VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

PROUDĚNÍ S VOLNOU HLADINOU

FLOW IN CHANNELS WITH OPEN WATER LEVEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Miroslav Palička

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.

SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	**Miroslav Palička**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.**
Akademický rok:	2017/18

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

Proudění s volnou hladinou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výpočty proudění kapaliny v kanálech s volnou hladinou, kde bude analyzován profil rychlosti, proudění podkritické (říční), kritické a nadkritické (bystřinné).
Problematika proudění s volnou hladinou bude zahrnovat určení rozměru energeticky nejvýhodnějšího průřezu, výpočet průtoku (konzumční křivky).
Student se seznámí s bezrozměrnými čísly, Coriolisovým a Boussinesqueovým pro jejich použití v hlavních výpočtech pro beztlakové proudění kapaliny v korytech (s volnou hladinou).

Cíle bakalářské práce:

Výpočty proudění s volnou hladinou v přivaděčích k vodním elektrárnám.

Seznam doporučené literatury:

MÄSIAR, Ernest. Hydraulika II. Bratislava: Slovenská vysoká škola technická, 1986. Učební texty vysokých škol.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá ustáleným prúdením vody s voľnou hladinou v korytách rôznych prierezov. Hlavný dôraz bol kladený na matematické odvodenie závislostí pre najvýhodnejší stav hladiny s ohľadom na rýchlosť a prietok, grafické znázornenie týchto závislostí a numerické potvrdenie výsledkov. V závere sú tieto výsledky zhodnotené a interpretované pre reálne prípady použitia.

Kľúčové slová

Voľná hladina, beztlakové prúdenie, Chézyho rovnica, Newtonova metóda, hydraulický polomer.

Abstract

This bacherol thesis deals with steady water flow, in open channels with different cross-sections. The main aim was mathematical derivation of relations for the most favorable water level, graphic representation of those relations and numerical confirmation of results. Practical use and evaluation of results are summarized in conclusion.

Key Words

Open water level, pressureless flow, Chézy formula, Newton’s method, hydraulic radius.

Bibliografická citácia

PALIČKA, M. *Proudění s volnou hladinou.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc..

Prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému Prúdenie s voľnou hladinou vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname použitej literatúry.

19. mája 2018

....

Palička Miroslav

Poďakovanie

Týmto spôsobom by som chcel poďakovať Doc. Ing. Miloslavovi Haluzovi, CSc. za rady a pripomienky pri písaní bakalárskej práce.

Obsah

Úvod

Prúdenie kvapalín je vo všeobecnosti veľmi zložitý a obšírny problém. Aby bolo možno rozprávať o ustálenom prúdení s voľnou hladinou, musí byť splnených niekoľko podmienok:

- pohyb je ustálený – Prietok „Q“ je konštantný,
- pohyb je rovnomerný – Stredná rýchlosť prúdu „v“ je konštantná,
- koryto je prizmatické – nemení svoj prierez po dĺžke,
- sklon koryta je vo všetkých bodoch kanálu nemenný.

Pokiaľ sú splnené tieto podmienky, obyčajne trojrozmerné, turbulentné prúdenie je zjednodušené na jednorozmerný problém. Vďaka tomuto zjednodušeniu je použiteľná Chézyho rovnica, ktorá popisuje rýchlosť beztlakového prúdenia kvapaliny v koryte. Táto práca je rozdelená na tri hlavné časti.

V prvej časti sú zhrnuté teoretické poznatky a závislosti v oblasti prúdenia s voľnou hladinou, Chézyho rovnice a jej rýchlostného súčiniteľu „C“.

Tento teoretický základ je ďalej rozvinutý v druhej časti práce pre tri rôzne profily kanálu.

V poslednej časti je definovaný hydraulicky najvýhodnejší prierez s praktickou aplikáciou týchto poznatkov na kruhový a obdĺžnikový prierez.

1. Podmienky prúdenia s voľnou hladinou

1.1. Ustálený, rovnomerný pohyb v otvorenom koryte

Ak je zvažovaný pohyb tekutiny v koryte s voľnou hladinou, prietok Q a stredná prietočná rýchlosť v sú všeobecne funkciami času a dráhy. Pre túto prácu bude podstatný ustálený, rovnomerný pohyb. Pre tento pohyb platí, že aj prietok Q aj stredná rýchlosť prúdu v sú konštantné. Rovnomerný pohyb však môže vzniknúť len v prizmatických korytách. [1]

1.2. Prizmatické koryto

Pre vytvorenie rovnomerného, ustáleného prúdenia je veľmi podstatný tvar koryta. Prúdenie s týmito vlastnosťami je možné dosiahnuť len v hranolových alebo valcových korytách, ktoré po celej dráhe nemenia svoj priečny prierez a ich drsnosť je v každej časti profilu rovnaká. [1]

1.3. Sklon koryta

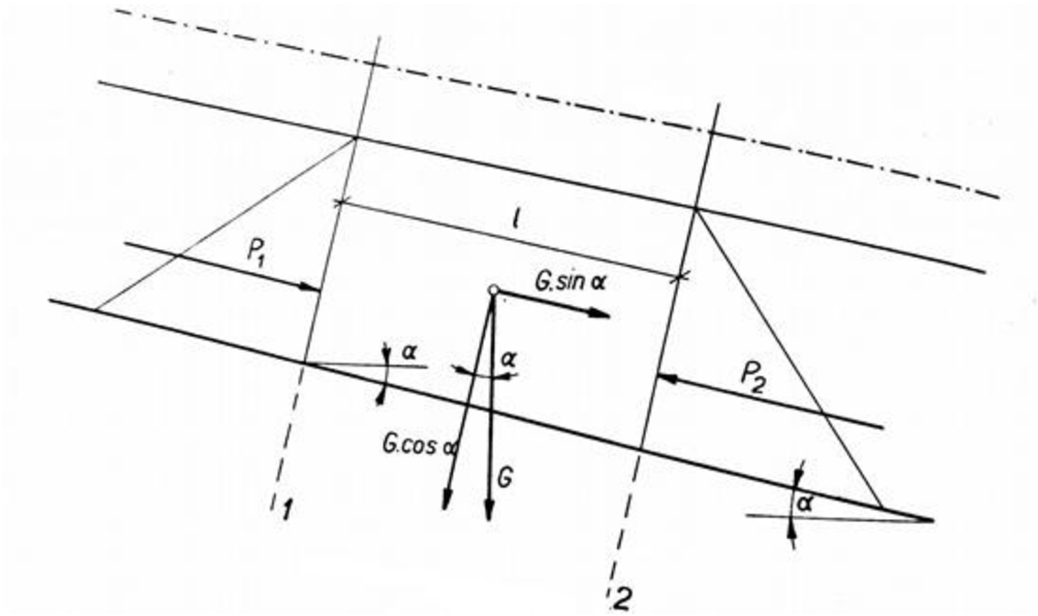
Pozdĺžny sklon prizmatického koryta i_o je uhol odchýlenia vytvárajúcej priamky od vodorovnej roviny. Tento uhol by mal byť vo všetkých častiach koryta rovnaký a zároveň každý priečny prierez by mal mať vodorovnú hladinu, a teda priečny sklon koryta musí byť nulový. Inak nemôže byť zaručený rovnomerný pohyb. Pozdĺžny sklon koryta je často veľmi malý a preto sa pri výpočtoch pre zjednodušenie uvažuje $\tan\alpha = \alpha = i_o$, aj napriek malej numerickej chybe. [1]

2. Odvodenie Chézyho rovnice

Rovnováha zotrvačných a externých síl v kvapaline:
Keďže pri akomkoľvek pohybe musia platiť základné dynamické zákony, aj pri prúdení tekutín možno uplatniť druhý Newtonov zákon. [1]

$$\sum F = m * a \tag{1.2}$$

Keďže sa jedná o ustálené prúdenie, zrýchlenie $a = 0$, teda suma síl sa musí rovnať nule.



Obrázok č. 1 Silová rovnováha v koryte

Na obrázku č. 1 je znázornená silová rovnováha jedného úseku koryta. Vzhľadom na to, že koryto je otvorené, na prierez 1 aj 2 pôsobí rovný tlak $P_1 = P_2$ a tlakové zložky síl sa navzájom vykrátia. Zložka tiažovej sily kolmá na dno $G * \cos\alpha$ a normálová sila od podložky sú rovné, opačne orientované a taktiež sa vykrátia. [1]

Druhá zložka tiažovej sily, $G * \sin\alpha$ pôsobí v smere pohybu. Aby bola rovnováha síl platná, oproti tejto zložke musí pôsobiť rovnako veľká sila trenia F_t, spôsobená viskozitou kvapaliny. Možno teda napísať:

$$G * \sin\alpha = S * l * \rho * g * i_o = F_t, \tag{2.2}$$

kde

$$F_t = \tau_0 * O * l, \tag{3.2}$$

pričom stredná sila trenia pre jednotku plochy

$$\tau_0 = C_t * \rho * \frac{v^2}{2}. \tag{4.2}$$

C_t je súčiniteľ trenia. Po úprave tejto rovnosti je zrejmé, že rýchlosť

$$v = \sqrt{\frac{2 * g}{C_t}} * \sqrt{\frac{S}{O} * i_o}\,. \tag{5.2}$$

Podiel prietočnej plochy a omočeného obvodu

$$\frac{S}{O} = R, \tag{6.2}$$

bude hydraulickým polomerom, a

$$\sqrt{\frac{2 * g}{C_t}} = C\,, \tag{7.2}$$

je Chézyho rýchlostný súčiniteľ. Z toho teda vyplýva, že vzťah pre rýchlosť prúdenia s voľnou hladinou bude

$$v = C * \sqrt{R * i_o}\ , \tag{8.2}$$

ktorý je nazývaný Chézyho rovnica. Túto rovnici odvodil Francúz Antoine de Chézy v roku 1775. [1]

3. Chézyho rýchlostný súčiniteľ

Chézyho rýchlostný súčiniteľ v podstate vyjadruje celkový hydraulický odpor koryta, ktorý je daný radou zložiek. Jednou zo základných zložiek tohto súčiniteľu je povrchová drsnosť koryta n, ktorá predstavuje celkovú výslednicu odporov jednotlivých zŕn materiálu koryta. [2]

Približné hodnoty povrchovej drsnosti niektorých materiálov korýt sú zobrazené v *tabuľke č.1*. [1]

Jakost omočeného obvodu	n
1. Hoblovaná dřeva, dobře hlazená omítka, cihly „zvonivky"	0,010
2. Dobře spojovaná prkna	—
3. Dlouhá železná a železobetonová potrubí (nová)	—
4. Drsná prkna	0,012
5. Kvádrové, neb dobře spárované cihelné zdivo	0,013
6. Čisté kameninové kanály	—
7. Kanály z cementových trub s jemnou usazeninou	—
8. Podélně nýtované železné trouby, menších průměrů	—
9. Obyčejné cihelné zdivo, stěny z fošen	—
10. Zdivo na maltu se špičatými kameny, hrubá betonová omítka	—
11. Zdivo z lomového kamene	0,017
12. Zdivo z lomového kamene s bahnitým dnem	—
13. Starší zdivo s bahnitým dnem, hladší skála	—
14. Dlažba, pravidelné koryto v zemi	—
15. Starý beton	0,020
16. Starší zemní kanály	0,025
17. Starší zemní kanály s kamením a porostem	0,030
18. Drenážní příkopy, koryto ve skále hrubě vystřílené	0,030
19. Horské bystřiny	0,080

tabuľka č. 1 Povrchová drsnosť rôznych materiálov [1]

Rýchlostný súčiniteľ „C", bol v minulosti interpretovaný viacerými spôsobmi. Na základe mnohých experimentov, vykonaných rôznymi autormi, vzniklo veľké množstvo empirických vzťahov, ktoré tento súčiniteľ ponímajú rozdielne. Táto práca sa venuje len tým najzákladnejším a najrozšírenejším.

3.1. Exponenciálne vzťahy

Všeobecne majú tieto vzťahy tvar

$$\frac{1}{n} * R^y, \tag{1.3}$$

kde súčiniteľ y môže byť konštantný alebo premenný. [2]

3.1.1. Manningova rovnica

Jeden z prvých vzorcov tohto typu predložil v roku 1899 Róbert Manning. V jeho interpretácií, exponent rýchlostného súčiniteľu naberá hodnotu $y = {}^{1}/_{6}$. Táto rovnica je veľmi rozšírená , často používaná a to aj v tejto bakalárskej práci, kde je základným stavebným kameňom. [2]

3.1.2. Forchheimerova rovnica

Veľmi podobná je Forchheimerov rovnica, ktorá sa líši len hodnotou exponentu $y = {}^{1}/_{5}$. [2]

3.1.3. Pavlovského rovnica

Sovietsky akademik Pavlovskij v roku 1925 uverejnil vzťah s premenným exponentom v tvare

$$y = 2{,}5 * \sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75 * \sqrt{R} * \left(\sqrt{n} - 0{,}1\right). \qquad (2.3)$$

Tento vzťah je možné zjednodušiť dvoma spôsobmi a to z hľadiska uvažovaného hydraulického polomeru alebo uvažovaného súčiniteľu drsnosti.

Zjednodušenie z hľadiska hydraulického polomeru:

$$y = 1{,}5 * \sqrt{n}\ ak\ R < 1\ m, \qquad (3.3)$$

$$y = 1{,}3 * \sqrt{n}\ ak\ R > 1\ m, \qquad (4.3)$$

Zjednodušenie z hľadiska veľkosti súčiniteľu drsnosti:

$$y = {}^{1}/_{6}\ \ pre\ 0{,}010 \le n \le 0{,}015\,, \qquad (5.3)$$

$$y = {}^{1}/_{5}\ \ pre\ 0{,}015 \le n \le 0{,}025\,, \qquad (6.3)$$

$$y = {}^{1}/_{4}\ pre\ 0{,}025 \le n\,. \quad [2] \qquad (7.3)$$

3.2. Logaritmické vzťahy

Logaritmické vzťahy vychádzajú z teórie turbulentného prúdenia a sú v súčasnej dobe považované za najlepšie podložené. [2]

3.2.1. Colebrook-Whitova rovnica

Z Pradtl-Karmánovho zákona sa dá odvodiť výraz pre súčiniteľ straty trením

$$\frac{1}{\sqrt{4 * C_t}} = 2 * log\frac{a * R}{k_s}\,, \qquad (8.3)$$

kde C_t je súčiniteľ trenia , k_s je absolútna drsnosť a a je konštanta závislá na tvare koryta. Keďže platí rovnica (7.2), dá sa predchádzajúci vzťah previesť na Colebrook-Whitovu rovnicu

$$C = 4 * \sqrt{2g} * \left(log \frac{R}{k_s} + \log a \right). \ [2] \tag{9.3}$$

3.2.2. Agroskinova rovnica

Jedným z najznámejších vzťahov pre výpočet rýchlostného súčiniteľu je Agroskinova rovnica

$$C = 4 * \sqrt{2g} * (\log R + k_A), \tag{10.3}$$

kde súčiniteľ hladkosti

$$k_a = \frac{0{,}05643}{n}. \tag{11.3}$$

Pôvodne tento vzťah odvodil v tvare

$$k_a = log \frac{2 * A}{\Delta}, \tag{12.3}$$

kde A je konštanta a Δ, je veľkosť výstupkov dna. Aby sa vyhol problémom s určením parametru Δ , vyšiel z exponenciálnych vzťahov pre C a odvodil tak rovnicu (11.3) . [2]

3.3. Ostatné súčinitele

3.3.1. Ganguillet-Kutterova rovnica

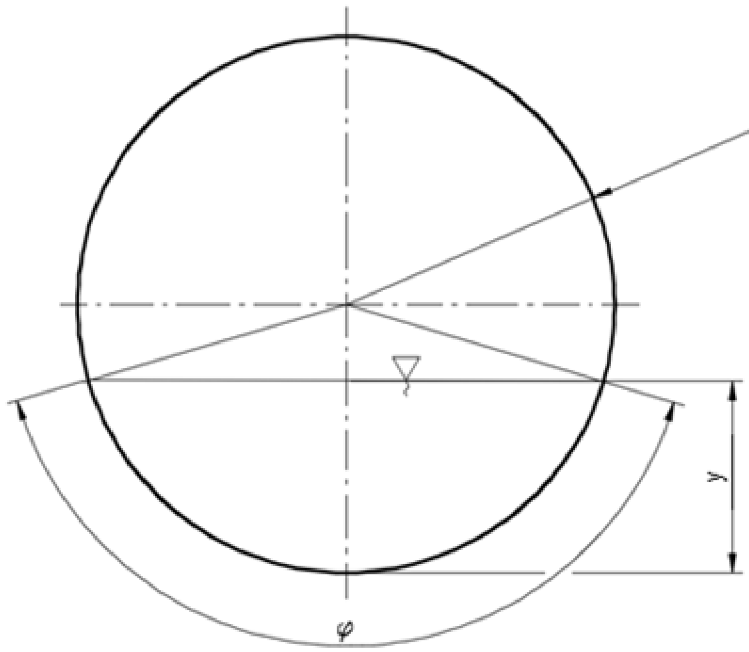
Jeden z prvých vzťahov vôbec na výpočet Chézyho rýchlostného súčiniteľu odvodili švajčiarskí inžinieri Ganguillet a Kutter. Na základe mnohých empirických údajov z riek a potokov, uviedli vzorec

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0{,}00155}{i_o}}{1 + \left(23 + \frac{0{,}00155}{i_o}\right) * \frac{n}{\sqrt{R}}} . [1] \tag{13.3}$$

4. Aplikácia Chézyho rovnice na rôzne tvary kanálov

Nasledujúca časť tejto práce sa podrobnejšie venuje niektorým základným profilom kanálov, používaných pre odvod vody s voľnou hladinou. Táto problematika je riešená s využitím Chézyho rovnice a Manningovho rýchlostného súčiniteľu.

4.1. Kruhový profil



Obrázok č. 2 Geometria kruhového profilu

4.1.1. Prietočná plocha S

Pre tento typ profilu sa plocha, ktorú zaberá kvapalina v kanáli, najlepšie vyjadruje pomocou uhlu plnenia φ v radiánoch. Voda zviera uhol φ medzi stredom kruhu a spoločnými bodmi omočeného obvodu a hladiny, tak ako je zobrazené na *obrázku. č. 2*. Takto definovaná plocha kvapaliny teda bude

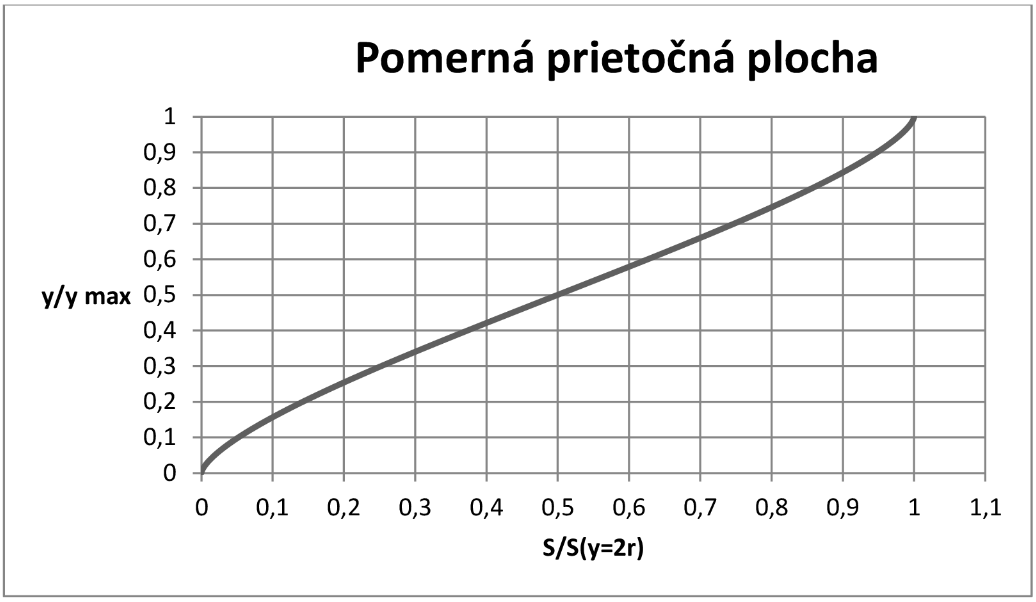
$$S = \frac{\pi * r^2}{2} * \frac{\varphi}{\pi} - 2 * \frac{1}{2} * r * sin\frac{\varphi}{2} * r * cos\frac{\varphi}{2}. \qquad (1.4.1)$$

Z goniometrie možno použiť zjednodušenie, pretože

$$2 * sin\frac{\varphi}{2} * cos\frac{\varphi}{2} = \sin\varphi. \qquad (2.4.1)$$

Ak je toto zjednodušenie použité v rovnici (1.4.1), výsledná prietočná plocha kruhového profilu je

$$S = \frac{r^2}{2} * \varphi - r^2 * \frac{\sin\varphi}{2} = \frac{r^2}{2} * (\varphi - \sin\varphi). \qquad (3.4.1)$$



Graf č. 1 Pomerná prietočná plocha kruhového profilu

Priebeh pomerného obsahu prietočnej plochy v kruhovom kanáli, (uvažovaného vzhľadom k maximálne zatopenému prierezu) v závislosti na pomernej výške plnenia od dna, je zobrazený v *grafe č. 1* , kde výška plnenia

$$y = r * \left(1 - \cos\frac{\varphi}{2}\right). \qquad (4.4.1)$$

4.1.2. Omočený obvod O

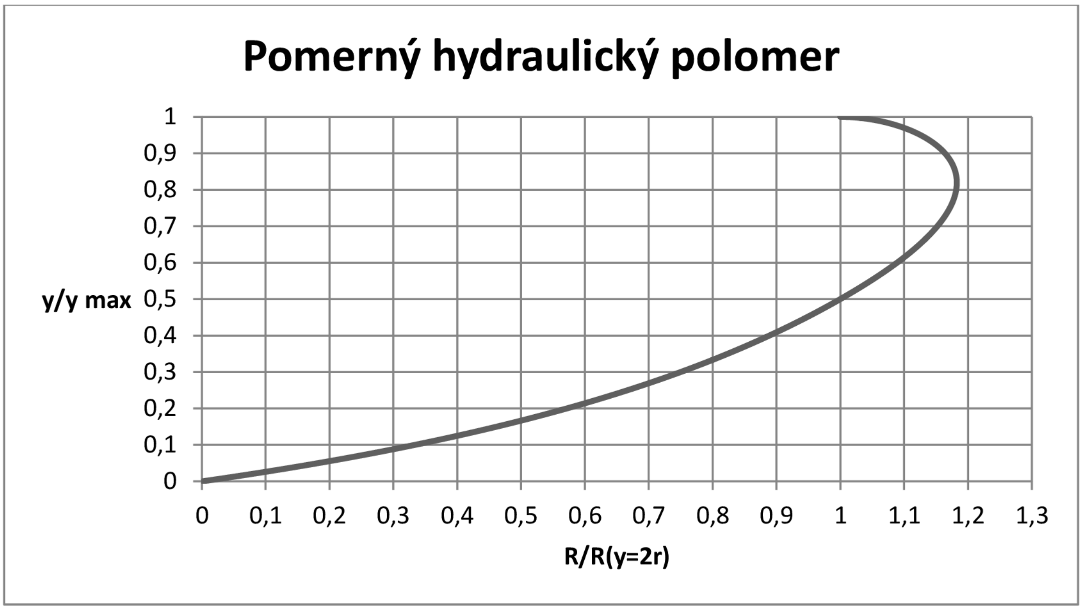
V prípade omočeného obvodu pre kanál kruhového prierezu, je vzťah medzi uhlom φ a omočeným obvodom O veľmi jednoduchý.

$$O = \varphi * r. \qquad (5.4.1)$$

4.1.3. Hydraulický polomer R

Z rovnice (6.2) je jednoznačné, že hydraulický polomer je $R = \frac{S}{O}$. Ak je do tejto rovnice dosadená prietočná plocha a omočený obvod pre kruhový profil kanálu , ktoré sú odvodené v predchádzajúcich kapitolách, výsledná rovnica pre hydraulický polomer kruhového profilu je

$$R = \frac{r}{2} * \left(1 - \frac{\sin\varphi}{\varphi}\right). \qquad (6.4.1)$$



Graf č. 2 Pomerný hydraulický polomer kruhového profilu

Tak ako v prípade prietočnej plochy S, možno priebeh pomerného hydraulického polomeru k pomernej výške plnenia zobraziť tak, ako je možné vidieť v *grafe č. 2*. Z tohto grafu je zrejmé, že maximum hydraulického polomeru nenastáva pri maximálnom plnení. Tento jav je spôsobený veľkým prírastkom omočeného obvodu v posledných fázach plnenia a teda neúmerného zvýšenia trenia pri malom zvýšení prietočnej plochy.

4.1.4. Maximum hydraulického polomeru pre kruhový profil

Pre nájdenie presnej hodnoty výšky hladiny, pri ktorej nastáva maximum hydraulického polomeru, je potrebné použiť deriváciu funkcie hydraulického polomeru a položiť ju rovno 0. Touto funkciou bude rovnica (6.4.1).

$$\frac{dR}{d\varphi} = 0 = \frac{r}{2} * \frac{(1-\cos\varphi) * \varphi - (\varphi - \sin\varphi) * 1}{\varphi^2}. \qquad (7.4.1)$$

Pre splnenie podmienky $\frac{dR}{d\varphi} = 0$ sa musí čitateľ rovnať nule. Ak má polomer zostať nenulový, čitateľ rovný nule bude

$$\varphi - \varphi * \cos\varphi - \varphi + \sin\varphi = 0. \qquad (8.4.1)$$

Po úprave tejto rovnice zostane výraz

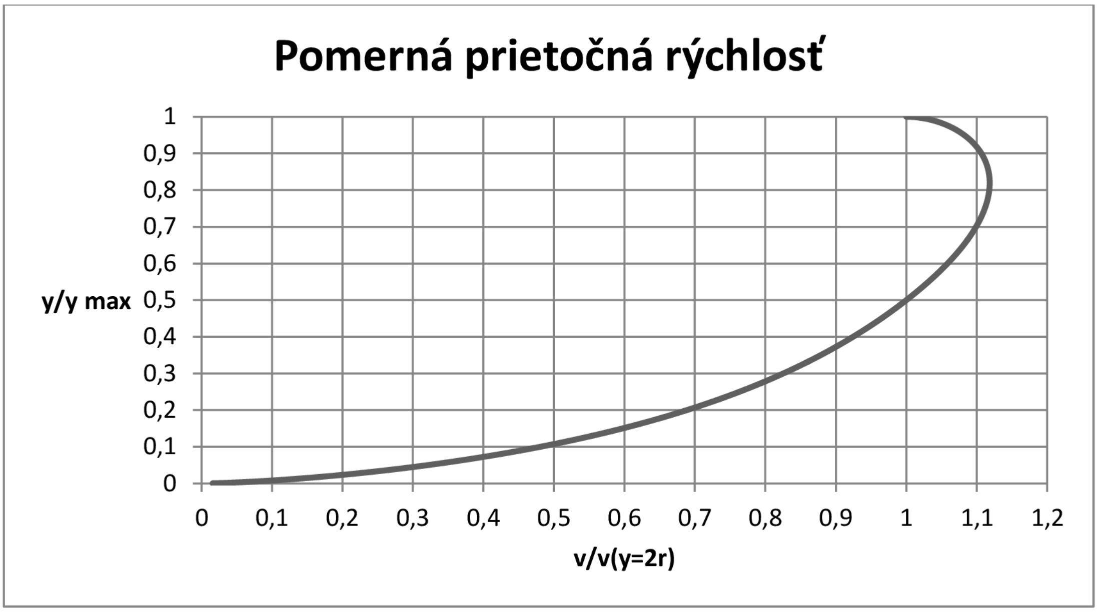
$$\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \tan\varphi. \qquad (9.4.1)$$

Z toho vyplýva, že uhol φ , pre ktorý sa hodnota funkcie $\tan\varphi$ rovná pôvodnému uhlu, je bodom maxima hydraulického polomeru.

4.1.5. Rýchlosť prietoku v podľa Chézyho

Ak je hľadaná rýchlosť prietoku v, pre kruhový profil kanálu, možno využiť Chézyho rovnicu (8.2) s využitím Manningovho rýchlostného súčiniteľu $v = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} * \sqrt{R * i_o}$. V prípade kruhového profilu je vzťah pre rýchlosť prietoku

$$v = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} * \sqrt{R * i_o} = \frac{1}{n} * \left(\frac{r}{2} * \left(1 - \frac{\sin\varphi}{\varphi}\right)\right)^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i_o}. \qquad (10.4.1)$$



Graf č. 3 Pomerná prietočná rýchlosť kruhového profilu

Ak je kanál vyrobený z materiálu, ktorého povrchová drsnosť $n = 0{,}013$ (kanál z cementového profilu) a sklon dna $i_o = 0{,}005$, je možno graficky znázorniť závislosť pomernej prierezovej rýchlosti, voči pomernej výške plnenia profilu vodou (*graf č. 3*). Tak ako pri hydraulickom polomere je zreteľné, že maximum rýchlosti nenastáva pri maxime plnenia.

4.1.6. Maximum prierezovej rýchlosti v a hydraulického polomeru R pre kruhový profil

Pre nájdenie presnej hodnoty výšky hladiny, pri ktorej nastáva maximum prietokovej rýchlosti je potrebné použiť, ako pri hydraulickom polomere, deriváciu funkcie položenú rovno 0. Touto funkciou bude rovnica (10.4.1),

$$\frac{dv}{d\varphi} = 0 = [\frac{1}{n} * \left(\frac{r}{2} * \left(1 - \frac{\sin\varphi}{\varphi}\right)\right)^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i_o}]' \qquad (11.4.1)$$

Deriváciou tejto funkcie bude vzťah:

$$\frac{dv}{d\varphi} = 0 = \frac{1}{n} * \left(\frac{r}{2}\right)^{\frac{2}{3}} * \frac{2}{3} * \left(1 - \frac{\sin\varphi}{\varphi}\right)^{-\frac{1}{3}} * \frac{-(\cos\varphi) * \varphi + (\sin\varphi)}{\varphi^2}. \qquad (12.4.1)$$

Pokiaľ sa má táto rovnica rovnať nule a polomer musí zostať nenulový, čitateľ rovný nule bude

$$0 = \varphi^{\frac{1}{3}} * \left(-(\cos\varphi) * \varphi + (\sin\varphi)\right) = -\varphi^{\frac{4}{3}} * (\cos\varphi) + \varphi^{\frac{1}{3}}(\sin\varphi)\,. \qquad (13.4.1)$$

Po úprave

$$\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \tan\varphi\,. \qquad (14.4.1)$$

Zhodne, ako v prípade hydraulického polomeru, maximum je v bode plnenia, kde uhol φ, je rovný funkčnej hodnote tangensu tohto uhlu. Veľkosť tohto uhlu je možné zistiť numericky. Pre tento účel možno použiť Newtonovu metódu dotyčníc.

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k - \frac{f(\varphi_k)}{f'(\varphi_k)}. \qquad (15.4.1)$$

Ako počiatočný bod prvej iterácie bude uhol plnenia 4,429 radiánu.

$$f(\varphi_k) = \varphi_k - tan\,\varphi_k \qquad (16.4.1)$$

$$f'(\varphi_k) = \frac{d(\,f(\varphi_k))}{d\varphi_k} = 1 - \frac{1}{(cos\,\varphi_k)^2} \qquad (17.4.1)$$

$$\varphi_0 = 4{,}429\,rad$$

$$\varphi_1 = \varphi_0 - \frac{\varphi_0 - \tan\varphi_0}{1 - \frac{1}{(cos\,\varphi_0)^2}} = 4{,}429\; - \frac{4{,}429\; - tan\,4{,}429}{1 - \frac{1}{(cos\,4{,}429\,)^2}} = 4{,}513411\,rad$$

$$\varphi_2 = 4.495285$$

$$\varphi_3 = 4.493426$$

$$\varphi_4 = 4.493409$$

$$\varphi_5 = 4.493409$$

Po piatich iteráciách možno povedať, že maximum prierezovej rýchlosti prietoku a hydraulického polomeru nastáva pri uhle plnenia $\varphi = 4{,}493409$ radiánu. Táto hodnota uhlu plnenia odpovedá pomernej výške plnenia $^{y}/_{ymax} = 0{,}8128$.

4.1.7. Prietok Q

Z rovnice kontinuity je zrejmé, že prietok korytom je

$$Q = v * S\,, \tag{18.4.1}$$

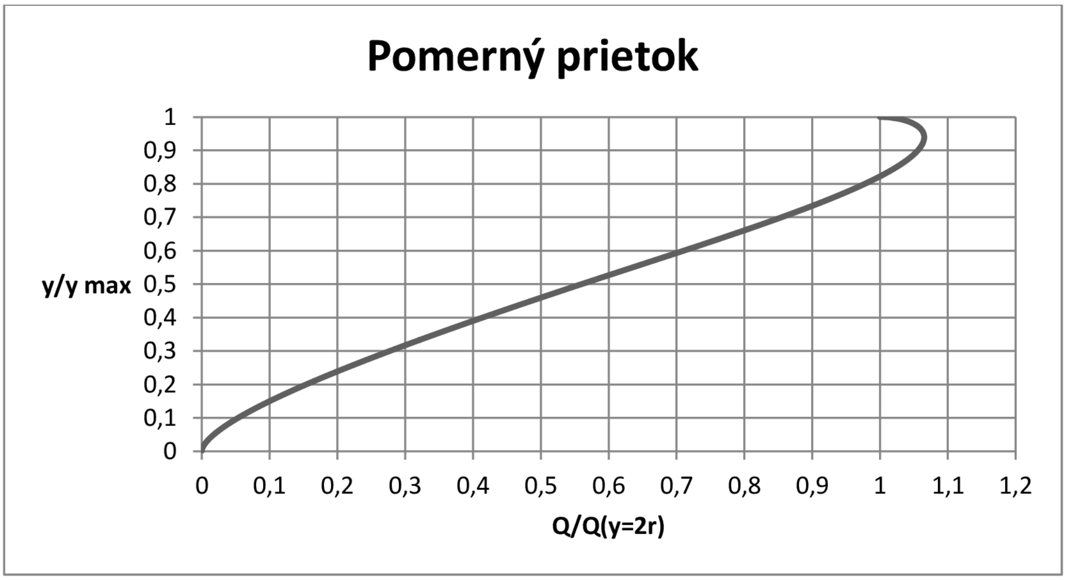
kde Q je prietok koryta v m^3/s , S je prietočná plocha v m^2 a v je rýchlosť prietoku v m/s . Pokiaľ je riešený kanál kruhového profilu, do rovnice (18.4.1) možno za rýchlosť prietoku v dosadiť rovnicu (10.4.1) a za prietočnú plochu rovnicu (3.4.1). Týmto spôsobom je odvodený vzťah, pre prietok korytom kruhového profilu, s využitím Chézyho rovnice a Manningovho súčiniteľu

$$Q = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i_o} * \frac{r^2}{2} * (\varphi - sin\,\varphi) =$$

$$\frac{1}{n} * \left(\frac{r}{2} * \left(1 - \frac{sin\,\varphi}{\varphi}\right)\right)^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i_o} * \frac{r^2}{2} * (\varphi - sin\,\varphi).$$

Po zjednodušení bude výsledný výraz

$$Q = \frac{1}{n} * \sqrt{i_o} * \frac{r^{\frac{8}{3}}}{2^{\frac{5}{3}}} * \frac{(\varphi - \sin\varphi)^{\frac{5}{3}}}{\varphi^{\frac{2}{3}}}. \tag{19.4.1}$$



Graf č. 4 Pomerný prietok kruhového profilu

Priebeh pomerného prietoku v závislosti na pomernej výške plnenia, je zobrazený v *grafe č. 4*. Podobne ako pri hydraulickom polomere a prietočnej rýchlosti je z grafu možné vidieť, že maximum prietoku nie je pri maximálnej výške plnenie. Oblasť maxima hydraulického polomeru a rýchlosti je v totožnom bode. Oblasť maxima prietoku je v bode inom.

4.1.8. Maximum prietoku Q

Pri zisťovaní maxima prietoku je potrebné zderivovať rovnicu (19.4.1) a položiť ju rovno nule.

$$\frac{dQ}{d\varphi} = 0 =$$

$$\frac{1}{n} * \sqrt{i_o} * \frac{r^{\frac{8}{3}}}{2^{\frac{5}{3}}} * \frac{\frac{5}{3} * (\varphi - sin\,\varphi)^{\frac{2}{3}} * (1 - cos\,\varphi) * \varphi^{\frac{2}{3}} - (\varphi - sin\,\varphi)^{\frac{5}{3}} * \frac{2}{3} * \varphi^{-\frac{1}{3}}}{\varphi^{\frac{4}{3}}}. \quad (20.4.1)$$

Ak sa má derivácia rovnať 0 a polomer má byť nenulový, čitateľ rovný nule bude

$$\frac{5}{3} * (\varphi - sin\,\varphi)^{\frac{2}{3}} * (1 - cos\,\varphi) * \varphi^{\frac{2}{3}} - (\varphi - sin\,\varphi)^{\frac{5}{3}} * \frac{2}{3} * \varphi^{-\frac{1}{3}}. \quad (21.4.1)$$

Po úprave bude výsledný vzťah

$$0 = -\varphi + \frac{2}{5} * \frac{(\varphi - \sin\varphi)}{1 - \cos\varphi}. \quad (22.4.1)$$

Vyriešením rovnice (22.4.1), bude získaná presná hodnota uhlu plnenia, pri ktorom je prietok maximálny. Opäť je vhodné použiť Newtonovu metódu dotyčníc (15.4.1).

$$f(\varphi_k) = -\varphi_k + \frac{2}{5} * \frac{\varphi_k - \sin\varphi_k}{1 - \cos\varphi_k} \quad (23.4.1)$$

$$f'(\varphi_k) = \frac{d(f(\varphi_k))}{d\varphi_k} =$$

$$-1 + \frac{\frac{5}{2} * (1 - cos\,\varphi_k)^2 - \frac{5}{2} * (\varphi_k - \sin\varphi_k) * \sin\varphi_k}{\left(\frac{5}{2} * (1 - \cos\varphi_k)\right)^2}. \quad (24.4.1)$$

Ako počiatočný bod prvej iterácie bude uhol plnenia 5,27 rad

$$\varphi_0 = 5{,}27\,rad$$

$$\varphi_1 = 5,27 - \left(\frac{-5,27 + \frac{2}{5} * \frac{5,27 - sin\,5,27}{1 - cos\,5,27}}{-1 + \frac{\frac{5}{2} * (1 - cos\,5,27)^2 - \frac{5}{2} * (5,27 - sin\,5,27) * sin\,5,27}{\left(\frac{5}{2} * (1 - cos\,5,27)\right)^2}} \right)$$

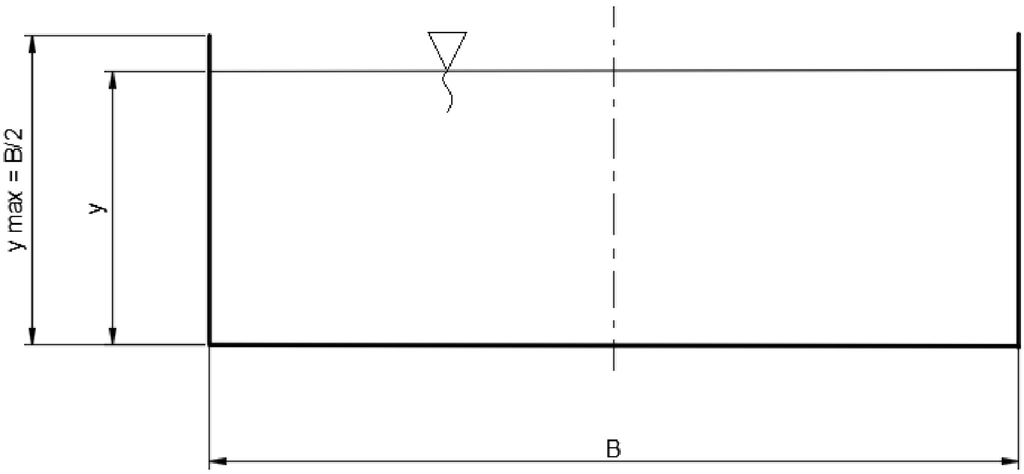
$$\varphi_1 = 5,278215$$

$$\varphi_2 = 5,278107$$

$$\varphi_3 = 5,278107$$

Po troch iteráciách možno povedať , že maximum prietoku v kruhovom kanáli nastáva pri uhle plnenia $\varphi = 5,278107$ radiánu. Táto hodnota odpovedá pomernej výške plnenia $^{y}/_{ymax} = 0,9382$.

4.2. Obdĺžnikový profil

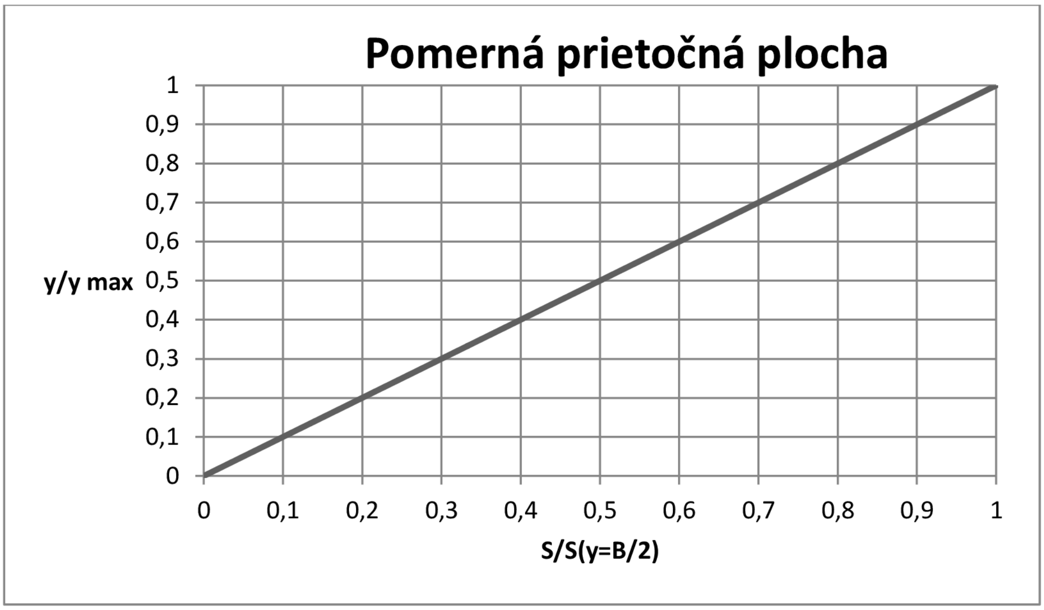


Obrázok č. 3 Geometria obdĺžnikového profilu

4.2.1. Prietočná plocha S

Na rozdiel od kruhového profilu určujúci parameter pre prizmatický obdĺžnikový profil kanálu šírky B je výška plnenia y. Takto zvolená geometria je zobrazená na *obrázku č. 3*. Prietočná plocha S pre tento profil teda bude

$$S = y * B. \qquad (1.4.2)$$



Graf č. 5 Pomerná prietočná plocha obdĺžnikového profilu

Priebeh pomernej prietočnej plochy (uvažovanej vzhľadom k maximálne zatopenému prierezu) k pomernej výške plnenia je zobrazený na grafe č. 5. Na prvý pohľad sa dá s určitosťou povedať, že táto funkcia je priamka a maximum prietočnej plochy je v maximálnom bode plnenia.

4.2.2. Omočený obvod O

Omočený obvod pre obdĺžnikový profil kanálu je

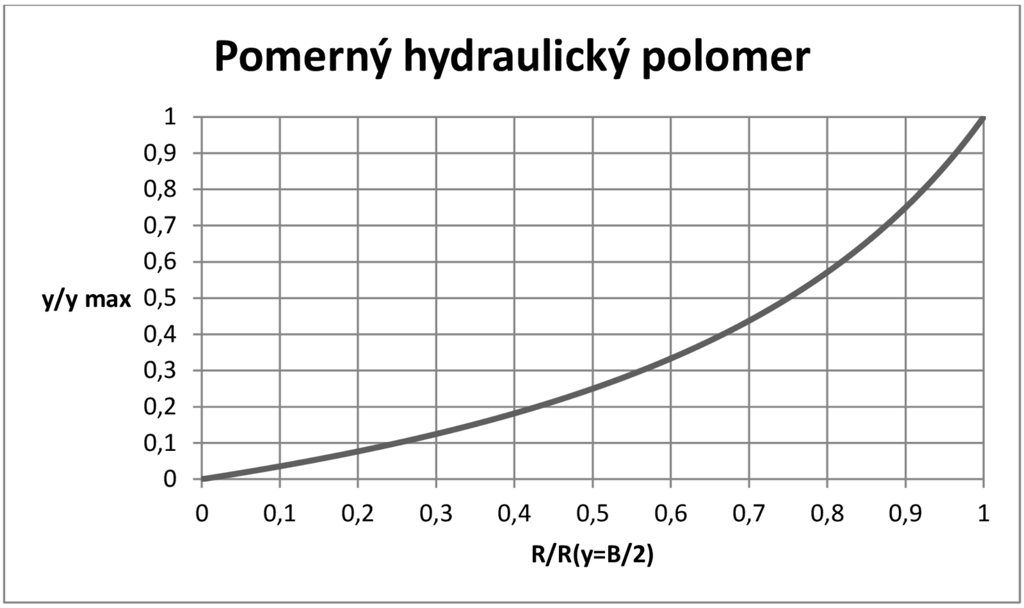
$$O = B + 2 * y. \tag{2.4.2}$$

Predpis tejto závislosti je rovnicou priamky, podobne ako v prípade prietočnej plochy, akokoľvek táto priamka nezačína v 0, ale je posunutá o hodnotu B .

4.2.3. Hydraulický polomer R

Hydraulický polomer tohto profilu bude opäť ako pri kruhových kanáloch určený vzťahom (6.2). Akokoľvek, v tomto prípade za prietočnú plochu bude dosadená rovnica (1.4.2) a za omočený obvod rovnica (2.4.2). Teda hydraulický polomer obdĺžnikového kanálu bude

$$R = \frac{y * B}{B + 2 * y}. \tag{3.4.2}$$



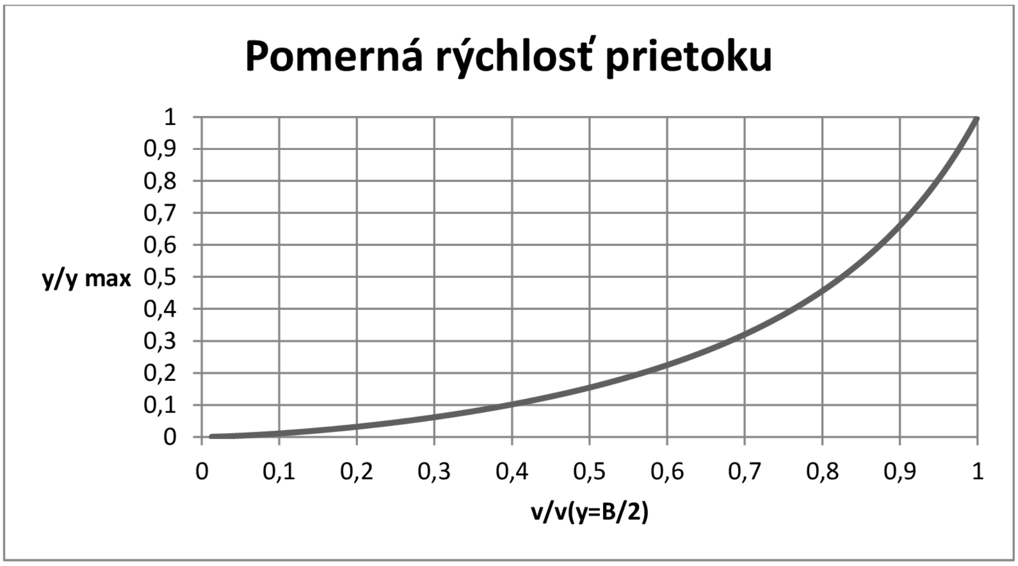
Graf č. 6 Pomerný hydraulický polomer obdĺžnikového profilu

Ako je možné vidieť na *grafe č.6*, závislosť pomerného hydraulického polomeru na pomernej výške plnenia už priamkou nie je. Jeho maximum nastáva pri maximálnom plnení.

4.2.4. Prierezová rýchlosť v podľa Chézyho rovnice

Z Chézyho rovnice (8.2) s použitím Manningovho súčiniteľu je možno rovnakým spôsobom ako pri kruhovom profile získať vzťah pre rýchlosť prietoku v obdĺžnikovom profile.

$$v = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} * \sqrt{R * i_o} = \frac{1}{n} * \left(\frac{y * B}{B + 2 * y}\right)^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i_o}. \qquad (4.4.2)$$



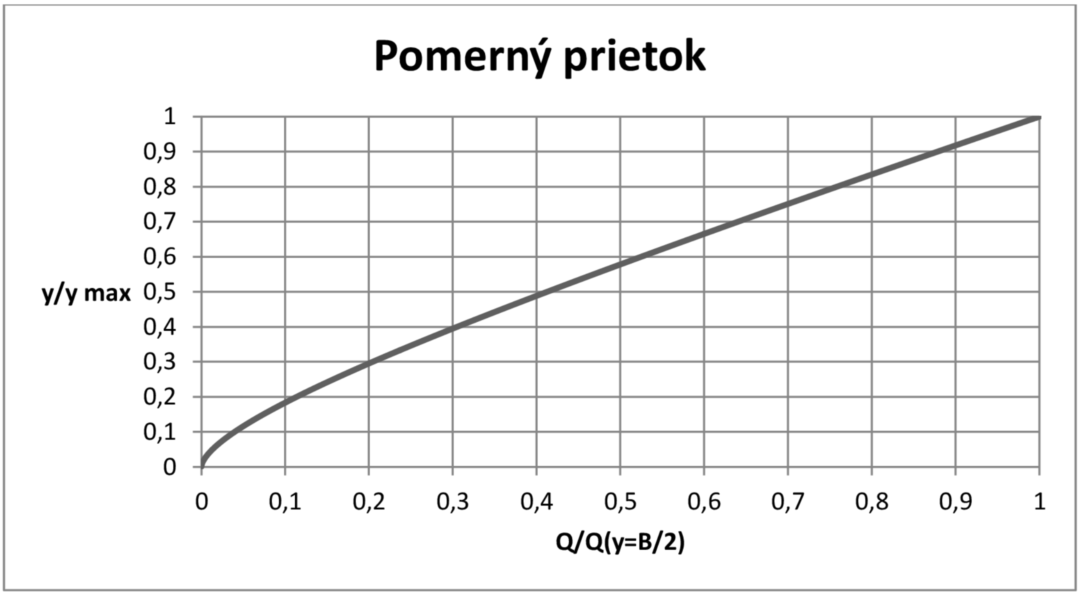
Graf č. 7 Pomerná rýchlosť prietoku obdĺžnikového profilu

Priebeh pomernej rýchlosti prietoku v závislosti na pomernej výške plnenia pre povrchovú drsnosť $n = 0{,}013$ a sklon dna $i_o = 0{,}005$, je zobrazený na *grafe č.7* . Maximum rýchlosti nastáva pri maximálnom plnení profilu ako pri hydraulickom polomere.

4.2.5. Prietok Q

Pre odvodenie vzťahu pre prietok korytom tohto typu opäť možno využiť rovnicu kontinuity (18.4.1) $Q = v * S$. Ak bude dosadená za rýchlosť prietoku rovnica (4.4.2) a za prietočnú plochu rovnica (1.4.2), výsledný vzťah bude

$$Q = \frac{1}{n} * \left(\frac{y * B}{B + 2 * y}\right)^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i_o} * y * B = \frac{1}{n} * \frac{(y * B)^{\frac{5}{3}}}{(B + 2 * y)^{\frac{2}{3}}} * \sqrt{i_o}\,. \qquad (5.4.2)$$

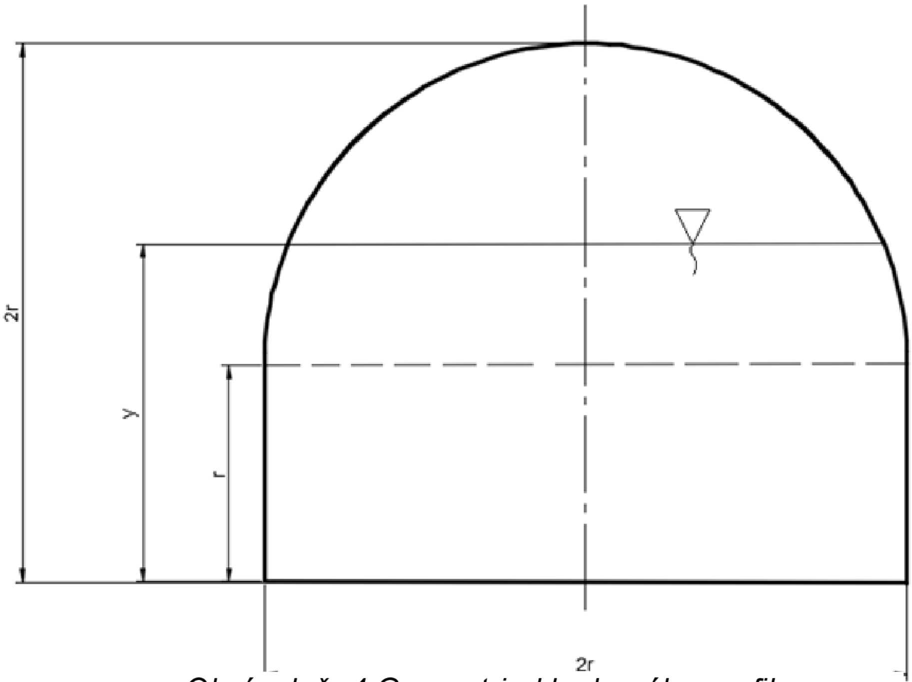


Graf č. 8 Pomerný prietok obdĺžnikového profilu

Priebeh pomerného prietoku v závislosti na pomernej výške plnenia pre tento profil, je na *grafe č. 8*. Pri pohľade na predchádzajúce dva grafy je jednoznačné, že priebeh prietoku je odlišný od priebehu rýchlosti a hydraulického polomeru. Akokoľvek, maximum prietoku taktiež nastáva pri maximálnom plnení profilu.

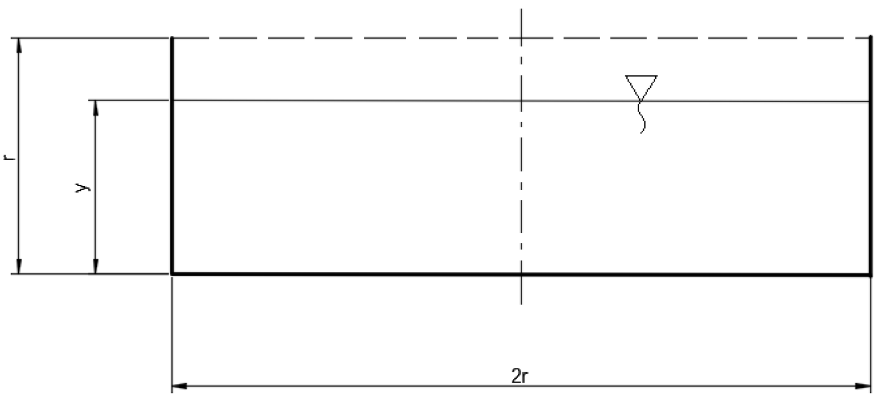
4.3. Klenbový profil

Tento profil je spojením kruhového a obdĺžnikového kanálu (*obrázok č.4*). Pri určovaní všetkých charakteristík v kruhovom profile bol použitý uhol plnenia

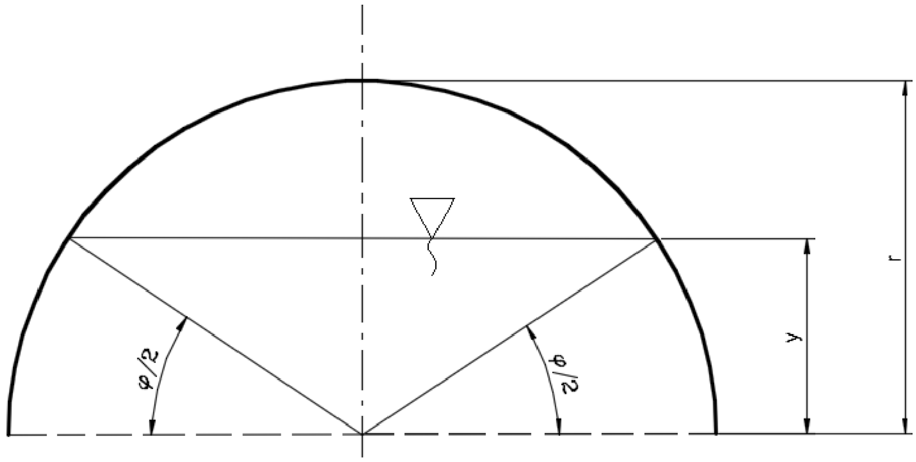


Obrázok č. 4 Geometria klenbového profilu

φ ako parameter. V obdĺžnikovom profile to bola výška plnenia y. Pre výpočty v klenbovom profile je potrebné zachovať jeden druh parametrizácie. Týmto parametrom musí byť výška plnenia y.



Obrázok č. 5 Geometria prvého intervalu



Obrázok č. 6 Geometria druhého intervalu

Celé riešenie tohto profilu bude rozdelené na dva intervaly. Prvý interval bude obdĺžniková časť klenbového profilu (*obrázok č. 5*) a druhý interval bude polkruhová časť (*obrázok č. 6*).

4.3.1. Prietočná plocha S

4.3.1.1. Interval 1

Pre prvý interval bude obsah prietočnej plochy S zhodný s prietočnou plochou obdĺžnikového profilu, pričom šírka kanálu bude $B = 2r$.

$$S_1 = 2r * y \tag{1.4.3}$$

4.3.1.2. Interval 2

Obsah prietočnej plochy pre druhý interval s takto zvoleným typom geometrie bude s použitím uhlu plnenia

$$S_2 = 2 * \left(\frac{\pi * r^2}{4} * \frac{\frac{\varphi}{2}}{\frac{\pi}{4}} + \frac{1}{2} * \sin\frac{\varphi}{2} * \cos\frac{\varphi}{2} * r^2 \right) = \frac{r^2}{2} * (\varphi + sin\,\varphi). \tag{2.4.3}$$

Vzťah pre prietočnú plochu vyjadrený pomocou uhlu plnenia však nie je použiteľný pre celkovú plochu klenbového profilu. Namiesto uhlu φ musí byť vyjadrený pomocou výšky plnenia y. K tomuto účelu možno využiť jednoduchý goniometrický vzťah vyplývajúci z geometrie *obrázku č. 6*

$$y = \sin\frac{\varphi}{2} * r \rightarrow \sin\frac{\varphi}{2} = \frac{y}{r}, \tag{3.4.3}$$

a Pytagorovu vetu

$$r^2 = (\cos\frac{\varphi}{2} * r)^2 + y^2 \rightarrow \cos\frac{\varphi}{2} = \frac{\sqrt{r^2 - y^2}}{r}. \qquad (4.4.3)$$

Vzťah medzi uhlom plnenia a výškou plnenia bude

$$\varphi = 2 * \arcsin\frac{y}{r}. \qquad (5.4.3)$$

Ak sa predchádzajúce geometrické vzťahy dosadia do rovnice pre prietočnú plochu vyjadrenú pomocou uhlu plnenia, výsledný vzťah bude

$$S_2 = r^2 * \arcsin\frac{y}{r} + y * \sqrt{r^2 - y^2}. \qquad (6.4.3)$$

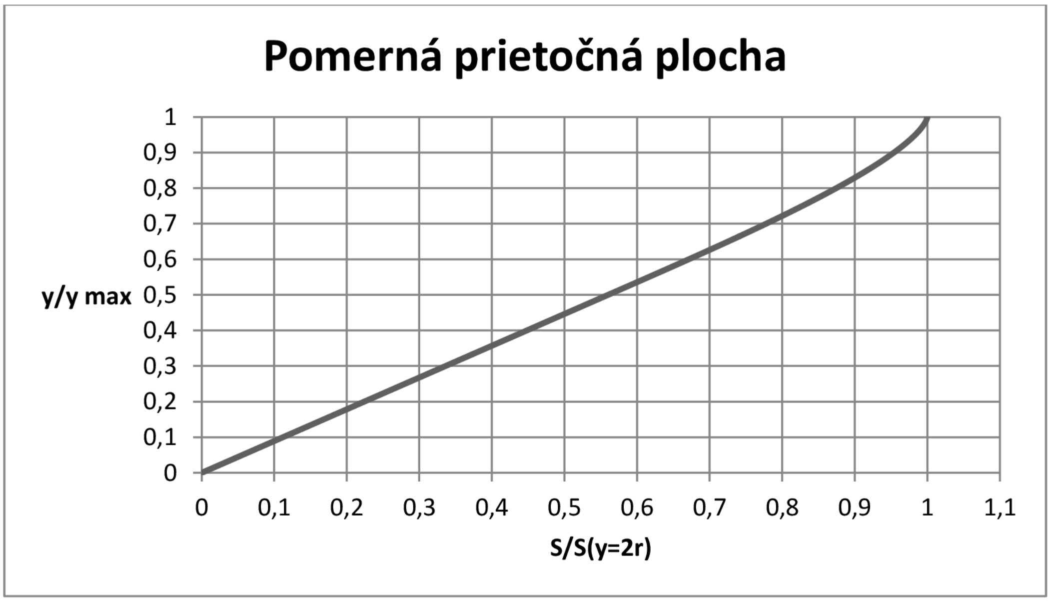
4.3.1.3. Prechod medzi intervalmi

Pri prietočnej ploche klenbového profilu branej ako celok je potrebné zvážiť prechod z prvého intervalu do druhého. Obdĺžniková časť tohto profilu nebude týmto prechodom ovplyvnená a teda predpis pre prietočnú plochu v prvom intervale bude rovnica (1.4.3). Polkruhová časť však ovplyvnená bude. Ako náhle voda prekročí hranicu obdĺžnikovej časti je potrebné zvážiť, že výška nie je nulová, je rovná polomeru r. Kvôli tomu je nutné upraviť rovnicu (6.4.3) a to tak, že výška v druhom intervale bude

$$y_2 = y - r\,. \qquad (7.4.3)$$

Okrem toho sa k tejto ploche musí pričítať plocha plne zatopeného, prvého intervalu. Výsledná prietočná plocha druhého intervalu teda bude

$$S_2 = 2 * r^2 + r^2 * arcsin\frac{(y-r)}{r} + (y-r) * \sqrt{r^2 - (y-r)^2}\,. \qquad (8.4.3)$$



Graf č. 9 Pomerná prietočná plocha klenbového profilu

4.3.1.4. Celková prietočná plocha

Priebeh celkovej pomernej prierezovej plochy (uvažovanej vzhľadom k maximálne zatopenému prierezu) k pomernej výške plnenia je zobrazený na *grafe č. 9* . V tejto závislosti nie je možné pozorovať výrazný prechod z jedného intervalu do druhého. To potvrdzuje geometrický predpoklad tohto profilu. Ak je prechod medzi dvomi časťami kanálu spojitý, grafy ich závislostí musia byť spojité taktiež.

4.3.2. Omočený obvod O

4.3.2.1. Interval 1

Prvý interval omočeného obvodu klenbového profilu bude podobný ako pri obdĺžnikovom profile

$$O_1 = 2 * r + 2 * y \tag{9.4.3}$$

4.3.2.2. Interval 2

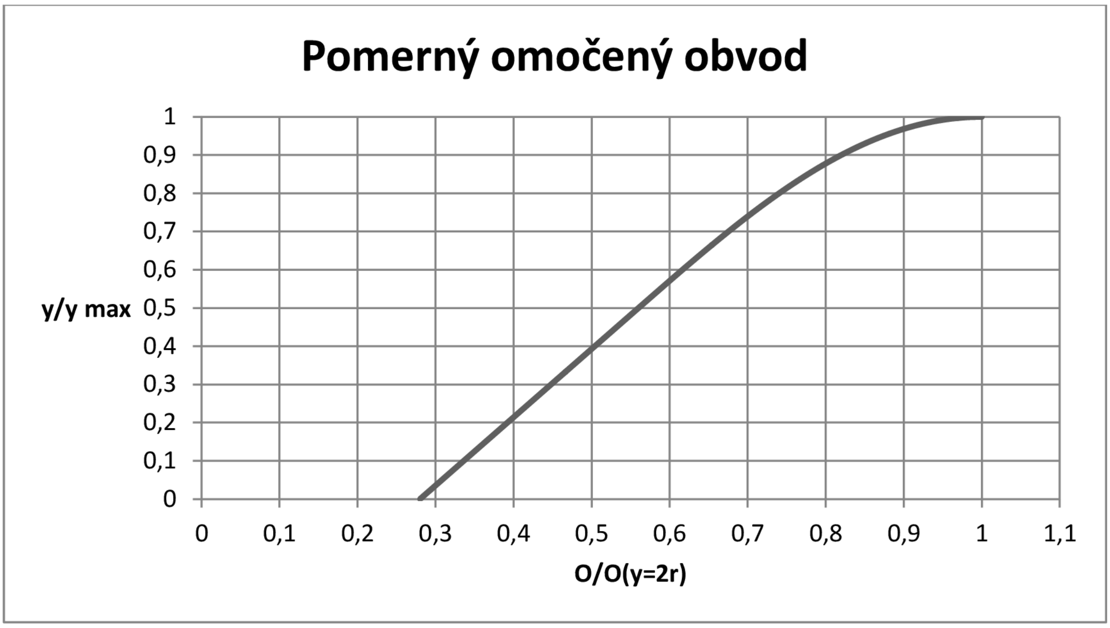
Vzťah pre omočený obvod kruhového profilu, parametrizovaný uhlom φ, je vyjadrený pomocou rovnice (5.4.1). Pre polkruhovú časť klenbového profilu s geometriou zvolenou podľa *obrázku č. 6*, je možno použiť rovnaký vzťah. Pri parametrizácií pomocou výšky plnenia y je potrebné nahradiť uhol φ rovnicou (5.4.3). Výsledný vzťah bude mať tvar

$$O_2 = 2 * r * \arcsin\frac{y}{r}. \tag{10.4.3}$$

4.3.2.3. Prechod medzi intervalmi

Podobne ako pri prietočnej ploche, prechodom medzi intervalmi bude ovplyvnený len 2. interval. S opätovným dosadením rovnice (7.4.3) a pričítaním maximálneho omočeného obvodu z obdĺžnikovej časti bude výsledný vzťah pre omočený obvod v druhom intervale

$$O_2 = 2 * r * \left(\arcsin\frac{y - r}{r} + 2\right). \tag{11.4.3}$$



Graf č. 10 Pomerný omočený obvod klenbového profilu

4.3.2.4. Celkový omočený obvod

Priebeh celkového pomerného omočeného obvodu k pomernej výške plnenia možno vidieť na *grafe č. 10*. Prechod medzi intervalmi je opäť viditeľne spojitý.

4.3.3. Hydraulický polomer klenbového profilu

4.3.3.1. Interval 1

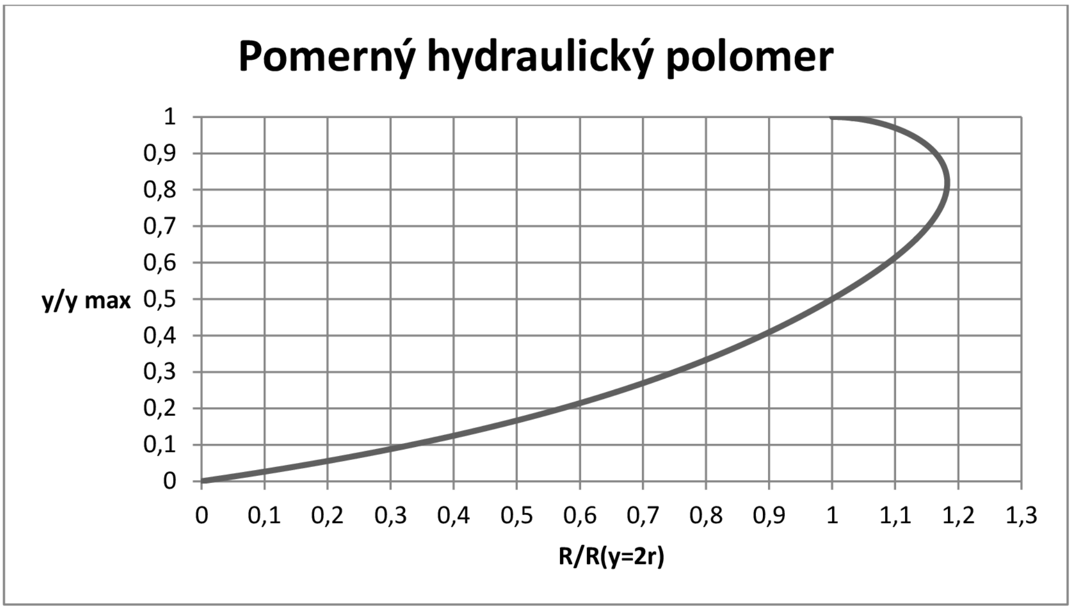
V 1. intervale je hydraulický polomer takmer zhodný s hydraulickým polomerom pre obdĺžnikový profil

$$R_1 = \frac{r * y}{r + y}\,. \tag{12.4.3}$$

4.3.3.2. Interval 2

Hydraulický polomer polkruhovej časti klenbového profilu je možno vyjadriť jednoduchým dosadením rovníc (8.4.3) a (11.4.3) do všeobecného vzťahu pre hydraulický polomer (6.2). Takto určený hydraulický polomer bude

$$R_2 = \frac{S_2}{O_2} = \frac{2 * r^2 + r^2 * arcsin\frac{(y-r)}{r} + (y-r) * \sqrt{r^2 - (y-r)^2}}{2 * r * \left(arcsin\frac{y-r}{r} + 2\right)}. \tag{13.4.3}$$



Graf č. 11 Pomerný hydraulický polomer klenbového profilu

4.3.3.3. Celkový hydraulický polomer

Priebeh celkového hydraulického polomeru klenbového profilu je možno vidieť na *grafe č.11*. Z grafu je vidieť, že táto charakteristika má jednoznačné maximum, ktoré nie je v plne zatopenom priereze. Je približne v bode pomerného plnenia $y/_{y\ max} = 0{,}82$. Prechod medzi intervalmi je spojitý.

4.3.4. Prietočná rýchlosť v podľa Chézyho rovnice

4.3.4.1. Interval 1

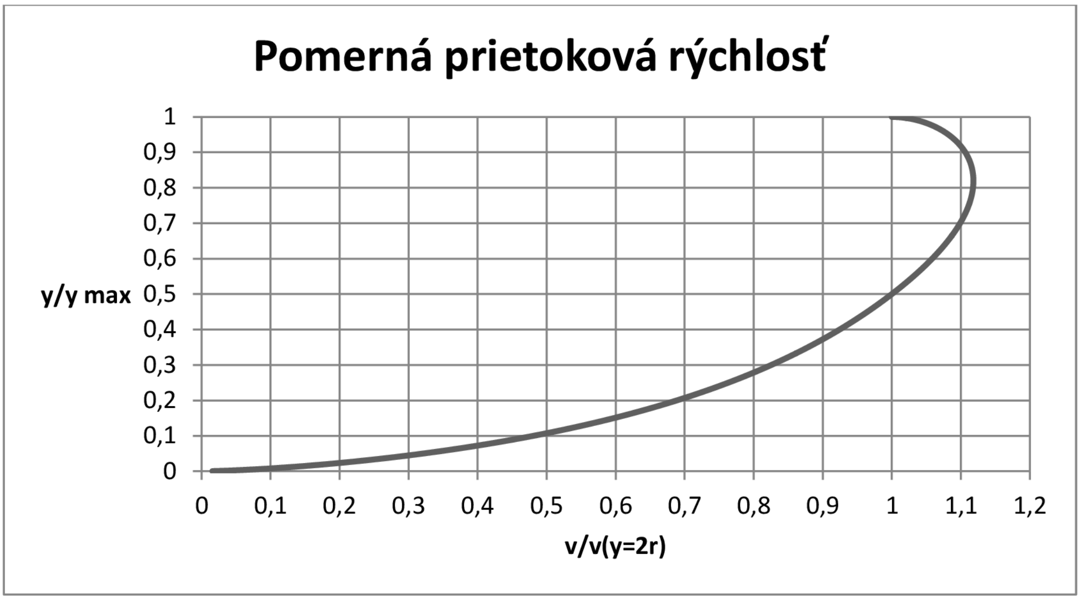
Rýchlosť prietoku v klenbovom profile, vyjadrená pomocou Chézyho rovnice (8.2), s použitím Manningovho súčiniteľu pre 1. interval je

$$v_1 = \frac{1}{n} * (R_1)^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i_o}. \qquad (14.4.3)$$

4.3.4.2. Interval 2

Druhý interval, riešený rovnakým prístupom, s použitím hydraulického polomeru R_2 bude

$$v_2 = \frac{1}{n} * (R_2)^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i_o}. \qquad (15.4.3)$$



Graf č. 12 Pomerná prietoková rýchlosť klenbového profilu

4.3.4.3. Celková prietočná rýchlosť

Celková pomerná prietočná rýchlosť k pomernému plneniu je zobrazená na *grafe č. 12*. Ako pri hydraulickom polomere má táto charakteristika maximum v rozdielnom bode, ako je plne zatopený prierez. Tento bod plnenia je zhodný s maximom hydraulického polomeru $^{y}/_{y\ max} = 0{,}82$.

4.3.5. Prietok Q

4.3.5.1. Interval 1

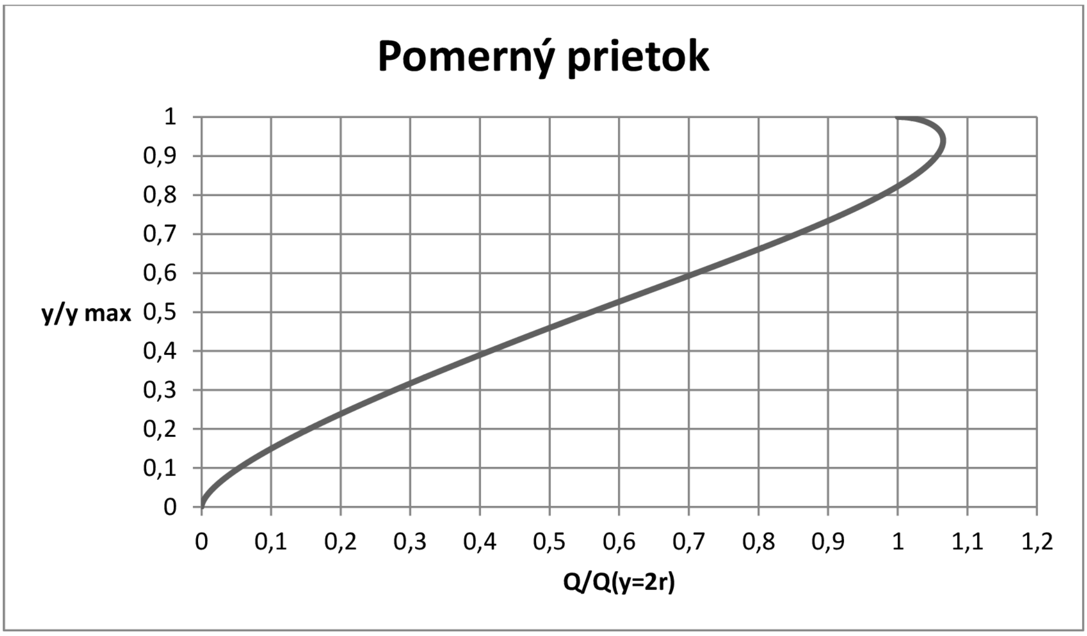
Prietok v klenbovom profile je opäť nutné rozdeliť na 2 intervaly. Túto charakteristiku možno odvodiť z rovnice kontinuity (18.4.1). Pre prvý interval bude vzťah s parametrizáciou pomocou y

$$Q_1 = S_1 * v_1. \tag{16.4.3}$$

4.3.5.2. Interval 2

V druhej časti profilu bude vzťah pre prietok

$$Q_2 = S_2 * v_2. \tag{17.4.3}$$



Graf č. 13 Pomerný prietok klenbového profilu

4.3.5.3. Celkový prietok

Celkový pomerný prietok, v závislosti na pomernom plnení, je zobrazený na *grafe č.13*. Táto charakteristika tiež dosahuje maximum, mimo plne zatopeného prierezu. Nachádza sa v bode pomerného plnenia $y/_{y\ max} = 0{,}9395$.

5. Hydraulicky najvýhodnejší prierez

5.1. Definícia hydraulicky najvýhodnejšieho prierezu

Z rovnice kontinuity (18.4.1), s použitím Chézyho rovnice (8.2) a Maningovho rýchlostného súčiniteľu, možno jednoznačne napísať že prietok je

$$Q = S * \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} * \sqrt{R * i_o}. \tag{1.5.1}$$

Rovnicu (1.5) možno upraviť, čím sa vzťah zjednoduší na

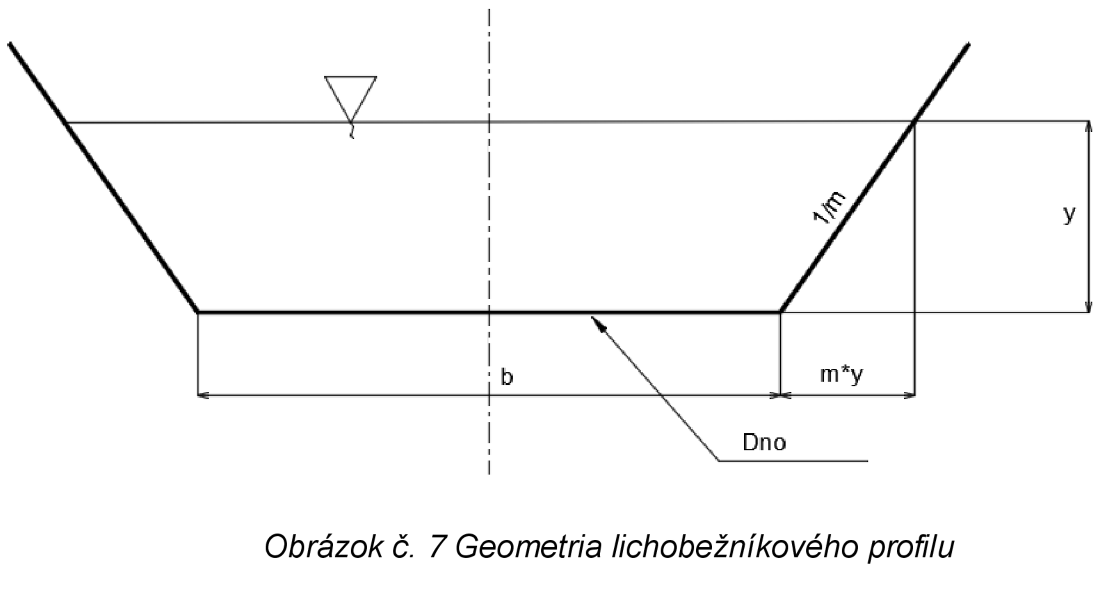
$$Q = S * \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i_o}, \tag{2.5.1}$$

a ak platí rovnica (6.2), možno ďalej zjednodušiť tento vzťah na

$$Q = \frac{1}{n} * \frac{S^{\frac{5}{3}}}{O^{\frac{2}{3}}} * \sqrt{i_o}. \tag{3.5.1}$$

Prierez kanálu bude energeticky najefektívnejší, pokiaľ pri stálom priereze, povrchovej drsnosti a pozdĺžnom sklone koryta bude jeho prietok maximálny. Ak je uvažovaná rovnica (3.5) a predošlé predpoklady, najvýhodnejší musí byť prierez, ktorý pri konštantnej prierezovej ploche má minimum omočeného obvodu. Takýto prierez je hydraulicky najvýhodnejší prierez. [3]

5.2. Obdĺžnikový profil



Obrázok č. 7 Geometria lichobežníkového profilu

Pre koryto lichobežníkového prierezu s geometriou zvolenou podľa *obrázku č.7* bude omočený obvod

$$O = 2 * \sqrt{m^2 * y^2 + y^2} + b = 2 * y * \sqrt{1 + m^2} + b\,. \tag{1.5.2}$$

Prietočná plocha tohto profilu bude

$$S = y * (b + m * y) \rightarrow \; b = \frac{S}{y} - m * y, \tag{2.5.2}$$

a teda

$$O = \frac{S}{y} - m * y + 2 * y * \sqrt{1 + m^2}, \tag{3.5.2}$$

kde S je konštantná prierezová plocha. Ak je hľadané minimum funkcie, možno použiť deriváciu prvého rádu podľa výšky hladiny a položiť ju rovno 0.

$$\min(O): \frac{dO}{dy} = -\frac{S}{y^2} - m + 2 * \sqrt{1 + m^2} = 0. \tag{4.5.2}$$

Za „S“ spätne možno dosadiť rovnicu (2.5.2). Po úprave výsledný výraz bude

$$\frac{b}{y} + 2 * \left(m - \sqrt{1 + m^2}\right) = 0. \tag{5.5.2}$$

Ak je hľadaný hydraulicky najvýhodnejší prierez, pre obdĺžnikový profil kanálu bude $m = 0$, a teda,

$$\frac{b}{y} + 2 * (0 + 1) = 0 \rightarrow \; b = 2y \,.\, [3] \tag{6.5.2}$$

Ak by bol hľadaný hydraulicky najvýhodnejší prierez lichobežníkového profilu kanálu, výsledný vzťah by pomocou ďalších úprav bol

$$b = \frac{2}{\sqrt{3}} * y. \, [4] \tag{7.5.2}$$

5.3. Kruhový profil

Pre tento profil je možno využiť geometriu z *obrázku č. 2*, použitom v kapitole 4.1. Vzťah pre omočený obvod bude rovnica (5.4.1) a pre prietočnú plochu (3.4.1). Po dosadení prietočnej plochy cez polomer kruhu, bude výsledný omočený obvod

$$O = \left(\frac{2 * S * \varphi^2}{\varphi - \sin\varphi}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{1.5.3}$$

Hydraulicky najvýhodnejší prierez tohto profilu je možno nájsť deriváciou prvého rádu podľa uhlu φ, položenú rovno 0. Keďže podľa definície hydraulicky najvýhodnejšieho prierezu je prietočná plocha konštantná,

$$\min(O): \frac{dO}{d\varphi} =$$

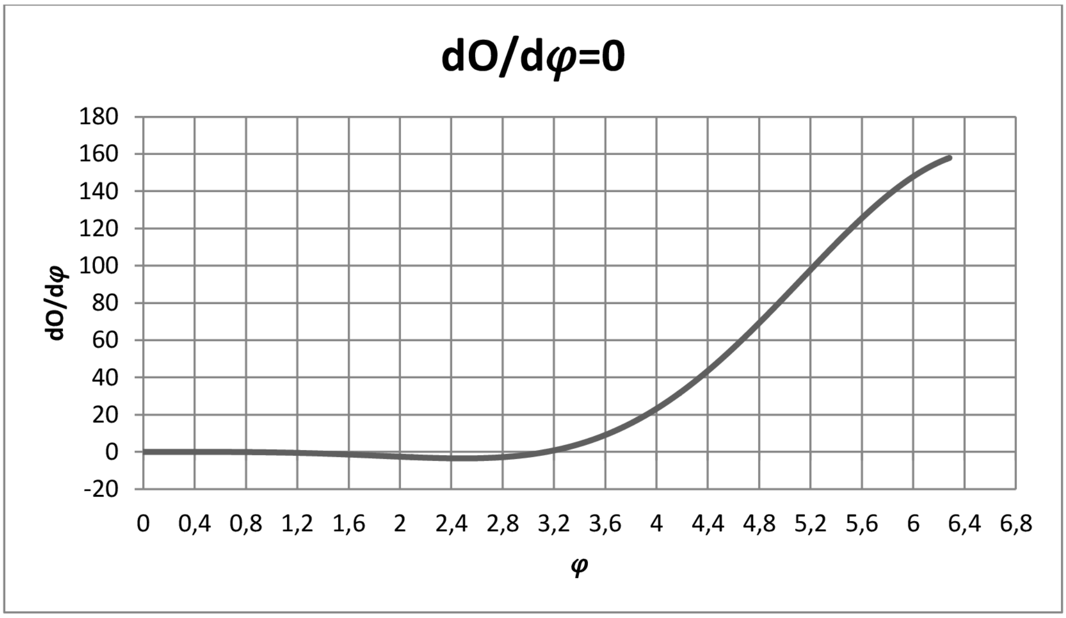
$$\frac{1}{2} * \left(\frac{2 * S * \varphi^2}{\varphi - \sin\varphi}\right)^{-\frac{1}{2}} * \frac{4 * S * \varphi * (\varphi - \sin\varphi) - 2 * S * \varphi^2 * (1 - \cos\varphi)}{(\varphi - \sin\varphi)^2}. \quad (2.5.3)$$

Pokiaľ sa má táto funkcia rovnať 0, čitateľ musí byť nulový.

$$4 * S * \varphi * (\varphi - sin\,\varphi) - 2 * S * \varphi^2 * (1 - cos\,\varphi) = 0 \quad (3.5.3)$$

Po zjednodušení dostaneme rovnicu

$$2 * \varphi^2 - 4 * \varphi * \sin\varphi + 2 * \varphi^2 * \cos\varphi = 0. \quad (4.5.3)$$



Graf č. 14 Priebeh derivácie omočeného obvodu kruhového profilu

Pre nájdenie hydraulicky najvýhodnejšieho prierezu je nutné vyriešiť túto rovnicu. V *grafe č. 14* je možné vidieť túto závislosť v intervale od 0 po 2π. Tento graf na prvý pohľad pretína nulu v okolí bodu π.Táto hodnota môže byť dosadená do rovnice (4.5.3).

$$2 * \pi^2 - 4 * \pi * sin\,\pi + 2 * \pi^2 * cos\,\pi = 0\,. \quad (5.5.3)$$

Keďže rovnosť platí, možno prehlásiť, že π je riešením tejto rovnice a hydraulicky najvýhodnejší prierez je v pomernej výške plnenia $\frac{y}{ymax} = 0{,}5$.

Záver

Táto bakalárska práca sa zaoberá prúdením s voľnou hladinou v korytách rôznych typov. Táto problematika bola interpretovaná pomocou Chézyho rovnice $v = C * \sqrt{i_o * R}$, s použitím konštantného Manningovho rýchlostného súčiniteľu $C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}}$.

Z hľadiska prietočnosti a prietokovej rýchlosti boli skúmané 3 rôzne profily a to obdĺžnikový, kruhový a klenbový. Vo všetkých troch prípadoch bol z geometrie jednotlivých profilov určený hydraulický polomer kanálu, ktorý bol neskôr využitý pre určenie rýchlosti a prietoku. Tieto matematické závislosti boli graficky znázornené v pomerných, bezrozmerných súradniciach, vzhľadom k plne zatopenému prierezu (konzumčné krivky) . Tento typ grafu názorne ukazuje, že nie v každom koryte, nastáva maximum rýchlosti a maximum prietoku v plne zatopenom priereze. Boli určené miesta maxima týchto charakteristík. Z dôvodu nutnosti vyriešenia nelineárnych rovníc v prípade kruhového profilu bola využitá Newtonova metóda dotyčníc na numerické potvrdenie výsledku. Jedným z dôležitých pozorovaní je skutočnosť, že maximum hydraulického polomeru je v zhode s maximom rýchlostí u všetkých troch profilov.

Ďalším zo záujmov tejto práce bolo hľadanie hydraulicky najvýhodnejšieho prierezu. Teoretické poznatky z tejto problematiky boli aplikované na kruhový a obdĺžnikový profil.

Z praktického hľadiska sú tieto poznatky využiteľné pre vodné elektrárne a odpadové kanály. Obdĺžnikový prierez je využívaný pre prívodné a odvodné kanály malých vodných elektrární. Kruhový profil je často využívaný pre odpadné štály kanalizácií.

Zoznam použitých zdrojov

[1] SMETANA, Jan. *Hydraulika I: Fyzikální vlastnosti, statika, kinematika a dynamika kapalin. Ustálený pohyb vody v potrubí a v korytech.* Praha: ČAV, 1957, 544 s.

[2] MATTAS, Daniel. *Výpočet průtoku v otevřených korytech.* Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, 2014, 110 s. : il. ISBN 978-80-87402-27-6.

[3] MÄSIAR, Ernest a Jozef KAMENSKÝ. *Hydraulika I*. 2. vyd. Bratislava: SVŠT, 1983, 364 s.

Internetové zdroje

[4] http://www.nptel.ac.in/courses/105106114/pdfs/Unit22/22_4.pdf

Zoznam obrázkov

Zoznam grafov