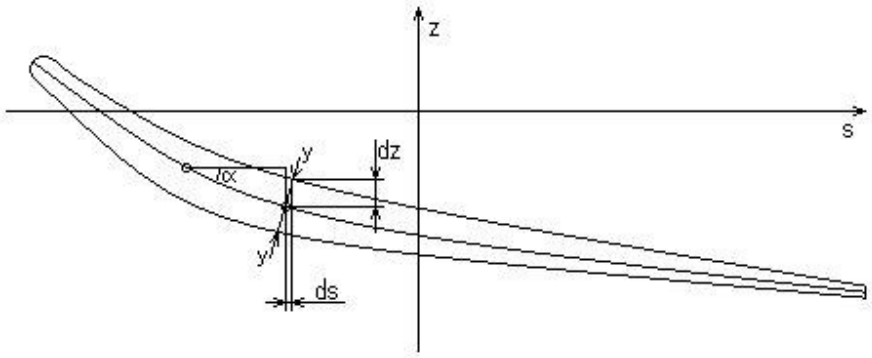
Platí:

$$ds = y \cdot \sin\alpha \tag{43}$$

$$dz = y \cdot \cos\alpha \tag{44}$$

Úhel α určíme pomocí souřadnic dvou bodů střednice:

$$\alpha = \arctan\frac{(z_n - z_{n+1})}{(s_{n+1} - s_n)} \tag{45}$$




*Obr. 21 Profil oběžné lopatky*

Tímto máme hotovy tři rozvinuté válcové řezy (R250, R350 a R500) nové oběžné lopatky. Povrch lopatky můžeme získat proložením těchto profilů plochou pomocí některého z 3D modelovacích programů. Před tím je ještě třeba udělat opět transformaci z válcových souřadnic (R, φ, z) do souřadnic kartézských (x, y, z), což je možno provést způsobem uvedeným výše. V tab. 3 jsou uvedeny vypočtené souřadnice s = R.φ, z, x a y bodů, které určují tvary profilů. Každý ze tří profilů (R250, R350 a R500) je dán křivkou, která začíná na odtokové hraně profilu, jde přes náběžnou hranu a končí opět na odtokové hraně. Pro lepší popis okolí náběžné hrany je hustota bodů v její blízkosti vyšší.

| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
|---|---|---|---|
| s | z | x | y |
| 102,2869 | -85,5935 | 99,45683 | 229,3651 |
| 79,25902 | -71,4575 | 77,93793 | 237,5409 |
| 56,20405 | -57,4187 | 55,73179 | 243,7088 |
| 33,21055 | -43,3491 | 33,11295 | 247,7974 |
| 10,38606 | -29,0952 | 10,38307 | 249,7843 |
| -12,1233 | -14,4603 | -12,1186 | 249,7061 |
| -34,1051 | 0,826962 | -33,9994 | 247,6773 |
| -55,1436 | 17,17049 | -54,6975 | 243,943 |
| -74,5781 | 35,18754 | -73,4769 | 238,9585 |
| -90,6069 | 55,74953 | -88,6363 | 233,7597 |
| -93,1353 | 60,29224 | -90,9959 | 232,8514 |
| -95,4158 | 65,01733 | -93,1161 | 232,0116 |
| -97,488 | 69,94424 | -95,036 | 231,2318 |
| -100 | 75,03246 | -97,3546 | 230,2652 |
| -100,133 | 69,3595 | -97,4775 | 230,2133 |
| -99,0219 | 63,91081 | -96,4529 | 230,6444 |
| -97,372 | 58,6283 | -94,9287 | 231,2759 |
| -95,2815 | 53,51377 | -92,9915 | 232,0616 |
| -80,0565 | 30,42436 | -78,6953 | 237,2911 |
| -60,6822 | 10,87641 | -60,088 | 242,6714 |
| -39,4397 | -6,3169 | -39,2763 | 246,8955 |
| -17,1093 | -21,9067 | -17,096 | 249,4148 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 5,885533 | -36,3407 | 5,88499 | 249,9307 |
| 29,34135 | -49,9106 | 29,27404 | 248,2801 |
| 53,12247 | -62,8274 | 52,72361 | 244,3772 |
| 77,13694 | -75,2577 | 75,91882 | 238,1939 |
| 101,3171 | -87,3426 | 98,56635 | 229,7492 |

*Tab. 3 a) profil R250*

| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
|---|---|---|---|
| s | z | x | y |
| 116,4 | -82,6131 | 114,2661 | 330,8221 |
| 88,92952 | -70,91 | 87,97574 | 338,7629 |
| 61,44184 | -59,2903 | 61,12675 | 344,6208 |
| 33,98288 | -47,6369 | 33,92951 | 348,3515 |
| 6,607075 | -35,8948 | 6,606683 | 349,9376 |
| -20,5191 | -23,6251 | -20,5074 | 349,3987 |
| -47,893 | -11,5616 | -47,7436 | 346,7283 |
| -74,3135 | 1,207126 | -73,7564 | 342,1403 |
| -99,3849 | 17,04689 | -98,0546 | 335,9841 |
| -123,208 | 34,27002 | -120,679 | 328,5369 |
| -127,529 | 38,1806 | -124,726 | 327,022 |
| -131,674 | 42,31754 | -128,59 | 325,522 |
| -135,674 | 46,68388 | -132,302 | 324,0311 |
| -140 | 51,04425 | -136,296 | 322,3713 |
| -137,506 | 45,43162 | -133,996 | 323,3345 |
| -134,104 | 40,40344 | -130,847 | 324,6216 |
| -130,311 | 35,68662 | -127,321 | 326,0204 |
| -126,204 | 31,2465 | -123,487 | 327,492 |
| -102,791 | 12,14435 | -101,32 | 335,0139 |
| -77,8762 | -4,69458 | -77,2352 | 341,3718 |
| -50,8527 | -18,2682 | -50,674 | 346,3122 |
| -23,5637 | -30,3372 | -23,5459 | 349,2071 |
| 3,820314 | -42,3566 | 3,820238 | 349,9792 |
| 31,58686 | -53,4996 | 31,544 | 348,5756 |
| 59,4914 | -64,1746 | 59,20535 | 344,9561 |
| 87,53688 | -74,4616 | 86,62712 | 339,1102 |
| 115,6733 | -84,4763 | 113,579 | 331,0586 |

*Tab. 3 b) profil R350*

| [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
|---|---|---|---|
| s | z | x | y |
| 137,6621 | -74,5074 | 135,9295 | 481,1686 |
| 107,7556 | -66,0162 | 106,9234 | 488,4336 |
| 77,84624 | -57,558 | 77,53212 | 493,9522 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 47,95686 | -49,059 | 47,88336 | 497,7019 |
| 18,11424 | -40,4332 | 18,11028 | 499,6719 |
| -11,6441 | -31,5684 | -11,643 | 499,8644 |
| -41,2685 | -22,3173 | -41,2217 | 498,2979 |
| -70,6653 | -12,4611 | -70,4303 | 495,0147 |
| -99,688 | -1,62107 | -99,0289 | 490,0952 |
| -127,876 | 10,97586 | -126,486 | 483,7368 |
| -133,304 | 13,88871 | -131,73 | 482,3351 |
| -138,651 | 16,96607 | -136,881 | 480,8988 |
| -143,933 | 20,19964 | -141,954 | 479,4259 |
| -149,385 | 23,32517 | -147,173 | 477,8495 |
| -144,824 | 19,00176 | -142,808 | 479,1721 |
| -139,823 | 15,24207 | -138,008 | 480,5765 |
| -134,638 | 11,74941 | -133,017 | 481,9818 |
| -129,307 | 8,482979 | -127,871 | 483,3726 |
| -101,255 | -5,33806 | -100,564 | 489,7825 |
| -72,2596 | -16,8374 | -72,0083 | 494,7876 |
| -42,8088 | -27,025 | -42,7565 | 498,1685 |
| -13,0956 | -36,3359 | -13,0941 | 499,8285 |
| 16,78242 | -45,043 | 16,77927 | 499,7184 |
| 46,77486 | -53,3049 | 46,70667 | 497,8137 |
| 76,84772 | -61,2356 | 76,54552 | 494,106 |
| 106,9782 | -68,9222 | 106,1639 | 488,5993 |
| 137,1477 | -76,4401 | 135,4344 | 481,3082 |

*Tab.3 c) profil R500*

Po vykreslení těchto profilů bylo zjištěno, že náběžná hrana vytvořená eliptickým obloukem má dosti malý poloměr zakřivení. Toto je nevýhodné při takových provozních režimech, kdy nátok není přesně bezrázový – u příliš ostré náběžné hrany dochází potom k odtržení proudění. Proto byla provedena úprava náběžné hrany lopatky (obr. 22). Blízké okolí náběžné hrany bylo nahrazeno obloukem kruhovým (s poloměrem 1 mm na řezu R250, 0,8 mm na řezu R350 a 0,4 mm na řezu R500). Tento oblouk byl pomocí dalších dvou oblouků tečně napojen na vypočtený profil.

*Obr. 22 Úprava náběžné hrany*

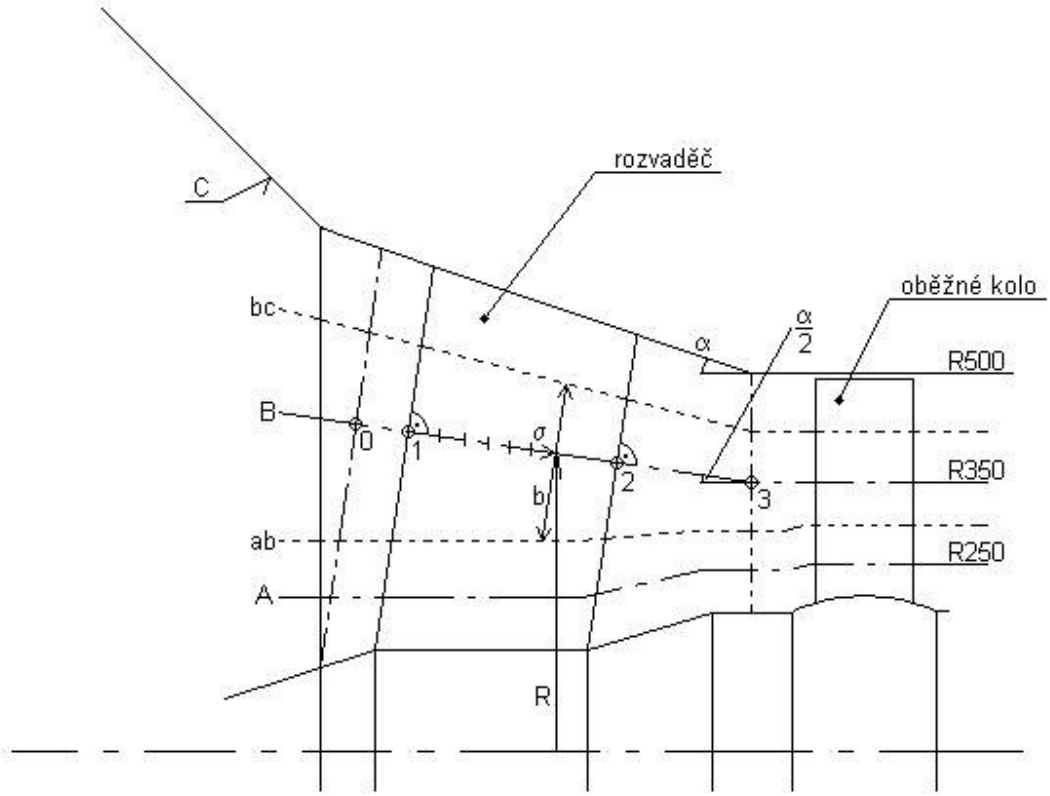
Rozvinuté válcové řezy jsou nakresleny na výkrese v příloze. Řezy jsou okótovány souřadnicovým způsobem pomocí přímek vzdálených o délku oblouku příslušného poloměru se středovým úhlem 5°.

# 5 Rozvaděč

Při prvním zkoumání problematiky MVE Beneš se zdálo, že nízká účinnost elektrárny je způsobena hlavně nevhodnou konstrukcí rozvaděče. Pro zvýšení účinnosti by potom stačilo navrhnout nový rozvaděč, který by byl sladěn se současným oběžným kolem. Předpokládalo se, že konstrukce tohoto nového rozvaděče bude jedním z hlavních úkolů této diplomové práce. Kontrolní výpočet však ukázal, že tvarování lopatek současného oběžného kola není vhodné pro dané provozní podmínky elektrárny a situace by se tudíž pouhou výměnou současného rozvaděče za rozvaděč lépe tvarovaný výrazně nezlepšila. Bylo tedy potřeba navrhnout nové oběžné lopatky. Tento návrh zabral poměrně dost času a kompletní konstrukci rozvaděče se proto dokončit nepodařilo. Další text tedy obsahuje pouze návrh možného postupu konstrukce s uvedením hlavních rysů, které by nový rozvaděč měl mít, aby pracoval v souladu s výše navrženými lopatkami oběžného kola.

## 5.1 Meridiální řez

Návrh meridiálního řezu rozvaděče je znázorněn na obr. 23.




*Obr. 23 Meridiální řez rozvaděče*

Tvar meridiálního řezu byl navržen tak, že náběžná a odtoková hrana jsou kolmé k ose úhlu mezi osou otáčení oběžného kola a šikmou hranicí kanálu. Délka rozváděcí lopatky ve směru proudění je dána délkou válcové části náboje stroje. Rozvaděč můžeme řešit opět na třech proudnicích:

Tvar proudnice A je odhadnut, tato proudnice navazuje na řez oběžného kola R250.

Proudnice B je rovnoběžná s osou úhlu mezi osou stroje a šikmou hranicí kanálu, navazuje na řez oběžného kola R350.

Proudnice C je tvořena hranicí kanálu a navazuje tedy na řez oběžného kola R500.

Proudnice A, B a C jsou referenčními proudnicemi tří prvkových kol, na která je rozvaděč rozdělen. Toto rozdělení je provedeno pomocí proudnic ab a bc tak, aby průtok každým příčným průřezem prvkového kola byl stejný a byl roven určité části celkového průtoku. Předpokládáme, že meridiální složka rychlosti se po příčném průřezu nemění, tzn. že rychlostní profil je pístový a meridiální rychlost se mění pouze po proudnici vlivem změny příčného průřezu. Rozdělení pomocí proudnic ab a bc určuje šířku prvkového kola b.

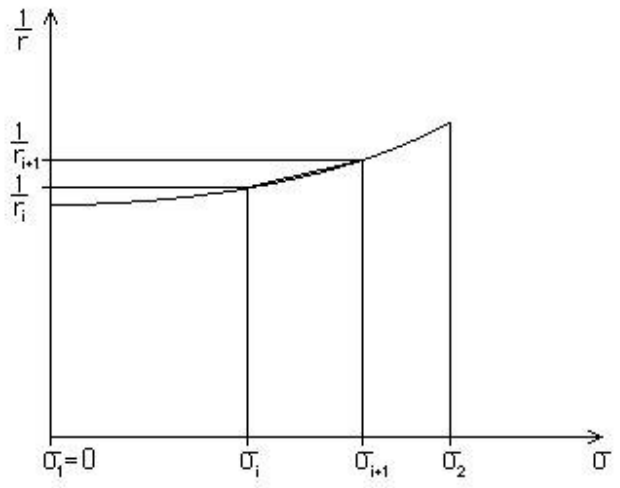
## 5.2 Konformní transformace

Výpočet tvaru střednice rozváděcí lopatky probíhá opět v souřadnicích ξ, η. Je tedy nutné provést konformní transformaci. Tato bude poněkud složitější než v případě oběžného kola, neboť zde se poloměr po proudnici mění. Pro transformaci tedy musíme použít obecných vztahů (16), (17) a (18).

Na každé proudnici mezi náběžnou a odtokovou hranou rozváděcí lopatky zvolíme několik bodů (např. 10), tak aby vzdálenost mezi nimi byla stejná.

Pro tyto body vypočteme souřadnici ξ. Integrály ve vztazích (16) a (18) můžeme určit pomocí lichoběžníkového pravidla (obr. 24):

$$\int_{\sigma_1}^{\sigma_{n+1}} \frac{d\sigma}{r} = \sum_{1}^{n} \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_{i+1}} \right) \cdot \left( \sigma_{i+1} - \sigma_i \right) \tag{46}$$




*Obr. 24 K výpočtu souřadnic ξ a konstanty mříže a*

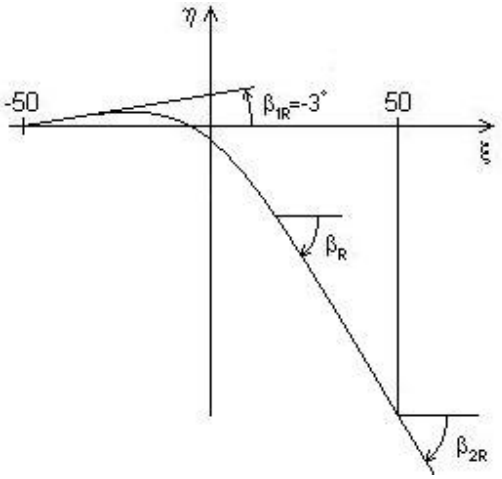
## 5.3 Tvar střednice

Od rozvaděče požadujeme, aby zajistil vhodný úhel vstupní rychlosti pro oběžnou lopatku. Tento úhel ($\beta_1$) jsme vypočítali z Eulerovy turbínové rovnice – vztah (36). Výstupní úhel rozváděcí lopatky by tedy teoreticky měl být roven tomuto úhlu. Na rozvaděč kapalina natéká v axiálním směru – teoretická hodnota vstupního úhlu rozváděcí lopatky je tedy 0°. Doporučené hodnoty těchto úhlů se mírně liší od těchto teoretických hodnot – pro vstupní úhel rozvaděče se doporučuje hodnota kolem -3°, výstupní úhel rozváděcí lopatky by měl být o 3 až 4° větší než hodnota teoretická. Doporučené hodnoty vstupního ($\beta_{1R}$) a výstupního ($\beta_{2R}$) úhlu rozváděcí lopatky jsou uvedeny v tab. 4.

| R [mm] | $\beta_{1R}$ [°] | $\beta_{2R}$ [°] |
|---|---|---|
| 250 | -3 | 33 |
| 350 | -3 | 26 |
| 500 | -3 | 19 |

*Tab. 4 Doporučené úhly rozváděcí lopatky*

Tvar střednice rozváděcí lopatky je možno opět určit pomocí lineární závislosti úhlu $\beta_R$ na souřadnici ξ (obr. 25). Výsledkem zde budou hodnoty souřadnice η pro body se souřadnicí ξ vypočtenou výše. Dalším krokem je zpětná transformace podle rovnice (17), čímž získáme úhel φ. Jelikož poloměr R a souřadnice z bodů proudnice je známa, je tímto tvar střednice určen ve válcových souřadnicích R, φ, z a je tedy možno zkonstruovat rozvinuté válcové řezy. Podle potřeby pak můžeme provést transformaci do souřadnic x, y, z.




*Obr. 25 Tvar střednice rozváděcí lopatky v souřadnicích ξ, η*

## 5.4 Další poznámky ke konstrukci rozvaděče

Pro lepší vedení kapaliny bude třeba, aby nový rozvaděč měl více lopatek než rozvaděč současný. Navržený počet lopatek nového rozvaděče je N = 13. Lopatky je možné vyrobit z plechu, pro dosažení potřebných úhlů však bude nutno lopatku svařit z více segmentů. Náběžnou hranu rozváděcí lopatky bude vhodné pro snížení ztrát opatřit zaoblením.

# 6 Závěr

Hlavní částí analýzy nesrovnalostí malé vodní elektrárny Beneš byl kontrolní výpočet oběžné lopatky. Tento výpočet prokázal, že současný tvar oběžných lopatek není vhodný pro návrhový bod MVE Beneš.

Důvodem nízké účinnosti elektrárny je vznik vstupního rázu a následného odtržení proudění při použití současného rozvaděče, dále vysoká a nerovnoměrná rotace proudění na výstupu z oběžného kola a také velké rozdíly ve zpracovávaných spádech na různých poloměrech vyvolávající proudění napříč lopatkou. Tyto spády se též dosti liší od spádu, který by měla elektrárna zpracovávat. Byl proveden také výpočet proudění oběžným kolem při použití rozvaděče, který by zajistil bezrázový nátok na oběžné kolo. Výpočet však ukázal, že z výše uvedených negativních jevů by se touto úpravou odstranil pouze vstupní ráz.

Pro zvýšení účinnosti elektrárny bylo nutno navrhnout nové oběžné lopatky. Výsledkem tohoto návrhu je oběžná lopatka znázorněná na výkrese v příloze této práce. Z důvodu nedostatku času se bohužel nepodařilo dokončit návrh rozváděcích lopatek, v práci je tedy uveden pouze stručný postup konstrukce a hlavní parametry rozvaděče.

Dále také záleží na provozovateli elektrárny, kolik prostředků může do úprav elektrárny investovat, zda pokračovat v konstrukci tímto směrem, nebo zda dále provozovat elektrárnu se sníženou účinností.

## Seznam použité literatury

[1] Fleischner, P., Nechleba, M.: Hydromechanika lopatkových strojů. Skripta VUT v Brně, 1976.

[2] Nechleba, M.: Vodní turbiny, jejich konstrukce a příslušenství. SNTL Praha, 1962.

[3] Nechleba, M., Druckmuller, M.:Vodní turbiny I. Skripta VUT v Brně, 1990.

[4] Holata, M.: Malé vodní elektrárny. Academia Praha, 2002.

## Seznam nejdůležitějších veličin

| | | |
|---|---|---|
| $c$ | [m/s] | absolutní rychlost |
| $c_m$ | [m/s] | meridiální složka absolutní rychlosti |
| $c_u$ | [m/s] | obvodová složka absolutní rychlosti |
| $D$ | [mm] | průměr |
| $H$ | [m] | spád |
| $n$ | [$s^{-1}$, $min^{-1}$] | otáčky |
| $N$ | [1] | počet lopatek |
| $Q$ | [$m^3/s$] | průtok |
| $r$, $R$ | [mm] | poloměr |
| $S$ | [$m^2$] | plocha |
| $u$ | [m/s] | obvodová rychlost |
| $w$ | [m/s] | relativní rychlost |
| $\beta$ | [°] | úhel absolutní rychlosti |
| $\beta_L$ | [°] | úhel oběžné lopatky |
| $\beta_R$ | [°] | úhel rozváděcí lopatky |
| $\eta$ | [1, %] | účinnost |
| $\eta_h$ | [1, %] | účinnost hydraulická |

## Seznam příloh

Příloha 1 – výkres: Návrh tvaru oběžné lopatky MVE Beneš