

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270013 – Stavba energetických strojů a zařízení

**Studijní specializace:** Stavba energetických strojů a zařízení

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Dvoutělesová parní turbína malého výkonu**

**Autor:** Bc. Jiří HLAVÁČ

**Vedoucí práce:** Ing. Pavel ŽITEK

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří HLAVÁČ**  
Osobní číslo: **S20N0042P**  
Studijní program: **N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení**  
Specializace: **Stavba energetických strojů a zařízení**  
Téma práce: **Dvoutělesová parní turbína malého výkonu**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

## Zásady pro vypracování

Navrhnete vysokootáčkovou parní turbínu s tříhřídelovou převodovkou do rafinérie. Turbína včetně převodovky a generátoru bude umístěna na společném rámu a bude mít následující parametry:

Teplota admisní páry: 397 °C

Tlak admisní páry: 60 bar

Množství admisní páry: 44,8 t/h

Protitlak v kondenzačním provozu: 0,1 bar

Protitlak v odběrovém provozu: 0,076 bar

Parametry procesního odběru

Tlak: 30 bar

Teplený výkon: 25 MWt

Ostatní parametry vhodně zvolte

Provedte:

1. Spočtete bilanční schéma pro zadané parametry v odběrovém i kondenzačním provozu, procesní odběr bude v kondenzačním provozu vypnutý. Uvažujte ztráty v ucpávkách.
2. Vhodně zvolte typ regulace turbíny.
3. Navrhnete průtočnou část obou dílů turbíny s ohledem na co nejvyšší účinnost. Provedte základní pevnostní výpočty včetně kontroly kritických otáček a pevnostní kontroly lopatek. Navrhnete uložení obou dílů turbíny s ohledem na spojení s převodovkou.
4. Nakreslete podélný řez strojem. Uvažujte turbínu s radiálním výstupem uloženou na rámu s převodovkou a generátorem.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Tepelné turbíny; J. Bečvář a kol.
- Parní turbíny – návrh a výpočet; Doc. Ing. Jan Fiedler, Dr., CERM – Brno 2004
- Parní turbína – tepelný a pevnostní výpočet; prof. Ing. Jan Škopek, CSc., ZČU Plzeň 2007
- Tepelné turbíny a turbokompresory, Kadrožka J., CERM – Brno 2007
- Doporučená znalost grafických programů (Catia, Autodesk Inventor, Autocad, SolidWorks, atd.)

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Žitek**  
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant diplomové práce: **Ing. Martin Zygmunt**  
Doosan Škoda Power s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Václav Dostál, Sc.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Žitkovi a konzultantovi Martinu Zygmontovi za ochotu a cenné rady, bez kterých by tato práce nevznikla. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkému okolí za podporu v rámci celého studia.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Hlaváč	<b>Jméno</b> Jiří	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 / Stavba energetických strojů a zařízení		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Žitek	<b>Jméno</b> Pavel	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Dvoutělesová parní turbína malého výkonu		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	140	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	80	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	44
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Cílem této diplomové práce je navrhnout vysokootáčkovou parní turbínu s tříhřídelovou převodovkou do rafinérie pro zadané parametry. Byly uvažovány dva provozy: kondenzační a odběrový. Práce se zaměřuje na dosažení co nejvyšší účinnosti turbíny.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Parní turbína, bilanční schéma, regulace turbíny, návrh lopatek, pevnostní výpočet

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Hlaváč	Name Jiří	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 / Stavba energetických strojů a zařízení		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Žitek	Name Pavel	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Low power double casing steam turbine		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Design of Power Machines and Equipment	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	--	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	140	<b>TEXT PART</b>	80	<b>GRAPHICAL PART</b>	44
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	Goal of this diploma thesis is to design high speed steam turbine with three-axis gear box for refinery to match desired parameters. There are two modes in scope: condensate and extraction. Main focus of this thesis is reaching maximal thermal efficiency.
<b>KEY WORDS</b>	Steam turbine, heat balance diagram, turbine regulation, blade design, design strenght

## Seznam použitých veličin a symbolů

Veličina	Jednotka	Název
$\lambda$	[-]	součinitel přebytku vzduchu
L	[m]	délka
D	[m]	průměr
$\rho$	[ $kg \cdot m^{-3}$ ]	hustota
p	[Pa]	tlak
$\Delta p$	[Pa]	tlaková ztráta
$\dot{m}$	[ $kg \cdot s^{-1}$ ]	hmotnostní tok
T	[K]	teplota
n	[1/min]	otáčky
i	[kJ/kg]	entalpie
v	[ $m^{-3}/kg$ ]	měrný objem
s	[kJ/kg · K]	entropie
$\eta$	[-]	účinnost
h	[kJ/kg]	entalpický spád
X	[-]	suchost
$\rho$	[-]	reakce stupně
c	[m/s]	absolutní rychlost
w	[m/s]	relativní rychlost
u	[m/s]	obvodová rychlost
$\omega$	[m/s]	úhlová rychlost
$\varepsilon$	[-]	parciálnost ostříku
$\phi$	[-]	rychlostní součinitel RL
$\psi$	[-]	rychlostní součinitel OL
b	[mm]	délka tětiny
c	[mm]	délka tětiny
B	[mm]	šířka
S, A	[ $mm^2$ ]	plocha
$W_o$	[ $mm^3$ ]	průřezový modul v ohybu
$t_{OL,RL}$	[mm]	rozteč
z	[-]	počet lopatek
z	[-]	počet břitů ucpávek
$Mo$	[Nm]	ohybový moment



$\sigma$	[MPa]	normálové napětí
$\tau$	[MPa]	smykové napětí
$m, G$	[kg]	hmotnost
$L$	[mm]	ložisková vzdálenost
$F$	[N]	síla
$\alpha$	[°]	vstupní úhel
$\beta$	[°]	výstupní úhel
$\gamma$	[°]	úhel nastavení profilu

### **Další označení a zkratky**

VT	vysokotlaký
NT	nízkotlaký
G	generátor

## Obsah

Úvod.....	12
Zadané parametry .....	12
Volené parametry .....	12
Použité programy a prostředí.....	12
1 Bilanční schéma .....	13
1.1 Popis a výpočet bilančního schématu .....	13
1.1.1 Primární tok páry.....	13
1.1.2 Okruh ucpávkové páry .....	17
1.2 Výpočet ucpávek .....	18
2 Regulace turbíny .....	23
3 Návrh průtočné části .....	25
3.1 Vysokotlaký díl.....	25
3.1.1 Jednostupňový díl v provedení A-kolo .....	26
3.1.2 Přetlakové lopatkování .....	36
3.1.3 Zvolené řešení vysokotlakého dílu.....	47
3.2 Nízkotlaký díl .....	51
3.2.1 Návrh průtočné části.....	52
4 Pevnostní výpočty.....	61
4.1 Volené profily a materiály lopatek .....	61
4.2 Kontrola oběžných lopatek.....	61
4.2.1 Namáhání ohybem.....	61
4.2.2 Namáhání tahem.....	62
4.2.3 Celkové namáhání oběžných lopatek .....	63
4.3 Volba a kontrola závěsů oběžných lopatek .....	71
4.3.1 Výpočet závěsu typu „T“ .....	71
4.3.2 Výpočet vidličkového závěsu.....	76
4.4 Kontrola rozváděcích lopatek .....	79
4.5 Kontrola hřídele na krut.....	85
4.6 Kontrola kritických otáček .....	86
5 Výkony jednotlivých dílů .....	88
6 Uložení dílů turbíny, spojení s převodovkou.....	90

Závěr.....	91
Seznam použitých zdrojů .....	92
Seznam obrázků .....	93
Seznam tabulek .....	94
Seznam příloh.....	96
Seznam externích příloh.....	96

## Úvod

Dvoutělesová turbína, která je předmětem této diplomové práce, je navrhována pro její použití v rafinérii. Předpokládají se dva provozy: odběrový, při kterém se uvažuje procesní odběr páry pro pokrytí předepsaného tepelného výkonu, a kondenzační plně využívající admisní páru k výrobě elektrické energie. Cílem práce je dosažení co nejvyšší termodynamické účinnosti turbíny. Návrh tepelného cyklu rafinérie není předmětem této práce, jelikož se jedná o již zavedený provoz.

Základní parametry navrhovaných tepelných schémat jsou uvedeny v zadání. Je zapotřebí vypočítat potřebné parametry hlavního toku páry i jednotlivé body ucpávkového okruhu a zavést systém regulace turbíny.

Pro známé stavy páry před a za oběma díly turbíny budou navrženy průtočné části obou dílů. Výsledné rozměry lopatek a jejich závěsy budou zkontrolovány na splnění pevnostních podmínek. Bude provedena kontrola kritických otáček obou rotorů. Dále bude vypracován návrh spojení obou dílů s tříhřídelovou převodovkou na společném rámu. Výsledný stroj pak bude vyobrazen na příčných řezech oběma díly. Nejedná se o retrofit a tudíž není návrh turbíny kromě zadanými parametry ničím omezen.

## Zadané parametry

Teplota admisní páry	$t_a = 397 \text{ °C}$
Tlak admisní páry	$p_a = 60 \text{ bar(a)}$
Množství admisní páry	$\dot{m}_a = 44,8 \text{ t/h}$
Protitlak v kondenzačním provozu	$p_{STk} = 0,1 \text{ bar(a)}$
Protitlak v odběrovém provozu	$p_{STo} = 0,076 \text{ bar(a)}$
Tlak procesního odběru	$p_{po} = 30 \text{ bar(a)}$
Tepelný výkon pracovního odběru	$P_t = 25 \text{ MW}$

## Volené parametry

Veškeré volené parametry jsou popsány níže v příslušných kapitolách předběžných a detailních výpočtů.

## Použité programy a prostředí

Tato diplomová práce byla převážně tvořena v programu MS Excel s velkým důrazem na využití prostředí X-Steam tables a Visual Basic. Pro tvorbu 2D výkresů a 3D modelů byly použity programy Autodesk AutoCAD a Inventor Professional 2024.

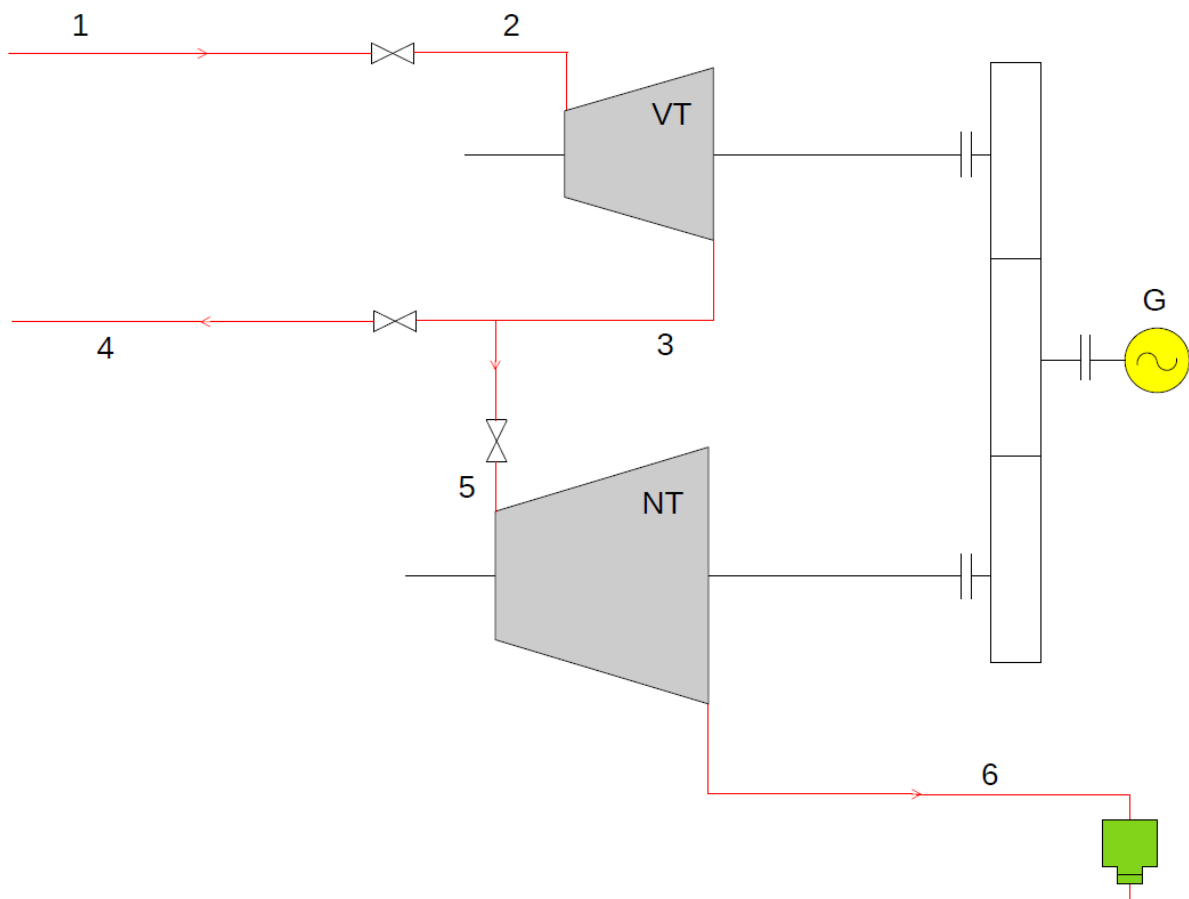
# 1 Bilanční schéma

Na základě konzultace se zástupcem společnosti Doosan Škoda Power se tato práce nezaměřuje na výpočet celého parního cyklu, ale na oblast obsahující průtočnou část oběma díly turbíny. Rozsah byl odsouhlasen s počátkem v místě přívodu admisní páry (před regulačním ventilem – viz. kapitola 1.1.1) a koncem definováním stavu páry po expanzi v nízkotlakém dílu.

## 1.1 Popis a výpočet bilančního schématu

Procesní odběr byl po domluvě se zástupcem společnosti Doosan Škoda Power umístěn mezi oba díly (nebude řešen odběrem z vysokotlakého nebo nízkotlakého dílu). Návrh vysokotlakého dílu je tudíž neovlivněn typem provozu a bude vždy plně zatížen. Nízkotlaký díl je zatížen na stoprocentní výkon pouze v kondenzačním provozu, na který je navrhovaný. Při zavedení provozního odběru je uvažována snížená účinnost nízkotlakého dílu. Pro přehlednost je nejprve naznačen primární tok páry, který je následovně podpořen návrhem okruhu ucpávkové páry.

### 1.1.1 Primární tok páry



Obrázek 1: Tepelné schéma – primární tok

Primární tok páry je znázorněn v Obrázek 1. Admisní pára z rafinerie o zadaných parametrech (bod 1) je regulována regulačním ventilem. Tento i následné průtoky ventily jsou provázeny škrcením páry. Je tedy zachován hmotnostní průtok s entalpií, je ovšem připuštěna tlaková ztráta o dohodou schválené hodnotě 3 %.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_a = 44,8 \left[ \frac{t}{h} \right] = 12,44 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1.1)$$

$$p_1 = p_a = 60 [bar] \quad (1.2)$$

$$i_1 = f(p_1, t_1) = 3170,48 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (1.3)$$

$$t_1 = t_a = 397 [^\circ C] \quad (1.4)$$

$$\Delta p_2 = 0,03 [-] \quad (1.5)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = 12,44 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1.6)$$

$$p_2 = p_1 * \left( \frac{1}{1 - \Delta p_2} \right) = 58,2 [bar] \quad (1.7)$$

$$i_2 = i_1 = 3170,48 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (1.8)$$

$$t_2 = f(p_2; i_2) = 395,67 [^\circ C] \quad (1.9)$$

S touto novou hodnotou je pomocí X-Steam tables vypočtena teplota po škrcení (bod 2). Pára dále pokračuje do vysokotlakého dílu, kde pára expanduje za generování mechanické práce (bod 3). Dochází ke změně hmotnostního toku na základě ztrát ucpávkami naznačených v kapitole 1.1.2. Tlak  $p_3$  za vysokotlakým dílem turbíny je daný tlakem provozního oděru  $p_4$  a smluvní tlakovou ztrátou regulačního ventilu  $\Delta p_4$ . Účinnost a tudíž hodnota entalpie páry za turbínovým dílem je závislá na kvalitě návrhu průtočné části tohoto dílu. Níže uvedená hodnota entalpie vychází z účinnosti vypočtené v kapitole 3.1.

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 - \dot{m}_{2_{1a}} - \dot{m}_{2_{2a}} - \dot{m}_{2_{3a}} - \dot{m}_{2_{2b}} - \dot{m}_{2_{3b}} = 11,52 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1.10)$$

$$p_3 = p_{po} * \left( \frac{1}{1 - \Delta p_4} \right) = 30,93 [bar] \quad (1.11)$$

$$i_3 = 3032,63 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (z \text{ detailního výpočtu průtočné části}) \quad (1.12)$$

$$t_3 = f(p_3; i_3) = 316,33 [^\circ C] \quad (1.13)$$

Tato pára se nadále v odběrovém provozu dělí na dvě větve. První představuje procesní odběr (bod 4) a druhá větev přívod páry do nízkotlakého dílu (bod 5). Obě větve obsahují regulační ventil s předepsanou tlakovou ztrátou 3 %. V kondenzačním provozu je regulační ventil procesního odběru plně uzavřen.

Zregulovaná pára vstupuje do nízkotlakého dílu a expanduje za generování mechanické energie (bod 6) na tlak předepsaný v zadání diplomové práce. Dále následuje kondenzátor, jehož dimenzování není předmětem této práce. Konkrétní hodnoty bodů 4, 5 a 6 jsou obsaženy v přílohách č. 1 a 2.

$$\Delta p_4 = 0,03 [-] \quad (1.14)$$

$$\Delta p_5 = 0,03 [-] \quad (1.15)$$

$$m_4 = \frac{P_t [kW]}{i_4 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1.16)$$

(pro odběrový provoz)

$$p_4 = 30 [bar] \quad (1.17)$$

(zadáno)

$$i_4 = i_3 \quad (1.18)$$

(pro odběrový provoz)

$$t_4 = f(p_4; i_4) \quad (1.19)$$

(pro odběrový provoz)

$$m_5 = m_3 - m_4 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1.20)$$

(odběrový provoz)

$$m_5 = m_3 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1.21)$$

(kondenzační provoz)

$$p_5 = p_3 * \left( \frac{1}{1 - \Delta p_5} \right) [bar] \quad (1.22)$$

$$i_5 = i_3 \quad (1.23)$$

$$t_5 = f(p_5; i_5) \quad (1.24)$$

$$m_6 = \dot{m}_5 + \dot{m}_{2_{1b}} - \dot{m}_{5_{2a}} - \dot{m}_{3_{3a}} + \dot{m}_{UNT22} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1.25)$$

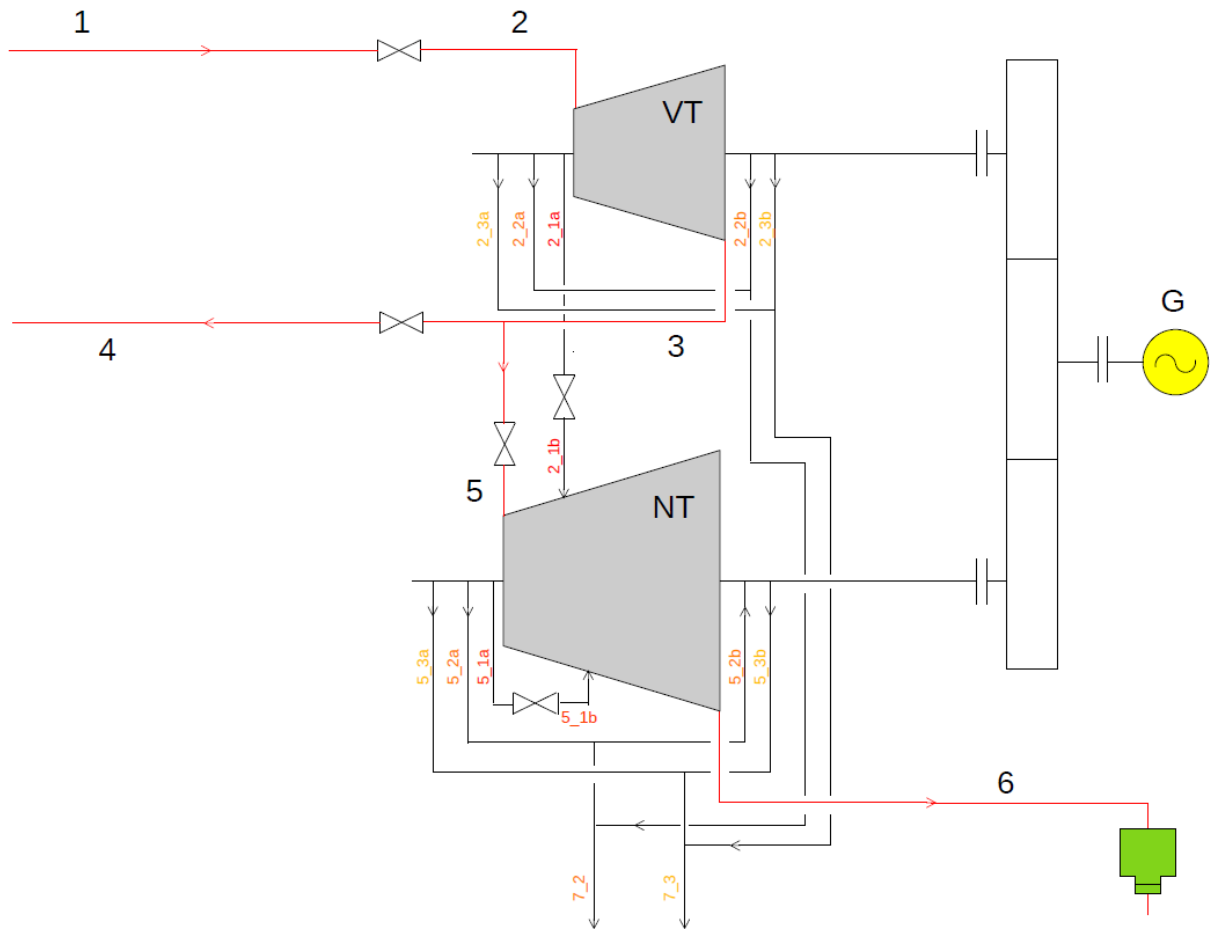
$$p_6 [bar] \\ \text{(dané zadáním)} \quad (1.26)$$

$$i_6 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \\ \text{(dané zadáním a detailním výpočtem průtočné části)} \quad (1.27)$$

$$t_6 = f(p_6; i_6) \quad (1.28)$$



### 1.1.2 Okruh ucpávkové páry



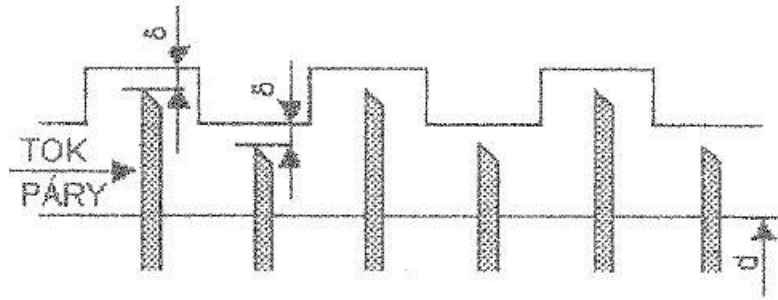
Obrázek 2: Tepelné schéma – primární tok a ucpávkový okruh

Okruh ucpávkové páry je patrný z Obrázek 2. Toky ucpávkových par před prvními stupni obou dílů nebyly zanedbatelné. Z důvodu navýšení výkonu tepelného cyklu byly tyto toky po zregulování ventily zavedeny do primárního toku páry v rámci nízkotlakého dílu do míst shodných tlaků v průběhu expanze. Odvod komínkové a ucpávkové páry z obou dílů je proveden dvěma okruhy o rozdílných tlacích. K zahlcení ucpávky na konci nízkotlakého dílu (UNT22 - Obrázek 6) byla využita pára z větve ucpávkové páry o tlaku 1,02 bar (pára proudí z okruhu ucpávkové páry do průtočné části nízkotlakého dílu).

Jednotlivé ztráty hmotnostních toků byly odvozeny v kapitole 1.2 na základě tlaků popsaných výše a geometrických rozměrů vycházející z výpočtů průtočných částí turbíny. Konkrétní hodnoty parametrů páry ucpávkového okruhu jsou obsaženy v přílohách č. 1 a 2.

## 1.2 Výpočet ucpávek

Schéma labyrintové ucpávky je znázorněno na Obrázek 3. Postup výpočtu využitý v této kapitole je převzán z [1]. Volba průměrů hřídelí  $d$  vychází z patních průměrů lopatek (viz. kapitola 3). Šířka bříty byla volena přibližně stejná napříč všemi ucpávkami. Počty břitů jednotlivých ucpávek byly odvozeny od tlakových spádů zpracovaných ucpávkami (dle konzultace cca 1 břit na 1 bar rozdílu tlaku). Počty břitů a jejich šířky byly lehce upraveny v rámci zajištění hmotnostních toků definovaných v pokročilých fázích výpočtů diplomové práce.



Obrázek 3: Schéma labyrintové ucpávky [1]

Jelikož pára v této oblasti nevykonává práci, uvažujeme průtok páry kaskádou ucpávek za izoentálpický děj. Stav páry před ucpávkou je označen indexem A a stav za ucpávkou indexem B. Za materiál byla zvolena austenitická ocel. Materiálová konstanta je tedy  $B = 1,35$  (při volbě feritické oceli s koeficientem  $B = 0,85$  vychází příliš malá hodnota radiální vůle).

Měrný objem:

$$v = f(p, i) [-] \quad (1.29)$$

Průtočný řez ucpávky:

$$S = \pi * d * \delta [m] \quad (1.30)$$

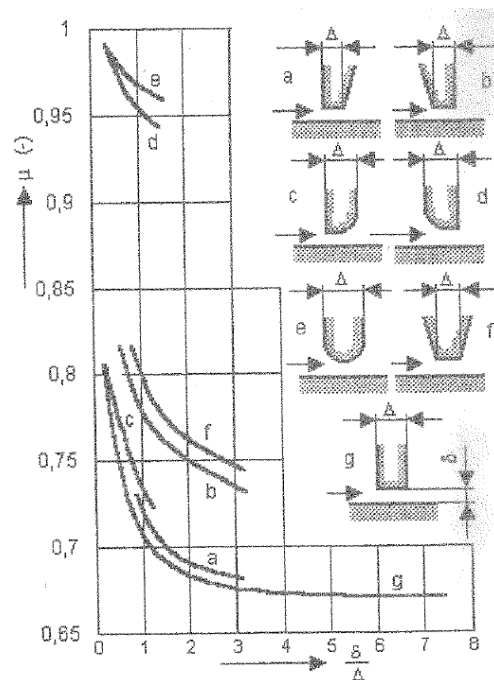
Radiální vůle v těsnění rozváděcích kol:

$$\delta = B * \frac{d}{1000} + 0,25 [mm] \quad (1.31)$$

Tlakový poměr:

$$\pi = \frac{p_B}{p_A} [-] \quad (1.32)$$

Průtokový součinitel  $\mu$  byl určen podle charakteristiky znázorněné na Obrázek 4. Pro nízkou hodnotu průtokového součinitele a nízkou technologickou náročnost při výrobě byl zvolen profil g.



Obrázek 4: Průtokový součinitel ucpávek [1]

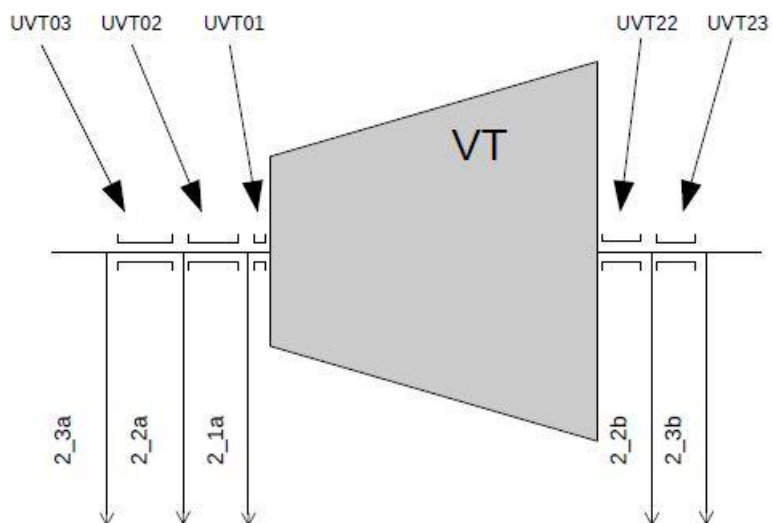
V případě že platí nerovnost  $\pi \leq \frac{0,82}{\sqrt{z+1,25}}$ , je tok ucpávkou kritický ( $\dot{m} = \dot{m}_{\text{krit}}$ ).

$$\dot{m}_{\text{krit}} = \mu * S * \sqrt{\frac{1}{z + 1,25} + \frac{p_A}{v_A}} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1.33)$$

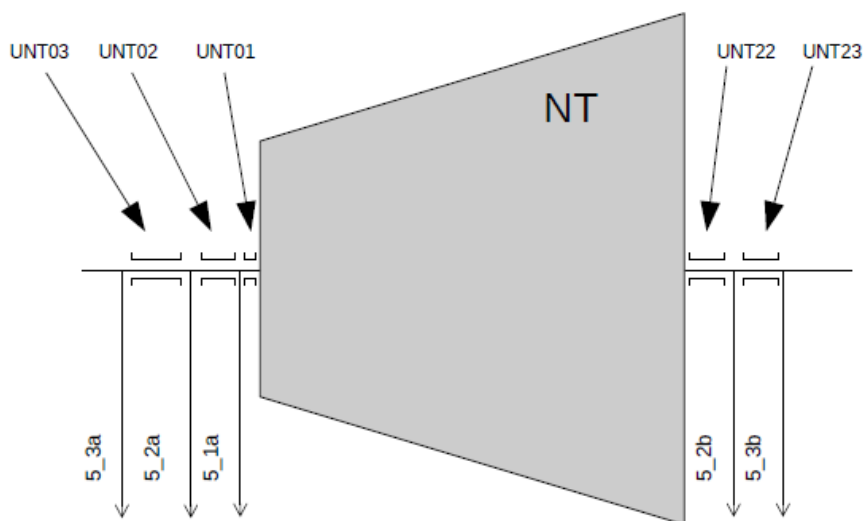
Pokud ke kritickému proudění nedochází ( $\pi > \frac{0,82}{\sqrt{z+1,25}}$ ,  $\dot{m} = \dot{m}_{\text{podkrit}}$ ), použije se pro výpočet ztráty páry ucpávkou následující vztah

$$\dot{m}_{\text{podkrit}} = \mu * S * \sqrt{\frac{p_A^2 - p_B^2}{p_A * v_A * z}} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (1.34)$$

Výsledné úniky páry skrze ucpávky naznačené na obrázcích Obrázek 5 a Obrázek 6 jsou uvedeny v Tabulka 7. Označení ucpávek bylo zvoleno autorem práce (nesplňuje žádnou známou konvenci).



Obrázek 5: Označení ucpávek – VT



Obrázek 6: Označení ucpávek – NT

Tabulka 1: Únik páry jednotlivými ucpávkami – VT – kondenzační provoz

Tok ucpávkami	UVT01	UVT02	UVT03	UVT22	UVT23
d [mm]	260	240	230	220	200
$\Delta$ [mm]	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8
z [-]	44	11	1	20	1
B [-]	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
$v_A$ [m <sup>3</sup> /kg]	0,049	0,190	2,803	0,082	2,492
$p_A$ [Pa]	5820000	1500000	102000	3092784	102000
$p_B$ [Pa]	1500000	102000	96000	102000	96000
S [m <sup>2</sup> ]	0,00049	0,00043	0,00040	0,00038	0,00033
$\delta$ [mm]	0,601	0,574	0,561	0,547	0,520
$\delta/\Delta$ [-]	1,202	1,148	0,701	0,684	0,650
$\mu$ [-]	0,700	0,700	0,750	0,750	0,750
$\pi$ [-]	0,258	0,068	0,941	0,033	0,941
typ proudění	podkritické	kritické	podkritické	kritické	podkritické
<b>M [kg/s]</b>	<b>0,548</b>	<b>0,243</b>	<b>0,020</b>	<b>0,379</b>	<b>0,017</b>

Tabulka 2: Únik páry jednotlivými ucpávkami – NT – kondenzační provoz

Tok ucpávkami	UNT01	UNT02	UNT03	UNT22	UNT23
d [mm]	260	250	240	260	240
$\Delta$ [mm]	0,5	0,8	0,5	0,5	0,5
z [-]	25	6	1	1	1
B [-]	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
$v_A$ [m <sup>3</sup> /kg]	0,08412744	0,507778	2,491902	1,305104	1,305104
$p_A$ [Pa]	3000000	500000	102000	102000	102000
$p_B$ [Pa]	500000	102000	96000	10000	96000
S [m <sup>2</sup> ]	0,00049091	0,000461	0,000433	0,000491	0,000433
$\delta$ [mm]	0,601	0,5875	0,574	0,601	0,574
$\delta/\Delta$ [-]	1,202	0,734375	1,148	1,202	1,148
$\mu$ [-]	0,7	0,75	0,7	0,7	0,7
$\pi$ [-]	0,16666667	0,204	0,941176	0,098039	0,941176
typ proudění	podkritické	kritické	podkritické	kritické	podkritické
<b>M [kg/s]</b>	<b>0,405</b>	<b>0,128</b>	<b>0,021</b>	<b>0,064</b>	<b>0,029</b>

Tabulka 3: Únik páry jednotlivými ucpávkami – NT – odběrový provoz

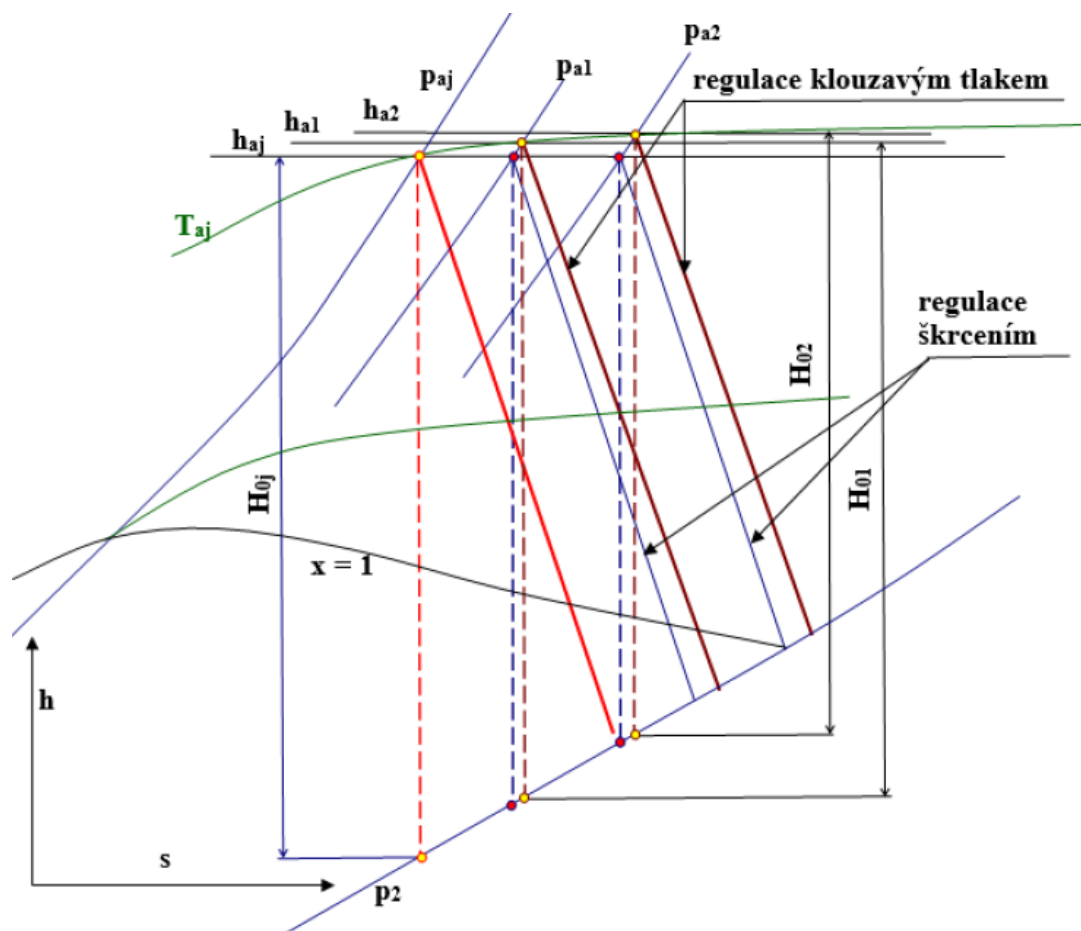
Tok ucpávkami	UNT01	UNT02	UNT03	UNT22	UNT23
d [mm]	260	250	240	260	240
$\Delta$ [mm]	0,5	0,8	0,5	0,5	0,5
z [-]	25	6	1	1	1
B [-]	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
$v_A$ [m <sup>3</sup> /kg]	0,328	0,508	2,492	1,590	1,590
$p_A$ [Pa]	773195,876	500000	102000	102000	102000
$p_B$ [Pa]	500000	102000	96000	7600	96000
S [m <sup>2</sup> ]	0,00049	0,00046	0,00043	0,00049	0,00043
$\delta$ [mm]	0,601	0,588	0,574	0,601	0,574
$\delta/\Delta$ [-]	1,202	0,734	1,148	1,202	1,148
$\mu$ [-]	0,700	0,750	0,700	0,700	0,700
$\pi$ [-]	0,647	0,204	0,941	0,075	0,941
typ proudění	podkritické	kritické	podkritické	kritické	podkritické
<b>M [kg/s]</b>	<b>0,080</b>	<b>0,128</b>	<b>0,021</b>	<b>0,058</b>	<b>0,026</b>

## 2 Regulace turbíny

Volba typu regulace turbíny se odvíjela od použitého provedení lopatkování. Jelikož pro tuto diplomovou práci bylo zvoleno bubnové uspořádání bez regulačního stupně, je uvažována regulace klouzavým tlakem. Velké změny výkonu s pomalejší odezvou lze regulovat tepelným výkonem samotného zdroje páry. Ve srovnání se škrtící regulací je regulace klouzavým tlakem méně ztrátová (energie páry se při škrcení maří – viz. Obrázek 7).

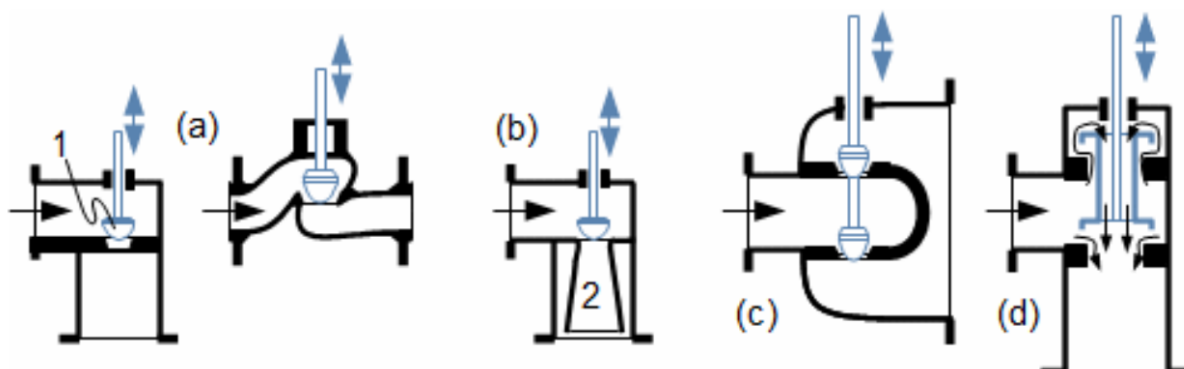
Pro možnost rychlé úpravy výkonu je použit systém regulačních ventilů před každou komponentou tepelného cyklu vyžadující regulaci. Tyto ventily jsou ovšem za standardního provozu plně otevřeny. Ventily byly umístěny před vysokotlaký a nízkotlaký díl, na větve potrubí provozního odběru a větve potrubí zavádějící ucpávkovou páru do nízkotlakého dílu (viz. Obrázek 2). Každému z těchto ventilů byla pro účely diplomové práce přiřazena poměrná tlaková ztráta o hodnotě **3 %**.

Pro nezatížený stav NT dílu při odběrovém provozu bylo nutné navýšit tlakovou ztrátu na některých ventilech, aby tlaky páry zaváděné do dílu odpovídaly tlakům přepočítaným podle parního kuželu. Ventil na vstupu do NT dílu (Obrázek 2: mezi body 3 a 5) má pro odběrový provoz tlakovou ztrátu **75 %**, ventil regulující páru z první ucpávky VT dílu do průtočné části NT dílu (Obrázek 2: mezi body 2<sub>1a</sub> a 2<sub>1b</sub>) také **75 %**. Ventil regulující páru z první ucpávky NT dílu pro její využití v jeho průtočné části (Obrázek 2: mezi body 5<sub>1a</sub> a 5<sub>1b</sub>) je plně uzavřen. Důvodem je zpětné proudění v případě jeho otevření. Tlakový spád na druhé ucpávce je větší než u první z důvodu velkého snížení tlaku na vstupu do NT dílu. Změna stavů při průtoku páry skrze jednotlivé ventily pro kondenzační i odběrový provoz jsou naznačeny v příslušných bilančních schématech (viz. přílohy č. 1 a 2). [4]



Obrázek 7: Porovnání diagramů expanze v turbíně při regulaci klouzavým tlakem a regulaci škrcením [2]

Existuje více typů regulačních ventilů (Obrázek 8) přičemž každý má své typické využití. Pro cyklus navrhovaný v této diplomové práci byl zvolen jednosedlový ventil pro jeho jednoduchost a časté využití pro malé parní turbíny. Ventily s difuzorem nejsou příliš vhodné pro nenávrhové stavy. Dvousedlové jsou pro navrhovaný provoz ekonomicky nevyplátí. [3]



Obrázek 8: Základní typy regulačních ventilů [3]

(a) jednosedlové ventily; (b) ventil s difuzorem; (c), (d) dvousedlové ventily



### 3 Návrh průtočné části

Návrhy průtočné části obou dílů se zakládají na stavech definovaných bilančním schématem v kapitole 1. Vstupní a výstupní parametry rovněž ovlivňují zahrnuté tlakové ztráty na vstupu a výstupu z turbínového dílu. Tyto tlakové ztráty byly spolu s dalšími parametry v souladu s [1].

Poměrná tlaková ztráta na vstupu do dílu:

$$\frac{p_0}{p_A} = 0,97 [-] \quad (3.1)$$

Poměrná tlaková ztráta na výstupu z díla:

$$\frac{p_k}{p_2} = 0,97 [-] \quad (3.2)$$

Rychlostní součinitel  $\phi$ :

$$\phi = 0,95 \quad (3.3)$$

Rychlostní součinitel  $\psi$ :

$$\psi = 0,88 \quad (3.4)$$

Geometrie průtočných částí obou dílů turbíny jsou řešeny v následujících podkapitolách.

#### 3.1 Vysokotlaký díl

Tento díl byl řešen v následujících dvou provedeních:

- jednostupňový díl v provedení A-kolo
- přetlakové lopatkování – metoda  $\left(\frac{c_a}{u}\right)$

Rovnice (1.11) určuje tlak páry za vysokotlakým dílem vyvozeného z předepsaného tlaku procesního odběru. Počáteční a koncový tlak stupňové části definuje 3% vstupní a výstupní tlakovou ztrátu. Souhrn stavů páry na začátku a konci celého vysokotlakého dílu a jeho průtočné části je uveden v Tabulka 4.

Tabulka 4: VT díl - stavy páry - definice stupňové části

Admisní pára					
	m [kg/s]	p [bar]	i [kJ/kg]	t [°C]	stav
	12,44444	58,2	3170,477	395,6675	přehřátá
Stupňová část					
Pára	m [kg/s]	p [bar]	i [kJ/kg]	t [°C]	stav
Před (0)	11,89668	56,36635	3170,976	394,4908	přehřátá
Po (2)	11,89668	31,88437	3032,626	317,4036	přehřátá
Výstupní pára					
	m [kg/s]	p [bar]	i [kJ/kg]	t [°C]	stav
	11,51821	30,92784	3032,626	316,3342	přehřátá

### 3.1.1 Jednostupňový díl v provedení A-kolo

Vzhledem k relativně malému navrhovanému entalpickému spádu přiřazenému vysokotlakému dílu turbíny je zvažována možnost jeho degradace na jediný stupeň v podobě A- kola. Jeho proveditelnost je zhodnocena v kapitole 3.1.3.

#### 3.1.1.1 Předběžný výpočet

Základní výpočty pro známý tlakový spád v dílu turbíny:

$$h_{iz} = i_0 - i_{2iz} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (3.5)$$

$$c_{1iz} = \sqrt{2 * h_{iz} + c_0^2} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.6)$$

$$d = \left( \frac{u}{c_{iz}} \right) \frac{c_{1iz}}{\pi * n} [m] \quad (3.7)$$

$$u = \pi * d * n \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.8)$$

Všeobecné požadavky pro návrh A-kola:

- minimální délka rozváděcí lopatky:

$$l_0 \geq 12 [mm] \quad (3.9)$$

- minimální hodnota parciálního ostříku: 0,2

$$\varepsilon \geq 0,2 [-] \quad (3.10)$$

- měrný objem páry za regulačním stupněm u přetlakového lopatkování umožňující dostatečnou délku lopatky prvního stupně
  - nerelevantní (zde je vysokotlaký díl koncipován jako samotné A-kolo bez následného lopatkování)
- volba rychlostního poměru  $\left(\frac{u}{c_{iz}}\right)$  ve snaze dosažení maximální termodynamické účinnosti
  - obvykle v rozmezí 0,4 až 0,5
  - hledán iteračním výpočtem

Stanovení kritického tlaku závisí na stavu páry:

- pro přehřátou vodní páru:

$$p_{krit,přehřátá} = 0,546 * p_0 [MPa] \quad (3.11)$$

- pro mokrou vodní páru:

$$p_{krit,mokrá} = 0,577 * p_0 [MPa] \quad (3.12)$$

Pokud platí nerovnost  $p_2 \geq p_{krit}$ , nedochází ke kritickému proudění a je volena dýza nerozšířená. Pro poměr tlaků ovšem musí platit:

$$\frac{p_2}{p_0} \leq 0,8 \quad (3.13)$$

Pro případ  $p_2 < p_{krit}$ , kdy dochází ke kritickému proudění, je vhodné použít rozšířenou dýzu, aby nedocházelo k odklonu proudu páry.

Pro stanovení měrného objemu páry je zapotřebí znát velikost ztráty ve statoru  $z_0$ .

$$z_0 = (1 - \phi^2) * h_{iz} \quad (3.14)$$

Rychlostní součinitel pro dýzu byl stanoven na  $\phi = 0,95$ .

Délka výstupní hrany rozváděcí lopatky při uvažování totálního ostříku:

$$l_{ot} = \frac{\dot{m} * v_1}{\pi * D * c_{1iz} * \phi * \sin \alpha_1} [m] \quad (3.15)$$

Optimální délka rozváděcí lopatky ( $l_{ot}$  je nutno dosadit v cm):

$$l_{opt} = \alpha * \sqrt{l_{ot}} [cm] \quad (3.16)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{D}{\frac{b}{a} * s_1 + \delta * D}} \quad [-] \quad (3.17)$$

$$\frac{b}{a} = 0,0398 \quad [-] \quad \dots \text{empirická konstanta}$$

$$s_1 = 1 \quad \dots \text{parciální ostřík vcelku}$$

$$s_1 = 2 \quad \dots \text{dělený parciální ostřík}$$

$$\delta = \frac{c}{a} * \frac{\left(\frac{u}{c_{iz}}\right)}{\left(\frac{n}{1000}\right)^{0,2} * D^{0,5}} \quad [-] \quad (3.18)$$

$$\frac{c}{a} = 0,1467 \quad \dots \text{experimentální konstanta, hodnota pro A-kolo}$$

Redukovaná délka lopatky:

$$L_{red} = \frac{l_0}{1 + \left(\frac{l_0}{l_{opt}}\right)^2 - \delta * l_0} \quad [cm] \quad (3.19)$$

Parciální ostřík:

$$\varepsilon = \left(\frac{l_{ot}}{l_0}\right) \quad [-] \quad (3.20)$$

Absolutní hodnota ztráty třením a ventilací:

$$Z_5 = \frac{k}{\dot{m} * v_1} \left[\frac{kJ}{kg}\right] \quad (3.21)$$

Hodnota  $k$  byla vyčtena z grafu v příloze č. 3.

Poměrná ztráta  $\xi_5$ :

$$\xi_5 = \frac{Z_5}{h_{iz}} \quad [-] \quad (3.22)$$

Vnitřní účinnost regulačního stupně:

$$\eta_{tdi} = \eta_u - \xi_5 [-] \quad (3.23)$$

Hodnota  $\eta_u$  byla vyčtena z diagramu v příloze č. 4.

Vnitřní výkon stupně:

$$P_i = \dot{m} * h_{iz} * \eta_{tdi} [kW] \quad (3.24)$$

Koncový bod expanze ve stupni:

$$i_2 = i_0 + \frac{C_0^2}{2} - \eta_{tdi} * h_{iz} \quad (3.25)$$

### 3.1.1.2 Detailní výpočet

Z předběžného výpočtu je známo:

- střední průměr lopatkování D
- optimální poměr  $\left(\frac{u}{C_{iz}}\right)$
- celkový izoentalpický spád  $h_{iz}$  na regulační stupeň
- tvar dýzy vzhledem ke kritickému proudění
- kritický tlak  $p_{kr}$
- hmotnostní průtok páry  $\dot{m}$

Reakce stupně byla zvolena dle doporučení literatury [1]:

$$\rho = \frac{h_{iz}^R}{h_{iz}} = 0,05 [-]$$

Rozdělení tepelných spádů na stator a rotor:

$$h_{iz}^S = (1 - \rho) * h_{iz} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (3.26)$$

$$h_{iz}^R = \rho * h_{iz} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (3.27)$$

Pokud  $p_1 > p_{krit}$ , nedochází ke kritickému proudění ve výstupním průřezu dýzy a platí:

$$\alpha_1 = \alpha_{1p} [^\circ] \quad (3.28)$$

Pokud  $p_1 < p_{krit}$ , dochází ke kritickému proudění ve výstupním průřezu dýzy a platí:

$$\alpha_1 = \alpha_{1p} + \delta = \arcsin \left[ \frac{v_1}{v_{KR}} * \frac{c_{KR}}{c_1} * \sin \alpha_{1p} \right] [^\circ] \quad (3.29)$$

$c_1$  ... rychlost na výstupu z dýzy

$c_{KR}$  ... kritická rychlost na výstupu z dýzy

$$c_1 = \phi * \sqrt{2 * h_{iz}^S} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.30)$$

$$c_{KR} = \phi * \sqrt{2 * h_{iz}^{KR}} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.31)$$

Teoretická rychlost na výstupu z dýzy:

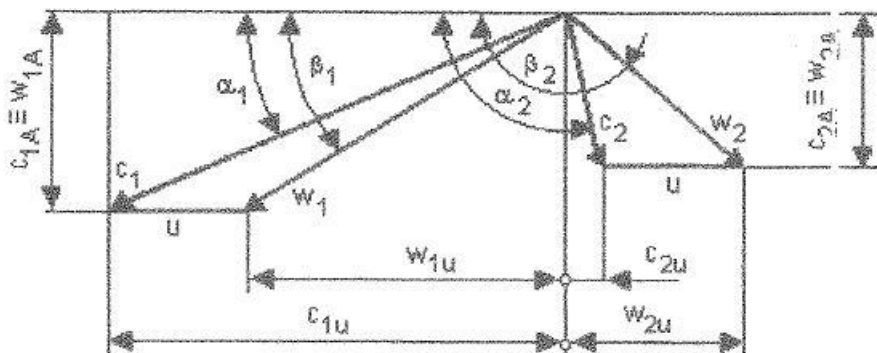
$$c_{1iz} = \sqrt{2 * (1 - \rho) * h_{iz} + c_0^2} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.32)$$

$c_0$  ... vstupní rychlost na stupeň

Rychlostní součinitele byly zvoleny následovně (viz. úvod do kapitoly 3):

$$\phi = 0,95 [-]$$

$$\psi = 0,88 [-]$$



Obrázek 9: Rychlostní trojúhelníky s označením rychlostí a úhlů [1]

Obvodová rychlost:

$$u = \pi * D * n \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.33)$$

Skutečná absolutní rychlost páry na výstupu z dýzy:

$$c_1 = \phi * c_{1iz} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.34)$$

Relativní rychlost páry na výstupu z dýzy:

$$w_1 = \sqrt{c_1^2 + u^2 - 2 * c_1 * u * \cos \alpha_1} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.35)$$

Složky rychlostí do obvodového směru:

$$c_{1u} = c_1 * \cos \alpha_1 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.36)$$

$$w_{1u} = c_{1u} - u \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.37)$$

Složky rychlostí do axiálního směru:

$$c_{1a} = w_{1a} = c_1 * \sin \alpha_1 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.38)$$

$$\beta_1 = \arccos \frac{w_{1u}}{w_1} [^\circ] \quad (3.39)$$

Rychlosti páry ve výstupním trojúhelníku:

$$w_{2,iz} = \sqrt{\rho * h_{iz} + w_1^2} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.40)$$

$h_{iz}$  dosazeno v [J/kg]

Skutečná relativní rychlost páry:

$$w_2 = \psi * w_{2iz} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.41)$$

Absolutní rychlost páry na výstupu z oběžných lopatek:

$$c_2 = \sqrt{w_2^2 + u^2 - 2 * w_2 * u * \cos(180 - \beta_2)} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.42)$$

Složky rychlostí do obvodového směru:

$$w_{2u} = w_2 * \cos \beta_2 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.43)$$

$$c_{2u} = w_{2u} + u \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.44)$$

Složky rychlostí do axiálního směru:

$$c_{2a} = w_{2a} = w_2 * \sin \beta_2 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.45)$$

$$\alpha_2 = \arctg \frac{c_{2a}}{c_{2u}} [^\circ] \quad (3.46)$$

Rozváděcí lopatka:

$$l_0 = \frac{\dot{m} * v_1}{\pi * D * \varepsilon * c_1 * \sin \alpha_1} [m] \quad (3.47)$$

Oběžná lopatka:

$$l_2 = \frac{\dot{m} * v_2}{\pi * D * \varepsilon * w_2 * \sin \beta_2} [m] \quad (3.48)$$

Vstupní délka oběžné lopatky:

- Pro válcovou lopatku:

$$l_1 = l_2 = l_0 + \Delta l [m] \quad (3.49)$$

$$\beta_2 = 180 - \arcsin \frac{\dot{m} * v_2}{\pi * D * \varepsilon * w_2 * l_2} [^\circ] \quad (3.50)$$

Přesah  $\Delta l$  je volen v rozmezí 1 až 3 mm

- Pro kuželovou lopatku:

$$l_1 = l_0 + \Delta l [m] \quad (3.51)$$

$l_2$  vypočteno z (3.48)

Zavedeno maximální rozšíření dýzy  $\frac{l_2}{l_0} \leq 1,2$

Zaveden maximální úhel rozšíření  $30^\circ$

Šířka lopatky:

$$B = c * \cos \gamma \quad (3.52)$$

Rozteč lopatek:

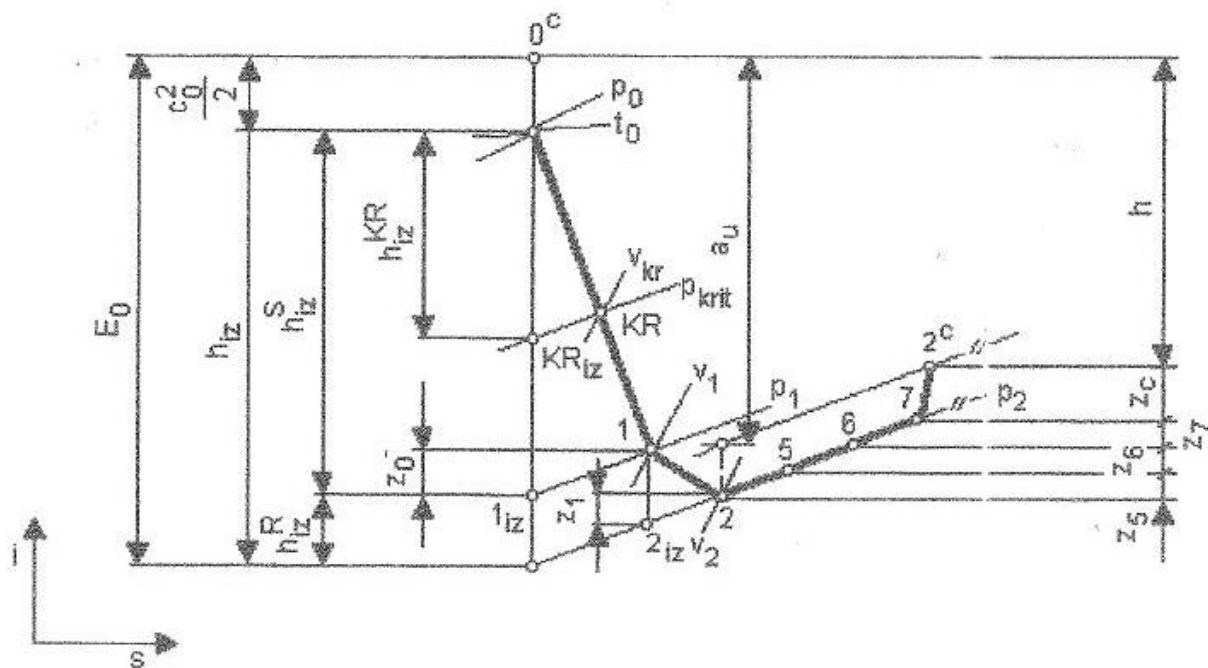
$$s = c * \left( \frac{s}{c} \right) \quad (3.53)$$



Počet lopatek:

$$z = \frac{\pi * D (* \varepsilon)}{s} [-] \quad (3.54)$$

Počet lopatek je zaokrouhlen na celé číslo.



Obrázek 10: Průběh expanze v A-kole [1]

Energetická ztráta v rozváděcí mříži:

$$z_0 = \frac{c_{1iz}^2}{2} * (1 - \phi^2) \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3.55)$$

Ztráta v oběžné lopatkové řadě:

$$z_1 = \frac{w_{2iz}^2}{2} * (1 - \psi^2) \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3.56)$$

Ztráta výstupní rychlostí:

$$z_c = \frac{c_2^2}{2} \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3.57)$$

Obvodová účinnost stupně (značení dle Obrázek 10):

$$\eta_u = \frac{a_u}{E_0} = \frac{a_u}{h_{iz} + \frac{c_0^2}{2}} = \frac{\left(h_{iz} + \frac{c_0^2}{2}\right) - z_0 - z_1 - z_c}{h_{iz} + \frac{c_0^2}{2}} [-] \quad (3.58)$$

$a_u$  [J/kg]... obvodová práce stupně

$E_0$  [J/kg]... celková využitelná energie na stupeň

Vnitřní termodynamická účinnost stupně:

$$\eta_{tdi} = \frac{h}{E_0} = \frac{a_u - z_5 - z_6 - z_7}{E_0} = \eta_u - \xi_5 - \xi_6 - \xi_7 [-] \quad (3.59)$$

$$\xi_i = \frac{Z_i}{E_0}$$

$Z_i$  ... absolutní hodnota i-té ztráty

Poměrná ztráta třením (ventilací) disku:

$$\xi_5 = k_{tř} * \frac{D^2}{S} * \left(\frac{u}{\sqrt{2} * h_{iz}}\right)^3 [-] \quad (3.60)$$

$$k_{tř} = (0,45 - 0,8) * 10^{-3} [-] \quad (3.61)$$

$$S = \pi * D * l_1 * \varepsilon * \sin \alpha_1 [m^2] \quad (3.62)$$

Poměrná ztráta parciálním ostřikem:

$$\xi_6 = \xi_{61} + \xi_{62} [-] \quad (3.63)$$

$\xi_{61}$ ...ztráta ventilací neostříkнутých lopatek

$\xi_{62}$ ...ztráta vznikající na okrajích pásma ostříku

$$\xi_{61} = \frac{0,065}{\sin \alpha_1} * \frac{1 - \varepsilon - 0,5 * \varepsilon_{kryt}}{\varepsilon} * \left(\frac{u}{\sqrt{2} * h_{iz}}\right)^3 [-] \quad (3.64)$$

$$\xi_{62} = 0,25 * \frac{c * l_2}{S} * \frac{u}{\sqrt{2} * h_{iz}} * \eta_u * z_{segm} [-] \quad (3.65)$$

$c$ ...délka tělivity oběžné lopatky

$z_{segm}$ ...počet segmentů po obvodu

Poměrná hodnota ztráty radiální mezerou:

$$\xi_7 = 1,5 * \frac{\mu_1 * S_{1R} * \eta_u}{S} * \sqrt{\frac{\rho_{\xi}}{1 - \rho}} \quad [-] \quad (3.66)$$

$S_{1R}$  ... průřez radiální mezery

$\mu_1 = 0,5$  [-] ... průtokový součinitel

$\rho_{\xi}$  ... reakce na špicí lopatky

$$S_{1R} = \pi * (D + l_1) \delta \quad [m^2] \quad (3.67)$$

$$\rho_{\xi} = 1 - (1 - \rho) \frac{\frac{D}{l_1}}{1 + \frac{D}{l_1}} \quad [-] \quad (3.68)$$

Vnitřní výkon akčního stupně v provedení A-kolo:

$$P_i = \dot{m} * h_{iz} * \eta_{tdi} \quad [kW] \quad (3.69)$$

Koncový bod expanze ve stupni:

$$i_{2c} = i_0 + \frac{c_0^2}{2} - h = i_0 + \frac{c_0^2}{2} - h_{iz} * \eta_{tdi} \quad \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3.70)$$

### 3.1.1.3 Optimalizace

V rámci snahy o dosažení maximální účinnosti vysokotlakého dílu v provedení jednostupňového dílu v provedení A-kolo bylo vytvořeno optimalizační makro (viz příloha č. 5) variující volitelné parametry v rámci výpočtu uvedeného v kapitolách 3.1.1.1 a 3.1.1.2. Byly vypočteny účinnosti pro **11664 kombinací** naznačených v Tabulka 5. Tímto přístupem bylo dosaženo maximální účinnosti **62 %**. Relativně nízká hodnota účinnosti je způsobena nízkou hodnotou redukované délky lopatky  $L_{RED} = 9,4$  mm. Podle grafu v příloze č. 4 se vypočtená účinnost blíží k teoretickému maximu pro poměr  $\left(\frac{u}{c_{iz}}\right)$  s rozdílem přibližně **3 %**.

Tabulka 5: Výsledky optimalizace A-kola

volitelné parametry	otáčky [1/min]	(u/c <sub>iz</sub> ) [-]	α1 [°]	s1 [-]	Δ β2 [°]	(s/c) <sub>s</sub> [-]	c <sub>s</sub> [mm]	(s / c) <sub>R</sub> [-]	c <sub>R</sub> [mm]
hodnoty pro návrh kombinací	8000	0,44	15	1	-1	0,65	25	0,5	25
	10000	0,47	16	2	1	0,8	47,5	0,625	47,5
	12000	0,5	17	-	-	0,95	70	0,75	70
	-	-	18	-	-	-	-	-	-
η <sub>max</sub> = 0,62 [-]	12000	0,44	16	2	-1	0,95	70	0,75	25

### 3.1.2 Přetlakové lopatkování

Druhý návrh provedení vysokotlakového dílu turbíny využívá přetlakového lopatkování vypočteného metodou  $\left(\frac{ca}{u}\right)$ . Rovněž bylo zvažováno rovnotlaké lopatkování pro případ neproveditelnosti bubnového uspořádání. Kolové uspořádání nebylo primárně voleno kvůli jeho nižší účinnosti, na kterou se tato diplomová práce zaměřuje.

#### 3.1.2.1 Mnohostupňová parní turbína

V této kapitole je popsán obecný postup návrhu mnohostupňové turbíny. V následujících kapitolách je naznačen postup pro specifický návrh přetlakové turbíny.

Nejprve je zapotřebí:

- odhadnout **termodynamickou účinnost průtočné části**
- učit **reheat faktor** (koeficient zpětného využití ztrát)

$$f = \frac{\sum_{j=1}^z h_{izj} - H_{iz}^{SČ}}{H_{iz}^{SČ}} = [-] \quad (3.71)$$

$$\sum h_{iz}^{SK} = (1 + f) * H_{iz}^{SK} \quad (3.72)$$

Při výpočtu mnohostupňové turbíny lze reheat faktor určit následujícími způsoby:

- dosazením odečtených hodnot ze známé expanzní části turbíny do vztahu (3.71)
  - obecně nedoporučované (pracné a nepřesné)

- využitím vztahu (3.73):
  - použít pro účely diplomové práce

$$f = k * (1 - \eta_{TDi}^{sč}) * \frac{H_{iz}^{sč}}{419} * \frac{z-1}{z} [-] \quad (3.73)$$

k...experimentální konstanta

0,2...expanze v přehřáté páře

0,12 pro expanzi v oblasti syté páry

0,14-0,18 pro expanzi z oblasti přehřáté do mokré páry

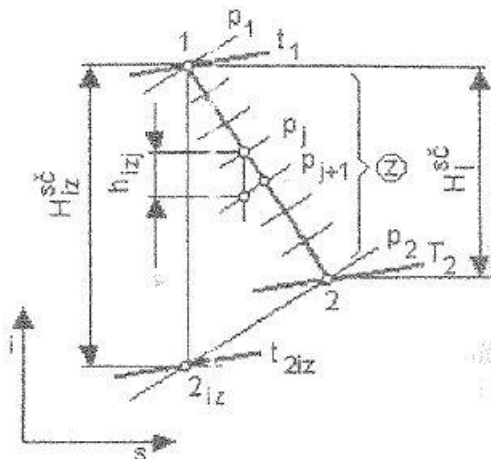
- využití vztahu (3.74):

$$f = \frac{z-1}{z} * (1 - \eta_i^{sč}) * \frac{t_1 - t_{2iz}}{T_1 + T_2} [-] \quad (3.74)$$

$\eta_i^{sč}$ ... termodynamická účinnost vnitřní stupňové části

$$\eta_i^{sč} = \frac{H_i^{sč}}{H_{iz}^{sč}} [-] \quad (3.75)$$

Pokud je zapotřebí díl turbíny rozdělit na více skupin s rozdílným hmotnostním průtokem (při zavedení odběru, nebo pro účely této diplomové práce v případě nízkotlakého dílu zavedení páry z ucpávek obou dílů) je nutno počítat tyto skupiny stupňů samostatně. Celkový součinitel zpětného využití ztrát a celková účinnost musí být dopočteny po optimalizaci návrhu jednotlivých skupin.



Obrázek 11: Součinitel zpětného využití ztrát [1]

### 3.1.2.1.1 Předběžný výpočet metody $\left(\frac{c_a}{u}\right)$

V rámci předběžného výpočtu metodou  $\left(\frac{c_a}{u}\right)$  je zapotřebí následující parametry:

- střední Parsonovo číslo ( $Pa_S$ )
  - 0,6 až 0,85
  - Očekává se pokles (5 ÷ 10 % mezi prvním a posledním stupněm)
- Parsonovo číslo prvního a posledního stupně  $Pa_1$  a  $Pa_n$ 
  - $Pa = (0,9 \div 0,95) * Pa_S$
- $\alpha_1$

Z diagramu v příloze č. 6 jsou odečteny poměry  $\left(\frac{c_a}{u}\right)_1$  a  $\left(\frac{c_a}{u}\right)_n$ . Délka první lopatky  $l_1$  je volena dle [1] na 30 mm. Hmotnostní tok, stav páry do lopatkové části a otáčky rotoru jsou známy.

Střední průměr lopatkování na vstupu:

$$D_1 = \frac{1}{\pi} * \sqrt{\frac{\dot{m} * v_1}{n * l_1 * \left(\frac{c_a}{u}\right)_1}} [m] \quad (3.76)$$

Střední průměr lopatkování na výstupu:

$$D_n = \sqrt[3]{\frac{\dot{m} * v_n}{\pi^2 * \left(\frac{c_a}{u}\right)_n * \left(\frac{l}{D}\right)_n * n}} [m] \quad (3.77)$$

Počet stupňů přetlakového lopatkování:

$$z = \frac{Pa_S * H_{iz}}{u_S^2} [-] \quad (3.78)$$

zaokrouhlo na celé číslo

$$u_S = \pi * \left(\frac{D_1 + D_2}{2}\right) * n \left[\frac{m}{s}\right] \quad (3.79)$$

Vnitřní účinnost přetlakového lopatkování bez ztráty výstupní rychlostí:

$$\eta_i = \eta_\infty * (1 + f)(1 - \xi_k - \xi_v - \xi_x) [-] \quad (3.80)$$

Ztráta radiální mezerou:

$$\xi_k = \frac{\xi_{k1} + \xi_{kn}}{2} [-] \quad (3.81)$$

$\xi_{k1}, \xi_{kn} \dots$  z detailního výpočtu

Ztráta rozvířením:

$$\xi_v = \frac{\xi_{v1} + \xi_{vn}}{2} [-] \quad (3.82)$$

$\xi_{v1}, \xi_{vn} \dots$  z detailního výpočtu

Ztráta vlhkostí páry:

$$\xi_x = \left(1 - \frac{1 + x_n}{2}\right) * \frac{H_x}{H_{iz}} [-] \quad (3.83)$$

$x_n \dots$  suchost páry na výstupu z lopatkování

$H_x \dots$  entalpický spád části expanze v mokré páře

**Ztráta výstupní rychlostí:**

Entapie páry na výstupu:

$$i_n = i_1 - H_{iz} * \eta_i \text{ [J/kg]} \quad (3.84)$$

Axiální výstupní rychlost páry z lopatkování:

$$c_{An} = \frac{\dot{m} * v_n}{\pi * D_n * l_n} \left[\frac{m}{s}\right] \quad (3.85)$$

Absolutní výstupní rychlost páry z oběžných lopatek:

$$c_{2n} = c_{An} * \sqrt{\left[\cotg \alpha_{1n} - \left(\frac{u}{ca}\right)_n\right]^2 + 1} \left[\frac{m}{s}\right] \quad (3.86)$$

Ztráta výstupní rychlostí:

$$z_c = \frac{c_{2n}^2}{2} \left[\frac{J}{kg}\right] \quad (3.87)$$

Skutečný entalpický spád připadající na stupňovou část se zahrnutím ztráty výstupní rychlostí:

$$H_i = H_{iz} * \eta_i - z_c \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3.88)$$

Vnitřní termodynamická účinnost stupňové části turbíny:

$$\eta_{tdi} = \frac{H_i}{H_{iz}} [-] \quad (3.89)$$

Vnitřní výkon stupňové části přetlakového lopatkování turbíny:

$$P_i = H_i * \dot{m} [kW] \quad (3.90)$$

Jelikož nízkotlaký díl turbíny lze rozdělit na tři části s rozdílným hmotnostním průtokem, je nutno tyto části (včetně jejich výkonů) spočítat separátně.

Spojkový výkon více stupňové turbíny:

$$P_{SP} = P_i * \eta_m * \eta_{vol} [kW] \quad (3.91)$$

$\eta_m$ ...mechanická účinnost

$\eta_{vol}$ ...volumetrická účinnost

$$\xi_{vol} = \frac{\Delta M}{M} [-] \quad (3.92)$$

$\Delta M$ ...součet úniků páry

$M$ ...hmotnostní tok páry na vstupu do turbíny

$$\eta_{vol} = 1 - \xi_{vol} [-] \quad (3.93)$$

Tento výpočet volumetrické účinnosti je vhodný pouze pro předběžný výpočet mnohostupňové turbíny.

Svorkový výkon více stupňové turbíny:

$$P_{SV} = P_{SP} * \eta_G [kW] \quad (3.94)$$



Svorková účinnost turbíny:

$$\eta_{sv} = \frac{P_{sv}}{\dot{m} * H_{iz}} [-] \quad (3.95)$$

### 3.1.2.1.2 Detailní výpočet metody $\left(\frac{c_a}{u}\right)$

Metodu  $\left(\frac{c_a}{u}\right)$  lze použít za následujících předpokladů:

- hmotnostní průtok skupinou stupňů je konstantní (nedochází k odběru)
- proudění je sledováno na středním průměru lopatkování
- axiální rychlost na vstupu a výstupu je stejná
- stupeň reakce  $\rho = 0,5$  (rychlostní trojúhelníky jsou symetrické)

Metoda používá bezrozměrový koeficient  $Pa$  (Parsonovo číslo), který je pro celou skupinu stupňů definován jako:

$$Pa = \frac{\sum_{j=1}^z u_j^2}{\sum_{j=1}^z h_{izj}} = \frac{z * u_s^2}{\sum_{j=1}^z h_{izj}} [-] \quad (3.96)$$

Pro libovolný stupeň platí:

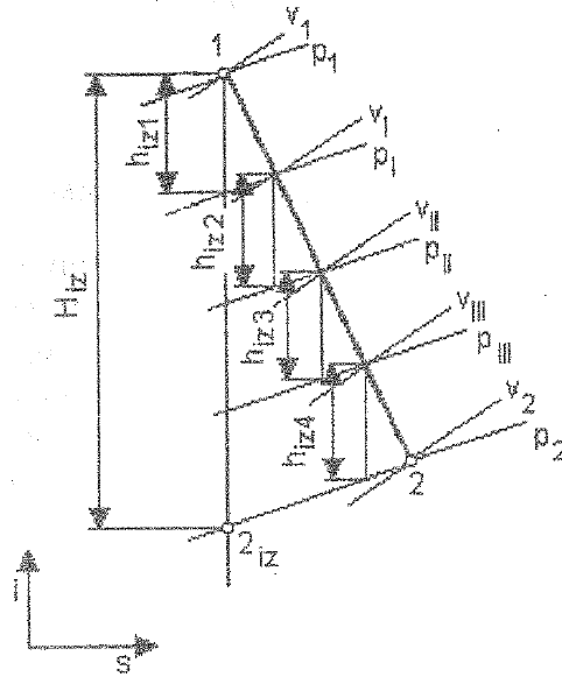
$$Pa = \frac{u_s^2}{h_{iz}} [-] \quad (3.97)$$

Pro výše uvedené předpoklady lze Parsonovo číslo vyjádřit následovně:

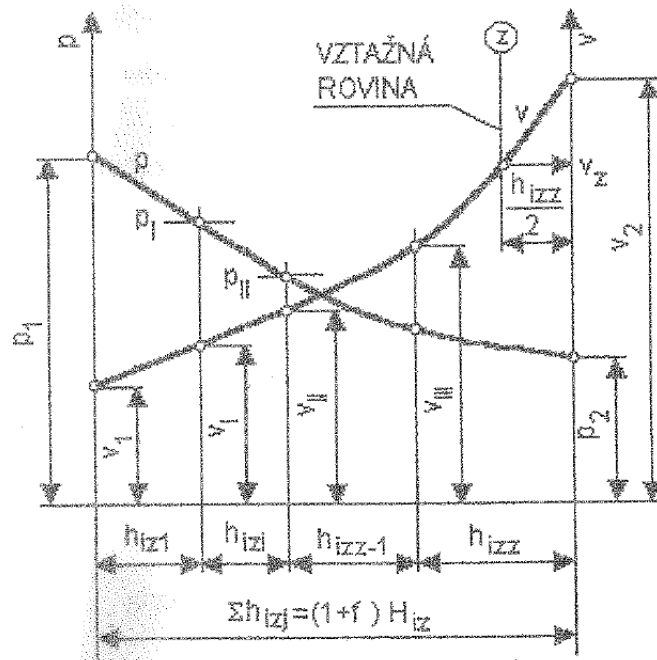
$$Pa = \frac{1}{\frac{\lambda}{\sin^2 \alpha_1} \left(\frac{c_a}{u}\right)^2 + \frac{2}{\operatorname{tg} \alpha_1} * \frac{c_a}{u} - 1} [-] \quad (3.98)$$

$$\lambda = \frac{1}{\phi^2} - 1 [-] \quad (3.99)$$

Na základě expanzní čáry v  $i$ - $s$  diagramu (Obrázek 12) je sestaven průběh tlaku a měrného objemu páry při expanzi (Obrázek 13) tak, že se expanzní čára rozdělí na počet segmentů daný doporučeným počtem stupňů  $z$ . Na tyto části je rovnoměrně přiřazen izoentropický entalpický spád (skutečné spády připadající jednotlivým stupňům nejsou zatím známy). Součet dílčích izoentropických spádů všech dílů  $\sum_{j=1}^z h_{izj}$  je větší než celkový izoentropický spád o hodnotu reheat faktoru (viz. vztah (3.72)).

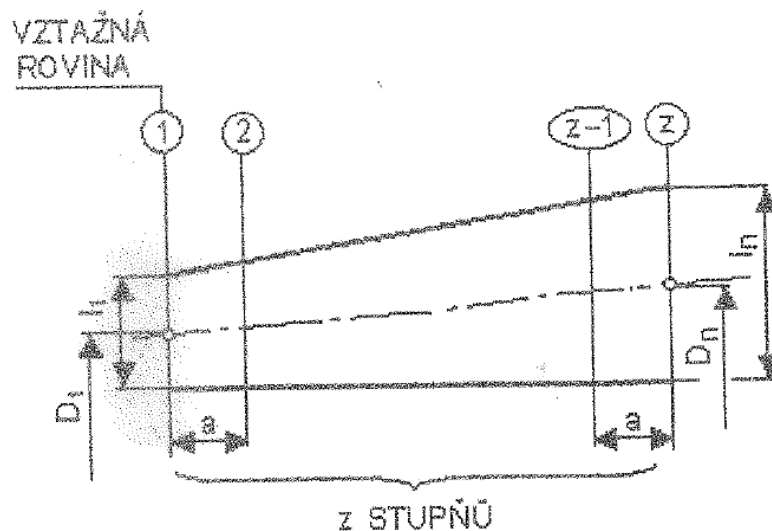


Obrázek 12: Expanzní čára ve skupině přetlakových stupňů [1]



Obrázek 13: p-v čáry pro skupinu přetlakových stupňů [1]

Tvar průtočného kanálu je často z technologických důvodů určován s konstantním patním průměrem lopatkování. V případě této diplomové práce byl průtočný kanál výsledkem postupu optimalizace výkonu turbíny popsán v kapitole 3.1.2.1.3.



Obrázek 14: Náčrt průtočného kanálu [1]

Postup výpočtu jednotlivých stupňů:

Z navrženého průtočného kanálu (viz. Obrázek 14) je pro vztažnou rovinu daného stupně odečten střední průměr stupně a délka lopatky ve vztažné rovině  $z$ . V této diplomové práci byl střední průměr spolu s délkou lopatky dopočten ve snaze zachovat konstantní rychlost (objemový tok) napříč všemi stupni.

Zvolí se axiální průtočná plocha ve vztažné rovině.

$$S_a = \pi * D_z * l_z [m^2] \quad (3.100)$$

Obvodová rychlost na středním průměru ve vztažné rovině  $z$ :

$$u = \pi * D_z * n \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.101)$$

Je proveden odhad entalpického spádu na posledním stupni, který je vyneseno do diagramu na Obrázek 13. Je odečten měrný objem.

Axiální rychlost ve vztažné rovině  $z$ :

$$c_a = \frac{\dot{m} * v_z}{S_a} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.102)$$

Je vypočten poměr  $\left(\frac{c_a}{u}\right)$  a stanoví se Pa:

- Výpočet dle rovnice (3.98)
- Odečtením z diagramu v příloze č. 6

Z definice Pa vyplývá zpracovaný entalpický spád stupně:

$$(h_{izz})_{vyp} = \frac{u^2}{Pa} \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (3.103)$$

Pokud není shoda vypočteného izoentropického entalpického spádu s odhadnutým (maximální odchylka je určena jako 5 kJ/kg), musí se výpočet opakovat, dokud rozdíl těchto hodnot neklesne pod tuto požadovanou úroveň.

Výše zmíněný postup je opakován, dokud výpočet nedospěje k prvnímu stupni (postupuje se od posledního stupně k prvnímu). Po provedení výpočtu všech stupňů je zapotřebí porovnat vypočtený součet izoentropických entalpických spádů s odhadnutým (určený dle přiřazeného izoentalpického spádu na skupinu stupňů a odhadnutého reheat faktoru (3.72)). Za přijatelnou shodu je považován rozdíl do 1 %. V případě většího rozdílu je zapotřebí upravit průtočný kanál, nebo odhad reheat faktoru.

Výpočet rychlostních trojúhelníků je obdobný s postupem uvedeným v kapitole 3.1.1.2. Z předchozího výpočtu jsou známy následující parametry:

- D ... střední průměr lopatkování
- u ... obvodová rychlost ve vztažné rovině
- $\alpha_1$  ... výstupní úhel z rozváděcí řady
- $h_{iz}$  ... izoentropický spád na stupeň
- $c_a$  ... axiální rychlost páry ve vztažné rovině
- $\rho = 0,5$  ... stupeň reakce stupně

Absolutní rychlost na výstupu ze statoru:

$$c_1 = \frac{c_{1a}}{\sin \alpha_1} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.104)$$

Relativní rychlost páry na výstupu do rotoru:

$$w_1 = \sqrt{c_1^2 + u^2 - 2 * c_1 * u * \cos \alpha_1} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.105)$$

Vstupní úhel proudu páry do rotoru:

$$\beta_1 = \arcsin \frac{w_{1a}}{w_1} [^\circ] \quad (3.106)$$

Rychlosti páry ve výstupním trojúhelníku:

$$w_{2,iz} = \sqrt{\rho * 2 * h_{iz} + w_1^2} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.107)$$

Skutečná relativní rychlost:

$$w_2 = w_{2iz} * \psi \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.108)$$

Výstupní úhel relativní rychlosti:

$$\beta_2 = \arcsin \frac{w_{2a}}{w_2} [^\circ] \quad (3.109)$$

Absolutní rychlost páry na výstupu ze stupně:

$$c_2 = \sqrt{w_2^2 + u^2 - 2 * w_2 * u * \cos(\beta_2)} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.110)$$

Výstupní úhel absolutní rychlosti:

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{c_{2a}}{c_2} [^\circ] \quad (3.111)$$

Složky rychlostí do obvodového směru:

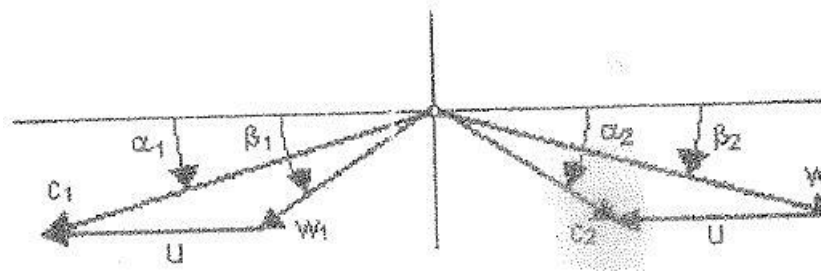
$$c_{1u} = c_1 * \cos \alpha_1 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.112)$$

$$w_{1u} = w_1 * \cos \beta_1 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.113)$$

$$c_{2u} = c_2 * \cos \alpha_2 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.114)$$

$$w_{2u} = w_2 * \cos \beta_2 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (3.115)$$

Jelikož se pro přetlakové lopatkování uvažuje reakce  $\rho = 0,5$ , je rychlostní trojúhelník tohoto stupně symetrický (viz. Obrázek 15)



Obrázek 15: Rychlostní trojúhelník přetlakového stupně [1]

Vnitřní účinnost řadového stupně přetlakového lopatkování:

$$\eta_i^{ST} = \eta_\infty * (1 - \xi_k - \xi_v - \xi_x) [-] \quad (3.116)$$

Poměrná ztráta radiální mezerou:

$$\xi_k = \frac{0,3 + k}{l} * 4,5 [-] \quad (3.117)$$

k [mm]...radiální vůle  
l [mm]...délka lopatky

Výpočet radiální vůle:

$$k = \frac{D_v}{1000} + x [-] \quad (3.118)$$

$D_v$ ...vnější průměr lopatkování

x ...výrobní tolerance

Poměrná ztráta rozvřením:

$$\xi_v = \left(\frac{l}{D}\right)^2 [-] \quad (3.119)$$

Poměrná ztráta vlhkostí páry:

$$\xi_x = \left(1 - \frac{X_0 + X_2}{2}\right) [-] \quad (3.120)$$

### 3.1.2.1.3 Optimalizace

Pro účely dosažení co největší účinnosti přetlakovým lopatkováním bylo navrženo optimalizační makro zakládající se na iteračním výpočtu vnitřní termodynamické účinnosti stupňové části dílu. V jedné výpočetní smyčce je dle odhadnutého reheat faktoru určen cílený izoentalpický spád, který je pravidelně rozdělen na nově vypočtený počet stupňů (rovnice (3.78)). Pro návrh jednotlivých stupňů je určena hodnota středního průměru lopatky a její délky. Rovněž je navržen úhel  $\alpha_1$  pro zajištění co nejpřesnější shody vypočteného izoentalpického spádu na stupeň s odhadovaným. Tento rozdíl nesmí být větší než 5kJ/kg. Izoentalpický spád pro další stupeň je kompenzován celkovou průběžnou odchylkou od cílového izoentalpického spádu. Tato korekce slouží ke splnění podmínky odchylky 1 % celkového vypočteného spádu k původnímu navrženému.

Při splnění této podmínky je vypočtena termodynamická účinnost stupňové části, která se stává výchozí navrhovanou účinností pro další iterační výpočetní smyčku. Za dobrou shodu odhadované a vypočtené účinnosti se považuje 1 %. Dosažená účinnost průtočné části vysokotlakého dílu touto metodou činí **91,16 %**. Se zahrnutím tlakových ztrát na vstupu a výstupu do dílu turbíny je pak účinnost **82,64 %**. Makro a jeho volané funkce jsou obsaženy v příloze č. 7.

### 3.1.3 Zvolené řešení vysokotlakého dílu

Pro účely řešení vysokotlakého dílu byly vypracovány dva koncepty. Jako konečné řešení byl zvolen koncept bubnového uspořádání na základě jeho vyšší termodynamické účinnosti oproti A-kolu.

#### 3.1.3.1 Výsledky předběžného výpočtu

Pro detailní výpočet přetlakového lopatkování byly ze známých stavů páry dle postupu uvedeného v kapitole 1.1 navrženy následující parametry (Tabulka 6):

Tabulka 6: VT - parametry z předběžného výpočtu

Parametry z předběžného výpočtu - VT		
$\rho$	-	0,50
M	kg/s	11,90
n	1/min	8000
$\lambda$	-	0,12
z	-	11,00
$\Sigma h_{iz} - target$	kJ/kg	152,69
$\Sigma h_{iz} - calculated$	kJ/kg	152,32
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,05
$v_n$	m <sup>3</sup> /kg	0,08

$l_1$	m	0,03
$l_n$	m	0,03
$D_1$	m	0,22
$D_n$	m	0,26

### 3.1.3.2 Výsledky detailního výpočtu

Konkrétní hodnoty detailního výpočtu dle metodiky uvedené v kapitole 3.1.1.2 jsou uvedeny v Tabulka 7 a Tabulka 8. Rovněž je naznačena expanze páry ve vysokotlakém dílu pomocí h-s diagramu, lopatkového plánu a rychlostních trojúhelníků uvedených v příloze č. 8. Jelikož je uvažována reakce stupňů  $\rho = 0,5$ , jsou rychlostní trojúhelníky osově symetrické.

Tabulka 7: Detailní návrh VT dílu - 1. až 6. stupeň

Stupeň		1	2	3	4	5	6
$D_s$	m	0,215	0,215	0,215	0,215	0,22	0,22
$l$	m	0,026	0,026	0,026	0,0265	0,0265	0,0275
$S_a$	m <sup>2</sup>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$u$	m/s	90,06	90,06	90,06	90,06	92,15	92,15
$u_{patní}$	m/s	79,17	79,17	79,17	78,96	81,05	80,63
$h_{iz}$ (odhad)	kJ/kg	13,88	13,54	13,32	14,47	14,11	13,59
$v_{vz}$	m <sup>3</sup> /kg	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$c_a$	m/s	33,95	34,00	34,17	33,94	33,85	33,62
$(c_a / u)$	-	0,38	0,38	0,38	0,38	0,37	0,36
$\alpha_1$	°	17,00	17,00	17,00	16,00	17,00	17,00
$P_a$	-	0,60	0,60	0,59	0,54	0,63	0,64
$h_{iz}$ (výpočet)	kJ/kg	13,51	13,54	13,66	15,03	13,52	13,37
$M$	kg/s	11,90	11,90	11,90	11,90	11,90	11,90
$p_0$	bar	56,37	53,73	51,18	48,71	46,11	43,86
$i_0$	kJ/kg	3170,98	3158,71	3146,41	3134,00	3120,35	3108,06
$t_0$	°	394,49	387,65	380,79	373,86	366,25	359,41
$v_0$	m <sup>3</sup> /kg	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06
$s_0$	kJ/kg*K	6,56	6,56	6,56	6,56	6,57	6,57
$x_0$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$p_1$	bar	55,03	52,44	49,93	47,39	44,97	42,78
$i_1$	kJ/kg	3164,84	3152,56	3140,20	3127,17	3114,21	3101,99
$t_1$	°	391,07	384,21	377,32	370,06	362,83	356,02
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06
$s_1$	kJ/kg*K	6,56	6,56	6,56	6,57	6,57	6,57
$x_1$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$p_2$	bar	53,73	51,18	48,71	46,11	43,86	41,72
$i_2$	kJ/kg	3158,71	3146,41	3134,00	3120,35	3108,06	3095,92
$t_2$	°C	387,65	380,79	373,86	366,25	359,41	352,64
$v_2$	m <sup>3</sup> /kg	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06
$s_2$	kJ/kg*K	6,56	6,56	6,56	6,57	6,57	6,57



$X_2$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$C_{1a}=C_{2a}=W_{1a}=W_{2a}$	m/s	33,95	34,00	34,17	33,94	33,85	33,62
$C_1$	m/s	116,12	116,28	116,89	123,14	115,77	115,01
$W_1$	m/s	39,92	40,04	40,49	44,20	38,60	38,06
$\beta_1$	°	58,27	58,12	57,56	50,17	61,26	62,07
$W_{2\_iz}$	m/s	122,89	123,06	123,70	130,32	122,52	121,71
$W_2$	m/s	108,15	108,30	108,86	114,68	107,82	107,11
$\beta_2$	°	18,30	18,30	18,30	17,22	18,30	18,30
$C_2$	m/s	36,22	36,31	36,67	39,13	35,36	34,95
$\alpha_2$	°	69,61	69,43	68,74	60,15	73,21	74,16
$C_{1u}$	m/s	111,05	111,20	111,78	118,37	110,71	109,98
$W_{1u}$	m/s	20,99	21,14	21,72	28,31	18,56	17,83
$C_{2u}$	m/s	12,62	12,76	13,30	19,48	10,22	9,54
$W_{2u}$	m/s	102,68	102,82	103,35	109,54	102,37	101,69
$D_v$	m	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25
$x$	mm	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
$k$	mm	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35
$l$	mm	26,00	26,00	26,00	26,50	26,50	27,50
$\xi_k$	-	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
$\xi_v$	-	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13
$x_0$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$x_2$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\xi_x$	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\eta_{inf}$	-	0,94	0,93	0,93	0,91	0,94	0,94
$\eta_{ST}$	-	0,72	0,71	0,71	0,70	0,72	0,72

Tabulka 8: Detailní návrh VT dílu - 7. až 11. stupeň

Stupeň		7	8	9	10	11
$D_s$	m	0,225	0,23	0,235	0,245	0,26
$l$	m	0,028	0,029	0,0305	0,0315	0,0325
$S_a$	m <sup>2</sup>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
$u$	m/s	94,25	96,34	98,44	102,63	108,91
$u_{patní}$	m/s	82,52	84,19	85,66	89,43	95,29
$h_{iz}$ (odhad)	kJ/kg	13,19	14,48	14,11	13,97	13,88
$v_{vz}$	m <sup>3</sup> /kg	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08
$c_a$	m/s	33,68	33,72	33,57	33,77	33,77
$(c_a / u)$	-	0,36	0,35	0,34	0,33	0,31
$\alpha_1$	°	17,00	16,00	17,00	17,00	17,00
$Pa$	-	0,66	0,61	0,72	0,77	0,86
$h_{iz}$ (výpočet)	kJ/kg	13,47	15,17	13,51	13,74	13,80
$M$	kg/s	11,90	11,90	11,90	11,90	11,90
$p_0$	bar	41,72	39,65	37,42	35,52	33,67
$i_0$	kJ/kg	3095,92	3083,69	3069,91	3057,64	3045,16
$t_0$	°	352,64	345,83	338,15	331,32	324,37
$v_0$	m <sup>3</sup> /kg	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08

$s_0$	kJ/kg*K	6,57	6,57	6,57	6,58	6,58
$x_0$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$p_1$	bar	40,68	38,53	36,46	34,59	32,77
$i_1$	kJ/kg	3089,81	3076,80	3063,77	3051,40	3038,89
$t_1$	°	349,23	341,99	334,74	327,85	320,89
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08
$s_1$	kJ/kg*K	6,57	6,57	6,58	6,58	6,58
$x_1$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$p_2$	bar	39,65	37,42	35,52	33,67	31,88
$i_2$	kJ/kg	3083,69	3069,91	3057,64	3045,16	3032,63
$t_2$	°C	345,83	338,15	331,32	324,37	317,40
$v_2$	m <sup>3</sup> /kg	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08
$s_2$	kJ/kg*K	6,57	6,57	6,58	6,58	6,58
$x_2$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$C_{1a}=C_{2a}=W_{1a}=W_{2a}$	m/s	33,68	33,72	33,57	33,77	33,77
$c_1$	m/s	115,20	122,33	114,82	115,50	115,49
$w_1$	m/s	37,25	39,85	35,44	34,66	33,80
$\beta_1$	°	64,71	57,79	71,30	76,95	87,40
$w_{2\_iz}$	m/s	121,91	129,46	121,51	122,23	122,22
$w_2$	m/s	107,28	113,92	106,93	107,56	107,56
$\beta_2$	°	18,30	17,22	18,30	18,30	18,30
$c_2$	m/s	34,53	35,95	33,71	33,77	34,44
$\alpha_2$	°	77,27	69,69	84,74	89,15	78,63
$c_{1u}$	m/s	110,16	117,59	109,80	110,45	110,44
$w_{1u}$	m/s	15,91	21,25	11,36	7,83	1,53
$c_{2u}$	m/s	7,61	12,48	3,09	0,50	6,79
$w_{2u}$	m/s	101,86	108,82	101,52	102,13	102,12
$D_v$	m	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
$x$	mm	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
$k$	mm	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39
$l$	mm	28,00	29,00	30,50	31,50	32,50
$\xi_k$	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
$\xi_v$	-	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13
$x_0$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$x_2$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\xi_x$	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\eta_{inf}$	-	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95
$\eta_{ST}$	-	0,73	0,72	0,73	0,74	0,74

### 3.2 Nízkotlaký díl

Stavy vstupní páry do a výstupní páry z nízkotlakého dílu jsou uvedeny v kapitole 1.1.1 (body 4 a 6). Analogicky jako u vysokotlakého dílu byla zavedena 3% poměrná tlaková ztráta na vstupu (rovnice (3.1)) a výstupu (rovnice (3.2)) z dílu turbíny. Pro nízkotlaký díl bylo zvoleno přetlakové lopatkování vzhledem k jeho vysoké účinnosti.

Návrh nízkotlakého dílu byl proveden stejnou metodikou, kterou byl vypočtený vysokotlaký díl (viz. kapitola 3.1.2). Jelikož metoda  $\left(\frac{c_a}{u}\right)$  je vhodná pouze pro konstantní hmotnostní tok (podmínky použití této metody jsou uvedeny v kapitole 3.1.2.1.2), je nutné nízkotlaký díl výpočetně rozdělit na tři části. Rozdílné hmotnostní toky jsou způsobené zaváděním ucpávkové páry z obou dílů turbíny (kapitola 1.1.2). Stavy páry podle jednotlivých částí jsou naznačeny v Tabulka 9. Mezi částmi NT1, NT2 a NT3 dochází k nárůstu měrné entalpie z důvodu zavádění hmotnostních toků ucpávkové páry z prvních ucpávek VT a NT dílu principem naznačeným v rovnici (3.121).

$$m_1 * h_1 + m_2 * h_2 = m_3 * h_3 \quad (3.121)$$

Tabulka 9: NT díl - stavy páry - definice stupňových částí

	Admisní pára				
	m [kg/s]	p [bar]	i [kJ/kg]	t [°C]	stav
	11,51821	30	3032,626	315,2904	přehřátá
Stupňová část NT1					
Pára	m [kg/s]	p [bar]	i [kJ/kg]	t [°C]	stav
Před (0)	11,11354	28,99229	3033,043	314,3194	přehřátá
Po (2)	11,11354	14,55	2887,274	233,9375	přehřátá
Stupňová část NT2					
Pára	m [kg/s]	p [bar]	i [kJ/kg]	t [°C]	stav
Před (0)	11,41406	14,55041	2895,872	237,4784	přehřátá
Po (2)	11,41406	4,85	2693,599	150,6922	mokrá
Stupňová část NT3					
Pára	m [kg/s]	p [bar]	i [kJ/kg]	t [°C]	stav
Před (0)	11,69209	4,882839	2708,895	150,945	mokrá
Po (2)	11,69209	0,103093	2190,021	46,40458	mokrá
	Výstupní pára				
	m [kg/s]	p [bar]	i [kJ/kg]	t [°C]	stav
	11,75603	0,1	2190,021	45,80755	mokrá

### 3.2.1 Návrh průtočné části

Pro výpočet částí NT1 a NT2 bylo využito optimalizační makro popsané v kapitole 3.1.1.3. Pro návrh posledních lopatek obsažených v části NT3 tento přístup nebyl proveditelný. Rozměry lopatek této části byly voleny ručně za podpory konzultanta diplomové práce. V Tabulka 10 až Tabulka 17 jsou obsaženy výsledky předběžných a detailních návrhů jednotlivých částí NT dílu. V příloze č. 9 je k nalezení souhrnný h-s diagram, lopatkový plán a rychlostní trojúhelníky.

Tabulka 10: NT1 - parametry z předběžného výpočtu

Parametry z předběžného výpočtu – NT1		
$\rho$	-	0,50
M	kg/s	11,11
n	1/min	100,00
$\lambda$	-	0,12
z	-	11,00
$\Sigma h_{iz} - \text{target}$	kJ/kg	163,11
$\Sigma h_{iz} - \text{calculated}$	kJ/kg	162,41
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,09
$v_n$	m <sup>3</sup> /kg	0,15
$l_1$	m	0,03
$l_n$	m	0,04
$D_1$	m	0,32
$D_n$	m	0,35

Tabulka 11: Detailní návrh NT dílu - NT1 - 1. až 6. stupeň

Stupeň		1	2	3	4	5	6
$D_s$	m	0,315	0,315	0,315	0,315	0,32	0,32
l	m	0,029	0,029	0,029	0,0295	0,03	0,031
$S_a$	m <sup>2</sup>	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
u	m/s	98,96	98,96	98,96	98,96	100,53	100,53
$u_{\text{patní}}$	m/s	89,85	89,85	89,85	89,69	91,11	90,79
$h_{iz}$ (odhad)	kJ/kg	14,25	14,64	15,23	14,08	14,47	15,04
$v_{vz}$	m <sup>3</sup> /kg	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
$c_a$	m/s	33,59	33,65	33,89	33,79	33,57	33,80
$(c_a / u)$	-	0,34	0,34	0,34	0,34	0,33	0,34
$\alpha_1$	°	17,00	16,00	16,00	17,00	16,00	16,00
Pa	-	0,72	0,64	0,64	0,72	0,66	0,66
$h_{iz}$ (výpočet)	kJ/kg	13,54	15,22	15,41	13,69	15,21	15,40

M	kg/s	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11
p <sub>0</sub>	bar	28,99	27,47	25,83	24,26	22,92	21,51
i <sub>0</sub>	kJ/kg	3033,04	3020,89	3007,22	2993,39	2981,11	2967,45
t <sub>0</sub>	°	314,32	307,59	300,03	292,39	285,60	278,07
v <sub>0</sub>	m <sup>3</sup> /kg	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11
s <sub>0</sub>	kJ/kg*K	6,62	6,62	6,63	6,63	6,63	6,64
x <sub>0</sub>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
p <sub>1</sub>	bar	28,22	26,64	25,04	23,58	22,21	20,82
i <sub>1</sub>	kJ/kg	3026,96	3014,05	3000,31	2987,25	2974,28	2960,54
t <sub>1</sub>	°	310,95	303,81	296,21	289,00	281,83	274,26
v <sub>1</sub>	m <sup>3</sup> /kg	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11
s <sub>1</sub>	kJ/kg*K	6,62	6,63	6,63	6,63	6,63	6,64
x <sub>1</sub>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
p <sub>2</sub>	bar	27,47	25,83	24,26	22,92	21,51	20,15
i <sub>2</sub>	kJ/kg	3020,89	3007,22	2993,39	2981,11	2967,45	2953,63
t <sub>2</sub>	°C	307,59	300,03	292,39	285,60	278,07	270,45
v <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> /kg	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12
s <sub>2</sub>	kJ/kg*K	6,62	6,63	6,63	6,63	6,64	6,64
x <sub>2</sub>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
C <sub>1a</sub> =C <sub>2a</sub> =W <sub>1a</sub> =W <sub>2a</sub>	m/s	33,59	33,65	33,89	33,79	33,57	33,80
c <sub>1</sub>	m/s	114,90	122,10	122,94	115,58	121,79	122,64
w <sub>1</sub>	m/s	35,32	38,36	38,96	35,72	37,42	38,00
β <sub>1</sub>	°	71,99	61,33	60,44	71,10	63,77	62,82
w <sub>2_iz</sub>	m/s	121,60	129,21	130,11	122,32	128,89	129,79
w <sub>2</sub>	m/s	107,01	113,71	114,50	107,64	113,42	114,21
β <sub>2</sub>	°	18,30	17,22	17,22	18,30	17,22	17,22
c <sub>2</sub>	m/s	33,70	35,01	35,45	33,95	34,47	34,87
α <sub>2</sub>	°	85,51	73,99	72,93	84,53	76,90	75,78
c <sub>1u</sub>	m/s	109,88	117,37	118,18	110,53	117,07	117,89
w <sub>1u</sub>	m/s	10,92	18,41	19,22	11,57	16,54	17,35
c <sub>2u</sub>	m/s	2,64	9,65	10,41	3,24	7,81	8,56
w <sub>2u</sub>	m/s	101,60	108,61	109,37	102,20	108,34	109,09
D <sub>v</sub>	m	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35
x	mm	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
k	mm	0,44	0,44	0,44	0,44	0,45	0,45
l	mm	29,00	29,00	29,00	29,50	30,00	31,00
ξ <sub>k</sub>	-	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11
ξ <sub>v</sub>	-	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10
x <sub>0</sub>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
x <sub>2</sub>	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ξ <sub>x</sub>	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
η <sub>inf</sub>	-	0,95	0,94	0,94	0,95	0,95	0,94
η <sub>ST</sub>	-	0,75	0,75	0,74	0,75	0,75	0,75

Tabulka 12: Detailní návrh NT dílu - NT1 - 7. až 11. stupeň

Stupeň		7	8	9	10	11
$D_s$	m	0,325	0,325	0,33	0,335	0,345
$l$	m	0,032	0,0345	0,037	0,04	0,0435
$S_a$	m <sup>2</sup>	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
$u$	m/s	102,10	102,10	103,67	105,24	108,38
$u_{patní}$	m/s	92,05	91,26	92,05	92,68	94,72
$h_{iz}$ (odhad)	kJ/kg	14,08	14,68	15,31	14,23	14,83
$v_{vz}$	m <sup>3</sup> /kg	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
$c_a$	m/s	33,95	33,77	33,75	33,73	33,59
$(c_a / u)$	-	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31
$\alpha_1$	°	17,00	16,00	16,00	17,00	16,00
$P_a$	-	0,75	0,68	0,70	0,81	0,76
$h_{iz}$ (výpočet)	kJ/kg	13,87	15,42	15,46	13,75	15,43
$M$	kg/s	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11
$p_0$	bar	20,15	18,99	17,76	16,59	15,60
$i_0$	kJ/kg	2953,63	2941,18	2927,34	2913,46	2901,12
$t_0$	°	270,45	263,58	255,96	248,33	241,55
$v_0$	m <sup>3</sup> /kg	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14
$s_0$	kJ/kg*K	6,64	6,64	6,64	6,65	6,65
$x_0$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$p_1$	bar	19,56	18,36	17,17	16,09	15,07
$i_1$	kJ/kg	2947,40	2934,26	2920,40	2907,29	2894,20
$t_1$	°	267,01	259,77	252,14	244,94	237,74
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15
$s_1$	kJ/kg*K	6,64	6,64	6,65	6,65	6,65
$x_1$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$p_2$	bar	18,99	17,76	16,59	15,60	14,55
$i_2$	kJ/kg	2941,18	2927,34	2913,46	2901,12	2887,27
$t_2$	°C	263,58	255,96	248,33	241,55	233,94
$v_2$	m <sup>3</sup> /kg	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15
$s_2$	kJ/kg*K	6,64	6,64	6,65	6,65	6,65
$x_2$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$c_{1a}=c_{2a}=w_{1a}=w_{2a}$	m/s	33,95	33,77	33,75	33,73	33,59
$c_1$	m/s	116,13	122,51	122,45	115,38	121,87
$w_1$	m/s	35,12	37,22	36,56	34,12	34,72
$\beta_1$	°	75,22	65,12	67,42	81,41	75,37
$w_{2\_iz}$	m/s	122,90	129,65	129,59	122,11	128,98
$w_2$	m/s	108,16	114,09	114,04	107,46	113,50
$\beta_2$	°	18,30	17,22	17,22	18,30	17,22
$c_2$	m/s	33,96	34,46	34,16	33,89	33,59
$\alpha_2$	°	89,01	78,49	81,14	84,55	89,94
$c_{1u}$	m/s	111,06	117,76	117,71	110,34	117,15
$w_{1u}$	m/s	8,96	15,66	14,04	5,10	8,77
$c_{2u}$	m/s	0,59	6,88	5,26	3,22	0,03
$w_{2u}$	m/s	102,69	108,98	108,93	102,02	108,42
$D_v$	m	0,36	0,36	0,37	0,38	0,39

x	mm	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
k	mm	0,46	0,46	0,47	0,48	0,49
l	mm	32,00	34,50	37,00	40,00	43,50
$\xi_k$	-	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08
$\xi_v$	-	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13
$x_0$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$x_2$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\xi_x$	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\eta_{inf}$	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
$\eta_{ST}$	-	0,76	0,75	0,75	0,75	0,75

Tabulka 13: NT2 - parametry z předběžného výpočtu

Parametry z předběžného výpočtu – NT2		
$\rho$	-	0,50
M	kg/s	11,42
n	1/min	100,00
$\lambda$	-	0,12
z	-	9,00
$\Sigma h_{iz} - target$	kJ/kg	218,27
$\Sigma h_{iz} - calculated$	kJ/kg	218,31
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,15
$v_n$	m <sup>3</sup> /kg	0,38
$l_1$	m	0,04
$l_n$	m	0,06
$D_1$	m	0,36
$D_n$	m	0,47

Tabulka 14: Detailní návrh NT dílu - NT2 - 12. až 16. stupeň

Stupeň		12	13	14	15	16
$D_s$	m	0,36	0,36	0,36	0,365	0,375
l	m	0,035	0,035	0,036	0,0375	0,0395
$S_a$	m <sup>2</sup>	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
u	m/s	113,10	113,10	113,10	114,67	117,81
$u_{patní}$	m/s	102,10	102,10	101,79	102,89	105,40
$h_{iz} (odhad)$	kJ/kg	24,69	23,04	23,74	24,49	23,05
$v_{vz}$	m <sup>3</sup> /kg	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18
$c_a$	m/s	43,88	44,15	43,98	43,89	44,07
$(c_a / u)$	-	0,39	0,39	0,39	0,38	0,37

$\alpha_1$	°	16,00	17,00	16,00	16,00	17,00
Pa	-	0,51	0,57	0,51	0,53	0,61
$h_{iz}$ (výpočet)	kJ/kg	24,86	22,61	24,95	25,00	22,81
M	kg/s	11,42	11,42	11,42	11,42	11,42
$p_0$	bar	14,56	12,99	11,69	10,37	9,17
$i_0$	kJ/kg	2896,08	2873,04	2852,10	2828,98	2805,82
$t_0$	°	237,58	225,06	213,70	201,18	188,70
$v_0$	m <sup>3</sup> /kg	0,15	0,17	0,18	0,20	0,22
$s_0$	kJ/kg*K	6,67	6,67	6,68	6,68	6,69
$x_0$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$p_1$	bar	13,76	12,33	11,01	9,76	8,66
$i_1$	kJ/kg	2884,56	2862,57	2840,54	2817,40	2795,25
$t_1$	°	231,32	219,37	207,43	194,94	183,03
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,16	0,17	0,19	0,21	0,23
$s_1$	kJ/kg*K	6,67	6,68	6,68	6,68	6,69
$x_1$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$p_2$	bar	12,99	11,69	10,37	9,17	8,17
$i_2$	kJ/kg	2873,04	2852,10	2828,98	2805,82	2784,68
$t_2$	°C	225,06	213,70	201,18	188,70	177,38
$v_2$	m <sup>3</sup> /kg	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24
$s_2$	kJ/kg*K	6,67	6,68	6,68	6,69	6,69
$x_2$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$C_{1a}=C_{2a}=W_{1a}=W_{2a}$	m/s	43,88	44,15	43,98	43,89	44,07
$c_1$	m/s	159,18	151,00	159,54	159,24	150,73
$w_1$	m/s	59,32	54,12	59,62	58,32	51,34
$\beta_1$	°	47,71	54,66	47,52	48,82	59,14
$w_{2\_iz}$	m/s	168,46	159,81	168,84	168,52	159,52
$w_2$	m/s	148,25	140,63	148,58	148,30	140,37
$\beta_2$	°	17,22	18,30	17,22	17,22	18,30
$c_2$	m/s	52,32	48,64	52,58	51,52	46,70
$\alpha_2$	°	56,99	65,18	56,75	58,42	70,66
$c_{1u}$	m/s	153,01	144,40	153,36	153,07	144,14
$w_{1u}$	m/s	39,92	31,31	40,26	38,40	26,33
$c_{2u}$	m/s	28,51	20,42	28,83	26,99	15,47
$w_{2u}$	m/s	141,60	133,52	141,92	141,65	133,28
$D_v$	m	0,40	0,40	0,40	0,40	0,41
$x$	mm	0,10	0,10	0,10	1,50	1,50
$k$	mm	0,50	0,50	0,50	1,90	1,91
$l$	mm	35,00	35,00	36,00	37,50	39,50
$\xi_k$	-	0,10	0,10	0,10	0,26	0,25
$\xi_v$	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11
$x_0$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$x_2$	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\xi_x$	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\eta_{inf}$	-	0,90	0,92	0,90	0,91	0,94
$\eta_{ST}$	-	0,72	0,74	0,72	0,57	0,60



Tabulka 15: Detailní návrh NT dílu - NT2 - 17. až 20. stupeň

Stupeň		17	18	19	20
$D_s$	m	0,385	0,405	0,43	0,475
$l$	m	0,0435	0,048	0,0545	0,0595
$S_a$	m <sup>2</sup>	0,05	0,06	0,07	0,09
$u$	m/s	120,95	127,23	135,09	149,23
$U_{patn}$	m/s	107,29	112,15	117,97	130,53
$h_{iz}$ (odhad)	kJ/kg	24,46	23,44	25,30	24,25
$v_{vz}$	m <sup>3</sup> /kg	0,20	0,24	0,28	0,34
$c_a$	m/s	44,12	44,08	43,86	43,82
$(c_a / u)$	-	0,36	0,35	0,32	0,29
$\alpha_1$	°	16,00	17,00	16,00	17,00
$Pa$	-	0,57	0,70	0,70	0,96
$h_{iz}$ (výpočet)	kJ/kg	25,67	23,23	26,12	23,20
$M$	kg/s	11,42	11,42	11,42	11,42
$p_0$	bar	8,17	7,16	6,33	5,50
$i_0$	kJ/kg	2784,68	2760,90	2739,38	2715,18
$t_0$	°	177,38	165,84	160,94	155,48
$v_0$	m <sup>3</sup> /kg	0,24	0,27	0,30	0,34
$s_0$	kJ/kg*K	6,69	6,69	6,70	6,70
$x_0$	-	1,00	1,00	0,99	0,98
$p_1$	bar	7,65	6,73	5,90	5,17
$i_1$	kJ/kg	2772,79	2750,14	2727,28	2704,43
$t_1$	°	171,05	163,38	158,20	153,08
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,25	0,28	0,32	0,36
$s_1$	kJ/kg*K	6,69	6,70	6,70	6,70
$x_1$	-	1,00	0,99	0,99	0,98
$p_2$	bar	7,16	6,33	5,50	4,85
$i_2$	kJ/kg	2760,90	2739,38	2715,18	2693,68
$t_2$	°C	165,84	160,94	155,48	150,69
$v_2$	m <sup>3</sup> /kg	0,27	0,30	0,34	0,38
$s_2$	kJ/kg*K	6,69	6,70	6,70	6,71
$x_2$	-	1,00	0,99	0,98	0,97
$C_{1a}=C_{2a}=W_{1a}=W_{2a}$	m/s	44,12	44,08	43,86	43,82
$C_1$	m/s	160,07	150,78	159,12	149,88
$W_1$	m/s	55,05	47,23	47,36	44,21
$\beta_1$	°	53,28	68,96	67,83	82,33
$W_{2\_iz}$	m/s	169,40	159,57	168,40	158,61
$W_2$	m/s	149,07	140,42	148,19	139,58
$\beta_2$	°	17,22	18,30	17,22	18,30
$C_2$	m/s	49,05	44,50	44,33	46,89
$\alpha_2$	°	64,08	82,14	81,62	69,14
$C_{1u}$	m/s	153,87	144,19	152,96	143,33
$W_{1u}$	m/s	32,91	16,96	17,87	5,90
$C_{2u}$	m/s	21,44	6,09	6,46	16,70
$W_{2u}$	m/s	142,39	133,32	141,55	132,52
$D_v$	m	0,43	0,45	0,48	0,53

x	mm	1,50	1,50	1,50	0,20
k	mm	1,93	1,95	1,98	0,73
l	mm	43,50	48,00	54,50	59,50
$\xi_k$	-	0,23	0,21	0,19	0,08
$\xi_v$	-	0,11	0,12	0,13	0,13
$x_0$	-	1,00	1,00	0,99	0,98
$x_2$	-	1,00	0,99	0,98	0,97
$\xi_x$	-	0,00	0,01	0,01	0,02
$\eta_{inf}$	-	0,92	0,95	0,95	0,94
$\eta_{ST}$	-	0,60	0,63	0,64	0,73

Tabulka 16: NT3 - parametry z předběžného výpočtu

Parametry z předběžného výpočtu – NT3		
$\rho$	-	0,50
M	kg/s	11,69
n	1/min	100,00
$\lambda$	-	0,12
z	-	4,00
$\Sigma h_{iz} - target$	kJ/kg	572,48
$\Sigma h_{iz} - calculated$	kJ/kg	571,94
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,38
$v_n$	m <sup>3</sup> /kg	11,90
$l_1$	m	0,06
$l_n$	m	0,14
$D_1$	m	0,55
$D_n$	m	0,80

Tabulka 17: Detailní návrh NT dílu - NT3 - 21. až 24. stupeň

Stupeň		21	22	23	24
$D_s$	m	0,55	0,6	0,8	1,08
l	m	0,0595	0,08	0,16	0,38
$S_a$	m <sup>2</sup>	0,10	0,15	0,40	1,29
u	m/s	172,79	188,50	251,33	339,29
$U_{patní}$	m/s	154,10	163,36	201,06	219,91
$h_{iz}$ (odhad)	kJ/kg	100,00	120,00	133,00	215,00
$v_{vz}$	m <sup>3</sup> /kg	0,38	0,63	1,87	6,55
$C_a$	m/s	43,77	48,78	54,49	59,43
$(C_a / u)$	-	0,25	0,26	0,22	0,18

$\alpha_1$	°	7,50	7,50	8,50	7,50
Pa	-	0,30	0,29	0,46	0,53
$h_{iz}$ (výpočet)	kJ/kg	98,53	120,90	136,41	216,11
M	kg/s	11,69	11,69	11,69	11,69
$p_0$	bar	4,76	2,73	1,31	0,53
$i_0$	kJ/kg	2704,81	2616,14	2507,32	2384,56
$t_0$	°	149,97	130,30	107,30	82,72
$v_0$	m <sup>3</sup> /kg	0,39	0,63	1,21	2,72
$s_0$	kJ/kg*K	6,74	6,76	6,80	6,83
$x_0$	-	0,98	0,95	0,92	0,89
$p_1$	bar	3,62	1,90	0,84	0,24
$i_1$	kJ/kg	2660,47	2561,73	2445,94	2287,31
$t_1$	°	140,01	118,63	94,82	64,12
$v_1$	m <sup>3</sup> /kg	0,49	0,87	1,80	5,53
$s_1$	kJ/kg*K	6,75	6,78	6,82	6,87
$x_1$	-	0,97	0,94	0,90	0,86
$p_2$	bar	2,73	1,31	0,53	0,10
$i_2$	kJ/kg	2616,14	2507,32	2384,56	2190,06
$t_2$	°C	130,30	107,30	82,72	46,40
$v_2$	m <sup>3</sup> /kg	0,63	1,21	2,72	11,90
$s_2$	kJ/kg*K	6,76	6,80	6,83	6,90
$x_2$	-	0,95	0,92	0,89	0,83
$C_{1a}=C_{2a}=W_{1a}=W_{2a}$	m/s	43,77	48,78	54,49	59,43
$c_1$	m/s	335,33	373,70	368,64	455,34
$w_1$	m/s	165,56	188,43	125,69	126,93
$\beta_1$	°	15,33	15,00	25,69	27,92
$w_{2\_iz}$	m/s	354,88	395,49	390,13	481,89
$w_2$	m/s	312,29	348,03	343,32	424,06
$\beta_2$	°	8,06	8,06	9,13	8,06
$c_2$	m/s	143,27	163,54	103,20	100,13
$\alpha_2$	°	17,79	17,35	31,87	36,41
$c_{1u}$	m/s	332,46	370,50	364,59	451,45
$w_{1u}$	m/s	159,67	182,01	113,26	112,16
$c_{2u}$	m/s	136,42	156,10	87,64	80,59
$w_{2u}$	m/s	309,21	344,59	338,96	419,88
$D_v$	m	0,61	0,68	0,96	1,46
$x$	mm	0,20	0,20	0,30	0,35
$k$	mm	0,81	0,88	1,26	1,81
$l$	mm	59,50	80,00	160,00	380,00
$\xi_k$	-	0,08	0,07	0,04	0,02
$\xi_v$	-	0,11	0,13	0,20	0,35
$x_0$	-	0,98	0,95	0,92	0,89
$x_2$	-	0,95	0,92	0,89	0,83
$\xi_x$	-	0,03	0,06	0,10	0,14
$\eta_{inf}$	-	0,80	0,80	0,88	0,91
$\eta_{ST}$	-	0,62	0,59	0,58	0,44

Účinnosti průtočné oblasti turbíny lze definovat po jejích jednotlivých oblastech. Při návrhu úseku NT1 bylo dosaženo účinnosti **90,01 %**, při návrhu úseku NT2 účinnosti **93,13 %** a návrhu úseku NT3 účinnosti **90,55 %**. Při počítání účinnosti průtočné části NT dílu jako celku bylo dosaženo **90,40 %**. Se započítáním vstupní a výstupní tlakové ztráty je pak účinnost celého dílu **89,59 %**.

## 4 Pevnostní výpočty

Tato kapitola se zabývá kontrolami oběžných lopatek, jejich závěsů a rozváděcích lopatek. Jejich rozměry jsou navrženy v kapitole 3. V případě příliš velkých namáhání (nemožné opravit změnou profilu lopatky ani kvalitnějším materiálem) je zapotřebí měnit rozměry lopatek nebo otáčky rotoru, dokud nebude lopatkování konstrukčně proveditelné. Rovněž je provedena kontrola hřídele na krut (v oblasti ložiska) a kontrola kritických otáček obou rotorů.

### 4.1 Volené profily a materiály lopatek

Profily lopatek byly voleny z přílohy č. 10. Zde uvedené profily jsou aplikovatelné jako rozváděcí i oběžné lopatky (kvůli konvenční hodnotě reakce stupně přetlakového lopatkování  $\rho = 0,5$ ). Volené materiály byly vybrány z přílohy č. 11. [1] [4]

Pro snížení ceny turbíny byla snaha profily a použité materiály co nejvíce unifikovat. Nicméně kvůli přílišným požadavkům na pevnost některých stupňů bylo nutné pro splnění pevnostních podmínek použít pevnější lopatku nebo tepelně odolnější materiál.

### 4.2 Kontrola oběžných lopatek

Pro účely kontroly pevnosti oběžných lopatek je nutné určit jejich ohybové a tahové namáhání. Metodika výpočtu je rozepsána v následujících kapitolách.

#### 4.2.1 Namáhání ohybem

Z tabulky profilů (viz. příloha č. 10) byly vyčteny následující parametry:

$B$  [mm],  $s$  [mm],  $c$  [mm],  $\gamma$  [°],  $W_{\min}$  [cm<sup>3</sup>],  $S$  [cm<sup>2</sup>]

Upravená délka oběžné lopatky:

$$L_{OL} = L_{RL} + \Delta L \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

Počet lopatek:

$$z' = \frac{\pi * D_p}{s} [-] \quad (4.2)$$

Zaokrouhlením na nejbližší vyšší celé číslo je znám skutečný počet lopatek  $z$ .

Rozteč lopatek:

$$t_{OL} = \frac{\pi * D_S}{z} [-] \quad (4.3)$$

Obvodová síla:

$$F_u = \dot{m} * \frac{c_{1u} - c_{2u}}{z} \text{ [N]} \quad (4.4)$$

Axiální síla:

$$F_a = \frac{\dot{m}_p * (c_{1a} - c_{2a}) + \pi * (D_{s1} * L_{10L} * p_1 - D_{s2} * L_{20L} * p_2)}{z_{OL}} \text{ [N]} \quad (4.5)$$

Tlakový rozdíl působící na oběžnou lopatku (na středním průměru):

$$\Delta p = p_1 - p_2 \text{ [bar]} \quad (4.6)$$

$$p_1 = f(i_1; s_0) \text{ [bar]} \quad (4.7)$$

$$i_1 = i_0 - h_{iz} * (1 - R_s) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (4.8)$$

Celková ohybová síla:

$$F = \sqrt{F_u^2 + F_a^2} \text{ [N]} \quad (4.9)$$

Maximální ohybový moment:

$$M_{max} = F * \frac{L_{OL}}{2} \text{ [Nm]} \quad (4.10)$$

Ohybové napětí v lopatce:

$$\sigma_o = \frac{M_{max}}{W_{OL}} \text{ [MPa]} \quad (4.11)$$

Míra namáhání v ohybu by pro lopatky s parciálním ostřikem nemělo přesáhnout 18 MPa. Pro stupně s totálním ostřikem se tento limit pohybuje v rozmezí 36 až 40 MPa. [4]

#### 4.2.2 Namáhání tahem

Hmotnost lopatky:

$$m_{OL} = \rho_o * S_{OL} * L_{OL} \text{ [kg]} \quad (4.12)$$

Hustota oceli je volena na  $\rho_o = 7850 \text{ kg/m}^3$ .

Otáčky rotoru při zásahu pojistného regulátoru:

$$n' = 1,1 * n \left[ \frac{1}{\text{min}} \right] \quad (4.13)$$

Úhlová rychlost při zásahu regulátoru:

$$\omega' = \left( \frac{\pi * n'}{30} \right) \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (4.14)$$

Odstředivá síla působící na list lopatky:

$$O_{OL} = m_{OL} * \frac{D_s}{2} * \omega'^2 [N] \quad (4.15)$$

Hmotnost bandáže:

$$m_b = \rho_o * \pi * D_b * B * b * \frac{1}{z} [kg] \quad (4.16)$$

Odstředivá síla způsobená hmotností bandáže:

$$O_b = m_b * \frac{D_b}{2} * \omega'^2 [N] \quad (4.17)$$

Celková odstředivá síla působící na oběžnou lopatku:

$$O_C = O_{OL} + O_b [N] \quad (4.18)$$

Celkové namáhání tahovou silou na patní průměr lopatky:

$$\sigma_t = \frac{O_C}{k * S_{OL}} [MPa] \quad (4.19)$$

k...součinitel odlehčení

### 4.2.3 Celkové namáhání oběžných lopatek

Celkové namáhání oběžných lopatek je složeno z ohybového a tahového napětí:

$$\sigma_C = 2 * \sigma_O + \sigma_t [MPa] \quad (4.20)$$

Musí být splněna pevnostní podmínka:

$$\sigma_C < \sigma_D \quad (4.21)$$

$\sigma_D$ ...dovolené napětí

Dovolené napětí je dáno typem voleného materiálu a provozní teploty. Teplota povrchu lopatky se může uvažovat o 50 °C nižší, než je teplota páry. [4] Konkrétní meze kluzu pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v příloze č. 11.

V Tabulka 18 až Tabulka 24 jsou obsaženy konkrétní hodnoty výše uvedených parametrů použitých oběžných lopatek.

Tabulka 18: Pevnostní výpočty OL - VT - 1. až 6. stupeň

Číslo stupně		1	2	3	4	5	6
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540	PB540	PB540
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>4</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$\gamma_{OL}$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
$\Delta L$	mm	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$L_{OL}$	mm	28,00	28,00	28,00	28,50	28,50	29,50
$B_{OL}$	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$z'$	-	28,59	28,59	28,59	28,51	29,27	29,12
z	-	29,00	29,00	29,00	29,00	29,00	29,00
$t_{OL}$	mm	23,29	23,29	23,29	23,29	23,83	23,83
$F_u$	N	40,38	40,38	40,40	40,57	41,23	41,21
$\Delta p$	bar	1,31	1,26	1,22	1,29	1,11	1,06
$F_a$	N	79,05	76,25	73,98	79,49	70,24	69,23
F	N	88,77	86,28	84,29	89,24	81,45	80,57
$M_{Omax}$	Nm	1,24	1,21	1,18	1,27	1,16	1,19
$\sigma_o$	Mpa	<b>8,64</b>	<b>8,39</b>	<b>8,20</b>	<b>8,84</b>	<b>8,07</b>	<b>8,26</b>
$\rho_{OL}$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
$m_{OL}$	kg	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$n'$	1/min	8800,00	8800,00	8800,00	8800,00	8800,00	8800,00
$\omega'$	rad/s	921,53	921,53	921,53	921,53	921,53	921,53
$O_{OL}$	N	3001,86	3001,86	3001,86	3055,46	3126,52	3236,22
b	mm	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$m_b$	kg	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$D_p$	m	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
$D_b$	m	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26
$O_b$	N	2978,98	2978,98	2978,98	2990,91	3111,50	3135,90
$O_c$	N	5980,84	5980,84	5980,84	6046,38	6238,02	6372,13
k	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sigma_t$	MPa	<b>39,98</b>	<b>39,98</b>	<b>39,98</b>	<b>40,42</b>	<b>41,70</b>	<b>42,59</b>
$\sigma_c$	MPa	<b>57,25</b>	<b>56,77</b>	<b>56,38</b>	<b>58,09</b>	<b>57,83</b>	<b>59,11</b>
$t_{OL}$	°C	391,07	384,21	377,32	370,06	362,83	356,02
Název materiálu	-	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6
$\sigma_D$	MPa	<b>123,00</b>	<b>123,00</b>	<b>123,00</b>	<b>137,00</b>	<b>137,00</b>	<b>137,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y	Y	Y



Tabulka 19: Pevnostní výpočty OL - VT - 7. až 11. stupeň

Číslo stupně		7	8	9	10	11
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540	PB560
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	3,23
$W_{OL}$	cm <sup>4</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,46
$\gamma_{OL}$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	25,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	30,55
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	45,60
$\Delta L$	mm	5,00	5,00	5,00	10,00	10,00
$L_{OL}$	mm	33,00	34,00	35,50	41,50	42,50
$B_{OL}$	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	40,80
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	3,23
$W_{OL}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,46
$z'$	-	29,80	30,40	30,93	32,29	23,39
z	-	30,00	30,00	31,00	32,00	23,00
$t_{OL}$	mm	23,56	24,09	23,82	24,05	35,51
$F_u$	N	40,67	41,68	40,95	40,88	53,61
$\Delta p$	bar	1,02	1,10	0,94	0,92	0,88
$F_a$	N	67,47	76,96	68,31	69,49	101,84
F	N	78,77	87,52	79,64	80,62	115,09
$M_{o_{max}}$	Nm	1,30	1,49	1,41	1,67	2,45
$\sigma_o$	MPa	<b>9,03</b>	<b>10,34</b>	<b>9,82</b>	<b>11,63</b>	<b>5,32</b>
$\rho_{OL}$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
$m_{OL}$	kg	0,04	0,04	0,04	0,05	0,11
$n'$	1/min	8800,00	8800,00	8800,00	8800,00	8800,00
$\omega'$	rad/s	921,53	921,53	921,53	921,53	921,53
$O_{OL}$	N	3702,46	3899,43	4159,97	5070,00	11896,71
b	mm	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$m_b$	kg	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07
$D_p$	m	0,20	0,20	0,20	0,21	0,23
$D_b$	m	0,27	0,27	0,28	0,30	0,32
$O_b$	N	3309,29	3459,12	3508,25	3926,55	9362,72
$O_c$	N	7011,75	7358,55	7668,21	8996,55	21259,43
k	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sigma_t$	MPa	<b>46,87</b>	<b>49,19</b>	<b>51,26</b>	<b>60,14</b>	<b>65,82</b>
$\sigma_c$	MPa	<b>64,93</b>	<b>69,87</b>	<b>70,91</b>	<b>83,39</b>	<b>76,45</b>
$t_{OL}$	°C	349,23	341,99	334,74	327,85	320,89
Název materiálu	-	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6
$\sigma_D$	MPa	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y	Y

Tabulka 20: Pevnostní výpočty OL – NT – NT1 – 1. až 6. stupeň

Číslo stupně		1	2	3	4	5	6
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540	PB540	PB540
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>4</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$\gamma_{OL}$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
$\Delta L$	mm	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$L_{OL}$	mm	31,00	31,00	31,00	31,50	32,00	33,00
$B_{OL}$	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$z'$	-	43,26	43,26	43,26	43,18	43,86	43,71
z	-	43,00	43,00	43,00	43,00	44,00	44,00
$t_{OL}$	mm	23,01	23,01	23,01	23,01	22,85	22,85
$F_u$	N	27,72	27,84	27,85	27,73	27,60	27,61
$\Delta p$	bar	0,75	0,81	0,78	0,66	0,70	0,67
$F_a$	N	50,29	53,92	51,91	44,75	47,78	47,45
F	N	57,42	60,68	58,91	52,65	55,18	54,90
$M_{Omax}$	Nm	0,89	0,94	0,91	0,83	0,88	0,91
$\sigma_o$	MPa	<b>6,19</b>	<b>6,54</b>	<b>6,35</b>	<b>5,76</b>	<b>6,14</b>	<b>6,29</b>
$\rho_{OL}$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
$m_{OL}$	kg	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
$n'$	1/min	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00
$\omega'$	rad/s	691,15	691,15	691,15	691,15	691,15	691,15
$O_{OL}$	N	2738,98	2738,98	2738,98	2783,16	2872,21	2961,97
b	mm	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$m_b$	kg	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$D_p$	m	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
$D_b$	m	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36
$O_b$	N	2253,15	2253,15	2253,15	2259,53	2277,43	2290,13
$O_c$	N	4992,13	4992,13	4992,13	5042,69	5149,64	5252,10
k	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sigma_t$	MPa	<b>33,37</b>	<b>33,37</b>	<b>33,37</b>	<b>33,71</b>	<b>34,42</b>	<b>35,11</b>
$\sigma_c$	MPa	<b>45,74</b>	<b>46,44</b>	<b>46,06</b>	<b>45,23</b>	<b>46,69</b>	<b>47,70</b>
$t_{OL}$	°C	310,95	303,81	296,21	289,00	281,83	274,26
Název materiálu	-	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6
$\sigma_D$	MPa	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

Tabulka 21: Pevnostní výpočty OL – NT – NT1 – 7. až 11. stupeň

Číslo stupně		7	8	9	10	11
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540	PB540
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>4</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$\gamma_{OL}$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
$\Delta L$	mm	5,00	5,00	5,00	10,00	10,00
$L_{OL}$	mm	37,00	39,50	42,00	50,00	53,50
$B_{OL}$	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
z'	-	44,32	43,94	44,32	44,62	45,60
z	-	44,00	44,00	44,00	45,00	46,00
$t_{OL}$	mm	23,20	23,20	23,56	23,39	23,56
$F_u$	N	27,90	28,01	28,40	26,46	28,30
$\Delta p$	bar	0,57	0,61	0,58	0,49	0,52
$F_a$	N	42,66	48,55	50,20	45,56	53,14
F	N	50,97	56,04	57,68	52,69	60,20
$M_{Omax}$	Nm	0,94	1,11	1,21	1,32	1,61
$\sigma_o$	MPa	<b>6,55</b>	<b>7,69</b>	<b>8,42</b>	<b>9,15</b>	<b>11,19</b>
$\rho_{OL}$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
$m_{OL}$	kg	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06
n'	1/min	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00
$\omega'$	rad/s	691,15	691,15	691,15	691,15	691,15
$O_{OL}$	N	3372,88	3600,78	3887,58	4698,20	5177,13
b	mm	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$m_b$	kg	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$D_p$	m	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30
$D_b$	m	0,37	0,37	0,38	0,40	0,41
$O_b$	N	2445,35	2478,33	2578,59	2764,50	2890,03
$O_c$	N	5818,24	6079,11	6466,17	7462,69	8067,16
k	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sigma_t$	MPa	<b>38,89</b>	<b>40,64</b>	<b>43,22</b>	<b>49,88</b>	<b>53,92</b>
$\sigma_c$	MPa	<b>52,00</b>	<b>56,02</b>	<b>60,06</b>	<b>68,19</b>	<b>76,31</b>
$t_{OL}$	°C	267,01	259,77	252,14	244,94	237,74
Název materiálu	-	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6
$\sigma_D$	MPa	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

Tabulka 22: Pevnostní výpočty OL – NT – NT2 – 12. až 16. stupeň

Číslo stupně		12	13	14	15	16
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540	PB540
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>4</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$\gamma_{OL}$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
$\Delta L$	mm	2,00	2,00	2,00	2,00	5,00
$L_{OL}$	mm	37,00	37,00	38,00	39,50	44,50
$B_{OL}$	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$z'$	-	49,16	49,16	49,01	49,54	50,75
z	-	49,00	49,00	49,00	50,00	51,00
$t_{OL}$	mm	23,08	23,08	23,08	22,93	23,10
$F_u$	N	29,01	28,89	29,02	28,79	28,81
$\Delta p$	bar	0,76	0,64	0,64	0,59	0,49
$F_a$	N	61,75	51,62	53,49	50,34	44,41
F	N	68,22	59,15	60,85	57,99	52,93
$M_{Omax}$	Nm	1,26	1,09	1,16	1,15	1,18
$\sigma_o$	MPa	<b>8,77</b>	<b>7,60</b>	<b>8,03</b>	<b>7,96</b>	<b>8,18</b>
$\rho_{OL}$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
$m_{OL}$	kg	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
$n'$	1/min	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00
$\omega'$	rad/s	691,15	691,15	691,15	691,15	691,15
$O_{OL}$	N	3736,12	3736,12	3837,09	4043,96	4680,67
b	mm	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$m_b$	kg	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$D_p$	m	0,33	0,33	0,32	0,33	0,34
$D_b$	m	0,40	0,40	0,41	0,41	0,43
$O_b$	N	2589,85	2589,85	2602,69	2633,17	2812,32
$O_c$	N	6325,97	6325,97	6439,78	6677,12	7492,99
k	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sigma_t$	MPa	<b>42,29</b>	<b>42,29</b>	<b>43,05</b>	<b>44,63</b>	<b>50,09</b>
$\sigma_c$	MPa	<b>59,83</b>	<b>57,50</b>	<b>59,12</b>	<b>60,55</b>	<b>66,46</b>
$t_{OL}$	°C	231,32	219,37	207,43	194,94	183,03
Název materiálu	-	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6	PAK 1.6
$\sigma_D$	MPa	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>186,00</b>	<b>186,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

Tabulka 23: Pevnostní výpočty OL – NT – NT2 – 17. až 20. stupeň

Číslo stupně		17	18	19	20
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>4</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14
$\gamma_{OL}$	°	30,00	30,00	30,00	30,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00
$\Delta L$	mm	5,00	5,00	10,00	10,00
$L_{OL}$	mm	48,50	53,00	64,50	69,50
$B_{OL}$	mm	26,40	26,40	26,40	26,40
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50
$W_{OL}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14
$z'$	-	51,65	54,00	56,80	62,85
z	-	52,00	54,00	57,00	63,00
$t_{OL}$	mm	23,26	23,56	23,70	23,69
$F_u$	N	29,08	29,20	29,34	22,95
$\Delta p$	bar	0,50	0,40	0,40	0,32
$F_a$	N	50,09	45,43	51,75	44,74
F	N	57,92	54,01	59,49	50,28
$M_{Omax}$	Nm	1,40	1,43	1,92	1,75
$\sigma_o$	MPa	<b>9,76</b>	<b>9,95</b>	<b>13,33</b>	<b>12,14</b>
$\rho_{OL}$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
$m_{OL}$	kg	0,06	0,06	0,08	0,08
$n'$	1/min	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00
$\omega'$	rad/s	691,15	691,15	691,15	691,15
$O_{OL}$	N	5237,44	6020,70	7779,37	9259,65
b	mm	5,00	5,00	5,00	5,00
$m_b$	kg	0,03	0,03	0,03	0,03
$D_p$	m	0,34	0,36	0,38	0,42
$D_b$	m	0,44	0,47	0,51	0,56
$O_b$	N	2940,98	3153,60	3540,97	3863,39
$O_c$	N	8178,42	9174,30	11320,34	13123,04
k	-	1,00	1,00	1,00	1,00
$\sigma_t$	MPa	<b>54,67</b>	<b>61,33</b>	<b>75,67</b>	<b>87,72</b>
$\sigma_c$	MPa	<b>74,19</b>	<b>81,22</b>	<b>102,34</b>	<b>112,01</b>
$t_{OL}$	°C	171,05	163,38	158,20	153,08
Název materiálu	-	PAK 1.6	PAK 1.6	P-AK 1 TD	P-AK 1 TD
$\sigma_D$	MPa	<b>186,00</b>	<b>186,00</b>	<b>260,00</b>	<b>260,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

Tabulka 24: Pevnostní výpočty OL – NT – NT3 – 21. až 24. stupeň

Číslo stupně		21	22	23	24
Označení profilu		PB540	PB540	PB550	1500
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	2,39	32,20
$W_{OL}$	cm <sup>4</sup>	0,14	0,14	0,29	16,40
$\gamma_{OL}$	°	30,00	30,00	30,00	17,50
s	mm	20,77	20,77	26,26	8,00
c	mm	31,00	31,00	39,20	12,00
$\Delta L$	mm	5,00	5,00	10,00	10,00
$L_{OL}$	mm	64,50	85,00	170,00	390,00
$B_{OL}$	mm	26,40	26,40	33,40	11,20
$S_{OL}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	2,39	32,20
$W_{OL}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,29	16,40
$z'$	-	74,19	78,65	76,55	274,89
$z$	-	74,00	79,00	77,00	275,00
$t_{OL}$	mm	23,35	23,86	32,64	12,34
$F_u$	N	30,98	31,74	42,06	15,77
$\Delta p$	bar	0,89	0,59	0,31	0,14
$F_a$	N	123,54	113,31	162,67	64,53
F	N	127,37	117,68	168,02	66,43
$M_{O_{max}}$	Nm	4,11	5,00	14,28	12,95
$\sigma_o$	MPa	<b>28,55</b>	<b>34,75</b>	<b>48,99</b>	<b>0,79</b>
$\rho_{OL}$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
$m_{OL}$	kg	0,08	0,10	0,32	9,86
$n'$	1/min	6600,00	6600,00	6600,00	6600,00
$\omega'$	rad/s	691,15	691,15	691,15	691,15
$O_{OL}$	N	9950,36	14304,96	60815,19	2542898,36
b	mm	5,00	5,00	5,00	5,00
$m_b$	kg	0,03	0,03	0,05	0,01
$D_p$	m	0,49	0,52	0,64	0,70
$D_b$	m	0,62	0,70	0,99	1,49
$O_b$	N	4097,71	4753,91	12394,61	2645,10
$O_c$	N	14048,07	19058,87	73209,80	2545543,47
k	-	1,00	1,00	1,80	2,90
$\sigma_t$	MPa	<b>93,90</b>	<b>127,40</b>	<b>170,53</b>	<b>272,60</b>
$\sigma_c$	MPa	<b>150,99</b>	<b>196,91</b>	<b>268,52</b>	<b>274,18</b>
$t_{OL}$	°C	140,01	118,63	94,82	64,12
Název materiálu	-	P-AK 1 TD	P-AK 1 TD	P-AK 1 TD	P-AK 1 TD
$\sigma_D$	MPa	<b>260,00</b>	<b>260,00</b>	<b>275,00</b>	<b>275,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

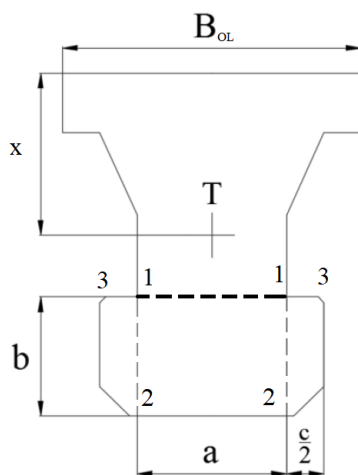
### 4.3 Volba a kontrola závěsů oběžných lopatek

Závěsy lopatek byly s ohledem na náročnost výroby a přeneseně tedy cenu volené primárně typu „T“. Pro oběžné lopatky nesplňující pevnostní podmínky byly použity závěsy vidličkové. Pro zajištění montáže je ovšem pro bubnové provedení dílu možno tento typ závěsu použít pouze pro poslední stupně. Pro předchozí stupně není možno aplikovat pojistné kolíky.

Tyto dvě koncepce pro účely diplomové práce postačily kromě posledního stupně. V případě zvýšené potřeby o pevnost závěsu je možné využít stromečkové závěsy. Jejich detailní návrh je ovšem střeženým firemním tajemstvím nejen firmy Doosan Škoda Power, ale i ostatních konstrukčních společností zaměřující se na lopátkové stroje.

#### 4.3.1 Výpočet závěsu typu „T“

Závěs typu „T“ představuje typické provedení uchycení oběžné lopatky do turbínového rotoru pro vysokotlaké části turbíny. Na Obrázek 16 je znázorněn příčný řez se základními rozměry potřebnými k pevnostním výpočtům (kontrola na tah, smyk a otláčení) uvedených v této kapitole:



Obrázek 16: Závěs lopatky typu "T" [5]

Průměr polohy těžiště závěsu:

$$D_T = D_p - 2 * x \text{ [mm]} \quad (4.22)$$

Hodnota  $x$  je vzdálenost polohy těžiště od paty lopatky. Hodnota tohoto parametru byla určena vykreslením lopátkového závěsu pomocí programu AutoCAD.

Rozteč těžiště závěsu:

$$t_T = \frac{\pi * D_T}{z} \text{ [mm]} \quad (4.23)$$

Hmotnost závěsu:

$$m_Z = \rho_o * t_T * S_Z \text{ [kg]} \quad (4.24)$$

$S_Z$  je plocha závěsu (opět zjištěna pomocí programu AutoCAD).

Odstředivá síla od hmotnosti závěsu:

$$O_Z = m_Z * \frac{D_T}{2} * \omega'^2 [N] \quad (4.25)$$

Celková odstředivá síla působící na lopatkový závěs:

$$O_C = O_{OL} + O_b + O_Z [N] \quad (4.26)$$

Plocha kritického průřezu namáhaného na tah (na Obrázek 16 jde o průřez 1-1):

$$A_{11} = a * t_T [mm^2] \quad (4.27)$$

Maximální tahové namáhání závěsu:

$$\sigma_{TZ} = \frac{O_C}{A_{11}} [MPa] \quad (4.28)$$

Pevnostní kontrola pro tahové namáhání na závěsu typu „T“:

$$\sigma_{TZ} < \sigma_D \quad (4.29)$$

$\sigma_D$ ...dáno voleným materiálem a provozní teplotou

Plocha kritického průřezu namáhaného na smyk (na Obrázek 16 jde o průřez 1-2):

$$A_{12} = b * t_T [mm^2] \quad (4.30)$$

Smykové namáhání:

$$\tau = \frac{O_C}{2 * A_{12}} [MPa] \quad (4.31)$$

Pevnostní kontrola pro smykové namáhání na závěsu typu „T“:

$$\tau < (0,6 \div 0,7) * \sigma_D \quad (4.32)$$

Plocha kritického průřezu namáhaného na otláčení (na Obrázek 16 jde o průřez 1-3):

$$A_{13} = c * t_T [mm^2] \quad (4.33)$$



Namáhání otláčením:

$$p = \frac{O_c}{A_{13}} [MPa] \quad (4.34)$$

Pevnostní kontrola pro otláčení na závěsu typu „T“:

$$p < (150 \div 200) [MPa] \quad (4.35)$$

Pokud jsou splněny veškeré pevnostní podmínky uvedené v této kapitole ((4.29), (4.32) a (4.35)), zvolený profil „T“ vyhovuje z hlediska pevnosti. V případě porušení jedné z podmínek, je zapotřebí použít jiný typ závěsu (vidličkový nebo stromečkový) nebo zvolit materiál s vyšší tepelnou odolností. V Tabulka 25 až Tabulka 30 jsou uvedeny konkrétní hodnoty pro pevnostní kontrolu závěsů typu „T“.

Tabulka 25: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – VT – 1. až 6. stupeň

Číslo stupně		1	2	3	4	5	6
B <sub>0</sub>	mm	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
x	mm	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
D <sub>t</sub>	m	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16
t <sub>T</sub>	m	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
S <sub>z</sub>	mm <sup>2</sup>	640,00	640,00	640,00	640,00	640,00	640,00
m <sub>z</sub>	kg	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
O <sub>z</sub>	N	6020,06	6020,06	6020,06	5982,82	6360,44	6283,99
O <sub>c</sub>	N	12000,91	12000,91	12000,91	12029,20	12598,46	12656,12
a	mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>11</sub>	mm <sup>2</sup>	209,82	209,82	209,82	209,17	215,66	214,36
σ <sub>taħ</sub>	MPa	<b>57,20</b>	<b>57,20</b>	<b>57,20</b>	<b>57,51</b>	<b>58,42</b>	<b>59,04</b>
σ <sub>D</sub>	MPa	<b>123,00</b>	<b>123,00</b>	<b>123,00</b>	<b>137,00</b>	<b>137,00</b>	<b>137,00</b>
b	mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>12</sub>	mm <sup>2</sup>	209,82	209,82	209,82	209,17	215,66	214,36
τ	MPa	<b>28,60</b>	<b>28,60</b>	<b>28,60</b>	<b>28,76</b>	<b>29,21</b>	<b>29,52</b>
τ <sub>D</sub>	MPa	<b>79,95</b>	<b>79,95</b>	<b>79,95</b>	<b>89,05</b>	<b>89,05</b>	<b>89,05</b>
c	mm	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
A <sub>13</sub>	mm <sup>2</sup>	104,91	104,91	104,91	104,58	107,83	107,18
p	MPa	<b>114,40</b>	<b>114,40</b>	<b>114,40</b>	<b>115,02</b>	<b>116,83</b>	<b>118,08</b>
p <sub>D</sub> (150 - 200 MPa)	MPa	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

Tabulka 26: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – VT – 7. až 11. stupeň

Číslo stupně		7	8	9	10	11
B <sub>0</sub>	mm	30,00	30,00	30,00	30,00	40,00
x	mm	13,80	13,80	13,80	13,80	16,20
D <sub>t</sub>	m	0,17	0,17	0,18	0,19	0,20
t <sub>T</sub>	m	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
S <sub>z</sub>	mm <sup>2</sup>	640,00	640,00	640,00	640,00	946,00
m <sub>z</sub>	kg	0,09	0,09	0,09	0,09	0,20
O <sub>z</sub>	N	6410,58	6716,90	6765,28	7237,71	16394,19
O <sub>c</sub>	N	13422,33	14075,45	14433,50	16234,25	37653,62
a	mm	12,00	12,00	12,00	12,00	14,00
A <sub>11</sub>	mm <sup>2</sup>	212,87	217,90	215,13	219,01	373,08
σ <sub>tah</sub>	MPa	<b>63,05</b>	<b>64,60</b>	<b>67,09</b>	<b>74,13</b>	<b>100,93</b>
σ <sub>D</sub>	MPa	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>
b	mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>12</sub>	mm <sup>2</sup>	212,87	217,90	215,13	219,01	319,79
τ	MPa	<b>31,53</b>	<b>32,30</b>	<b>33,55</b>	<b>37,06</b>	<b>58,87</b>
τ <sub>D</sub>	MPa	<b>102,05</b>	<b>102,05</b>	<b>102,05</b>	<b>102,05</b>	<b>102,05</b>
c	mm	6,00	6,00	6,00	6,00	10,80
A <sub>13</sub>	mm <sup>2</sup>	106,44	108,95	107,56	109,50	287,81
p	MPa	<b>126,11</b>	<b>129,19</b>	<b>134,19</b>	<b>148,25</b>	<b>130,83</b>
p <sub>D</sub> (150 - 200 MPa)	MPa	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>200,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y	Y

Tabulka 27: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – NT – NT1 – 1. až 6. stupeň

Číslo stupně		1	2	3	4	5	6
B <sub>0</sub>	mm	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
x	mm	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
D <sub>t</sub>	m	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
t <sub>T</sub>	m	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
S <sub>z</sub>	mm <sup>2</sup>	640,00	640,00	640,00	640,00	640,00	640,00
m <sub>z</sub>	kg	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
O <sub>z</sub>	N	5853,71	5853,71	5853,71	5831,08	5899,15	5854,27
O <sub>c</sub>	N	10845,84	10845,84	10845,84	10873,77	11048,79	11106,38
a	mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>11</sub>	mm <sup>2</sup>	226,55	226,55	226,55	226,11	224,82	223,97
σ <sub>tah</sub>	MPa	<b>47,87</b>	<b>47,87</b>	<b>47,87</b>	<b>48,09</b>	<b>49,14</b>	<b>49,59</b>
σ <sub>D</sub>	MPa	<b>157,00</b>	<b>157,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>
b	mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>12</sub>	mm <sup>2</sup>	226,55	226,55	226,55	226,11	224,82	223,97
τ	MPa	<b>23,94</b>	<b>23,94</b>	<b>23,94</b>	<b>24,05</b>	<b>24,57</b>	<b>24,79</b>
τ <sub>D</sub>	MPa	<b>102,05</b>	<b>102,05</b>	<b>111,80</b>	<b>111,80</b>	<b>111,80</b>	<b>111,80</b>
c	mm	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
A <sub>13</sub>	mm <sup>2</sup>	113,27	113,27	113,27	113,05	112,41	111,98
p	MPa	<b>95,75</b>	<b>95,75</b>	<b>95,75</b>	<b>96,18</b>	<b>98,29</b>	<b>99,18</b>
p <sub>D</sub> (150 - 200 MPa)	MPa	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Tabulka 28: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – NT – NT1 – 7. až 11. stupeň

Číslo stupně		7	8	9	10	11
B <sub>0</sub>	mm	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
x	mm	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
D <sub>t</sub>	m	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27
t <sub>τ</sub>	m	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
S <sub>z</sub>	mm <sup>2</sup>	640,00	640,00	640,00	640,00	640,00
m <sub>z</sub>	kg	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09
O <sub>z</sub>	N	6034,81	5921,66	6034,81	5989,97	6148,10
O <sub>c</sub>	N	11853,05	12000,77	12500,99	13452,67	14215,26
a	mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>11</sub>	mm <sup>2</sup>	227,39	225,25	227,39	224,02	224,47
σ <sub>tah</sub>	MPa	<b>52,13</b>	<b>53,28</b>	<b>54,97</b>	<b>60,05</b>	<b>63,33</b>
σ <sub>D</sub>	MPa	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>
b	Mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>12</sub>	mm <sup>2</sup>	227,39	225,25	227,39	224,02	224,47
τ	MPa	<b>26,06</b>	<b>26,64</b>	<b>27,49</b>	<b>30,03</b>	<b>31,66</b>
τ <sub>D</sub>	MPa	<b>111,80</b>	<b>111,80</b>	<b>111,80</b>	<b>111,80</b>	<b>111,80</b>
c	Mm	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
A <sub>13</sub>	mm <sup>2</sup>	113,70	112,63	113,70	112,01	112,24
p	MPa	<b>104,25</b>	<b>106,55</b>	<b>109,95</b>	<b>120,10</b>	<b>126,65</b>
p <sub>D</sub> (150 - 200 MPa)	MPa	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y	Y

Tabulka 29: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – NT – NT2 – 12. až 16. stupeň

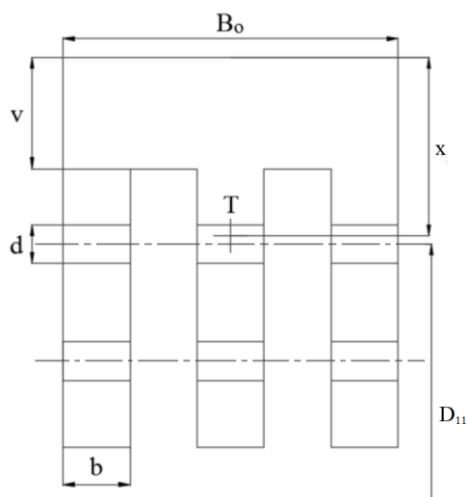
Číslo stupně		12	13	14	15	16
B <sub>0</sub>	mm	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
x	mm	13,80	13,80	13,80	13,80	13,80
D <sub>t</sub>	m	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31
t <sub>τ</sub>	m	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
S <sub>z</sub>	mm <sup>2</sup>	640,00	640,00	640,00	640,00	640,00
m <sub>z</sub>	kg	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10
O <sub>z</sub>	N	6804,57	6804,57	6758,88	6781,06	7007,51
O <sub>c</sub>	N	13130,54	13130,54	13198,67	13458,18	14500,50
a	mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>11</sub>	mm <sup>2</sup>	228,81	228,81	228,04	226,12	227,60
σ <sub>tah</sub>	MPa	<b>57,39</b>	<b>57,39</b>	<b>57,88</b>	<b>59,52</b>	<b>63,71</b>
σ <sub>D</sub>	MPa	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>172,00</b>	<b>186,00</b>	<b>186,00</b>
b	Mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>12</sub>	mm <sup>2</sup>	228,81	228,81	228,04	226,12	227,60
τ	MPa	<b>28,69</b>	<b>28,69</b>	<b>28,94</b>	<b>29,76</b>	<b>31,86</b>
τ <sub>D</sub>	MPa	<b>111,80</b>	<b>111,80</b>	<b>111,80</b>	<b>120,90</b>	<b>120,90</b>
c	Mm	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
A <sub>13</sub>	mm <sup>2</sup>	114,41	114,41	114,02	113,06	113,80
p	MPa	<b>114,77</b>	<b>114,77</b>	<b>115,76</b>	<b>119,04</b>	<b>127,42</b>
p <sub>D</sub> (150 - 200 MPa)	MPa	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y	Y

Tabulka 30: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – NT – NT2/NT3 – 17. až 21. stupeň

Číslo stupně		17	18	19	20	21
B <sub>0</sub>	mm	30,00	30,00	40,00	40,00	40,00
x	mm	13,80	13,80	16,20	16,20	16,20
D <sub>t</sub>	m	0,31	0,33	0,34	0,38	0,46
t <sub>r</sub>	m	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
S <sub>z</sub>	mm <sup>2</sup>	640,00	640,00	946,00	946,00	946,00
m <sub>z</sub>	kg	0,10	0,10	0,14	0,14	0,14
O <sub>z</sub>	N	7143,22	7574,75	11507,80	12981,04	15802,09
O <sub>c</sub>	N	15321,64	16749,05	22828,14	26104,08	29850,17
a	mm	12,00	12,00	14,00	14,00	14,00
A <sub>11</sub>	mm <sup>2</sup>	227,57	229,96	264,74	267,45	272,27
<b>σ<sub>tah</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>67,33</b>	<b>72,83</b>	<b>86,23</b>	<b>97,60</b>	<b>109,63</b>
<b>σ<sub>D</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>186,00</b>	<b>186,00</b>	<b>260,00</b>	<b>260,00</b>	<b>260,00</b>
b	Mm	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
A <sub>12</sub>	mm <sup>2</sup>	227,57	229,96	226,92	229,25	233,38
<b>τ</b>	<b>MPa</b>	<b>33,66</b>	<b>36,42</b>	<b>50,30</b>	<b>56,93</b>	<b>63,95</b>
<b>τ<sub>D</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>120,90</b>	<b>120,90</b>	<b>169,00</b>	<b>169,00</b>	<b>169,00</b>
c	Mm	6,00	6,00	10,80	10,80	10,80
A <sub>13</sub>	mm <sup>2</sup>	113,79	114,98	204,23	206,32	210,04
<b>p</b>	<b>MPa</b>	<b>134,65</b>	<b>145,67</b>	<b>111,78</b>	<b>126,52</b>	<b>142,12</b>
<b>p<sub>D</sub> (150 - 200 MPa)</b>	<b>MPa</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>	<b>150,00</b>
<b>Splnění pevnostní podmínky</b>	<b>Y/N</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

#### 4.3.2 Výpočet vidličkového závěsu

Pro delší lopatky dochází k nárůstu odstředivých sil působících na závěs. Tyto navýšené pevnostní požadavky je možno vyřešit odolnějším vidličkovým provedením. Na Obrázek 17 je naznačeno jeho provedení:



Obrázek 17: Vidličkový závěs [5]

Pevnostní výpočet vidličkového závěsu je analogický k výpočtu závěsu typu „T“ popsaného v kapitole 4.3.1. Odlišnosti jsou pouze v definicích ploch namáhané na kontrolované typy namáhání.

Průměr polohy těžiště závěsu:

$$D_T = D_P - 2 * x \text{ [mm]} \quad (4.36)$$

Hodnota  $x$  je vzdálenost polohy těžiště od paty lopatky. Hodnota tohoto parametru byla určena vykreslením lopatkového závěsu pomocí programu AutoCAD.

Rozteč těžiště závěsu:

$$t_T = \frac{\pi * D_T}{z} \text{ [mm]} \quad (4.37)$$

Hmotnost závěsu:

$$m_Z = \rho_o * t_T * S_Z \text{ [kg]} \quad (4.38)$$

$S_Z$  je plocha závěsu (opět zjištěna pomocí programu AutoCAD).

Odstředivá síla od hmotnosti závěsu:

$$O_Z = m_Z * \frac{D_T}{2} * \omega'^2 \text{ [N]} \quad (4.39)$$

Celková odstředivá síla působící na lopatkový závěs:

$$O_C = O_{OL} + O_b + O_Z \text{ [N]} \quad (4.40)$$

Rozteč průřezu 1-1:

$$t_{11} = \frac{\pi * D_{11}}{z} \text{ [mm]} \quad (4.41)$$

Plocha kritického průřezu namáhaného na tah (na ilustraci Obrázek 17 jde o průřez na průměru  $D_{11}$ ):

$$A_{11} = n_v * b * (t_{11} - d) \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.42)$$

$n_v \dots$  počet vidlic

Maximální tahové namáhání závěsu:

$$\sigma_T = \frac{O_C}{A_{11}} \text{ [MPa]} \quad (4.43)$$

Pevnostní kontrola pro tahové namáhání na vidličkovém závěsu:

$$\sigma_T < \sigma_D \quad (4.44)$$

$\sigma_D$ ...dáno voleným materiálem a provozní teplotou

Plocha průřezu kolíků namáhaných na smyk:

$$A_k = 2 * n_v * n_k * \frac{\pi * d^2}{4} [mm^2] \quad (4.45)$$

$n_k$ ...počet kolíků

Smykové namáhání:

$$\tau = \frac{O_C}{A_k} [MPa] \quad (4.46)$$

Pevnostní kontrola pro smykové namáhání na vidličkovém závěsu:

$$\tau < (0,6 \div 0,7) * \sigma_D \quad (4.47)$$

Plocha kritického průřezu namáhaného na otláčení (mezi kolíky a vidličkovým závěsem):

$$A_p = n_v * b * d [mm^2] \quad (4.48)$$

Namáhání otláčením:

$$p = \frac{O_C}{A_p} [MPa] \quad (4.49)$$

Pevnostní kontrola pro otláčení na závěsu typu „T“:

$$p < 1,5 * \sigma_D [MPa] \quad (4.50)$$

V Tabulka 31 jsou uvedeny konkrétní hodnoty pevnostních výpočtů použitých vidličkových závěsů.

Tabulka 31: Pevnostní výpočet vidličkových závěsů – NT – NT3 – 22. až 23. stupeň

Číslo stupně		22	23
Bo	mm	50,00	50,00
v	mm	12,00	12,00
b	mm	11,00	11,00
d	mm	10,00	10,00
n <sub>v</sub>	-	3,00	4,00
n <sub>k</sub>	-	2,00	2,00
X	mm	28,00	28,00
D <sub>t</sub>	m	0,46	0,58
t <sub>T</sub>	m	0,02	0,02
S <sub>z</sub>	mm <sup>2</sup>	2211,00	2211,00
m <sub>z</sub>	kg	0,32	0,41
O <sub>z</sub>	N	35492,15	57684,40
O <sub>c</sub>	N	54551,01	130894,19
(D <sub>p</sub> - D <sub>11</sub> )	mm	30,00	30,00
D <sub>11</sub>	mm	490,00	610,00
t <sub>11</sub>	mm	19,49	24,89
A <sub>t</sub>	mm <sup>2</sup>	278,91	608,39
<b>σ<sub>t</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>195,58</b>	<b>215,15</b>
<b>σ<sub>D</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>260,00</b>	<b>275,00</b>
A <sub>k</sub>	mm <sup>2</sup>	942,48	1256,64
<b>τ</b>	<b>MPa</b>	<b>57,88</b>	<b>104,16</b>
<b>τ<sub>D</sub></b>	<b>MPa</b>	<b>169,00</b>	<b>178,75</b>
A <sub>p</sub>	mm <sup>2</sup>	330,00	440,00
<b>p</b>	<b>MPa</b>	<b>165,31</b>	<b>297,49</b>
<b>p<sub>D</sub> (150 - 200 MPa)</b>	<b>MPa</b>	<b>390,00</b>	<b>412,50</b>
<b>Splnění pevnostní podmínky</b>	<b>Y/N</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

#### 4.4 Kontrola rozváděcích lopatek

Obdobně jako oběžné lopatky jsou rozváděcí lopatky kontrolované na ohyb. U statorových lopatek ovšem není nutné provádět kontrolu na tahové namáhání kvůli absenci odstředivé síly.

Počet lopatek:

$$z_{RL} = \frac{\pi D_p^2}{s} [-] \quad (4.51)$$

Obvodová síla:

$$F_{uRL} = \frac{m_p * (c_{u1} - c_{u2})}{z_{RL}} [N] \quad (4.52)$$

Axiální síla:

$$F_{aRL} = \frac{m_p * (c_{a1} - c_{a2}) + \pi * (D_{s1} * L_{1RL} * p_1 - D_{s2} * L_{2RL} * p_2)}{Z_{RL}} [N] \quad (4.53)$$

Ohybový moment od obvodové síly:

$$M_{uRL} = \frac{F_{uRL} * L_{2RL}}{2} [Nm] \quad (4.54)$$

Ohybový moment od axiální síly:

$$M_{aRL} = \frac{F_{aRL} * L_{2RL}}{2} [Nm] \quad (4.55)$$

Výsledný moment na rozváděcí lopatku:

$$M_{oRL} = \sqrt{M_{uRL}^2 + M_{aRL}^2} [Nm] \quad (4.56)$$

Ohybové napětí:

$$\sigma_{oRL} = \frac{M_{oRL}}{W_{min}} [MPa] \quad (4.57)$$

Napětí v ohybu nesmí překročit hodnotu 40 MPa ani povolené napětí materiálu pro danou teplotu. Teplota povrchu lopatky se může uvažovat o 50 °C nižší, než je teplota páry. [4]

Tabulka 32: Pevnostní výpočty RL – VT - 1. až 6. stupeň

Číslo stupně		1	2	3	4	5	6
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540	PB540	PB540
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
s/c	-	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
$\gamma$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
B	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77
$W_{min}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$S_{top}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
z	-	29,00	29,00	29,00	29,00	29,00	29,00
S	m <sup>2</sup>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$C_{0a}$	m/s	35,58	36,97	38,44	39,23	40,06	40,18
$C_{0u}$	m/s	10,88	11,30	11,75	11,99	11,49	12,28
$F_u$	N	-42,99	-42,87	-42,92	-45,65	-42,58	-41,92



$F_a$	N	81,45	79,16	77,41	83,64	74,43	73,54
$M_u$	Nm	-0,56	-0,56	-0,56	-0,60	-0,56	-0,58
$M_a$	Nm	1,06	1,03	1,01	1,11	0,99	1,01
$M_o$	Nm	1,20	1,17	1,15	1,26	1,14	1,16
$\sigma_o$	MPa	<b>8,32</b>	<b>8,13</b>	<b>8,00</b>	<b>8,77</b>	<b>7,90</b>	<b>8,09</b>
<b>celkové namáhání</b>	<b>MPa</b>	<b>8,32</b>	<b>8,13</b>	<b>8,00</b>	<b>8,77</b>	<b>7,90</b>	<b>8,09</b>
$t_{RL}$	°C	344,49	337,65	330,79	323,86	316,25	309,41
název materiálu	-	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3
$\sigma_D$	MPa	<b>267,00</b>	<b>267,00</b>	<b>267,00</b>	<b>267,00</b>	<b>267,00</b>	<b>267,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Tabulka 33: Pevnostní výpočty RL – VT - 7. až 11. stupeň

Číslo stupně		7	8	9	10	11
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540	PB540
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
s/c	-	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
$\gamma$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
B	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77
$W_{min}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$S_{top}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
z	-	30,00	30,00	31,00	32,00	34,00
S	m <sup>2</sup>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
$c_{0a}$	m/s	40,15	39,49	38,49	37,26	35,52
$c_{0u}$	m/s	12,27	12,07	11,04	11,39	10,86
$F_u$	N	-40,60	-43,77	-39,65	-38,52	-36,45
$F_a$	N	71,65	81,24	71,76	72,36	71,03
$M_u$	Nm	-0,57	-0,63	-0,60	-0,61	-0,59
$M_a$	Nm	1,00	1,18	1,09	1,14	1,15
$M_o$	Nm	1,15	1,34	1,25	1,29	1,30
$\sigma_o$	MPa	<b>8,01</b>	<b>9,30</b>	<b>8,69</b>	<b>8,97</b>	<b>9,02</b>
<b>celkové namáhání</b>	<b>MPa</b>	<b>8,01</b>	<b>9,30</b>	<b>8,69</b>	<b>8,97</b>	<b>9,02</b>
$t_{RL}$	°C	302,64	295,83	288,15	281,32	274,37
název materiálu	-	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3
$\sigma_D$	MPa	<b>267,00</b>	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y	Y

Tabulka 34: Pevnostní výpočty RL – NT – NT1 – 1. až 6. stupeň

Číslo stupně		1	2	3	4	5	6
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540	PB540	PB540
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
s/c	-	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
$\gamma$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
B	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77
$W_{\min}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$S_{\text{top}}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
z	-	43,00	43,00	43,00	43,00	44,00	44,00
S	m <sup>2</sup>	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$C_{0a}$	m/s	34,96	36,50	38,33	39,62	40,12	40,85
$C_{0u}$	m/s	10,69	11,16	10,99	11,36	12,27	11,71
$F_u$	N	-26,57	-28,45	-28,71	-26,56	-27,43	-27,79
$F_a$	N	51,73	56,01	54,43	47,35	50,77	50,61
$M_u$	Nm	-0,39	-0,41	-0,42	-0,39	-0,41	-0,43
$M_a$	Nm	0,75	0,81	0,79	0,70	0,76	0,78
$M_o$	Nm	0,84	0,91	0,89	0,80	0,87	0,89
$\sigma_o$	MPa	<b>5,86</b>	<b>6,33</b>	<b>6,20</b>	<b>5,56</b>	<b>6,02</b>	<b>6,22</b>
<b>celkové namáhání</b>	<b>MPa</b>	<b>5,86</b>	<b>6,33</b>	<b>6,20</b>	<b>5,56</b>	<b>6,02</b>	<b>6,22</b>
$t_{RL}$	°C	264,32	257,59	250,03	242,39	235,60	228,07
název materiálu	-	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3
$\sigma_D$	MPa	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Tabulka 35: Pevnostní výpočty RL – NT – NT1 – 7. až 11. stupeň

Číslo stupně		7	8	9	10	11
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540	PB540
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
s/c	-	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
$\gamma$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
B	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77
$W_{\min}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$S_{\text{top}}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
z	-	44,00	44,00	44,00	45,00	46,00
S	m <sup>2</sup>	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05
$C_{0a}$	m/s	41,04	39,91	38,66	37,19	34,87
$C_{0u}$	m/s	11,77	12,20	11,09	10,66	10,66
$F_u$	N	-25,99	-27,63	-27,91	-25,51	-26,67
$F_a$	N	45,62	51,57	52,98	47,67	55,03
$M_u$	Nm	-0,42	-0,48	-0,52	-0,51	-0,58

$M_a$	Nm	0,73	0,89	0,98	0,95	1,20
$M_o$	Nm	0,84	1,01	1,11	1,08	1,33
$\sigma_o$	MPa	<b>5,84</b>	<b>7,01</b>	<b>7,70</b>	<b>7,51</b>	<b>9,24</b>
<b>celkové namáhání</b>	<b>MPa</b>	<b>5,84</b>	<b>7,01</b>	<b>7,70</b>	<b>7,51</b>	<b>9,24</b>
$t_{RL}$	°C	220,45	213,58	205,96	198,33	191,55
název materiálu	-	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3
$\sigma_D$	MPa	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>	<b>282,00</b>	<b>229,00</b>	<b>229,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

Tabulka 36: Pevnostní výpočty RL – NT – NT2 – 12. až 16. stupeň

Číslo stupně		12	13	14	15	16
<b>Označení profilu</b>		<b>PB540</b>	<b>PB540</b>	<b>PB540</b>	<b>PB540</b>	<b>PB540</b>
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
s/c	-	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
$\gamma$	°	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
B	mm	26,40	26,40	26,40	26,40	26,40
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77	20,77
$W_{min}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$S_{top}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
z	-	49,00	49,00	49,00	50,00	51,00
S	m <sup>2</sup>	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
$c_{0a}$	m/s	43,90	48,01	50,74	52,79	53,74
$c_{0u}$	m/s	13,42	13,77	15,51	15,14	15,41
$F_u$	N	-32,53	-30,44	-32,12	-31,50	-28,82
$F_a$	N	64,63	54,71	57,64	54,90	48,70
$M_u$	Nm	-0,57	-0,53	-0,58	-0,59	-0,57
$M_a$	Nm	1,13	0,96	1,04	1,03	0,96
$M_o$	Nm	1,27	1,10	1,19	1,19	1,12
$\sigma_o$	MPa	<b>8,80</b>	<b>7,61</b>	<b>8,25</b>	<b>8,25</b>	<b>7,77</b>
<b>celkové namáhání</b>	<b>MPa</b>	<b>8,80</b>	<b>7,61</b>	<b>8,25</b>	<b>8,25</b>	<b>7,77</b>
$t_{RL}$	°C	187,58	175,06	163,70	151,18	138,70
název materiálu	-	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3
$\sigma_D$	MPa	<b>229,00</b>	<b>229,00</b>	<b>229,00</b>	<b>229,00</b>	<b>229,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

Tabulka 37: Pevnostní výpočty RL – NT – NT2 – 17. až 20. stupeň

Číslo stupně		17	18	19	20
Označení profilu		PB540	PB540	PB540	PB540
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
s/c	-	0,67	0,67	0,67	0,67
$\gamma$	°	30,00	30,00	30,00	30,00
B	mm	26,40	26,40	26,40	26,40
c	mm	31,00	31,00	31,00	31,00
s	mm	20,77	20,77	20,77	20,77
$W_{\min}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14	0,14
$S_{\text{top}}$	cm <sup>2</sup>	1,50	1,50	1,50	1,50
z	-	52,00	54,00	57,00	63,00
S	m <sup>2</sup>	0,05	0,06	0,07	0,09
$c_{0a}$	m/s	52,03	49,87	46,10	43,25
$c_{0u}$	m/s	15,91	14,30	14,09	12,40
$F_u$	N	-30,29	-27,46	-27,82	-23,73
$F_a$	N	54,59	49,20	55,52	47,21
$M_u$	Nm	-0,66	-0,66	-0,76	-0,71
$M_a$	Nm	1,19	1,18	1,51	1,40
$M_o$	Nm	1,36	1,35	1,69	1,57
$\sigma_o$	MPa	9,44	9,40	11,76	10,92
<b>celkové namáhání</b>	<b>MPa</b>	<b>9,44</b>	<b>9,40</b>	<b>11,76</b>	<b>10,92</b>
$t_{RL}$	°C	127,38	115,84	110,94	105,48
název materiálu	-	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3
$\sigma_D$	MPa	229,00	229,00	229,00	229,00
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	Y	Y	Y	Y

Tabulka 38: Pevnostní výpočty RL – NT – NT3 – 21. až 24. stupeň

Číslo stupně		21	22	23	24
Označení profilu		PB540	PB550	1500	1500
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	7850,00	7850,00	7850,00	7850,00
s/c	-	0,67	0,67	0,67	0,67
$\gamma$	°	30,00	30,00	17,50	17,50
B	mm	26,40	33,40	11,20	11,20
c	mm	31,00	39,20	12,00	12,00
s	mm	20,77	26,26	8,00	8,00
$W_{\min}$	cm <sup>3</sup>	0,14	0,29	16,40	16,40
$S_{\text{top}}$	cm <sup>2</sup>	1,50	2,39	32,20	32,20
z	-	74,00	62,00	251,00	275,00
S	m <sup>2</sup>	0,10	0,15	0,40	1,29
$c_{0a}$	m/s	43,82	48,91	35,24	24,70
$c_{0u}$	m/s	12,98	6,44	4,64	3,69
$F_u$	N	-50,49	-68,67	-16,77	-19,04
$F_a$	N	158,43	200,66	74,11	133,65
$M_u$	Nm	-1,50	-2,75	-1,34	-3,62

$M_a$	Nm	4,71	8,03	5,93	25,39
$M_o$	Nm	4,95	8,48	6,08	25,65
$\sigma_o$	MPa	<b>34,38</b>	<b>29,10</b>	<b>0,37</b>	<b>1,56</b>
<b>celkové namáhání</b>	<b>MPa</b>	<b>34,38</b>	<b>29,10</b>	<b>0,37</b>	<b>1,56</b>
$t_{RL}$	°C	99,97	80,30	57,30	32,72
název materiálu	-	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3	ČSN 15 335.3
$\sigma_D$	MPa	<b>314,00</b>	<b>314,00</b>	<b>314,00</b>	<b>314,00</b>
Splnění pevnostní podmínky	Y/N	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>	<b>Y</b>

## 4.5 Kontrola hřídele na krut

Pro oba hřídele je provedena kontrola na krut v oblasti ložisek. Výpočet vychází z výkonů jednotlivých dílů shrnutých v kapitole 5 a úhlové rychlosti rotorů (viz. kapitola 3). Postup výpočtu a zvolený materiál je založen na konzultaci s Doosan Škoda Power. Koeficient bezpečnosti je volen  $k \sim 15$ .

Krouticí moment:

$$M_K = \frac{P}{\omega} [Nm] \quad (4.58)$$

Průřezový modul v krutu:

$$W_K = \frac{\pi * d^3}{16} [m^3] \quad (4.59)$$

Smykové napětí:

$$\tau = \frac{M_K}{W_K} * 1000 [MPa] \quad (4.60)$$

Dovolené smykové napětí:

$$\tau_D = 0,65 * Re \quad (4.61)$$

$Re$  ... mez kluzu voleného materiálu

Koeficient bezpečnosti:

$$k = \frac{\tau_D}{\tau} [-] \quad (4.62)$$

Tabulka 39: Kontrola na krut

díl	VT	NT
P	1645,91	9950,86
n	8000	6000
d	70	140
Mk	1964,66	15837,29
Wk	0,000067	0,0005388
$\tau$	29,17	29,39
materiál	16537	16537
Re	686	686
$\tau_D$	445,90	445,90
<b>k</b>	<b>15,2853033</b>	<b>15,16948</b>

## 4.6 Kontrola kritických otáček

Po stanovení základních rozměrů průtočné části a potvrzení jejich pevnosti v kapitolách 3 a 4 je zapotřebí v CAD SW vymodelovat rotory obou dílů pro získání parametrů potřebných k výpočtu kritických otáček (viz. (4.63)). Při návrhu se bere ohled na již stanovené rozměry jako jsou patní průměry, délky a šířky oběžných lopatek a průměry ucpávek. Ložisková vzdálenost je zvolena v této fázi návrhu. Při negativním výsledku kontroly vlastní frekvence rotoru je možno tento parametr modifikovat k docílení splnění dostatečné vzdálenosti jmenovitých otáček obou rotorů od jejich kritických otáček. Pro elastické motory (provozní otáčky jsou vyšší než kritické) platí, že by se kritické otáčky měly pohybovat pod hranicí 70 % provozních otáček. Pro tuhé rotory (kritické otáčky jsou vyšší než jmenovité) je dáno, že by se provozní otáčky měly pohybovat pod hranicí 77 až 80 % kritických otáček. [4]

$$n_k = 7,5 * \frac{\left(\frac{d_0}{L}\right)^2}{\sqrt{\frac{G}{L}}} \left[ \frac{ot}{min} \right] \quad (4.63)$$

$d_0$ ...maximální průměr hřídele [mm]

$G$ ...hmota celého rotoru [kg]

$L$ ...ložisková vzdálenost [m]

$$G = G_R + G_L [kg] \quad (4.64)$$

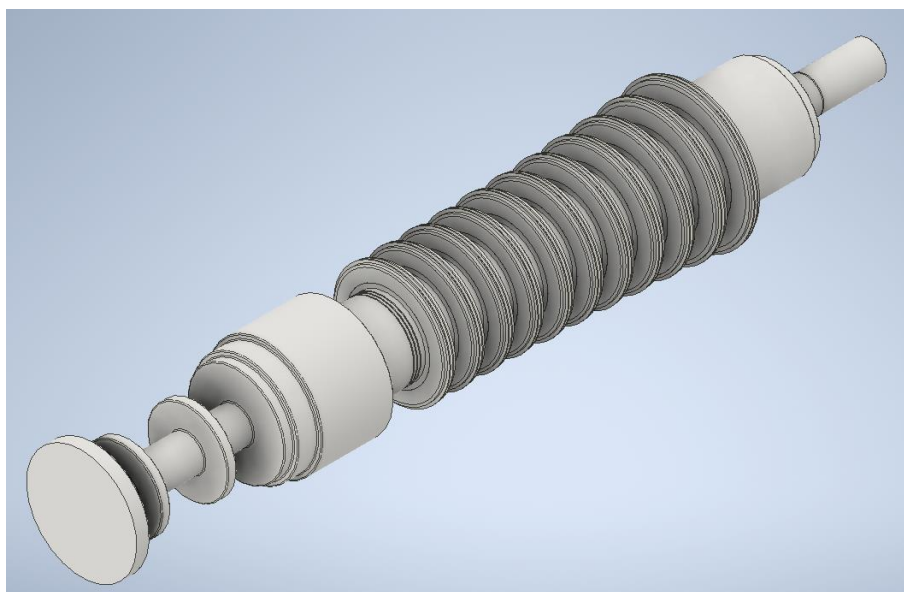
$G_R$ ... hmota rotoru

$G_L$ ...hmota lopatek

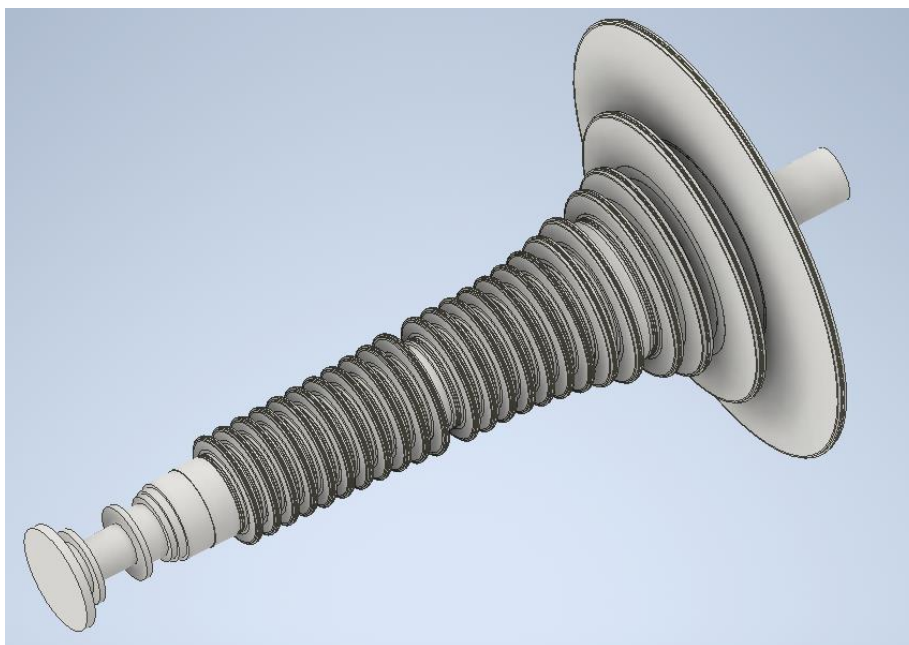
V Tabulka 40 jsou uvedeny analyticky zjištěné kritické otáčky. Rotor vysokotlakého dílu lze považovat za tuhý, přičemž jmenovité otáčky představují **71 %** kritických otáček. Pro nízkotlaký díl je uvažován elastický rotor. Zde kritické otáčky představují **46 %** provozních otáček. Tato hodnota je sice v blízkosti dolní povolené procentuální hranice, ale na základě konzultace je tato hodnota stále přijatelná. Oba rotory tedy vyhovují.

Tabulka 40: Kritické otáčky rotorů

kritické otáčky		VT	NT
G	kg	542,56	2670,64
Lb	m	1,55	2,5704
nj	ot/min	8000	6000
nk	ot/min	11279,46	2761,016



Obrázek 18: Rotor VT dílu



Obrázek 19: Rotor NT dílu

## 5 Výkony jednotlivých dílů

V této kapitole jsou zhodnoceny oba turbínové díly z pohledu výkonu pro oba provozy. Výkon celého cyklu (pro případ této diplomové práce pouze části cyklu) závisí na výkonu jednotlivých dílů, které jsou součty výkonů jednotlivých stupňů (viz. (5.1)). Pro oba provozy byla započtena stejná mechanická účinnost soustrojí (včetně převodovky spojující oba díly s generátorem)  $\eta_M$  a účinnost samotného generátoru  $\eta_G$ .

Výkon jednotlivých dílů:

$$P_{VT,NT} = \sum_{i=1}^z P_i = \sum_{i=1}^z m_i * h_i \text{ [kW]} \quad (5.1)$$

Celkový výkon působící na převodovku:

$$P_P = P_{VT} + P_{NT} \text{ [kW]} \quad (5.2)$$

Mechanická účinnost soustrojí:

$$\eta_M = 0,95 \text{ [-]} \quad (5.3)$$

Účinnost generátoru:

$$\eta_G = 0,95 \text{ [-]} \quad (5.4)$$

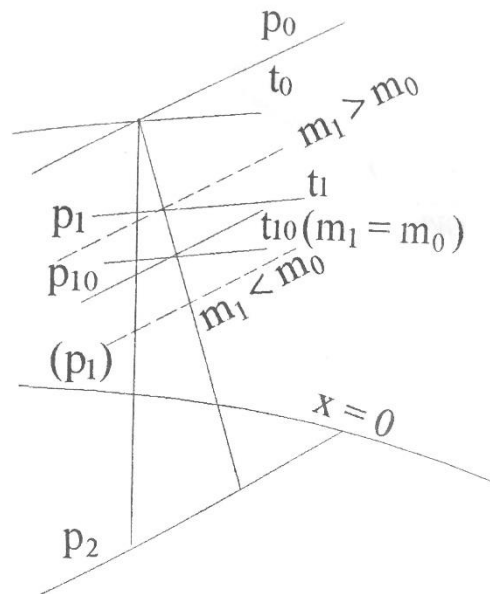
Výkon na svorkách:

$$P_G = P * \eta_M * \eta_G \text{ [kW]} \quad (5.5)$$

Snížený výkon NT dílu pro jeho nezatížený stav v odběrovém provozu byl vypočten pomocí přepočítání tlaků na jednotlivých stupních pomocí „parního kužele“, který je znázorněn na Obrázek 20. Princip přepočtu je uveden v rovnici (5.6). Veličiny označené indexem 0 patří návrhovému stavu.

$$\left(\frac{m_1}{m_0}\right)^2 = \frac{T_{10}}{T_1} * \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_{10}^2 - p_{20}^2} \quad (5.6)$$





Obrázek 20: Parní kužel [4]

Výkon na svorkách je pro kondenzační provoz výkonem celého cyklu. Pro odběrový provoz se počítá s pokrytím předepsaného tepelného výkonu se zbytkem tepla využitým ke generování elektrické energie. Výkon odběrového provozu lze tedy definovat následovně:

Výkon odběrového provozu:

$$P = P_Q + P_G \text{ [kW]} \quad (5.7)$$

Souhrn všech výkonů je uveden v Tabulka 41.

Tabulka 41: Výkony dílů v obou provozech

Jednotlivé výkony		kondenzační	odběrový
$P_{VT}$	MW	1,65	1,65
$P_{NT}$	MW	9,95	1,54
$P_P$	MW	11,6	3,19
$P_G$	MW <sub>e</sub>	10,47	2,88
$P_Q$	MW <sub>Q</sub>	0	25
$P$	MW	10,47	27,88

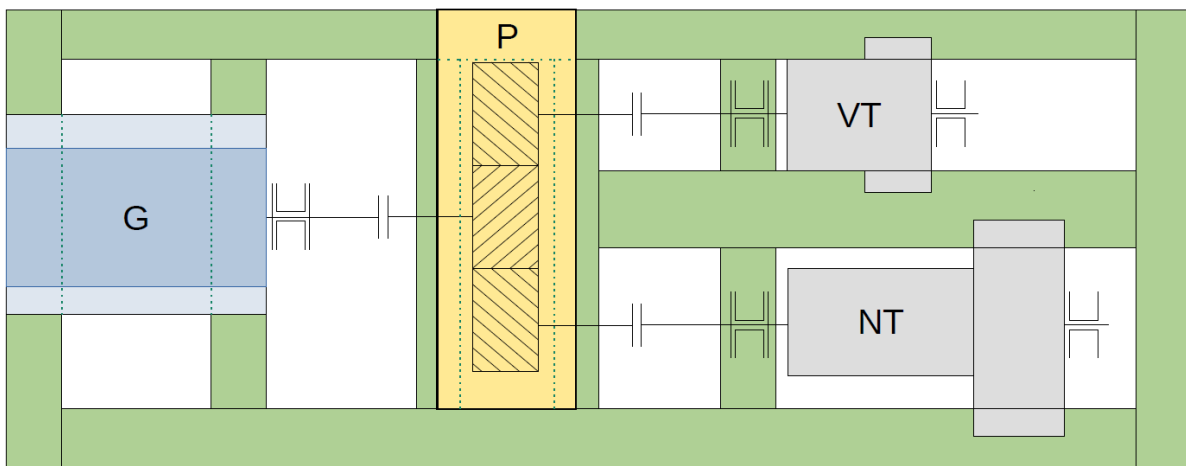
## 6 Uložení dílů turbíny, spojení s převodovkou

Samotné uložení obou dílů turbíny bylo navrženo dle Obrázek 21. Vzhledem k přísnějším tolerancím u prvních stupňů jednotlivých dílů a axiálnímu tepelnému rozpínání, byly pevné body obou rotorů (zajištěné radiálně axiálními kluznými ložisky) umístěny k prvním stupňům dílů turbíny. Radiální kluzná ložiska jsou umístěné u posledních stupňů.

Převodovka spojující hřídele obou dílů s generátorem byla připojena pevnými spojkami. Převodové poměry mezi dvěma vstupními rychlostmi a žádanou výstupní rychlostí vycházejí z navržených otáček obou dílů vycházející z kapitoly 3 a optimálních otáček generátoru (rovněž spojený s převodovkou pomocí pevné spojky). Převodovka je opatřena natáčedlem.

Jako typ ozubení převodovky bylo zvoleno šikmé ozubení z důvodu vyšší životnosti oproti válcovému ozubení, schopnosti přenášet větší silové zatížení a možnosti kompenzovat případné axiální posuvy kol. Pro zamezení větších posuvů ze strany generátoru bylo rovněž použito radiálně axiální ložisko.

Pevné body statorů obou dílů jsou definované jejich spojení s rámem pomocí kozlíků. Radiálně axiální ložiska jsou uložena na relativně elastické podpěře, a tedy se uvažuje jejich pohyb vůči rámu. Převodovka s generátorem jsou upevněné šroubovými spoji přímo s rámem.



Obrázek 21: Schéma uložení dílů turbíny s převodovkou a generátorem na společném rámu

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout dvoutělesovou turínu malého výkonu do rafinerie. Bylo propočteno bilanční schéma v oblasti turbíny včetně okruhu ucpávkové páry, a to pro oba uvažované provozny (kondenzační a odběrový). Odběr byl umístěn za vysokotlaký díl. Návrh jeho průtočné části tedy nebyl ovlivněn zvoleným provozem. Design nízkotlakého dílu se zakládal na parametrech bilančního schématu pro kondenzační provoz, jelikož při něm dochází ke 100% zatížení tohoto dílu. Pro provoz odběrový byla vypočtena účinnost a výkon nízkotlakého dílu při částečném zatížení.

Pro vysokotlaký díl byly uvažovány dvě koncepce: jednostupňový díl v provedení A-kolo a bubnové uspořádání. Pro jeho vyšší účinnost bylo zvoleno a detailněji vypracováno přetlakové lopatkování. Díl se skládá z 11 stupňů. Výsledná termodynamická účinnost průtočné části činí 91,16 %. Se zahrnutím tlakových ztrát na vstupu a výstupu vysokotlakého dílu pak klesne účinnost na 82,64 %. Výkon vysokotlakého dílu pro oba provozny je 1645,91 MWe.

Nízkotlaký díl byl od začátku koncipován na bubnové uspořádání. Kvůli zavádění páry z ucpávek do jeho průtočné části byl výpočetně rozdělen na tři oblasti. Jeho návrh se skládá z 24 lopatkových stupňů. Účinnost jeho průtočné části je 90,40 % a se zahrnutím tlakových ztrát má celý díl účinnost 89,59 %. Pro kondenzační provoz má tento díl výkon 9950,86 MWe. Při uvažování odběrového provozu, a tedy za částečného zatížení nízkotlakého dílu dochází ke snížení jeho výkonu. Důvodem je nedostatečné zahlcení lopatek.

Elektrický výkon kondenzačního provozu dosahuje hodnoty 10,47 MWe. Při najetí na odběrový provoz pak tato hodnota klesá na 2,28 MWe. Se započítáním tepelného výkonu odběrové větve je celkový výkon odběrového provozu daným zadáním 27,88 MW.

Lopatky (a jejich závěsy) byly pevnostně zkontrolovány na příslušná namáhání a byl zkontrolován minimální průměr hřídelí na krut. Kritické otáčky rotorů (se započtením tíhy lopatkování) byly porovnány s provozními otáčkami a byla prokázána jejich dostatečná vzájemná vzdálenost.

Dále byl proveden návrh uložení obou dílů, převodovky a generátoru na společném rámu. Jako závěrečná část této diplomové práce byly vypracovány příčné řezy oběma díly turbíny. Jelikož se jedná o nový design a ne o retrofit, nebylo nutné dodržet předem známé neměnné rozměry.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Fiedler, J. Parní turbíny - Návrh a výpočet. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004. str. 66. ISBN 80-214-2777-9.
- [2] Kollross, P., 2021. *Parní turbíny a kondenzátory - 5. přednáška předmětu KKE/PTK*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] Škorpík, J., 2006. *Škracení par a plynů*. 1. vydání editor Brno: ISSN 1806-8293.
- [4] ŠKOPEK, Jan. Parní turbína: Tepelný a pevnostní výpočet. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2007, 107 s., 54 s. příl. ISBN 978-80-7043-256-3.
- [5] Janeček, M., 2020. *[DP] Retrofit parní turbíny 120 MW*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Tepelné schéma – primární tok.....	13
Obrázek 2: Tepelné schéma – primární tok a ucpávkový okruh.....	17
Obrázek 3: Schéma labyrintové ucpávky [1] .....	18
Obrázek 4: Průtokový součinitel ucpávek [1] .....	19
Obrázek 5: Označení ucpávek – VT.....	20
Obrázek 6: Označení ucpávek – NT.....	20
Obrázek 7: Porovnání diagramů expanze v turbíně při regulaci klouzavým tlakem a regulaci škrcením [2].....	24
Obrázek 8: Základní typy regulačních ventilů [3] .....	24
Obrázek 9: Rychlostní trojúhelníky s označením rychlostí a úhlů [1] .....	30
Obrázek 10: Průběh expanze v A-kole [1] .....	33
Obrázek 11: Součinitel zpětného využití ztrát [1].....	37
Obrázek 12: Expanzní čára ve skupině přetlakových stupňů [1] .....	42
Obrázek 13: p-v čáry pro skupinu přetlakových stupňů [1].....	42
Obrázek 14: Náčrt průtočného kanálu [1] .....	43
Obrázek 15: Rychlostní trojúhelník přetlakového stupně [1] .....	46
Obrázek 16: Závěs lopatky typu "T" [5] .....	71
Obrázek 17: Vidličkový závěs [5].....	76
Obrázek 18: Rotor VT dílu.....	87
Obrázek 19: Rotor NT dílu.....	87
Obrázek 20: Parní kužel [4] .....	89
Obrázek 21: Schéma uložení dílů turbíny s převodovkou a generátorem na společném rámu	90

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Únik páry jednotlivými ucpávkami – VT – kondenzační provoz.....	21
Tabulka 2: Únik páry jednotlivými ucpávkami – NT – kondenzační provoz.....	21
Tabulka 3: Únik páry jednotlivými ucpávkami – NT – odběrový provoz.....	22
Tabulka 4: VT díl - stavy páry - definice stupňové části .....	26
Tabulka 5: Výsledky optimalizace A-kola.....	36
Tabulka 6: VT - parametry z předběžného výpočtu.....	47
Tabulka 7: Detailní návrh VT dílu - 1. až 6. stupeň.....	48
Tabulka 8: Detailní návrh VT dílu - 7. až 11. stupeň.....	49
Tabulka 9: NT díl - stavy páry - definice stupňových části .....	51
Tabulka 10: NT1 - parametry z předběžného výpočtu.....	52
Tabulka 11: Detailní návrh NT dílu - NT1 - 1. až 6. stupeň .....	52
Tabulka 12: Detailní návrh NT dílu - NT1 - 7. až 11. stupeň .....	54
Tabulka 13: NT2 - parametry z předběžného výpočtu.....	55
Tabulka 14: Detailní návrh NT dílu - NT2 - 12. až 16. stupeň .....	55
Tabulka 15: Detailní návrh NT dílu - NT2 - 17. až 20. stupeň .....	57
Tabulka 16: NT3 - parametry z předběžného výpočtu.....	58
Tabulka 17: Detailní návrh NT dílu - NT3 - 21. až 24. stupeň .....	58
Tabulka 18: Pevnostní výpočty OL - VT - 1. až 6. stupeň.....	64
Tabulka 19: Pevnostní výpočty OL - VT - 7. až 11. stupeň.....	65
Tabulka 20: Pevnostní výpočty OL – NT – NT1 – 1. až 6. stupeň.....	66
Tabulka 21: Pevnostní výpočty OL – NT – NT1 – 7. až 11. stupeň.....	67
Tabulka 22: Pevnostní výpočty OL – NT – NT2 – 12. až 16. stupeň.....	68
Tabulka 23: Pevnostní výpočty OL – NT – NT2 – 17. až 20. stupeň.....	69
Tabulka 24: Pevnostní výpočty OL – NT – NT3 – 21. až 24. stupeň.....	70
Tabulka 25: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – VT – 1. až 6. stupeň .....	73
Tabulka 26: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – VT – 7. až 11. stupeň .....	74
Tabulka 27: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – NT – NT1 – 1. až 6. stupeň.....	74
Tabulka 28: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – NT – NT1 – 7. až 11. stupeň.....	75
Tabulka 29: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – NT – NT2 – 12. až 16. stupeň.....	75
Tabulka 30: Pevnostní výpočet závěsů typu "T" – NT – NT2/NT3 – 17. až 21. stupeň .....	76
Tabulka 31: Pevnostní výpočet vidličkových závěsů – NT – NT3 – 22. až 23. stupeň.....	79

Tabulka 32: Pevnostní výpočty RL – VT - 1. až 6. stupeň .....	80
Tabulka 33: Pevnostní výpočty RL – VT - 7. až 11. stupeň .....	81
Tabulka 34: Pevnostní výpočty RL – NT – NT1 – 1. až 6. stupeň .....	82
Tabulka 35: Pevnostní výpočty RL – NT – NT1 – 7. až 11. stupeň .....	82
Tabulka 36: Pevnostní výpočty RL – NT – NT2 – 12. až 16. stupeň .....	83
Tabulka 37: Pevnostní výpočty RL – NT – NT2 – 17. až 20. stupeň .....	84
Tabulka 38: Pevnostní výpočty RL – NT – NT3 – 21. až 24. stupeň .....	84
Tabulka 39: Kontrola na krut .....	86
Tabulka 40: Kritické otáčky rotorů .....	87
Tabulka 41: Výkony dílů v obou provozech .....	89

## Seznam příloh

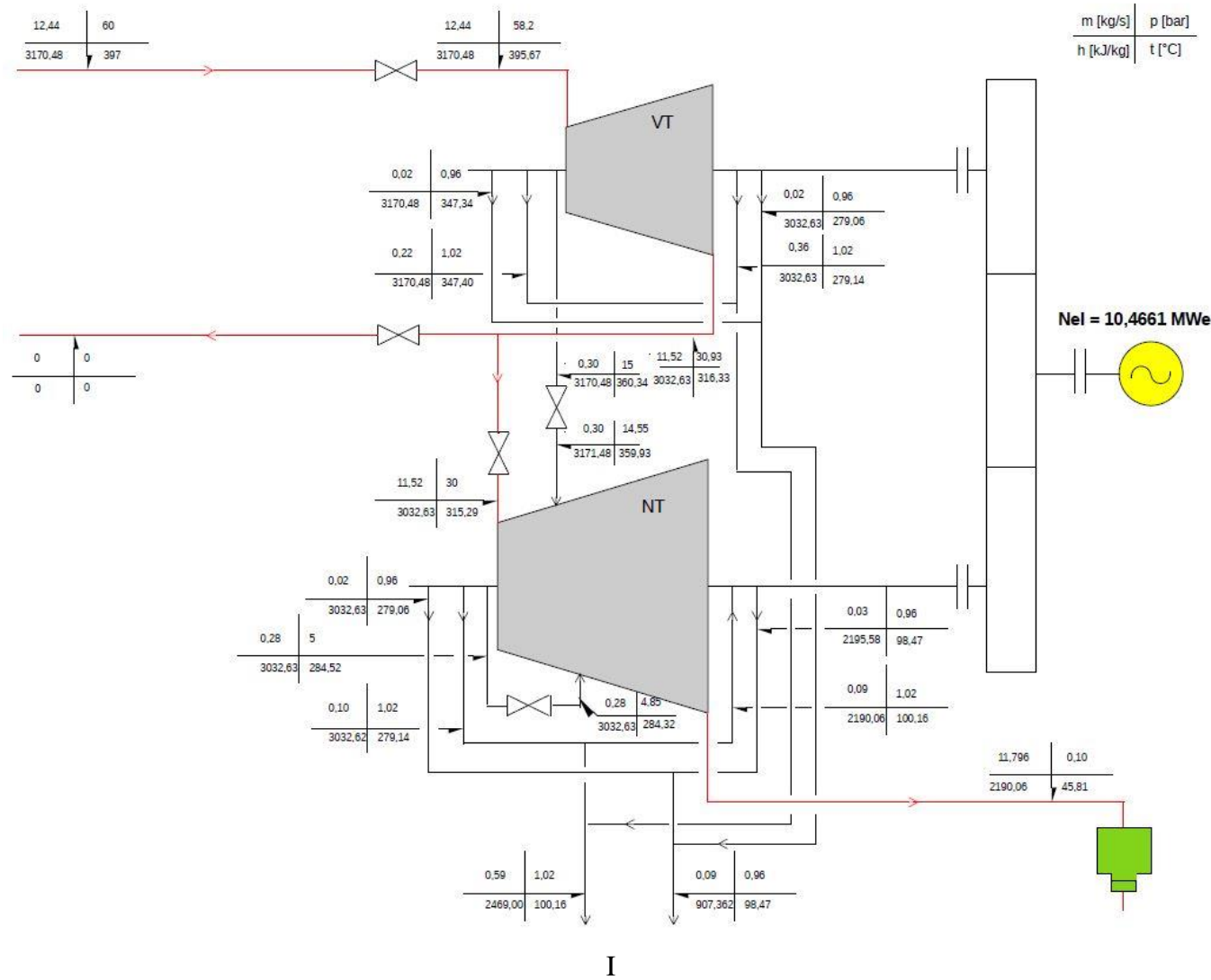
- Příloha 1: Bilanční schéma – kondenzační provoz
- Příloha 2: Bilanční schéma – odběrový provoz
- Příloha 3: Ztráta třením a ventilací regulačního stupně [1]
- Příloha 4: Redukovaná účinnost regulačního stupně [1]
- Příloha 5: Optimalizační makro – jednostupňový díl v provedení A-kolo
- Příloha 6: Diagram pro výpočet skupiny přetlakových stupňů metodou  $\left(\frac{c_a}{u}\right)$  [1]
- Příloha 7: Optimalizační makra – přetlakové lopatkování
- Příloha 8: Grafické znázornění provedení vysokotlakého dílu
- Příloha 9: Grafické znázornění provedení nízkotlakého dílu
- Příloha 10: Profily přetlakových lopatek [1]
- Příloha 11: Materiály oběžných a rozváděcích lopatek [4]

## Seznam externích příloh

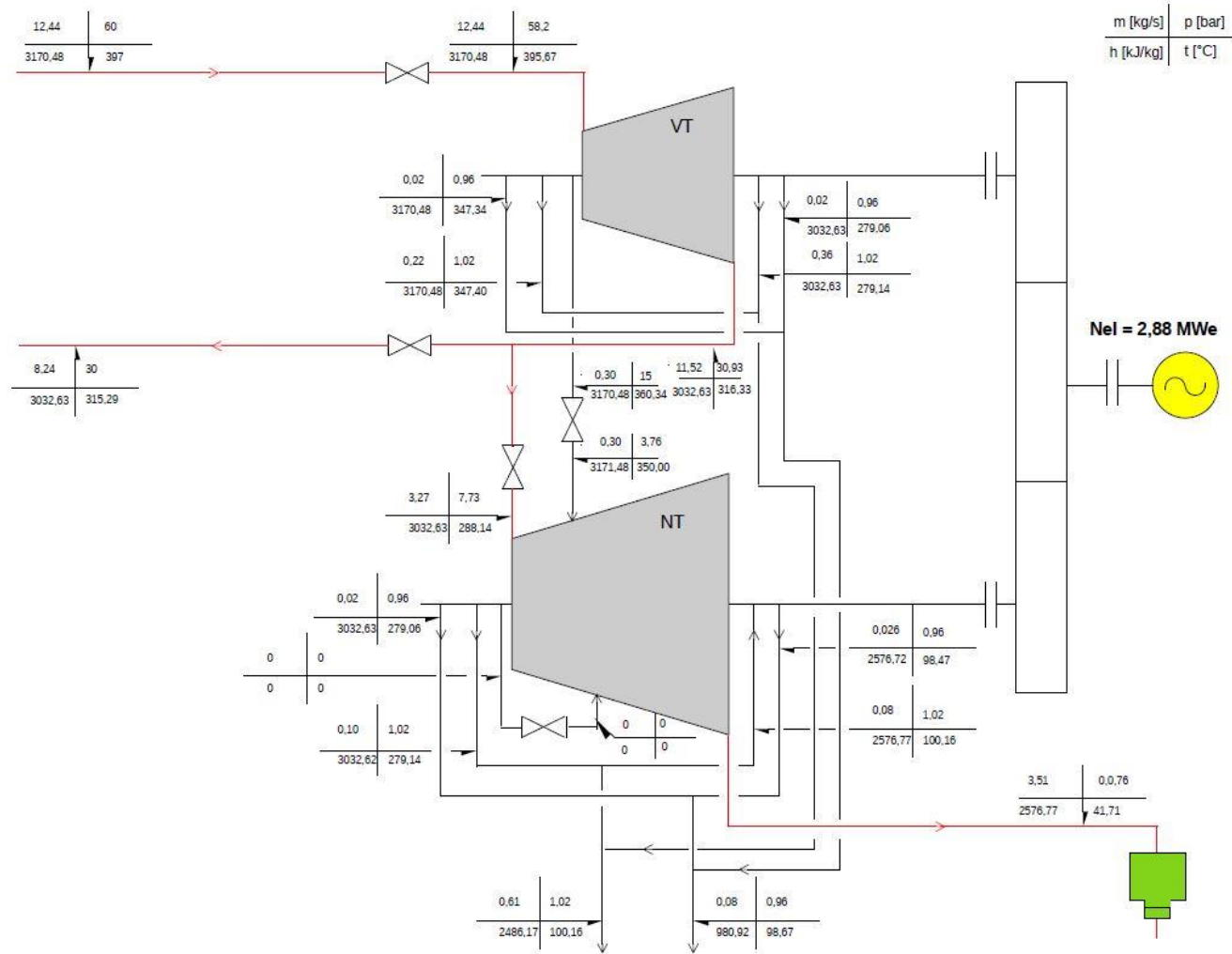
- Příloha A: VT díl - podélný řez - A3
- Příloha B: NT díl - podélný řez - A3



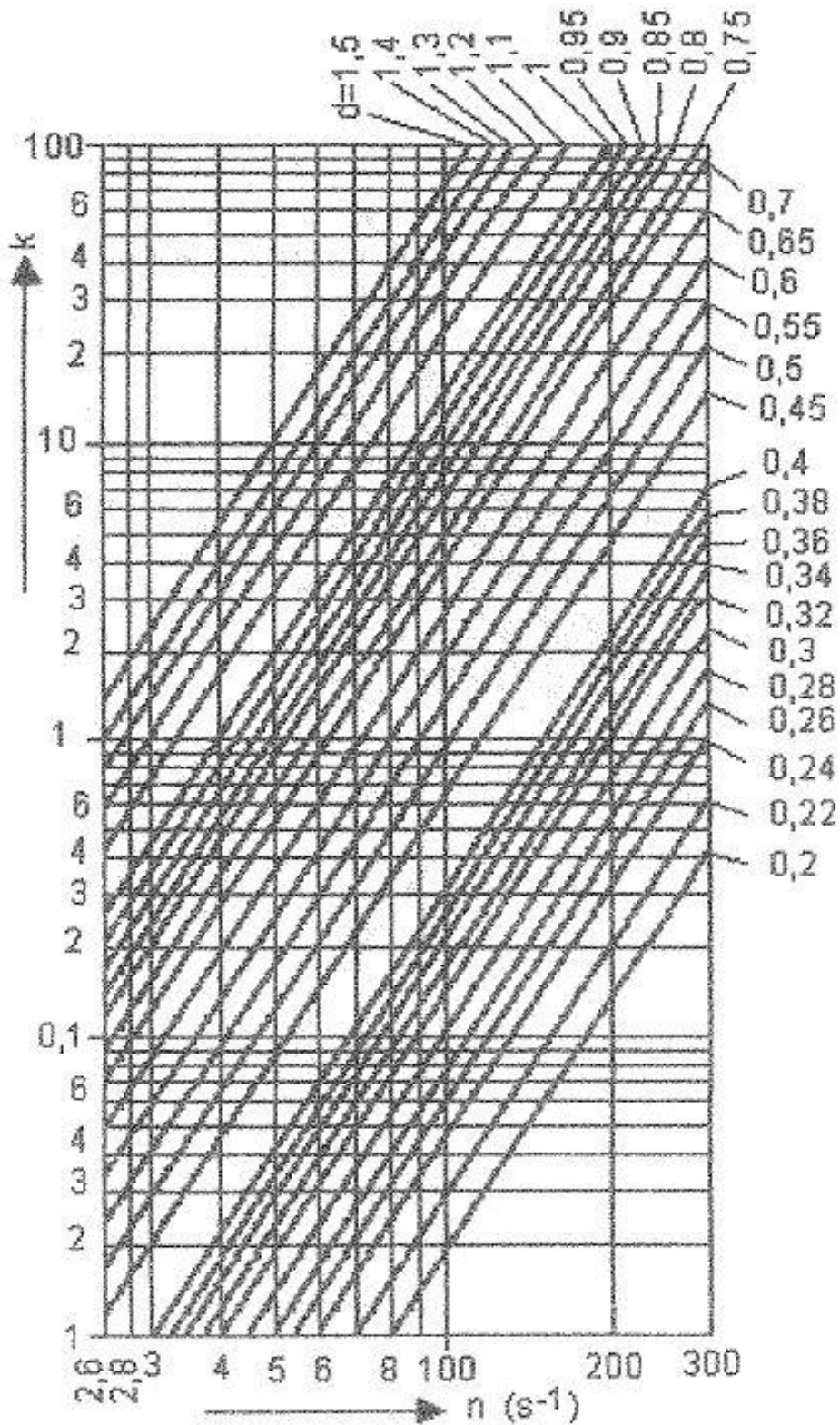
**Příloha 1: Bilanční schéma – kondenzační provoz**



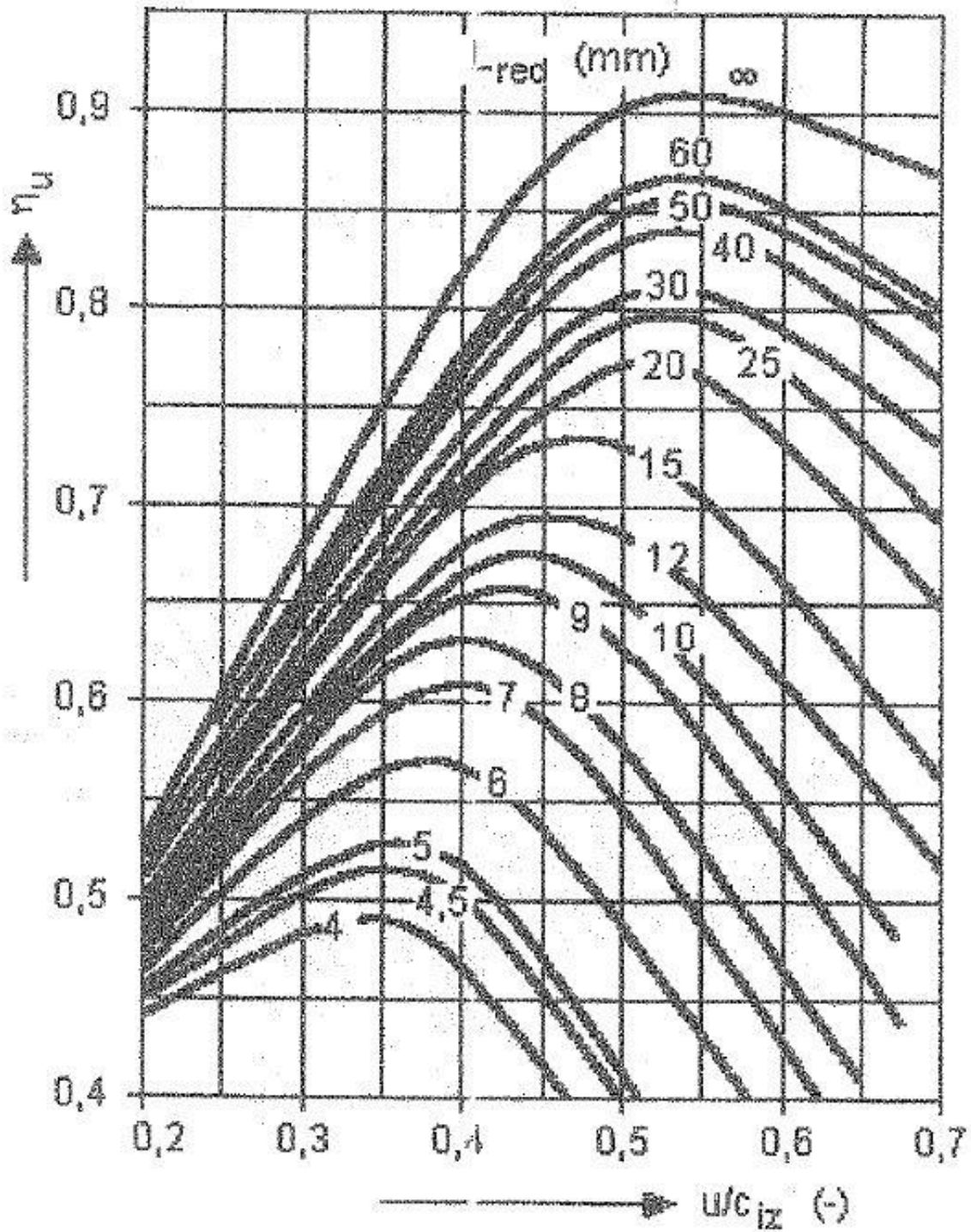
**Příloha 2: Bilanční schéma – odběrový provoz**



Příloha 3: Ztráta třením a ventilací regulačního stupně [1]



**Příloha 4: Redukovaná účinnost regulačního stupně [1]**



## Příloha 5: Optimalizační makro – jednostupňový díl v provedení A-kolo

Public Sub writeVariableCombinationsAndCalculateAKolo()

Dim row As Long

Dim column As Long

Dim rowCounter As Long

Dim rowComb As Long

Dim columnComb As Long

Dim rowW As Long

Dim columnW As Long

Dim rowCR As Long 'cell ref.

Dim columnnR As Long 'results column

Dim OKcolumnR As Long 'result column - just OK results

Dim columnCheck As Long 'column with a check of overstepping limits

Dim OKcolumnCheck As Long

Dim modValue As Long 'index brane hodnoty dane veliciny (1 -> steps)

Dim sheetCalc As String

Dim sheetOptim As String

Dim MIN As Double

Dim MAX As Double

Dim steps As Double

Dim stepsRT As Double 'steps - running total

Dim varCount As Long 'pocet promennych

Dim combCount As Long 'pocet kombinaci

Dim varCounter As Long 'counter promennych

Dim combCounter As Long 'counter kombinace

Dim result As Double 'result value

Dim checkOK As String 'kontrola limitu hodnot

Dim resultTop As Double 'hodnota nejlepšího výsledku  
Dim resultTopIndex As Integer 'index nejlepšího výsledku

Dim VrowS As Long

Dim VrowE As Long

Dim OCrowS As Long 'první radka zápisu zkoumaných hodnot promenných a jejich kombinaci

Dim columnS As Long

Dim columnE As Long

Dim OCVcolumnS As Long 'první sloupec zápisu kombinací (zkoumané hodnoty se odkazují na původní sloupce promenných)

Dim OKOCVcolumnS As Long 'jen OK result

-----

sheetCalc = "A-kolo"

sheetOptim = "Optim makro\_A-kolo"

'zápis hodnot o rozsahu

VrowS = Cells(2, 3).Value

VrowE = Cells(3, 3).Value

OCrowS = Cells(4, 3).Value

columnS = Cells(5, 3).Value

columnE = Cells(6, 3).Value

rowCR = VrowS - 3

combCount = Cells(3, 9).Value

varCount = Cells(2, 9).Value

Range("B17:IV65536").Clear

'cistení předeslych dat

column = columnS

'nulování sloupce

```
'-----  
-----  
'definice hodnot jednotlivych velicin  
For column = columnS To columnE  
    MIN = Cells(VrowS, column)  
    MAX = Cells(VrowS + 1, column)  
    steps = Cells(VrowE, column)  
  
    row = OCrowS                                'nulovani radky  
    Cells(row - 1, column) = Cells(VrowS - 1, column).Value    'vypis promenne  
  
    rowCounter = 0                               'nulovani counteru radek  
  
    'vypis jednotlivycho hodnot  
    For row = row To row + steps - 1  
        If steps = 1 Then  
            Cells(row, column) = MIN + ((MAX - MIN) / 2)  
        Else  
            Cells(row, column) = MIN + (((MAX - MIN) / (steps - 1)) * rowCounter)  
            rowCounter = rowCounter + 1  
  
        End If  
  
    Next row  
  
Next column  
'-----  
'jednotlive variace  
  
OCVcolumnS = columnE + 3  
column = columnS                                'nulovani sloupce (levy blok - hodnoty  
promennych)  
columnW = OCVcolumnS                            'nulovani sloupce zapisu
```

```
varCounter = varCount
```

```
'indexovani kombinaci
```

```
For rowW = OCrowS To OCrowS + combCount - 1
```

```
Cells(rowW, OCVcolumnS - 1) = rowW - OCrowS + 1
```

```
Next rowW
```

```
'vypis kombinaci
```

```
Do Until varCounter = 0
```

```
rowW = OCrowS 'nulovani radky zapisu
```

```
Cells(rowW - 1, columnW) = Cells(VrowS - 1, column).Value
```

```
combCounter = combCount
```

```
steps = Cells(VrowE, column)
```

```
stepsRT = Cells(VrowE + 1, column)
```

```
Do Until combCounter = 0
```

```
modValue = ((Int((combCounter - 1) / (combCount / stepsRT))) Mod (steps))
```

```
Cells(rowW, columnW) = Cells(OCrowS + modValue, column)
```

```
rowW = rowW + 1
```

```
combCounter = combCounter - 1
```

```
Loop
```

```
columnW = columnW + 1
```

```
column = column + 1
```

```
varCounter = varCounter - 1
```

```
Loop
```

```
'-----
```

```
'calculation
```

```
columnR = OCVcolumnS + varCount + 1
```

```
columnCheck = columnR + 1
```



For row = OCrowS To OCrowS + combCount - 1

For column = OCVcolumnS To columnR - 1

Cells(rowCR, column - (OCVcolumnS - columnS)) = Cells(row, column).Value

Next column

ActiveWorkbook.Sheets(sheetCalc).Activate  
Worksheets(sheetCalc).Calculate  
result = Range("O47")  
checkOK = Range("O48")  
ActiveWorkbook.Sheets(sheetOptim).Activate  
Cells(row, columnR) = result  
Cells(row, columnCheck) = checkOK

Next row

'-----'

'OK results

resultTop = 0                                    'nulovani top result

resultTopIndex = 0

OKOCVcolumnS = columnCheck + 3

rowW = OCrowS

columnW = OKOCVcolumnS

For row = OCrowS To OCrowS + combCount - 1

If Cells(row, columnCheck) = "Y" Then

For column = OCVcolumnS - 1 To columnR

```
Cells(rowW, columnW) = Cells(row, column).Value  
columnW = columnW + 1
```

```
Next column
```

```
result = Cells(row, column - 1).Value
```

```
If result > resultTop Then
```

```
    resultTop = Cells(row, column - 1).Value
```

```
    resultTopIndex = Cells(row, OCVcolumnS - 1).Value
```

```
End If
```

```
rowW = rowW + 1
```

```
End If
```

```
columnW = OKOCVcolumnS
```

```
Next row
```

```
'-----
```

```
'display best
```

```
rowW = rowCR
```

```
columnW = columnS
```

```
For column = OCVcolumnS To columnR
```

```
    Cells(rowW, columnW) = Cells(OCrowS + resultTopIndex - 1, column)
```

```
    columnW = columnW + 1
```

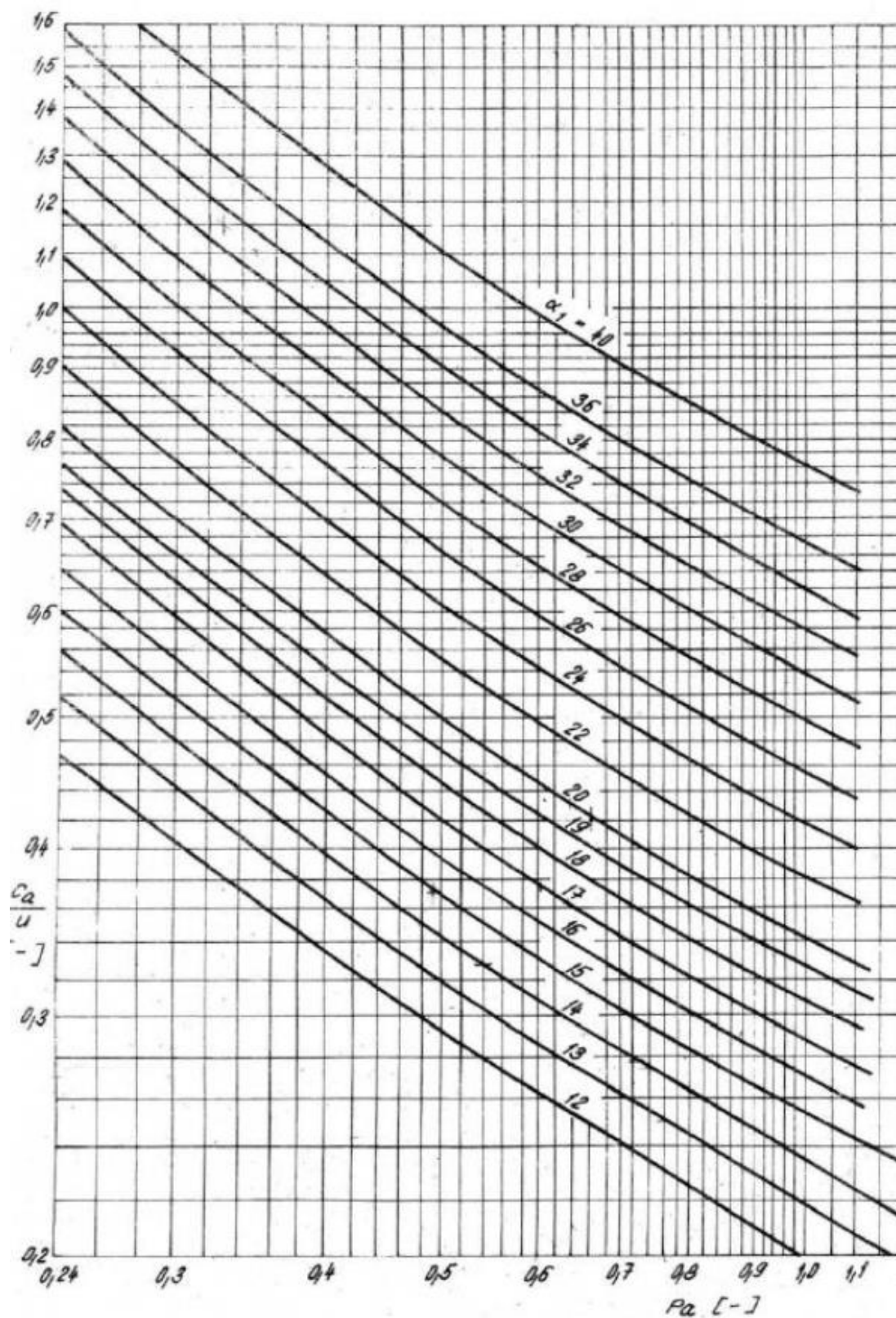
```
Next column
```

MsgBox (resultTop)

MsgBox (resultTopIndex)

End Sub

**Příloha 6: Diagram pro výpočet skupiny přetlakových stupňů metodou  $\left(\frac{c_a}{u}\right)$  [1]**



## Příloha 7: Optimalizační makra – přetlakové lopatkování

### Makro navrhující průtočnou část turbíny pro odhadnutý entalpický spád

Public Sub calculateBlades() 'CALCULATES ALL STAGES FOR DESIRED H

Dim column As Integer

Dim rowAlpha As Integer

Dim rowH As Integer

Dim rowHRunningCount As Integer

Dim rowHTagrget As Integer

Dim columnFirstStage As Integer

Dim columnLastStage As Integer

Dim columnStage As Integer

Dim countStages As Integer

Dim alpha As Double

Dim alphaMin As Double

Dim alphaMax As Double

Dim alphaTop As Double

Dim alphaStep As Double

Dim differenceStage As Double

Dim differenceStageTop As Double

Dim differenceSum As Double '% difference from desired h

Dim loopCounter As Integer

Dim hSum As Double

Dim hSumTarget As Double

Dim hTarget As Double

Dim hValue As Double

Dim expVIni As Double

Dim expDIni As Double

Dim expLIni As Double

Dim sheet As String

Dim OK As Boolean

sheet = "Pretlak"

alphaMin = Range("M36").Value

alphaMax = Range("M37").Value

alphaStep = Range("M38").Value '5 - velký krok, ale stabilní

rowAlpha = 50

rowH = 52

rowHRunningCount = 53

rowHTarget = 46

hSumTarget = Range("D37")

countStages = Range("D36").Value

columnFirstStage = 4

columnLastStage = columnFirstStage + countStages - 1

differenceSum = 100

loopCounter = 0

expVIni = 3

expDIni = 3

expLIni = 3

Range("J36").Value = expVIni

Range("J37").Value = expDIni

Range("J38").Value = expLIni

Do Until differenceSum < 0.01 Or loopCounter = 100

OK = True

hSum = 0

updateCellsPV

hSumTarget = Range("D37")

For column = columnFirstStage To columnLastStage

alpha = alphaMin - alphaStep 'nutno dat podminku na zacatek Do Until  
-> zde se musi ponizit

differenceStageTop = 1000 'any large number

alphaTop = 0

hTarget = Cells(rowHTarget, column).Value

Do While alpha <= alphaMax

alpha = alpha + alphaStep

Cells(rowAlpha, column).Value = alpha

'Worksheets(sheet).UsedRange.Rows("41:53").Calculate

Worksheets(sheet).Calculate

hValue = Cells(rowH, column).Value

differenceStage = Abs(hValue - hTarget)

If differenceStage < differenceStageTop Then

differenceStageTop = differenceStage

alphaTop = alpha

End If

alphaTop = alphaTop

Loop

Cells(rowAlpha, column).Value = alphaTop

'stage OK check

hValue = Cells(rowH, column).Value

differenceStage = Abs(hValue - hTarget)

If differenceStage > 5 Then

OK = False

'MsgBox ("failed attempt - stage")

End If

```
hSum = hSum + Cells(rowH, column).Value
```

```
MsgBox (loopCounter)
```

```
Next column
```

```
Worksheets(sheet).Calculate
```

```
hSum = Cells(rowHRunningCount, columnLastStage + 1).Value
```

```
MsgBox (hSum)
```

```
differenceSum = Abs((hSum - hSumTarget) / (hSumTarget)) 'porovnani zadaneho a  
vypocteneho souctu
```

```
If hSum > hSumTarget Then
```

```
Range("j37").Value = Range("j37").Value - 0.1
```

```
Range("q9").Value = Range("q9").Value - 0.01
```

```
End If
```

```
loopCounter = loopCounter + 1
```

```
If loopCounter = 100 Then
```

```
MsgBox ("failed attempt - loop")
```

```
End If
```

```
If OK = True Then
```

```
Range("A31").Value = "Y"
```

```
Else
```

```
Range("A31").Value = "N"
```

```
End If
```

```
Loop
```



Worksheets(sheet).Calculate

hSum = Cells(rowHRunningCount, columnLastStage + 1).Value

Range("D38").Value = hSum

'MsgBox ("done.")

End Sub

### **Makro aktualizující hodnoty iterované v hlavním optimalizačním makru**

Public Sub updateCellsPV()

Dim rowXi\_k As Integer

Dim rowXi\_v As Integer

Dim rowX\_n As Integer

Dim rowM As Integer

Dim row2S As Integer 'radek cteni stavu za expanzi

Dim row0SW As Integer 'radek zapisu stavu pred expanzi

Dim columnS As Integer 'sloupec prvnioho stupne

Dim columnE As Integer 'sloupec posledniho stupne

Dim column0SW As Integer 'sloupec zapisu stavu pred expanzi

Dim stagesCount As Integer

Dim row As Integer

Dim column As Integer

Dim rowW As Integer 'radka zapisu

Dim columnW As Integer 'sloupec zapisu

Dim rowHzCalc As Integer

Dim rowI0 As Integer

Dim rowI1 As Integer

Dim rowI2 As Integer

Dim rowX0 As Integer

Dim rowX1 As Integer

Dim rowX2 As Integer

Dim iWetS As Double

Dim Hx As Double

Dim hIzCalc As Double

Dim wetStartFounf As Boolean

'-----

rowXi\_k = 90

rowXi\_v = 91

rowX\_n = 72

row0S = 55

row0SW = 22

rowI0 = 56

rowI1 = rowI0 + 6

rowI2 = rowI1 + 6

rowX0 = 60

rowX1 = rowX0 + 6

rowX2 = rowX1 + 6

rowHIzCalc = 52

columnS = 4

column0SW = 16

rowM = 54

'-----

'n stage losses

```
stagesCount = Range("D36").Value  
columnE = columnS + stagesCount - 1
```

```
Range("i19") = Cells(rowXi_k, columnE)  
Range("i22") = Cells(rowXi_v, columnE)
```

```
'-----  
'stav pary pred prutocnou casti (pred prvnm stupnem)  
rowW = row0SW  
columnW = column0SW
```

```
Cells(rowW - 1, columnW) = Cells(rowM, columnE)
```

```
For row = row0S To row0S + 5  
    Cells(rowW, columnW) = Cells(row, columnE)
```

```
    rowW = rowW + 1
```

```
Next row
```

```
'-----  
'h_iz_vypocteno  
hIzCalc = 0
```

```
For column = columnS To columnE  
    hIzCalc = hIzCalc + Cells(rowHIzCalc, column)  
Next column
```

```
Range("d38").Value = hIzCalc
```

End Sub

## Hlavní optimalizační makro

Public Sub calculateEffectivity()

Dim F As Double

Dim initialF As Double

Dim calcF As Double

Dim diffF As Double

Dim diffFLimit As Double

Dim Eta As Double

Dim initialEta As Double

Dim calcEta As Double

Dim diffEta As Double

Dim diffEtaLimit As Double

Dim loopCounter As Integer

Dim sheet As String

sheet = "Pretlak"

initialF = 0.1

diffF = 1

diffFLimit = 0.01

initialEta = 0.7

diffEta = 1

diffEtaLimit = 0.01

loopCounter = 0

F = initialF

Eta = initialEta

Range("Q9").Value = F

Range("W11").Value = Eta

```
Range("F22").Value = Eta
```

```
Do Until diffF <= diffFLimit And diffEta <= diffEtaLimit
```

```
    updateCellsPV
```

```
    calculateBlades
```

```
    updateCellsPV
```

```
    Worksheets(sheet).Calculate
```

```
    calcF = Range("Q12").Value
```

```
    calcEta = Range("W16").Value
```

```
    diffF = Abs(F - calcF) / F
```

```
    diffEta = Abs(Eta - calcEta) / Eta
```

```
    F = calcF
```

```
    Eta = calcEta
```

```
    Worksheets(sheet).Calculate
```

```
    Range("Q9").Value = F
```

```
    Range("W11").Value = Eta
```

```
    Range("F22").Value = Eta
```

```
    loopCounter = loopCounter + 1
```

```
    If loopCounter >= 20 Then
```

```
        diffF = -1                'escape loop
```

```
        diffEta = -1              ' escape loop
```

```
        Range("A31").Value = "N"
```

```
        MsgBox ("too many attempts")
```

```
    End If
```

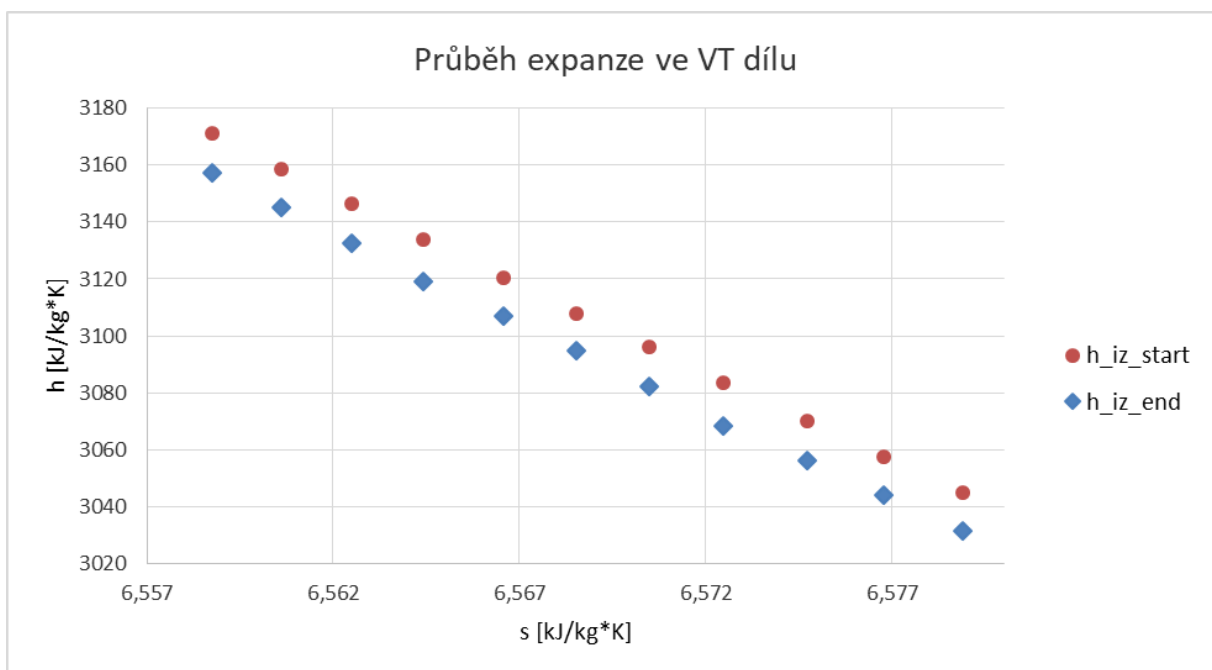
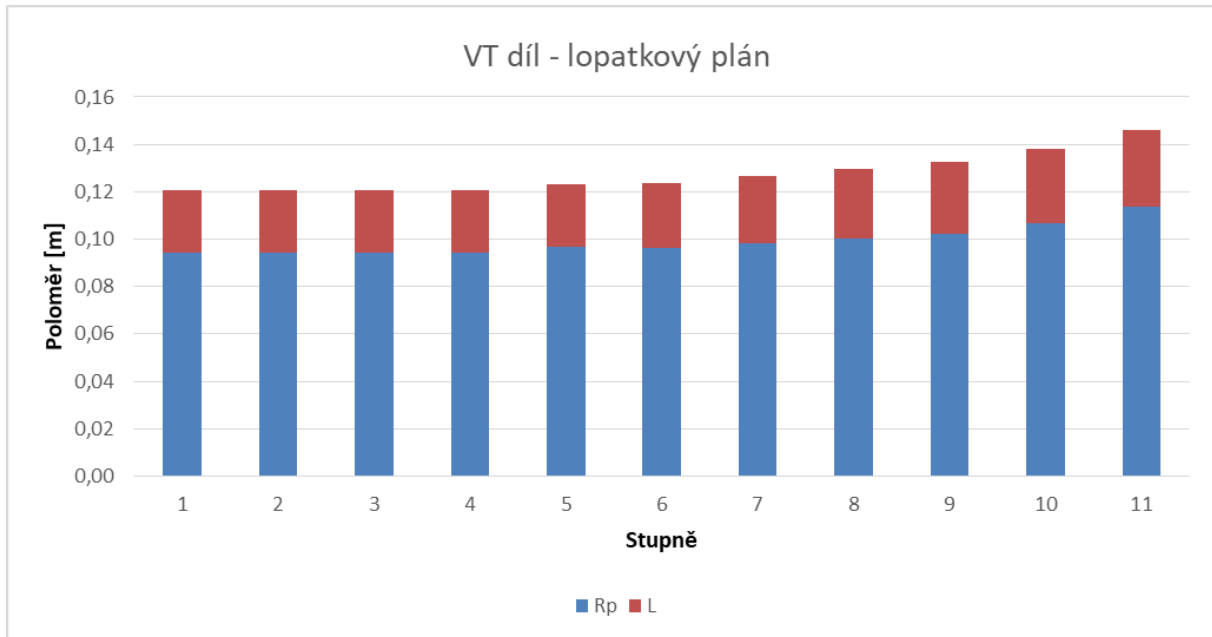
```
Loop
```

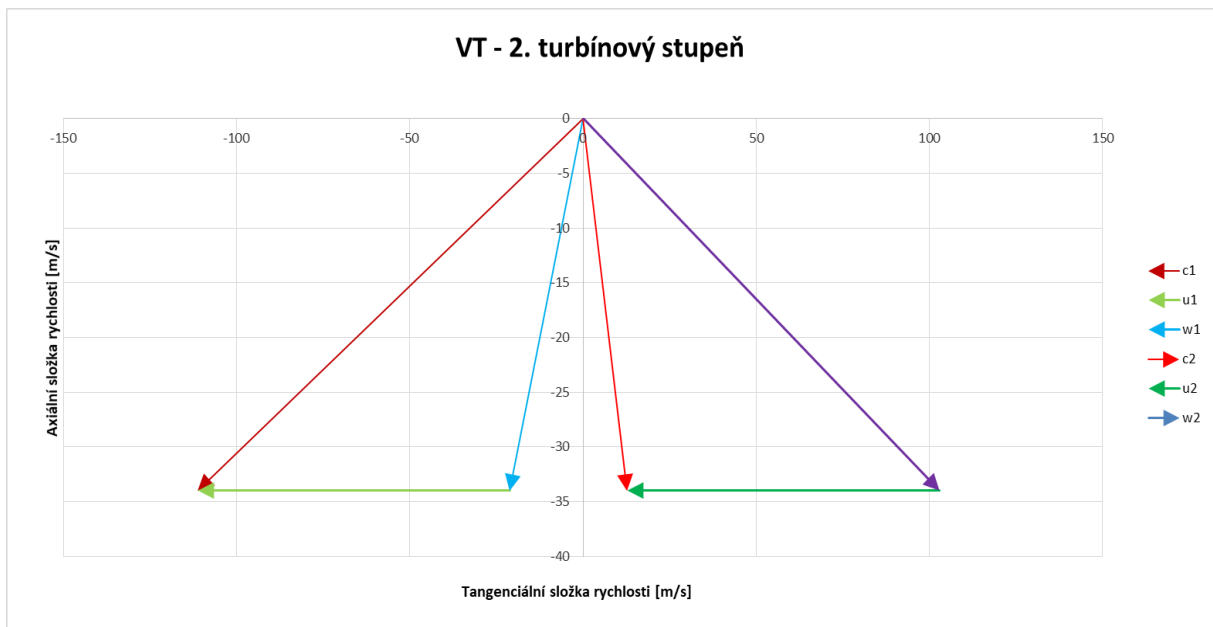
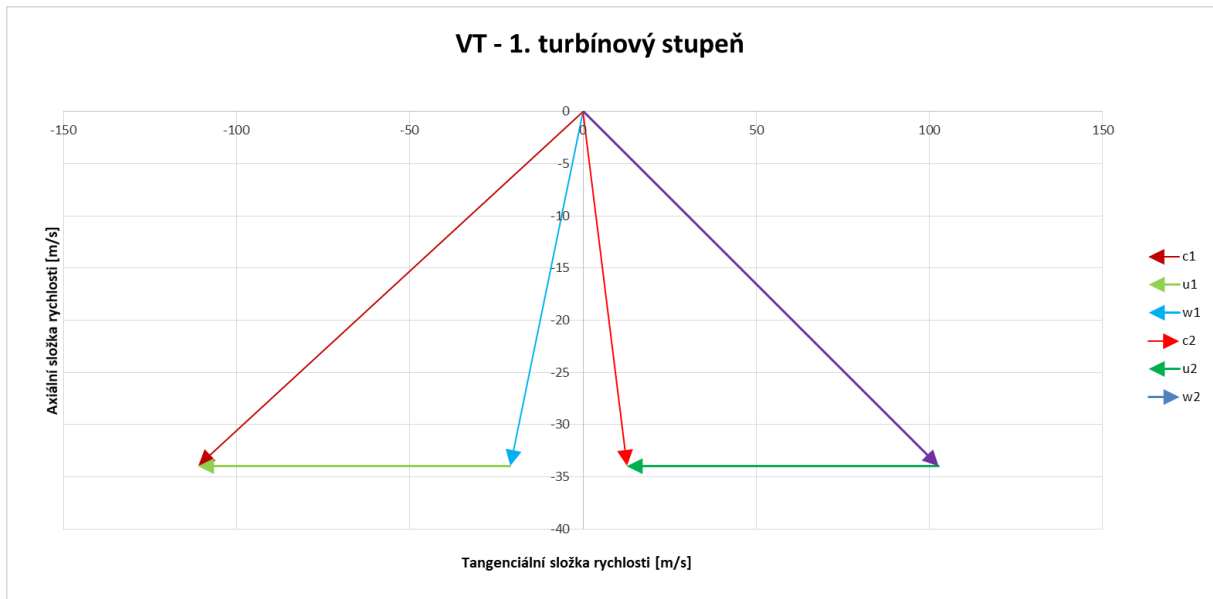
```
updateCellsPV
```

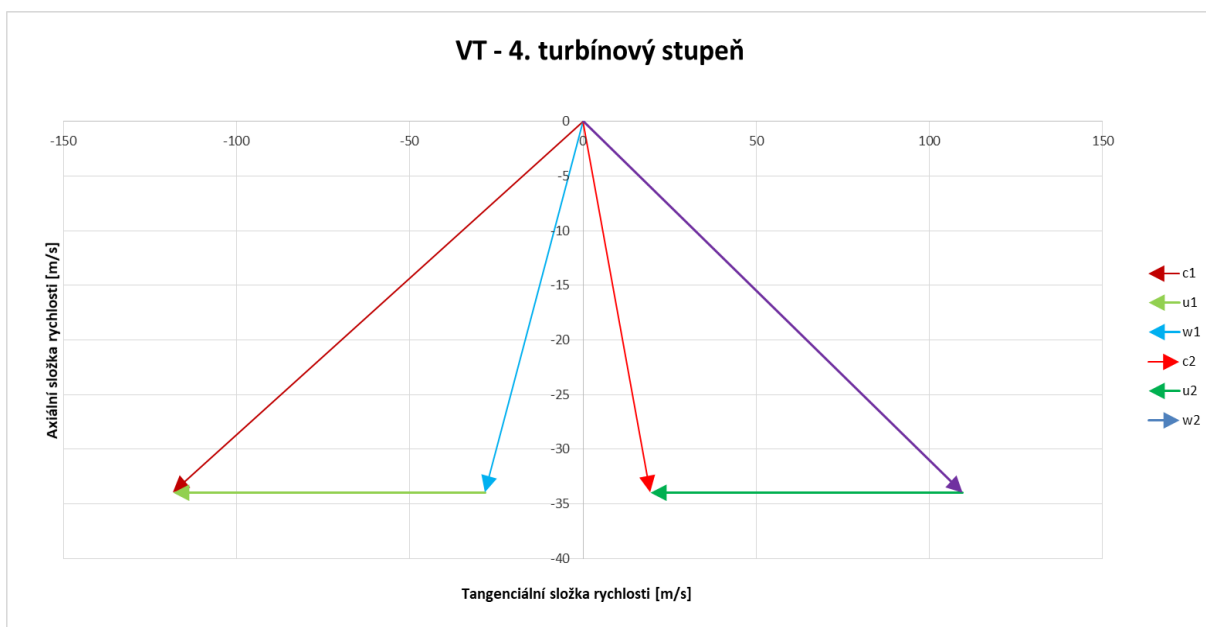
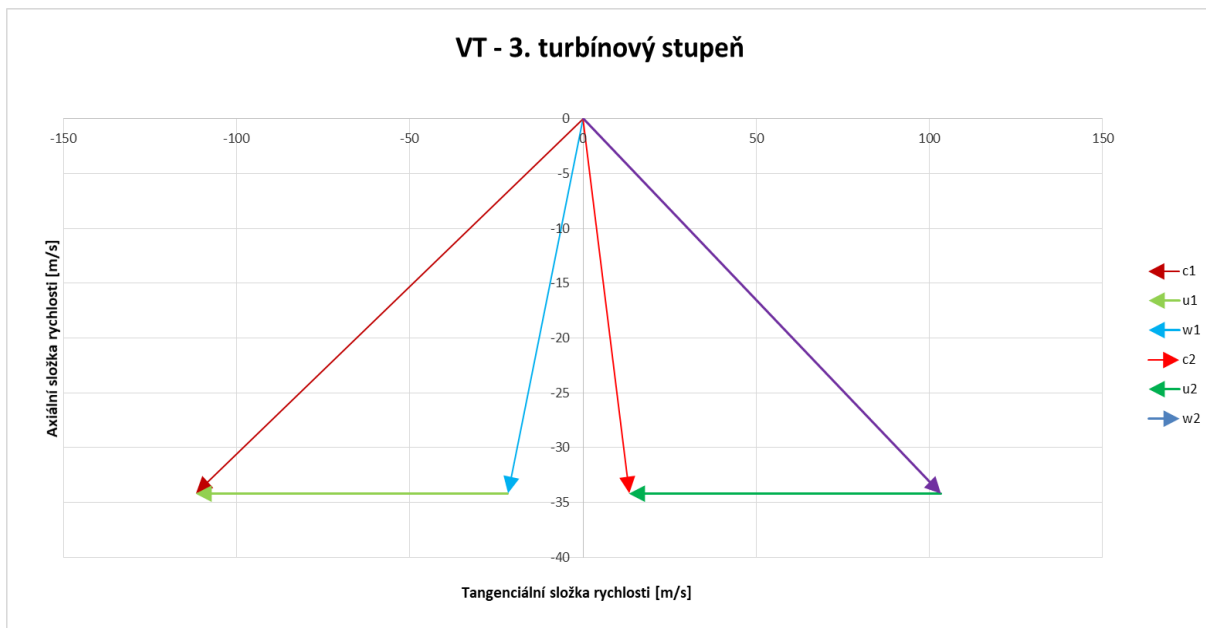
```
MsgBox ("DONE.")
```

```
End Sub
```

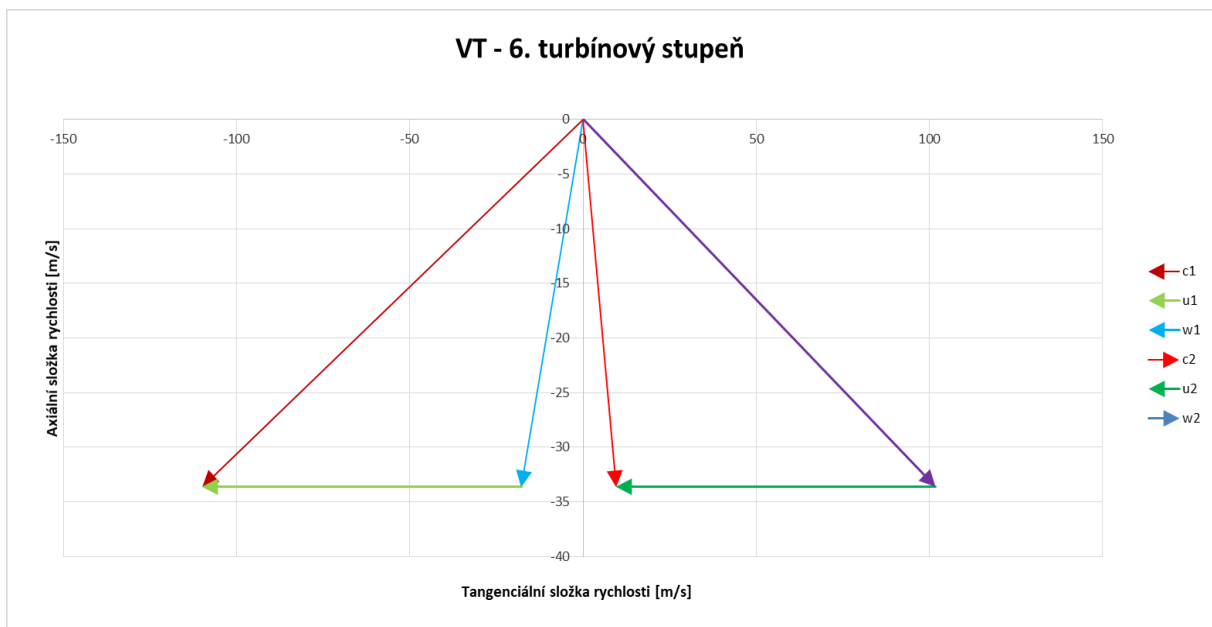
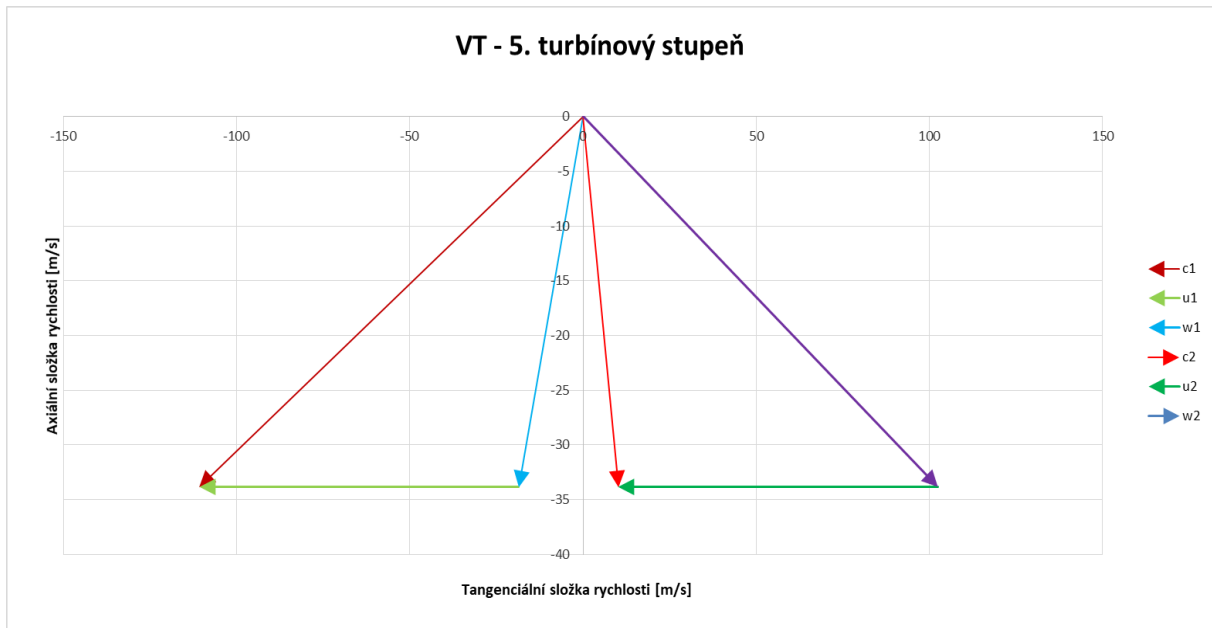
### Příloha 8: Grafické znázornění provedení vysokotlakého dílu

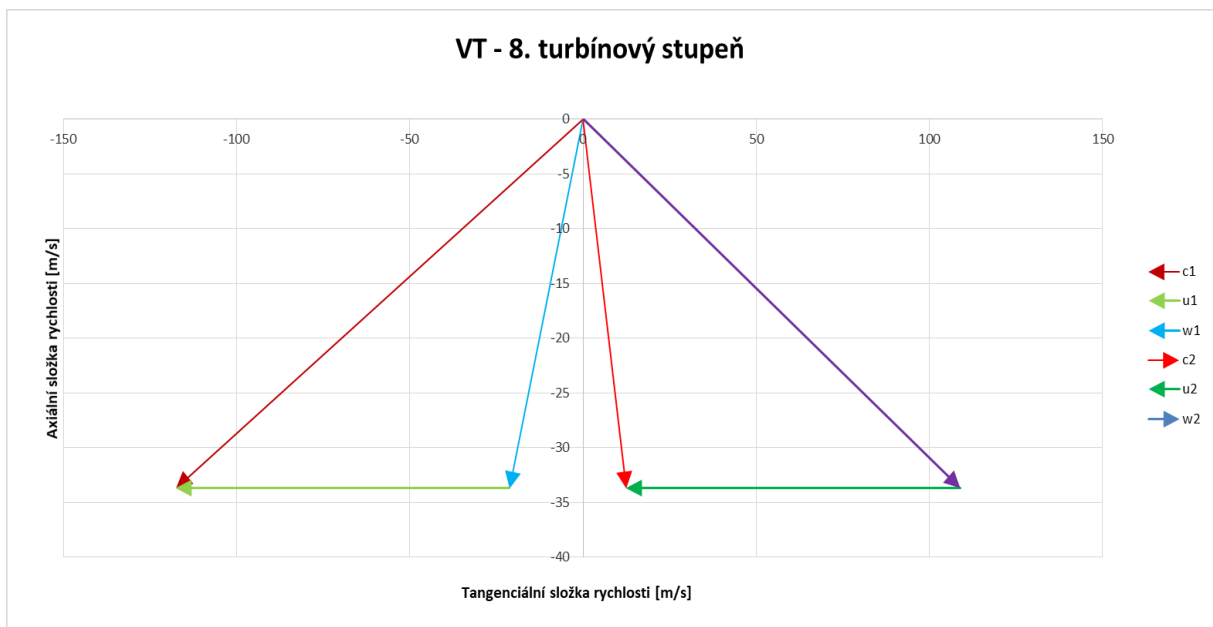
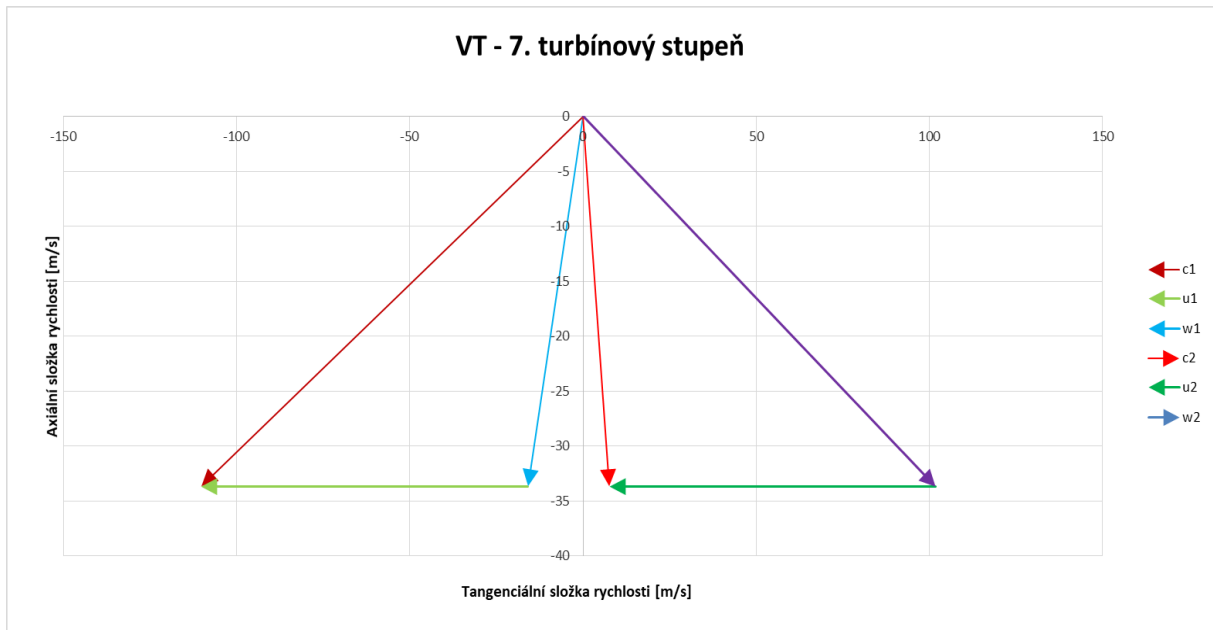


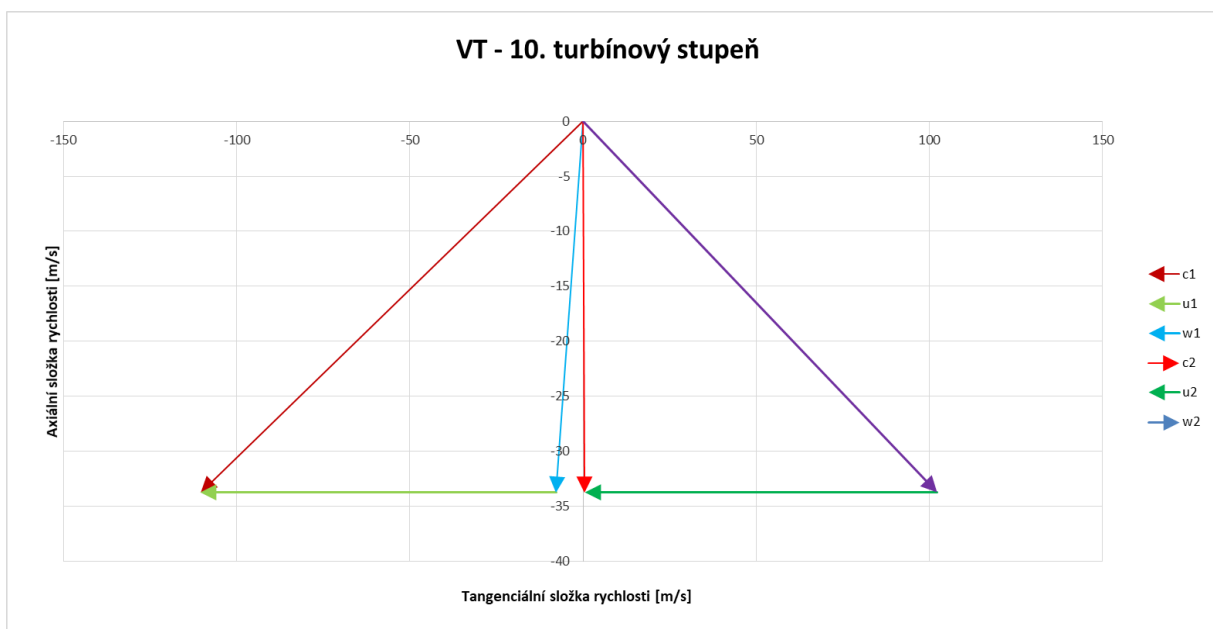
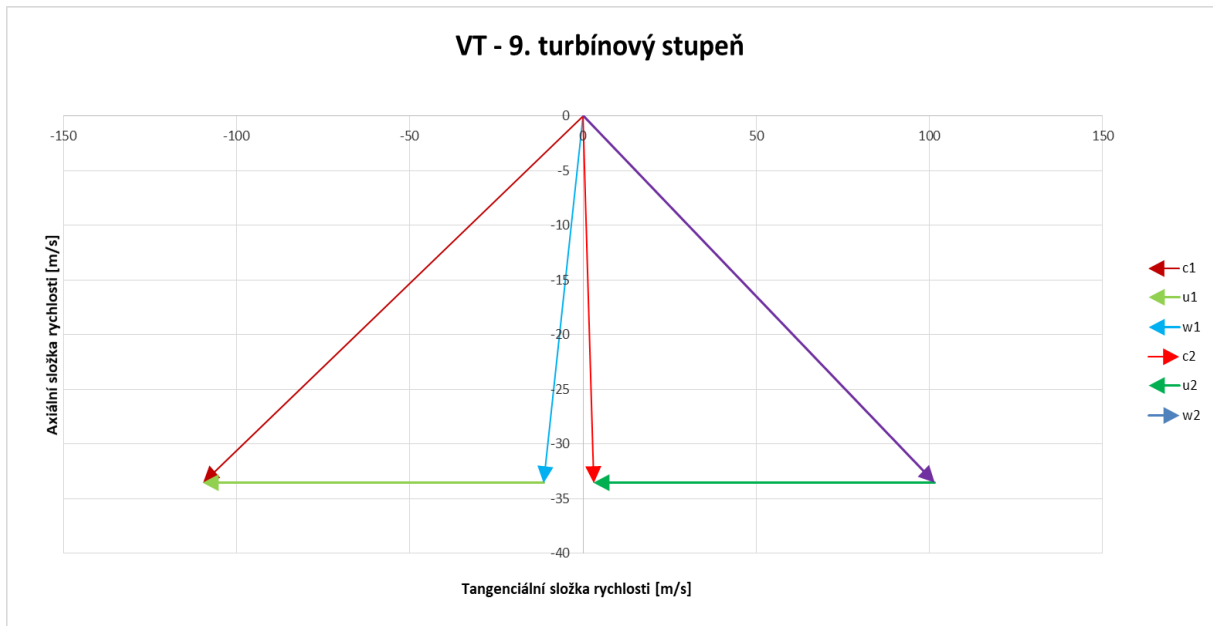


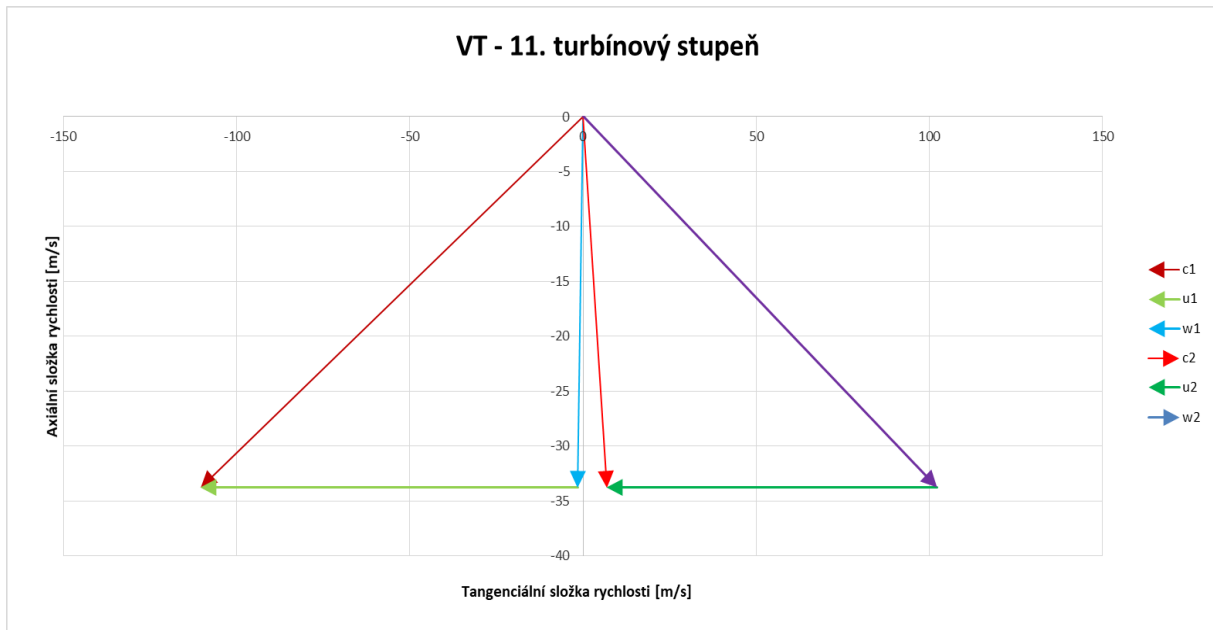




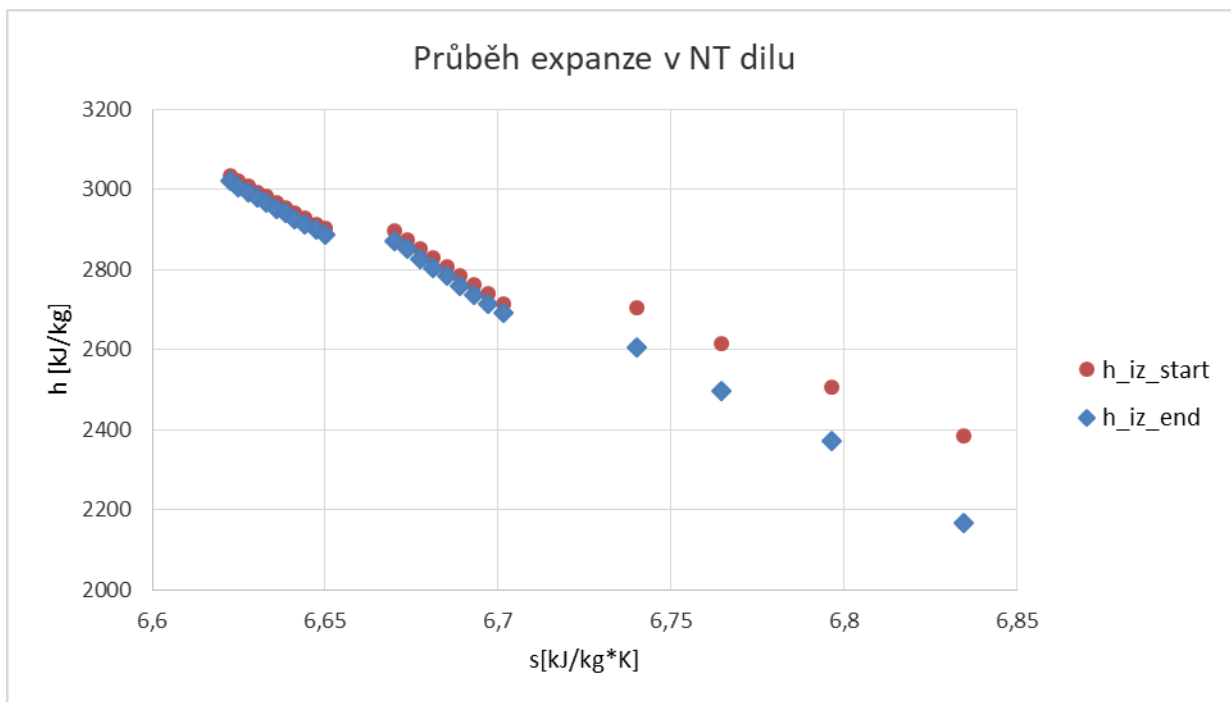
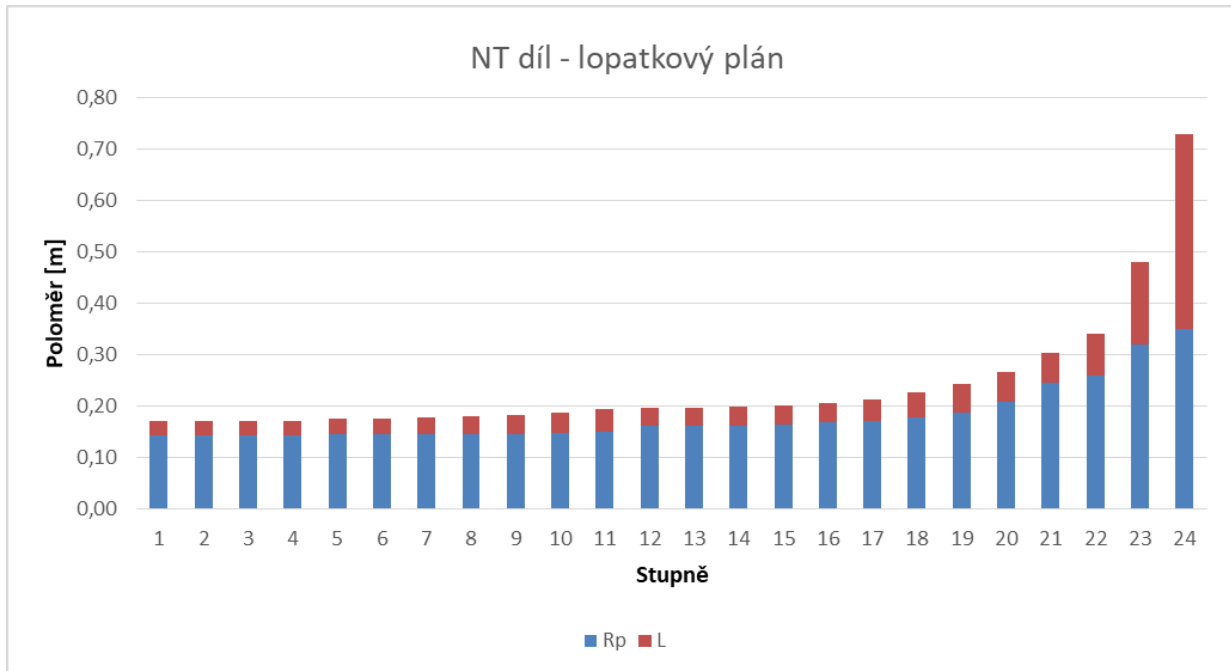


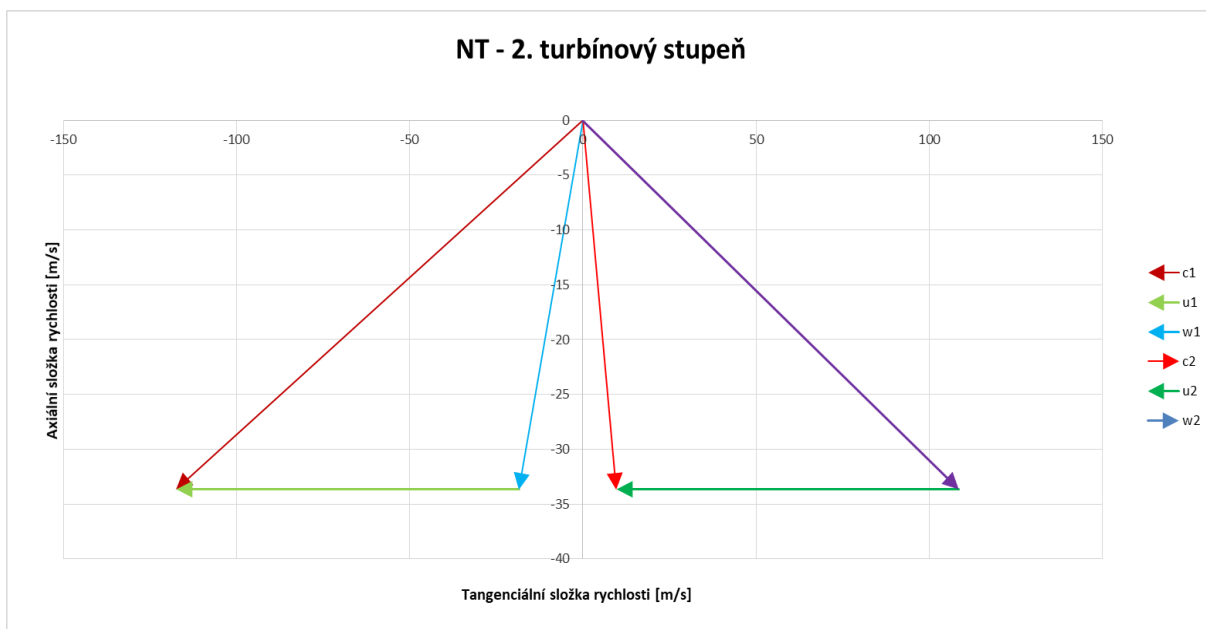
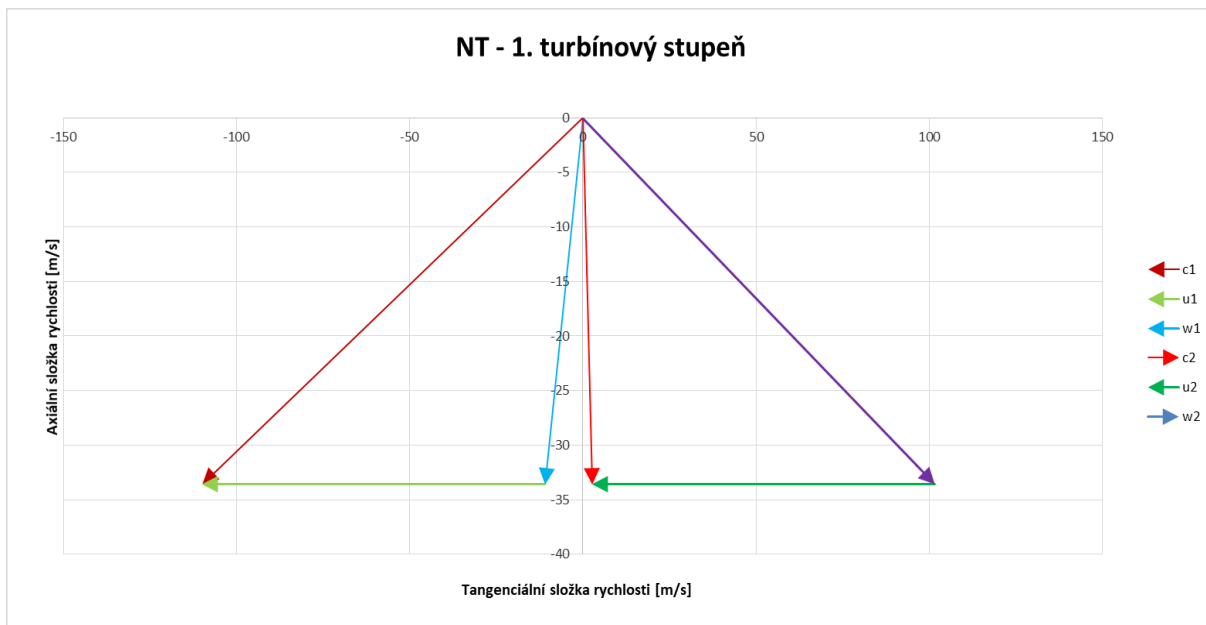


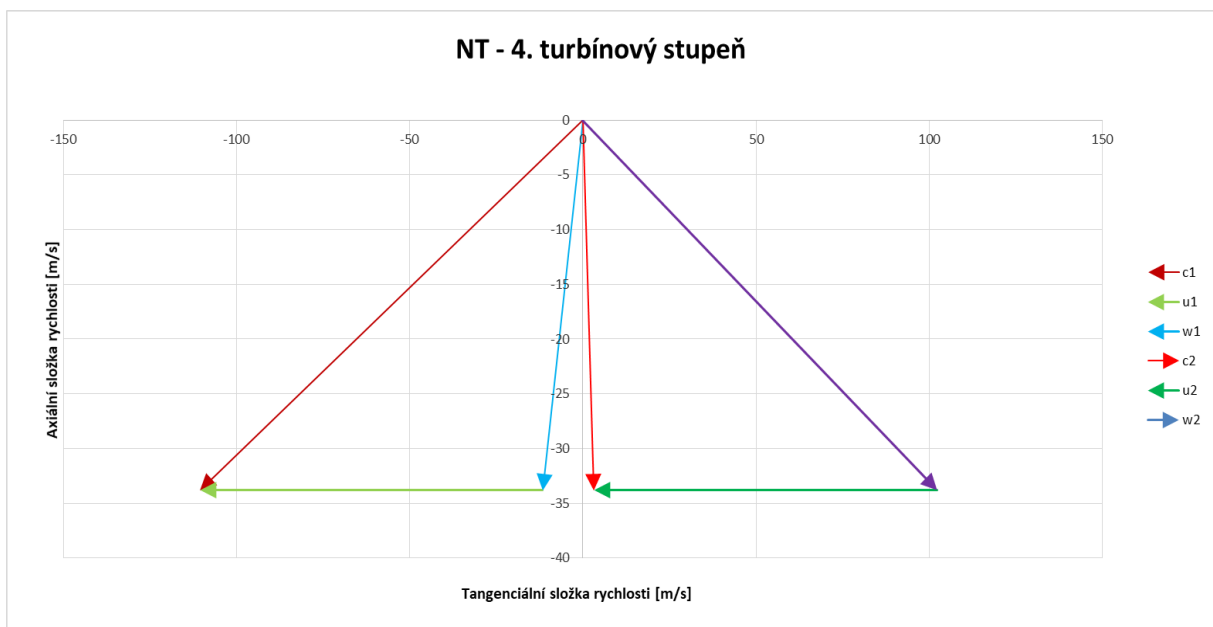
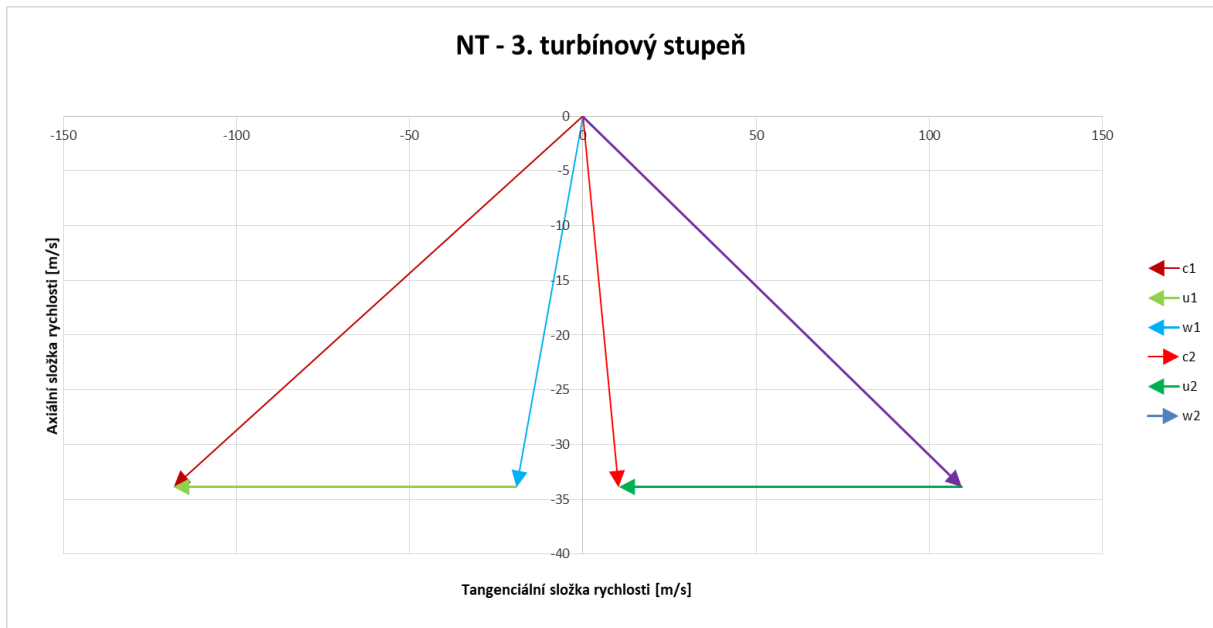


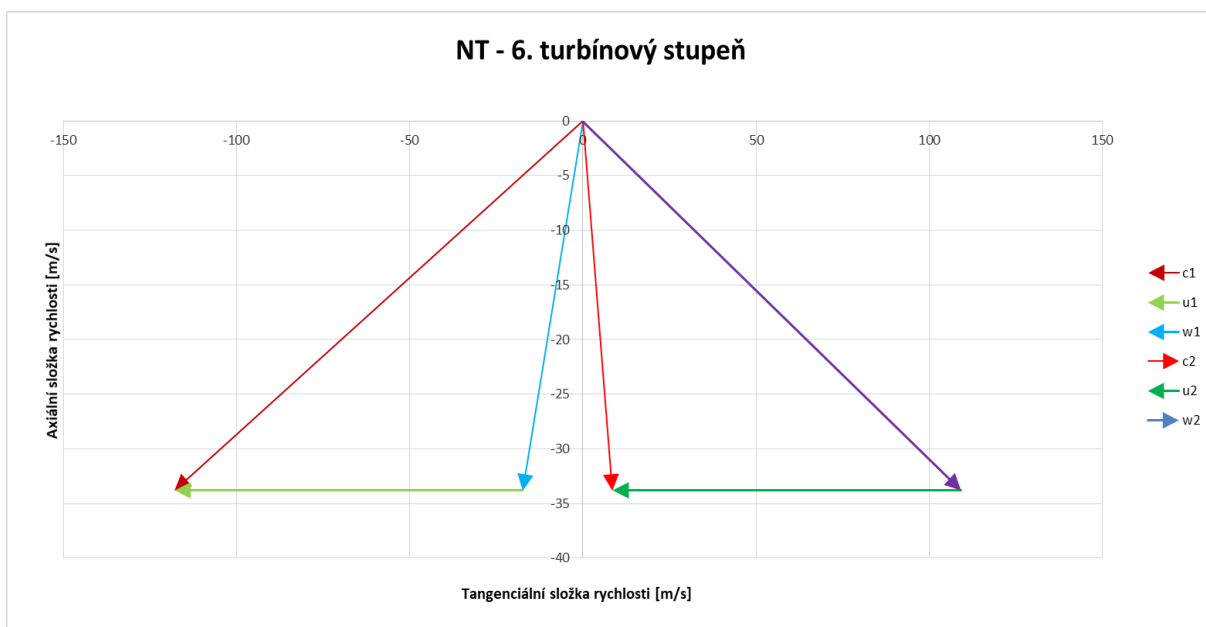
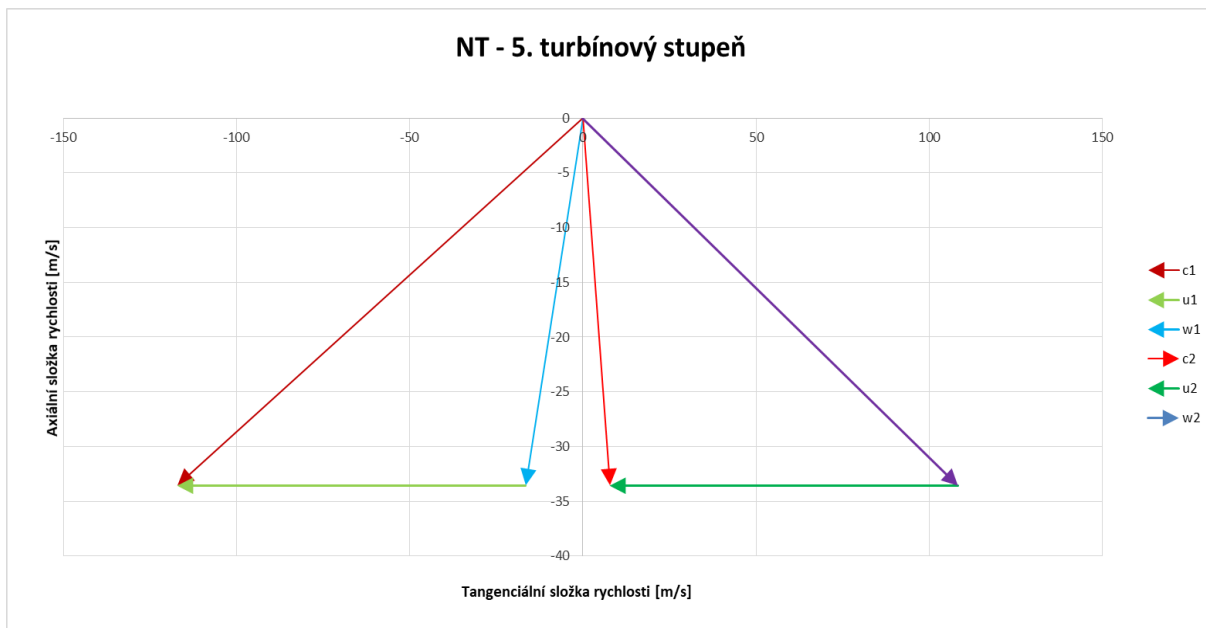


### Příloha 9: Grafické znázornění provedení nízkotlakého dílu

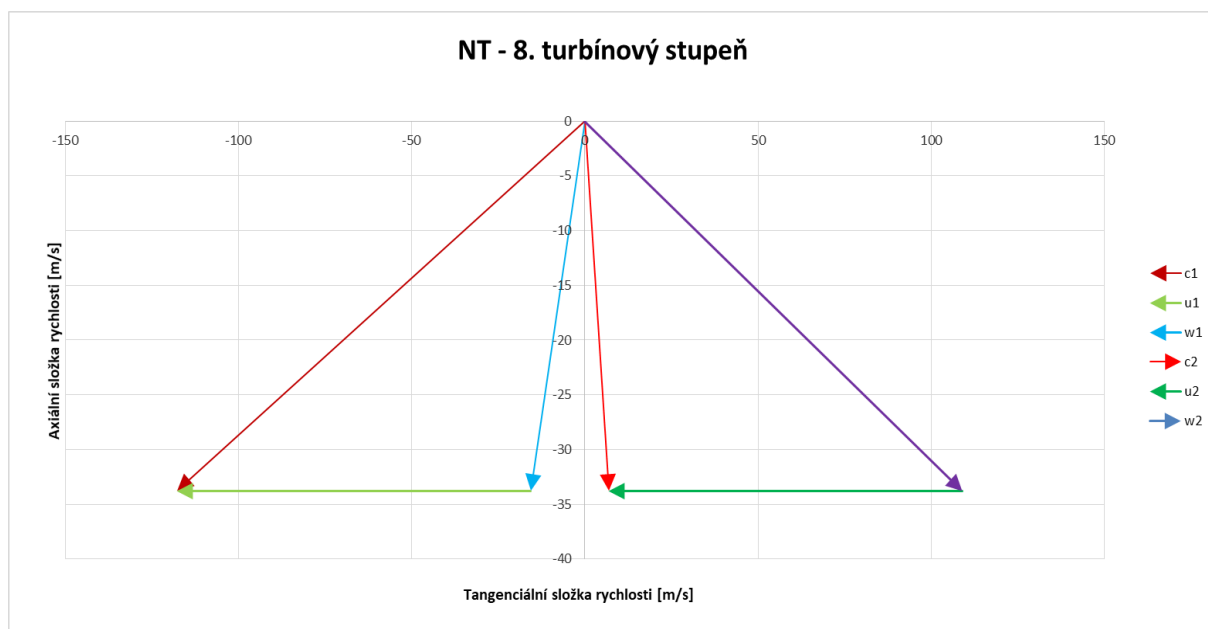
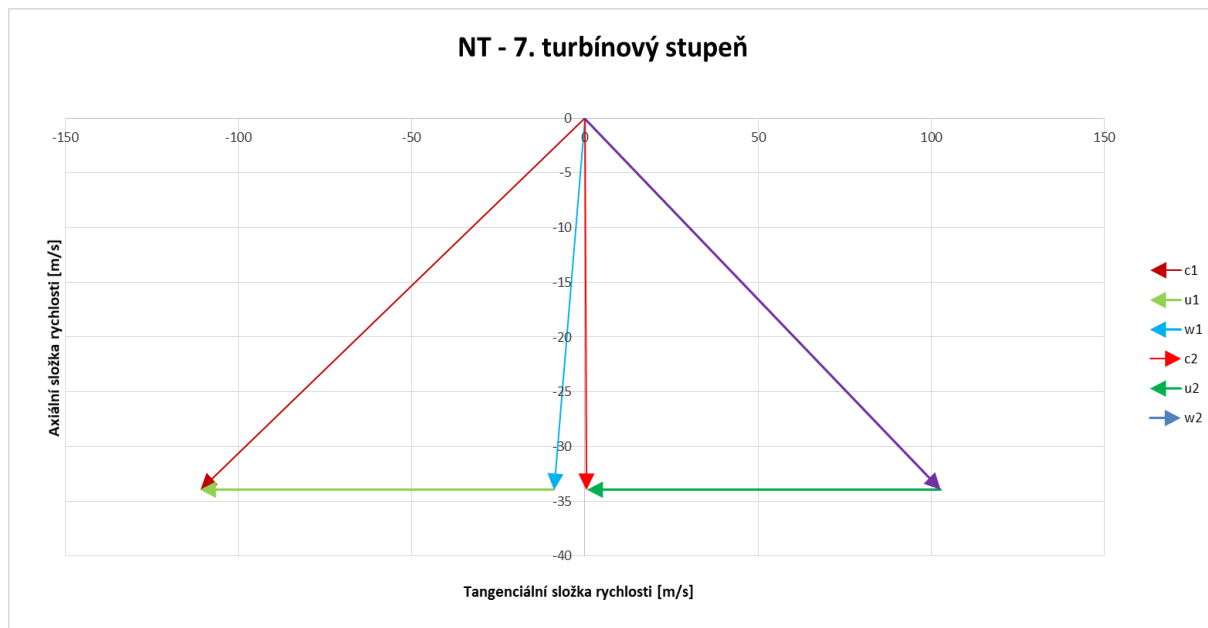


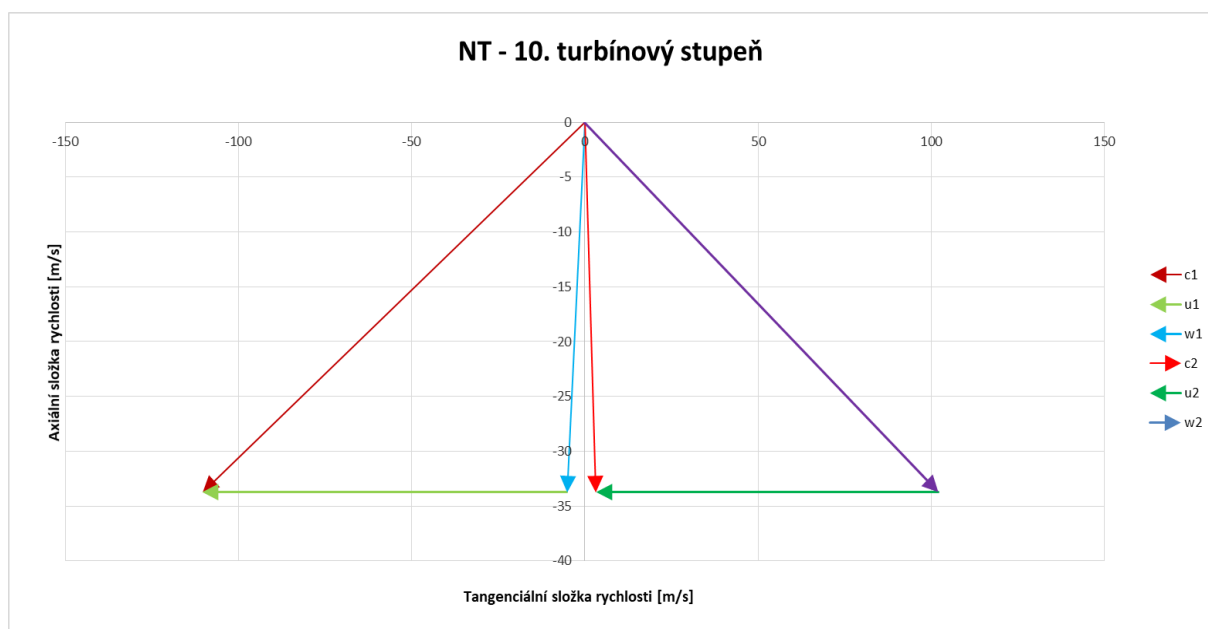
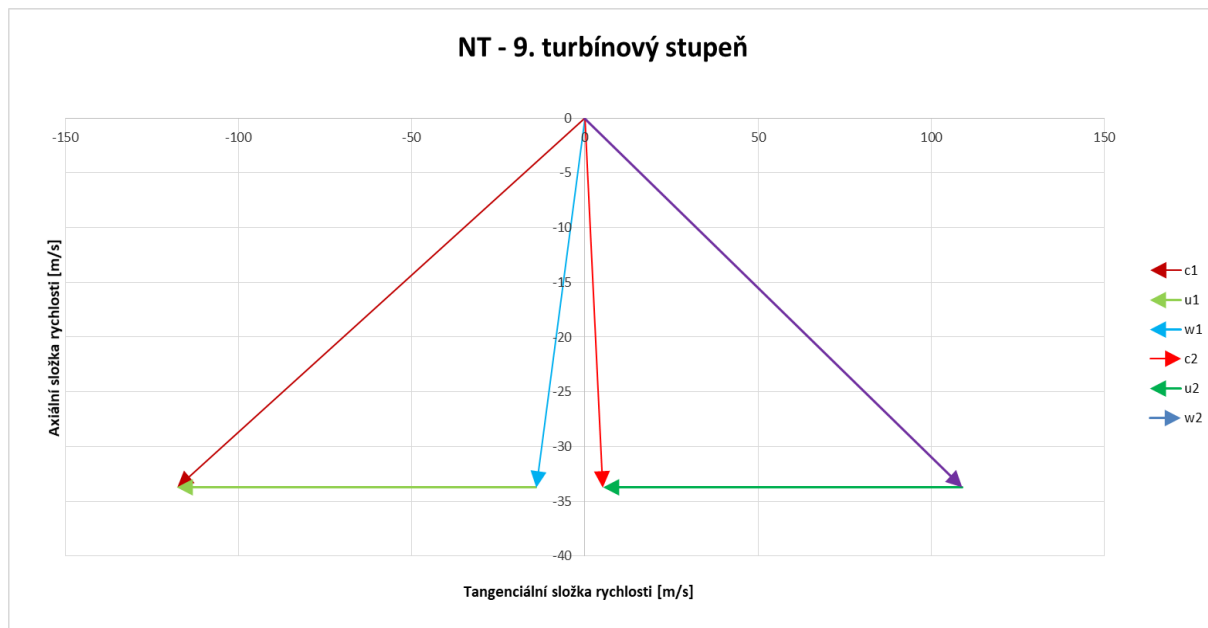


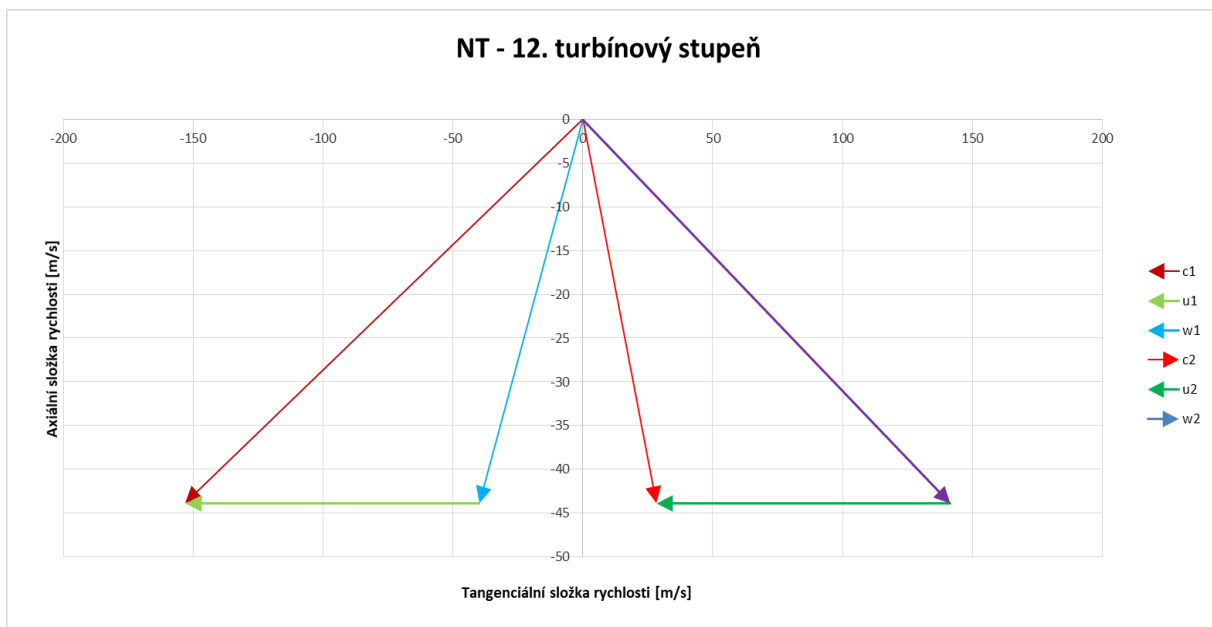
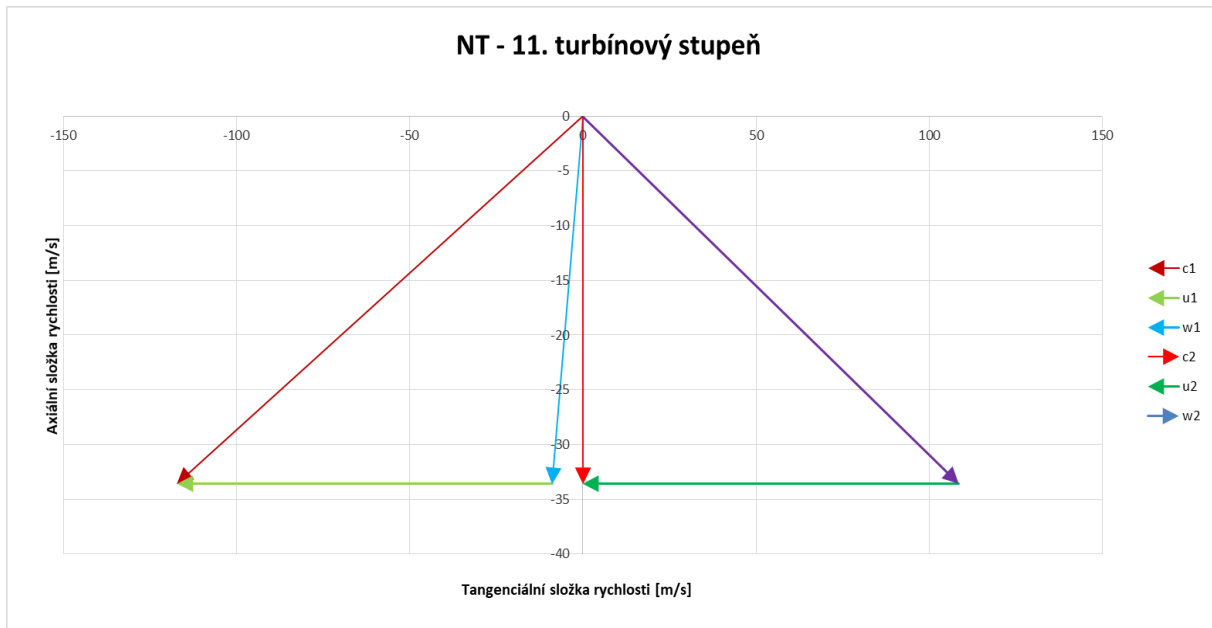


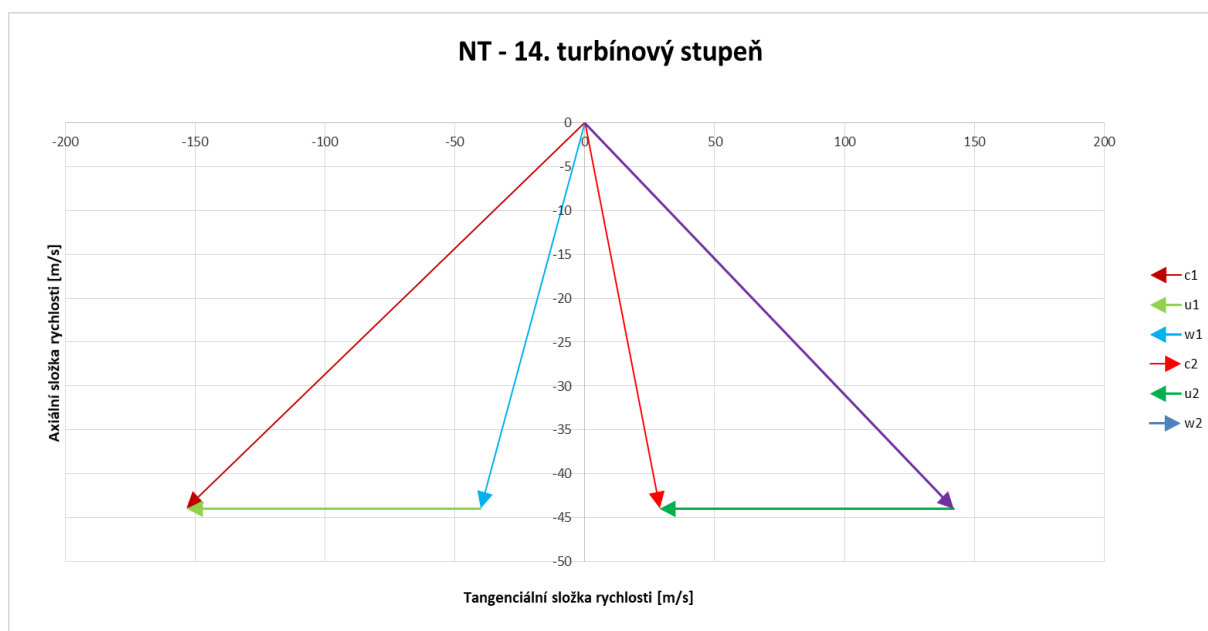
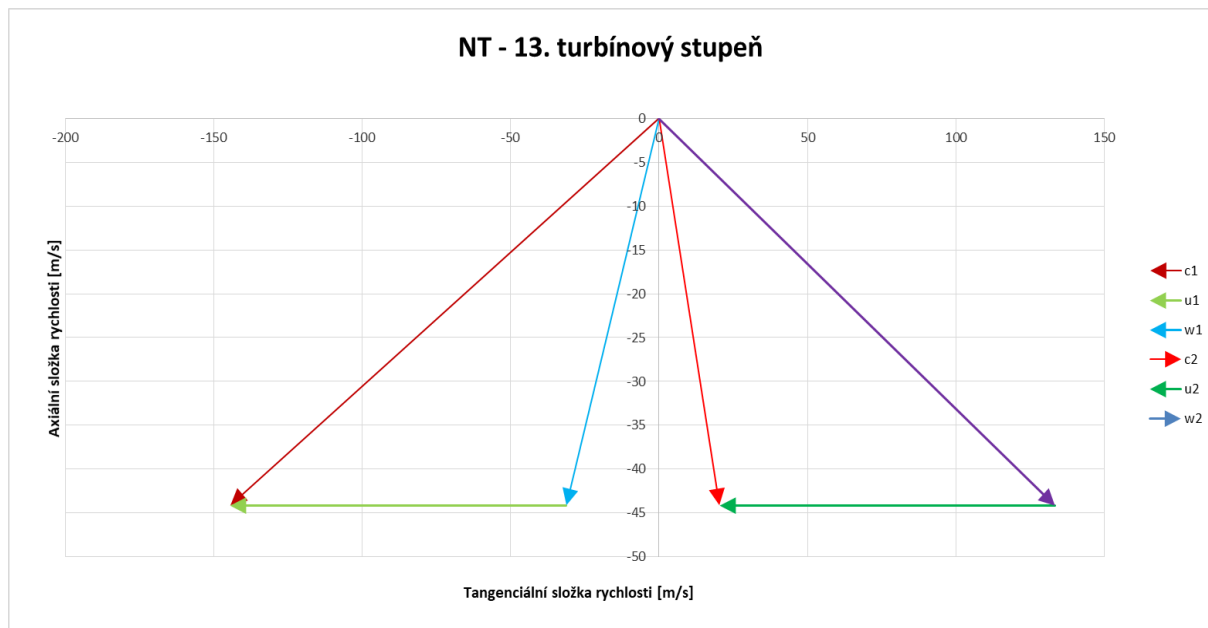


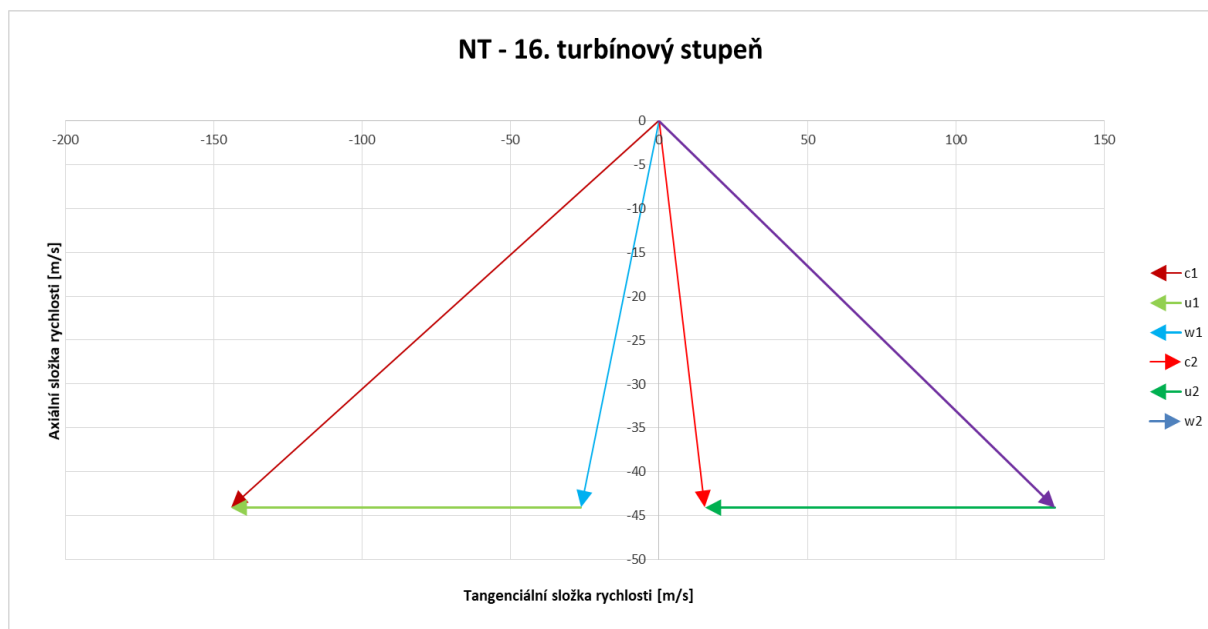
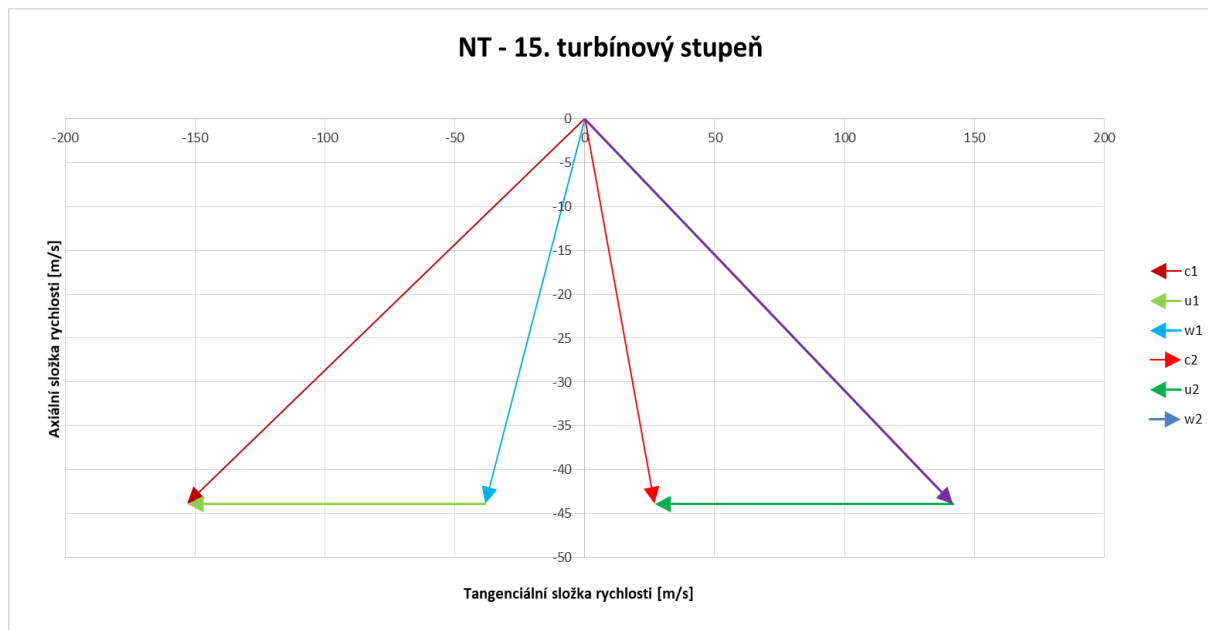


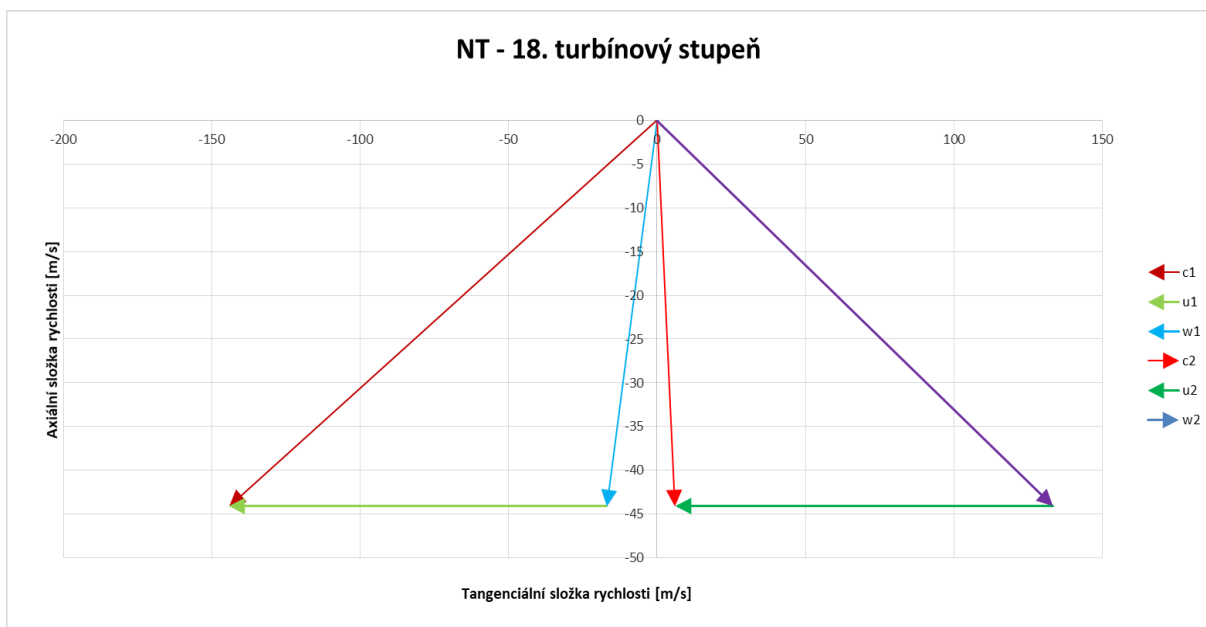
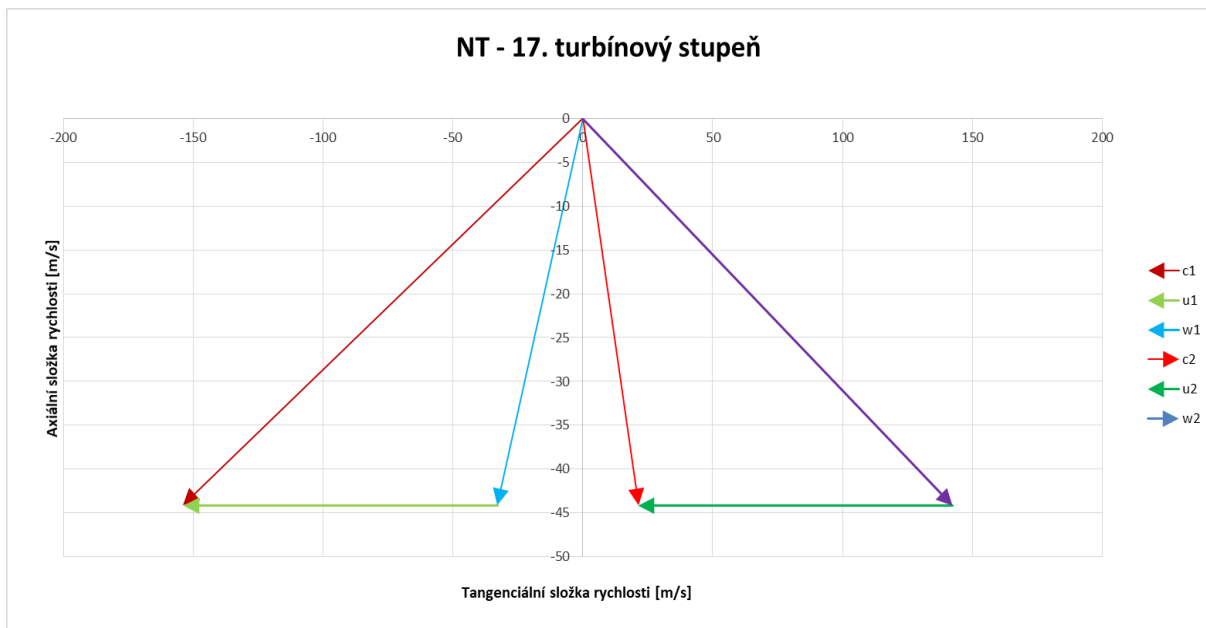


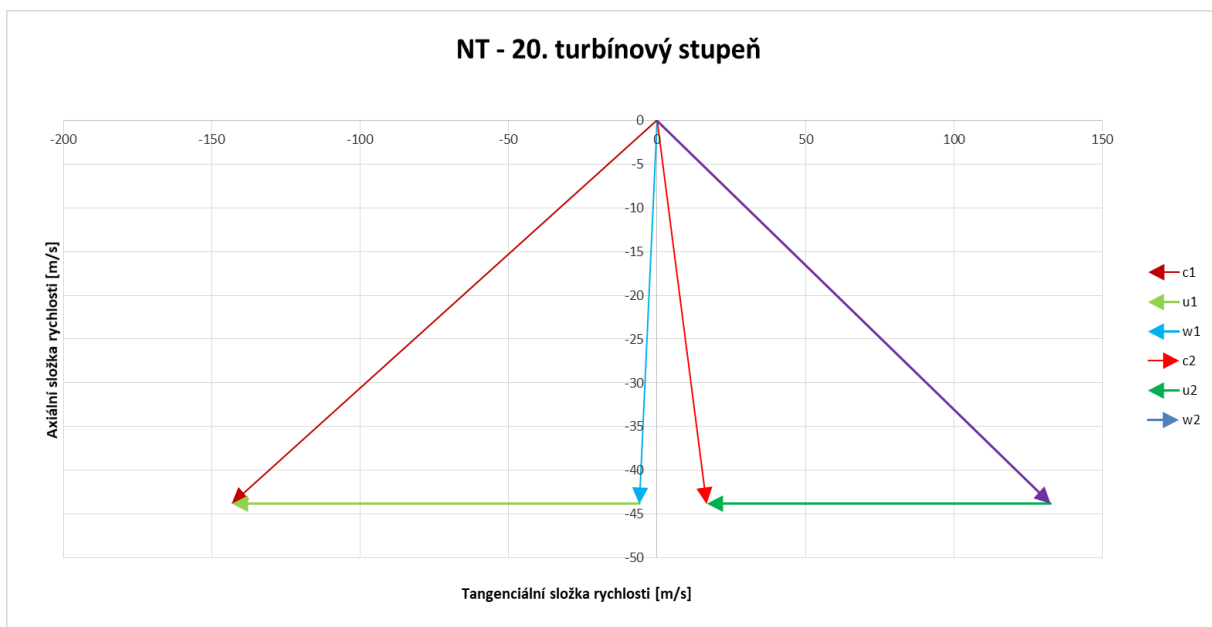
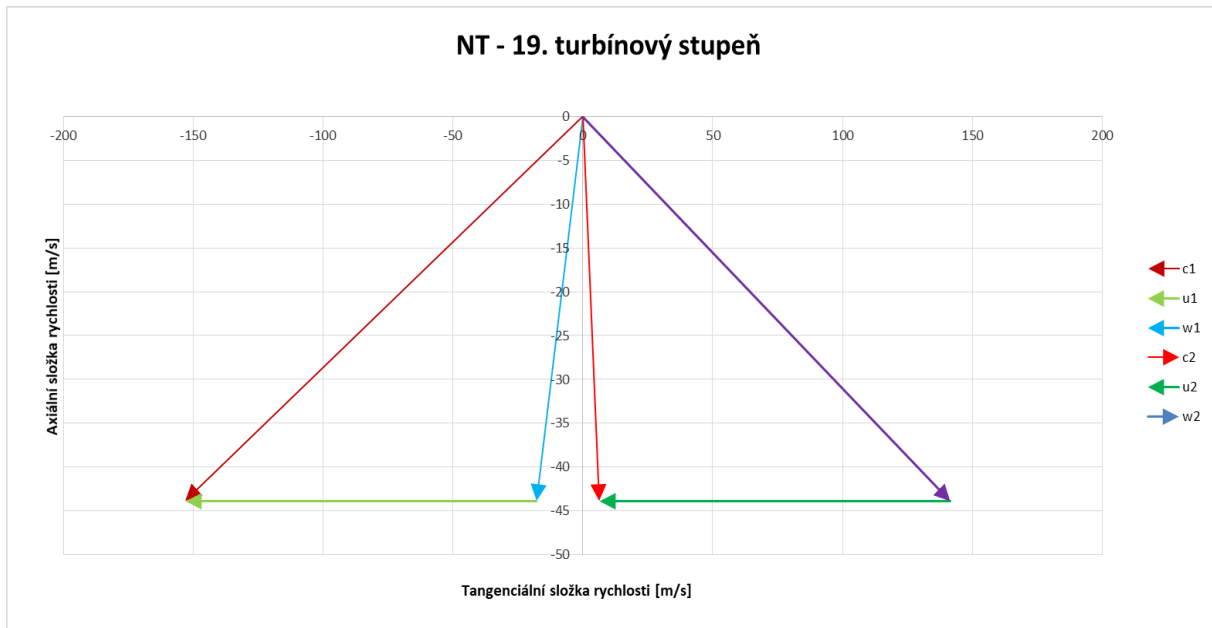


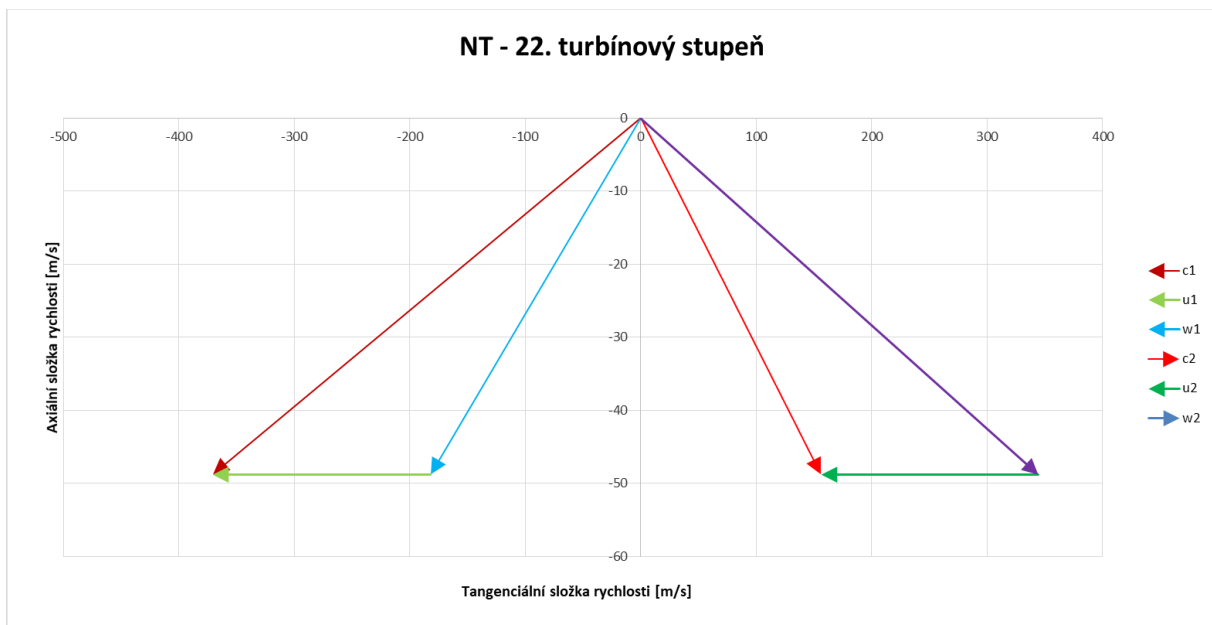
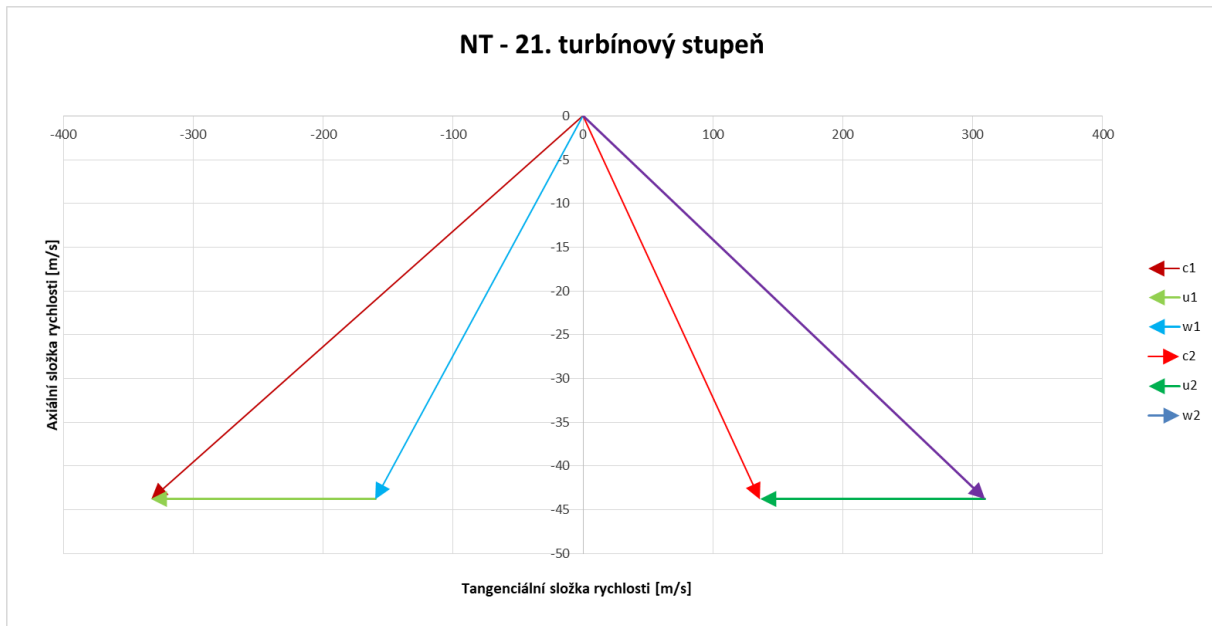




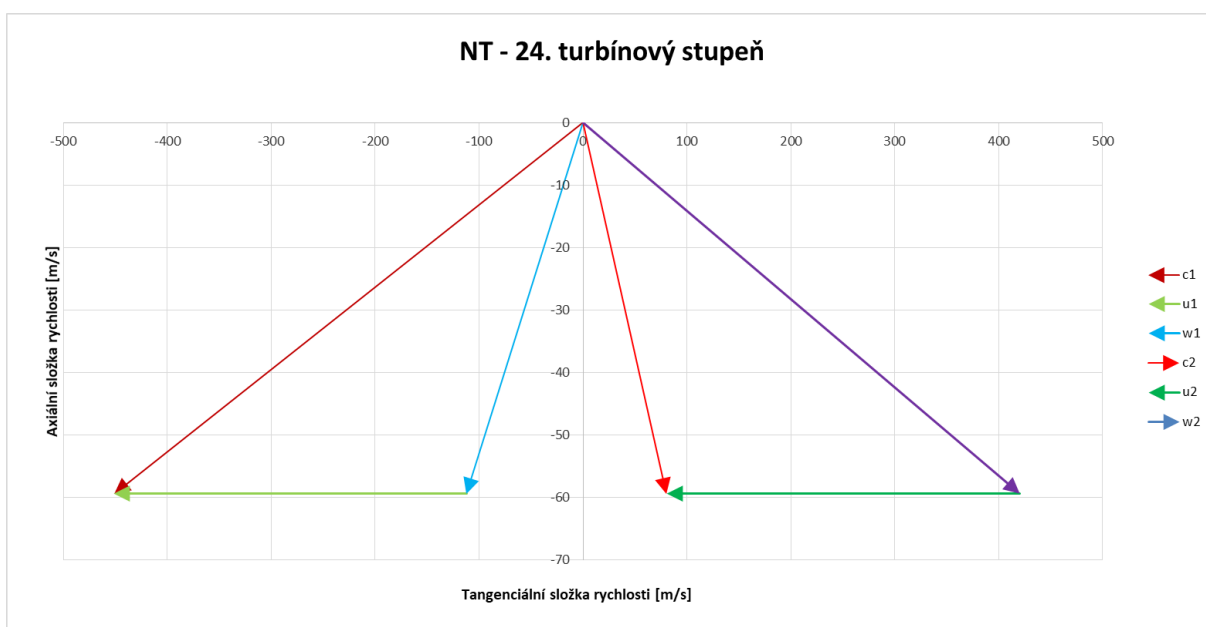
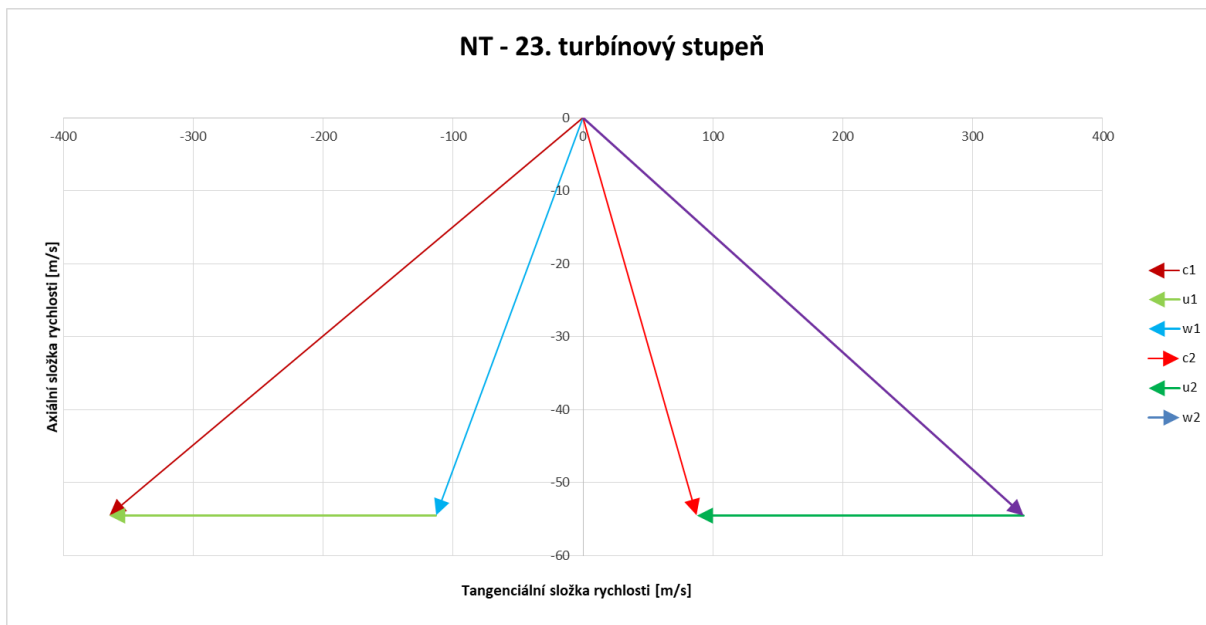






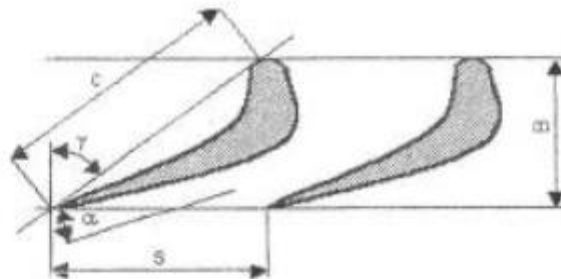






### Příloha 10: Profily přetlakových lopatek [1]

Tab. 10.1 Přetlakové profily statorových a rotorových lopatek – doporučené hodnoty



Profil	B	$\alpha_0, s$ [mm]						c [mm]	$\gamma$	$W_{mn}$ [cm <sup>3</sup> ]	S [cm <sup>2</sup> ]												
		s/c = 0,67		s/c = 0,75		s/c = 0,815																	
PB 500	8,5	s = 8,44	12	s = 9,9	13	s = 18,758	14	13,2	49°	0,0114	0,265												
	9,2											16	17	20	18	23,0	44°30'						
	9,7																	18	23	21	38°30'		
	10,1																						
PB 510	11,8	s = 12,261	12	s = 13,725	13	s = 14,9145	14	18,3	49°	0,0304	0,5099												
	12,8											16	17	20	18	21	44°30'						
	13,4																	19	23	21	38°30'		
	14,1																					26	35°
	14,7																						
PB 520	14,4	s = 15,008	12	s = 16,8	13	s = 18,256	14	22,4	49°	0,0543	0,780												
	15,7											16	17	20	18	20	44°30'						
	16,5																	19	23	26	38°30'		
	17,2																					30	35°
	18,0																						
19,1																							
PB 530	18,7	s = 17,956	16	s = 20,1	17	s = 21,842	18	26,8	44°30'	0,0930	1,115												
	19,6											19	20	23	21	38°30'							
	20,5																26	30	35°				
	21,6																			30°			
	22,8																						
PB 540	21,5	s = 20,77	16	s = 23,25	17	s = 25,265	18	31,0	44°30'	0,1439	1,496												
	22,8											19	20	23	21	38°30'							
	23,8																26	30	35°				
	24,9																			30°			
	26,4																						
PB 550	27,4	s = 26,264	16	s = 29,4	17	s = 31,948	18	39,2	44°30'	0,2915	2,385												
	28,8											19	20	23	21	38°30'							
	30,1																26	30	35°				
	31,5																			30°			
	33,4																						
PB 560	38,8	s = 30,552		s = 34,2	30	s = 37,164		45,6	30°	0,460	3,230												
	40,8											33	25°										

1500 1501	8,7 9,3 9,6 10,0 10,3 10,8 11,2	$s = 8,0$	(12) 16 19	$s = 9,0$	(13) 17 20 23 26 30 33	$s = 9,8$	14 18 21	12	41,5 37,0 34,0 31,0 27,5 22,5 17,5	16,4	32,2
1510 1511	11,6 12,3 12,8 13,3 13,8 14,4 14,9	$s = 10,7$	(12) 16 19	$s = 12,0$	(13) 17 20 23 26 30 33	$s = 13,0$	14 18 21	16	41,5 37,0 34,0 31,0 27,5 22,5 17,5	38,7	56,9
1520 1521	14,4 15,4 16,0 16,6 17,2 18,0 18,6	$s = 13,4$	(12) 16 19	$s = 15,0$	(13) 17 20 23 26 30 33	$s = 16,3$	14 18 21	20	41,5 37,0 34,0 31,0 27,5 22,5 17,5	76,3	89,8
1530 1531	17,3 18,5 19,2 19,9 20,6 21,6 22,3	$s = 16,1$	(12) 16 19	$s = 18,0$	(13) 17 20 23 26 30 33	$s = 19,6$	14 18 21	24	41,5 37,0 34,0 31,0 27,5 22,5 17,5	131,1	128,5
1540 1541	20,2 21,6 22,4 32,2 24,1 25,2 26,1	$s = 18,8$	(12) 16 19	$s = 21,0$	(13) 17 20 23 26 30 33	$s = 22,8$	14 18 21	28	41,5 37,0 34,0 31,0 27,5 22,5 17,5	207,9	174,7
1550 1551	25,3 27,0 28,0 29,0 30,1 31,4 32,6	$s = 23,5$	(12) 16 19	$s = 26,3$	(13) 17 20 23 26 30 33	$s = 28,5$	14 18 21	35	41,5 37,0 34,0 31,0 27,5 22,5 17,5	405,4	272,6
1560 1561	29,6 31,6 32,9 34,0 35,3 36,8 38,2	$s = 27,5$	(12) 16 19	$s = 30,8$	(13) 17 20 23 26 30 33	$s = 33,4$	14 18 21	41	41,5 37,0 34,0 31,0 27,5 22,5 17,5	650,9	374,0

## Příloha 11: Materiály oběžných a rozváděcích lopatek [4]

	*ident	název mater.	Sqkm	Tmax	S20.	100.	200.	300.	350.	375.	400.	420.	440.	460.	480.	500.	510.	520.	530.	540.	550.	→T	E20.	100.	200.	300.	400.	500.	600.	* poznámky až do konce			
Rozv. kola	00101	15 128.5	363.	550.	181.	172.	159.	147.	139.	135.	132.	128.	125.	121.	109.	84.	75.	66.	56.	50.	44.		214.	211.	208.	197.	188.	178.	166.	* plechy, výkovky i nad 400° C			
	00102	11 523.1	304.	400.	152.	132.	118.	103.	93.	87.	62.												210.	210.	208.	197.	188.			* plechy, výkovky i do 400° C			
	00103	422747.6	410.	550.	216.	196.	181.	172.	167.	164.	162.	160.	152.	125.	100.	80.	71.	65.	57.	50.	44.		213.	211.	204.	193.	186.	177.	167.		* odlitky i nad 400° C		
	00104	422744.6	284.	550.	142.	137.	132.	127.	123.	118.	113.	109.	105.	101.	98.	83.	72.	61.	51.	43.	36.		213.	210.	204.	197.	188.	179.	168.		* odlitky i nad 400° C		
	00105	422742.6	314.	500.	157.	142.	127.	115.	108.	103.	98.	96.	94.	86.	78.	59.								212.	209.	203.	196.	187.	176.	164.		* odlitky i nad 400, do 500° C i do 8 tun	
	00106	422713.5	245.	400.	123.	113.	98.	83.	69.	59.	49.												212.	208.	202.	193.	184.				* odlitky i do 400° C		
	00107	422904.5	294.	350.	147.	132.	118.	108.	103.														216.	211.	204.	196.	187.				* korozivzd. (pro jaderné 220)		
	00108	SN 422903.6	360.	400.	180.	145.	140.	135.	132.	131.	130.												214.	209.	202.	193.	182.				* korozivzd. (pro jaderné 1000)		
	00109	422425	245.	250.	59.	59.	59.	59.															126.	124.	121.	119.					* slitina i do 250° C		
Rozv. lop.	00201	15 128.5	274.	550.	220.	214.	207.	196.	172.	172.	172.	153.	153.	133.	133.	133.	86.	86.	59.	59.	59.										* tyče, vt profily i nad 400° C		
	00202	15 335.3	392.	550.	314.	229.	282.	267.	251.	251.	251.	212.	212.	172.	172.	172.	133.	133.	94.	94.	94.										* tyče, vt profily i nad 400° C		
	00203	17 021.2	274.	400.	220.	204.	188.	180.	172.	172.	172.																				* tyče, st profily i do 400° C		
	00204	422745	319.	550.	255.	245.	240.	235.	220.	220.	220.	208.	208.	134.	134.	134.	88.	88.	59.	59.	59.										* přesné odlitky u starých strojů		
	00205	SN 422903	360.	400.	284.	231.	223.	216.	208.	208.	208.																				* svařovaná rozváděcí kola i do 400° C		
	00206	422904	294.	400.	235.	220.	206.	191.	186.	186.	186.																				* svařovaná rozváděcí kola i do 400° C		
	00207	422905	245.	400.	196.	180.	169.	161.	153.	153.	153.																				* rozv. lop. zalité v Sedé litině (NT)		
	00208	Alsth.C51R-J	441.	550.	353.	328.	309.	279.	258.	258.	258.	231.	231.	147.	147.	147.	115.	115.	88.	88.	88.											* Alsthom, nahraďa 15 335	
Rotory	00301	15 335.9	490.	550.	196.	186.	176.	157.	147.	142.	137.	133.	129.	123.	113.	103.	98.	93.	88.	82.	76.										*		
	00302	15 320.9	490.	550.	196.	186.	176.	157.	147.	142.	137.	133.	129.	123.	108.	83.	70.	59.	50.	42.	35.										* VT,ST rotory méně namáhané a studenější		
	00303	16 236.6	539.	550.	216.	201.	186.	167.	157.	155.	152.	142.	132.	123.	108.	93.	86.	78.	72.	65.	57.										* VT,ST rotory více namáhané a teplejší		
	00304	16 431.6	588.	500.	235.	216.	196.	176.	167.	162.	157.	152.	137.	118.	98.	73.															*		
	00305	16 431.9	637.	500.	255.	235.	216.	196.	186.	181.	176.	172.	137.	118.	98.	73.															*		
	00306	16 444.6(9)	735.	420.	294.	279.	255.	230.	216.	196.	176.	147.																			* disky skládaných rotorů		
	00307	16 536.6	686.	420.	276.	260.	235.	216.	206.	191.	176.	147.																			* disky svař. NT rotorů, běžně používaná		
	00308	16 536.6 a	314.	420.	314.	299.	276.	245.	230.	206.	176.	147.																			* disky do šířky 500 mm		
Ob.lop.	00401	PAK 1.6	490.	460.	196.	186.	172.	157.	137.	123.	88.	69.	53.	37.																			
	00402	PAK 1.6 vyk.	539.	420.	216.	206.	186.	172.	152.	132.	98.	78.																					
	00403	PAK 2MV.7	570.	550.	230.	221.	211.	201.	191.	186.	181.	176.	172.	167.	162.	142.	123.	103.	88.	74.	59.												
	00404	P-AK 1 TD	686.	200.	275.	260.	245.																										
kolíky	00501	15 320.9	588.	550.	157.	150.	144.	125.	115.	110.	105.	102.	99.	96.	82.	63.	52.	44.	37.	31.	26.												

Sqkm.....mez kluzu [Mpa]