

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

Kandidat:

**JAN PRIBOŠEK**

## **IZRAČUN ENERGETSKIH PARAMETROV HIDROELEKTRARNE**

**Diplomska naloga št.**

**Mentor:**

Andrej Kryžanowski

LJUBLJANA, 2017

delovna verzija, 28. junij 2017



## **POPRAVKI**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

### **UDK**

**Avtor:** Jan Pribošek  
**Mentor:** Prof. dr. Andrej Kryžanowski  
**Naslov:** Izračun parametrov hidroelektrarne  
**Tip dokumenta:** Diplomaska naloga - univerzitetni študijski program gradbeništvo  
**Obseg in oprema:** 19 str., 11 sl., 0 pregl., 33 en.  
**Ključne besede:**

### **Izvleček**

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

### **UDC**

**Author:** Jan Pribošek

**Supervisor:** Prof. Andrej Kryžanowski, Ph. D.

**Title:** Calculating parameters of the hydroelectric powerplant

**Document type:** Graduation - Thesis - university program

**Notes:** 19 p., 11 fig., 0 tab., 33 eq.

**Keywords:**

**Abstract**

## **ZAHVALA**

## KAZALO VSEBINE

<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK</b>	<b>II</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>ZAHVALA</b>	<b>IV</b>
<b>1 Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Teoretične osnove</b>	<b>2</b>
2.1 Pridobitev podatkov . . . . .	2
2.2 Izračun hidrološkega niza podatkov . . . . .	3
2.3 Izračun konsumpcijske krivulje . . . . .	3
2.3.1 Izračun konsumpcijske krivulje za pravokotne in trapezne struge . . . . .	3
2.4 Izračun konsumpcijske krivulje za struge poljubne oblike . . . . .	5
2.4.1 Izračun višine rečnega korita . . . . .	5
2.4.2 Določitev parametrov odseka . . . . .	5
2.5 Izračun proizvodnje električne energije . . . . .	8
<b>3 Izračun</b>	<b>10</b>
3.1 Izračun parametrov po trapezni metodi . . . . .	10
3.1.1 Ročni izračun . . . . .	10
3.1.2 Izračun s programom . . . . .	10
3.2 Izračun parametrov po numerični metodi . . . . .	12
3.2.1 Ročni izračun parametrov hidroelektrarne . . . . .	12
3.2.2 Izračun parametrov hidroelektrarne s programom . . . . .	12
3.3 Rezultati . . . . .	14
<b>4 ZAKLJUČEK</b>	<b>15</b>
<b>POVZETEK</b>	<b>16</b>

<b>SUMMARY</b>	<b>17</b>
<b>VIRI</b>	<b>18</b>
<b>DODATKI</b>	<b>19</b>



## KAZALO SLIK

2.1	Prečni prerez pravokotne struge . . . . .	4
2.2	Prečni prerez trapezne struge . . . . .	4
2.3	Poljubno definirana struga . . . . .	5
2.4	Izbrani odsek struge . . . . .	6
2.5	Detajl odseka struge . . . . .	6
2.6	Prečni prerez hidroelektrarne . . . . .	8
3.1	Shema struge izbranega vodotoka . . . . .	10
3.2	Vnos podatkov v program . . . . .	11
3.3	Konsumpcijska krivulja izračunana po trapezni metodi . . . . .	11
3.4	Vnos podatkov v program . . . . .	13
3.5	Graf konsumpcijske krivulje izračunani po numerični metodi . . . . .	13

## KAZALO PREGLEDNIC

## **LIST OF FIGURES**

## LIST OF TABLES

## 1 Uvod

Letna količina vode ki se pretoči v Sloveniji je  $33,9 \text{ km}^3$ , kar nas primerjano na število prebivalcev uvršča v sam vrh v Evropi, takoj za Švico in Norveško. Potreba po električni energiji se iz leta v leto veča, vendar se le okoli 47% vodnega potenciala efektivno uporablja za potrebe proizvodnje električne energije. Voda v Sloveniji je povsod okoli nas, zato je zanimivo preračunati koliko električne energije bi lahko proizvedli iz bližnjega potoka ali večje reke. Podatki o pretokih rek v Sloveniji so namreč javno dostopni v arhivu na spletni strani agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). [1]

Cilj diplomske naloge je ocena proizvedene električne energije pretočne hidroelektrarne poljubne velikosti za vodotok poljubnega pretoka in oblike. V ta namen sem napisal program, ki s pomočjo začetno ocenjenih parametrov struge in meritev povprečnih dnevnih pretokov izbranega vodotoka izračuna parametre pretočne hidroelektrarne.

V diplomski nalogi bom najprej opisal postopek izračuna z osnovnimi enačbami, na koncu pa bom primerjal rezultate ročnega izračuna z rezultati ki jih izračuna program. Pri izračunu sem upošteval da je voda za pregrado na maksimalni konstantni višini, izkoristek turbine neodvisen od pretoka skozi turbino in naklon struge od 0% do 2%.

## 2 Teoretične osnove

Parametre izbrane hidroelektrarne lahko izračunamo po naslednjem algoritmu:

1. Pridobitev podatkov
2. Izračun hidrološkega niza podatkov za obdobje
3. Izračun konsumpcijske krivulje
4. Izračun proizvodnje električne energije

### 2.1 Pridobitev podatkov

Za nadaljnje izračune potrebujemo podatke o:

- Dimenzijah rečne struge
- Naklonu in oceno Manningovega koeficienta hrapavosti rečnega korita
- Povprečnih dnevnih pretokih vodotoka za izbrano obdobje

Podatke o dimenzijah rečne struge lahko pridobimo z meritvami ali pa dimenzije ocenimo na podlagi ortofoto posnetkov. Naklon se lahko oceni s pomočjo spletne aplikacije Geopedija, kjer so vneseni podatki o višinski razliki izbranih točk  $\Delta h$  rečne struge in razdalje med točkami  $L$ . Naklon rečne struge izračunamo po enačbi:

$$I = \frac{100\Delta h}{L}[\%] \quad (2.1)$$

Manningov koeficient hrapavosti rečnega korita  $n_g$  se lahko oceni izkustveno na terenu s pomočjo priročnikov ali pa z umerjanjem na podlagi podatkov o nivojih vode in pretokih. Odvisen od naslednjih 7 faktorjev [2]:

1. Hrapavosti površine ostenja
2. Zaraščenosti rečnega korita
3. Neregularnosti oblike rečnega korita
4. Meandriranja rečne struge
5. Zamašitve struge s plavinami
6. Oblike in velikosti rečnega korita
7. Polnosti korita

Podatke o pretokih slovenskih vodotokov lahko pridobimo iz arhiva, ki se nahaja na spletni strani agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO). V primeru da iščemo pretok za manjši vodotok, obstaja velika verjetnost da podatki o pretokih ne obstajajo. V tem primeru lahko pretok vodotoka ocenimo s pomočjo meritev višine gladine vode in dimenzij struge, ocene Manningovega koeficienta hrapavosti in naklona struge. S pomočjo Manningove enačbe opisane v poglavju 2.3.1 in ocenjenih členov enačbe dobimo končno ocenjeno vrednost pretokov za posamezno obdobje meritev.

## 2.2 Izračun hidrološkega niza podatkov

Iz arhiva lahko izvozimo podatke o povprečnih dnevni pretokih v csv (comma separated values) obliki. Iz podatkov lahko za vsak mesec obdobja izračunamo povprečni mesečni pretok. Če mesečne pretoke povprečimo za vsa leta izbranega obdobja lahko navedene povprečne mesečne pretoke obdobja prikažemo na hidrogramu. Prav tako se lahko določi mokro in suho leto obdobja, ki ju primerjamo z povprečnimi mesečnimi pretoki.

## 2.3 Izračun konsumpcijske krivulje

Konsumpcijska krivulja je graf, ki predstavlja višino gladine spodnje vode v rečni strugi v odvisnosti od pretoka vode skozi turbine hidroelektrarne. Graf konsumpcijske krivulje potrebujemo za določitev višinske razlike  $dh$  med spodnjo in zgornjo vodo v odvisnosti od pretoka vode skozi turbine hidroelektrarne. Višinsko razliko  $dh$  potrebujemo za določitev moči hidroelektrarne v zadnjem koraku algoritma opisanega v tem poglavju.

### 2.3.1 Izračun konsumpcijske krivulje za pravokotne in trapezne struge

Za izračun konsumpcijske krivulje potrebujemo pretok vodotoka v odvisnosti od višine gladine vode  $h$  v strugi. Gladina vode  $h$  poteka od dna struge do maksimalne višine struge  $H$ . Pretok vode v strugi se za vsak cm višine  $h$  izračuna po Manningovi enačbi:

$$Q(h) = \frac{1}{ng} \sqrt{I} \frac{S(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}} \quad (2.2)$$

Kjer je:

Q	pretok
ng	Manningov koeficient hrapavosti dna struge
I	naklon struge
S	ploščina prečnega profila
P	dolžina omočenega oboda struga

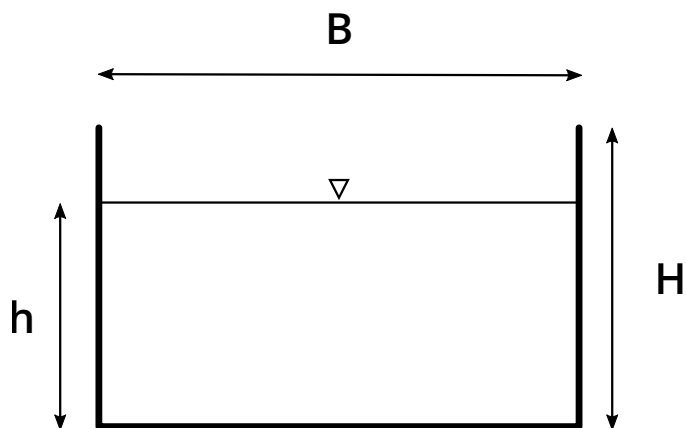
#### 1. Pravokotna struga:

Omočeni obod pravokotne struge izračunamo kot seštevek širine dna struge in dvakratne višine struge  $h$ .

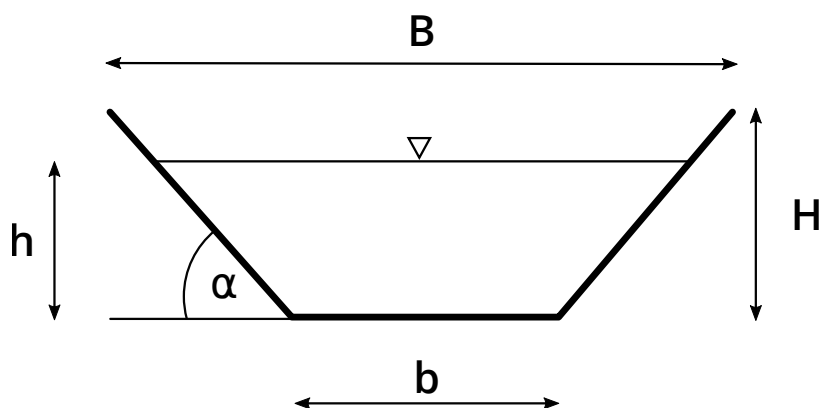
$$P_p(h) = B + 2h \quad (2.3)$$

Ploščino pravokotne struge dobimo po enačbi:

$$S_p(h) = B \cdot h \quad (2.4)$$



Slika 2.1: Prečni prerez pravokotne struge



Slika 2.2: Prečni prerez trapezne struge

## 2. Trapezna struga:

Omočeni obod trapezne struge izračunamo kot seštevek širine dna struge in dvakratne razdalje od roba dna struge do točke presečišča rečnega korita z gladino vode.

$$P_t(h) = b + 2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{h}{\tan \alpha}\right)^2} \quad (2.5)$$

Ploščino trapezne struge izračunamo po enačbi:

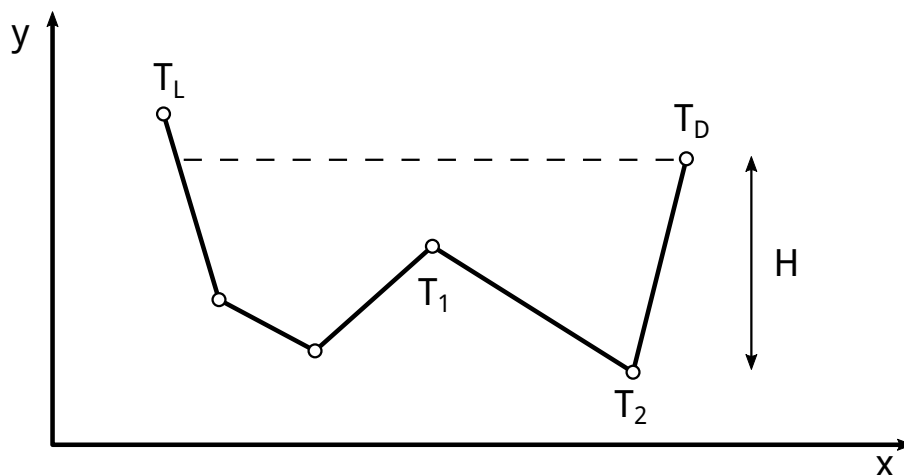
$$S_t(h) = b \cdot h + \frac{h^2}{2 \tan \alpha} \quad (2.6)$$

Ko poznamo vse parametre Manningove enačbe 2.2, izračunamo pretoke vodotoka za vsak cm višine rečne struge, ki poteka od 0 do  $H$  in narišemo konsumpcijsko krivuljo  $h(Q)$ .



## 2.4 Izračun konsumpcijske krivulje za struge poljubne oblike

Poljubno oblikovano strugo lahko popišemo s serijo točk, ki jih dodajamo v kartezijski koordinatni sistem. Za vsako točko poljubnega rečnega korita podamo  $x$  in  $y$  koordinato, za točke pa predpostavimo da so med seboj povezane z enačbo linearne funkcije.



Slika 2.3: Poljubno definirana struga

### 2.4.1 Izračun višine rečnega korita

Skrajni točki struge sta točki  $T_L$  in  $T_D$  na sliki 2.3. Točko na robu struge z najnižjo  $y$  koordinato označimo s  $T_{Smin}$  (na sliki 2.3 točka  $T_D$ ). Najnižjo točko poljubne struge označimo s  $T_{min}$  (na sliki 2.3 točka  $T_2$ ). Višina rečnega korita  $H$  je definirana kot razdalja med točkama  $T_{Smin}$  in  $T_{min}$ .

### 2.4.2 Določitev parametrov odseka

Program razdeli podano strugo na odseke po dve točki  $T_1 (x_1, y_1)$  in  $T_2 (x_2, y_2)$ . Za podan odsek se najprej določi enačba linearne funkcije.

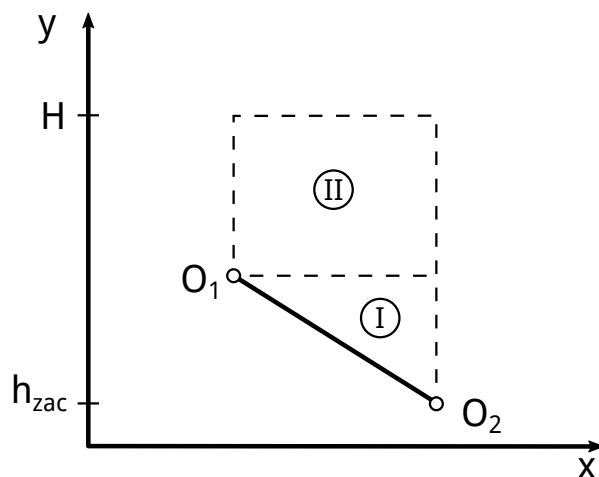
$$f(x) = kx + n \quad (2.7)$$

Naklon funkcije  $k$  se izračuna po formuli:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.8)$$

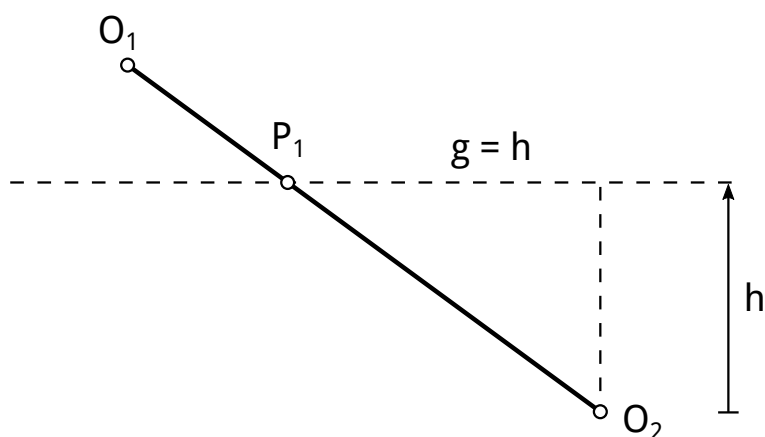
Če v enačbo linearne funkcije 2.7 vstavimo izračunan  $k$  in koordinate točke  $T_1$ , lahko izračunamo iskani  $n$  in s tem je določena enačba linearne funkcije  $f(x)$  med dvema točkama, ki jo potrebujemo za nadaljnje izračune.

Za vsak odsek dveh točk se najprej določi najnižja točka odseka  $T_{zac}$ , na sliki 2.4 označena kot točka  $O_2$ .  $Y$  koordinata točke  $T_{zac}$  nam predstavlja začetno višino odseka  $h_{zac}$ . Razdaljo med začetno višino odseka  $h_{zac}$  in končno gladino struge  $H$  označimo z  $dh$ .



Slika 2.4: Izbrani odsek struge

Od  $h_{zac}$  do končne višine rečnega korita  $H$  za vsak cm po višini določimo presečišče  $P_1$  prej izračunane funkcije  $f(x)$  s horizontalno ravnino  $g$ , ki predstavlja gladino vode pri trenutni višini  $h$ .



Slika 2.5: Detajl odseka struge

Ko imamo določeno presečišče  $P_1$  gladine vode s funkcijo  $f(x)$  med točkama odseka, lahko izračunamo dolžino omočenega oboda struge in ploščino lika ki ga oklepajo funkcija odseka, navidezna gladina vode  $g$  in najnižja točka odseka  $T_{zac}$  na sliki 2.4 označena z  $O_2$ .

1. V primeru da se presečišče  $P_1$  odseka nahaja v območju med točkama  $O_1$  in  $O_2$ , dolžino omočenega oboda določimo po Pitagorovem izreku kot:

$$P = \sqrt{(T_{zac}x - P_1x)^2 + (T_{zac}y - P_1y)^2} \quad (2.9)$$

ploščino področja ki ga oklepajo horizontalna ravnina s presečiščem  $P_1$  in najnižjo točko odseka  $T_{zac}$  pa določimo kot ploščino trikotnika (področje I na sliki 2.4) po formuli:

$$S = \frac{|T_{zac}x - P_1x| \cdot |T_{zac}y - P_1y|}{2} \quad (2.10)$$

2. V primeru, da se presečišče  $P1$  nahaja izven območja točk  $O_1$  in  $O_2$  pa se dolžina omočenega oboda izračuna kot razdalja med točkama  $O_1$  in  $O_2$  po Pitagorovem izreku:

$$P = \sqrt{(O_1x - O_2x)^2 + (O_1y - O_2y)^2} \quad (2.11)$$

Ploščina pa se določi kot seštevek ploščin območij I in II na sliki 2.4.

$$S = S_I + S_{II} \quad (2.12)$$

Pri čemer sta  $S_I$  in  $S_{II}$  enaka:

$$S_I = \frac{(O_2y - O_1y) * (O_2x - O_1x)}{2} \quad (2.13)$$

$$S_{II} = (O_2x - O_1x) * (H - O_1y) \quad (2.14)$$

Za določitev končne dolžine omočenih obodov pri iskani višini  $h$  moramo sešteti vse omočene obode odsekov pri iskani višini  $h$ .

$$P(h) = P_1(h) + P_2(h) + P_3(h) + \dots + P_{n-1}(h) + P_n(h) \quad (2.15)$$

Za določitev končnih vrednosti ploščin likov  $S$  pri iskani višini  $h$ , moramo sešteti ploščine  $S$  pri iskani višini  $h$  za vse odseke točk rečne struge, to so vse točke med  $T_L$  in  $T_D$  na sliki 2.3

$$S(h) = S_1(h) + S_2(h) + S_3(h) + \dots + S_{n-1}(h) + S_n(h) \quad (2.16)$$

Za izris konsumpcijske krivulje potrebujemo podatke o pretokih v odvisnosti od višine vode v strugi. Za vsak odsek struge imamo na voljo podatke o ploščini prečnega profila struge in omočenega oboda dna struge v odvisnosti od višine vode v strugi. Pretoke za vsak cm višine vode v strugi izračunamo po Manningovi enačbi 2.2

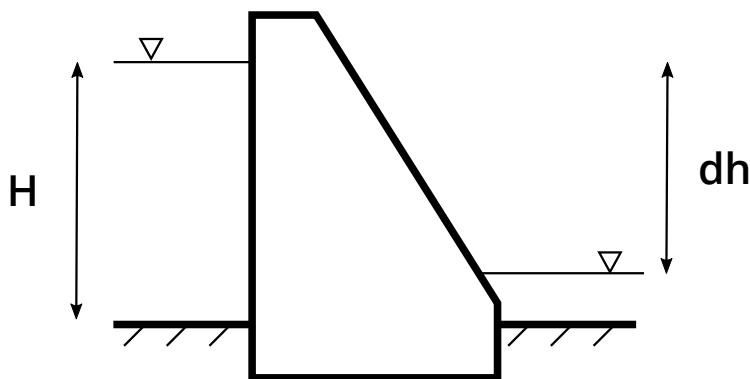
Ko imamo posamezne pretoke po višinah za vse odseke izračunane, jih medsebojno seštejemo in dobimo končne vrednosti pretokov:

$$Q(h) = Q_1(h) + Q_2(h) + Q_3(h) + \dots + Q_{n-1}(h) + Q_n(h) \quad (2.17)$$

Sledi izris konsumpcijske krivulje  $h(Q)$ .

## 2.5 Izračun proizvodnje električne energije

Za določitev končne proizvodnje električne energije potrebujemo razliko med koto zgornje vode (vode v rezervoarju) in koto spodnje vode, ki jo določimo iz grafa konsumpcijske krivulje izračunanega za izbrano strugo.



Slika 2.6: Prečni prerez hidroelektrarne

Ker računamo proizvodnjo električne energije za pretočne hidroelektrarne, predpostavimo da je koto zgornje vode konstantna na višini  $H$ . Koto spodnje vode določimo iz prej izračunane konsumpcijske krivulje, kjer določimo višino spodnje vode v strugi za dani povprečni mesečni pretok skozi turbino hidroelektrarne. V primeru da se pretok skozi turbino hidroelektrarne nahaja med dvema točkama pretokov v konsumpcijski krivulji, iskano višino spodnje vode določimo z linearno interpolacijo med točkama na grafu konsumpcijske krivulje.

Izračunamo višinsko razliko med koto zgornje in spodnje vode:

$$dh = H - H_{spodaj} \quad (2.18)$$

Moč hidroelektrarne izračunamo po enačbi

$$P = \mu \cdot g \cdot Q \cdot dh \quad (2.19)$$

Pri čemer so:

$P$	moč [kW]
$\mu$	izkoristek turbine [%]
$g$	gravitacijska konstanta [ $9,81 \frac{m}{s^2}$ ]
$Q$	pretok [ $m^3/s$ ]
$dh$	razlika višin spodnje in zgornje vode [m]

Za izračun povprečne mesečne proizvodnje električne energije, za vsak dan v mesecu izračunamo povprečno moč in uporabimo naslednjo enačbo:

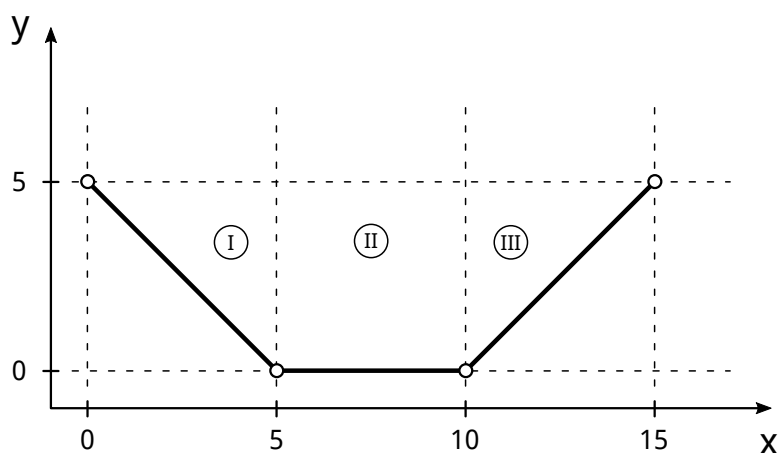
$$E = \frac{24P \cdot d}{1000} \quad (2.20)$$

Pri čemer so:

E	proizvedena električna energija [ $kWh$ ]
d	število dni v mesecu

### 3 Izračun

Za izračun ocene parametrov pretočne hidroelektrarne je ključnega pomena pravilen izračun konsumpcijske krivulje za izbran vodotok, saj se vsi nadaljnji izračuni nanašajo nanj. V tem poglavju bom s primerom dokazal, da program računa parametre pravilno. Za dokaz bom uporabil namišljen primer trapezno oblikovane struge vodotoka prikazane na sliki 3.1 z Manningovim koeficientom hrupavosti 0,3 in z 1% naklonom struge. Rezultate ročnega izračuna bom primerjal z rezultati ki jih izračuna program po trapezni in numerični metodi opisani v poglavju 2.3.1 oz. 2.4. Vse mere na spodnji sliki so v metrih.



Slika 3.1: Shema struge izbranega vodotoka

#### 3.1 Izračun parametrov po trapezni metodi

##### 3.1.1 Ročni izračun

Za izračun pretoka vodotoka pri višini  $h = 5\text{ m}$  uporabimo enačbe navedene v poglavju 2.3.1.

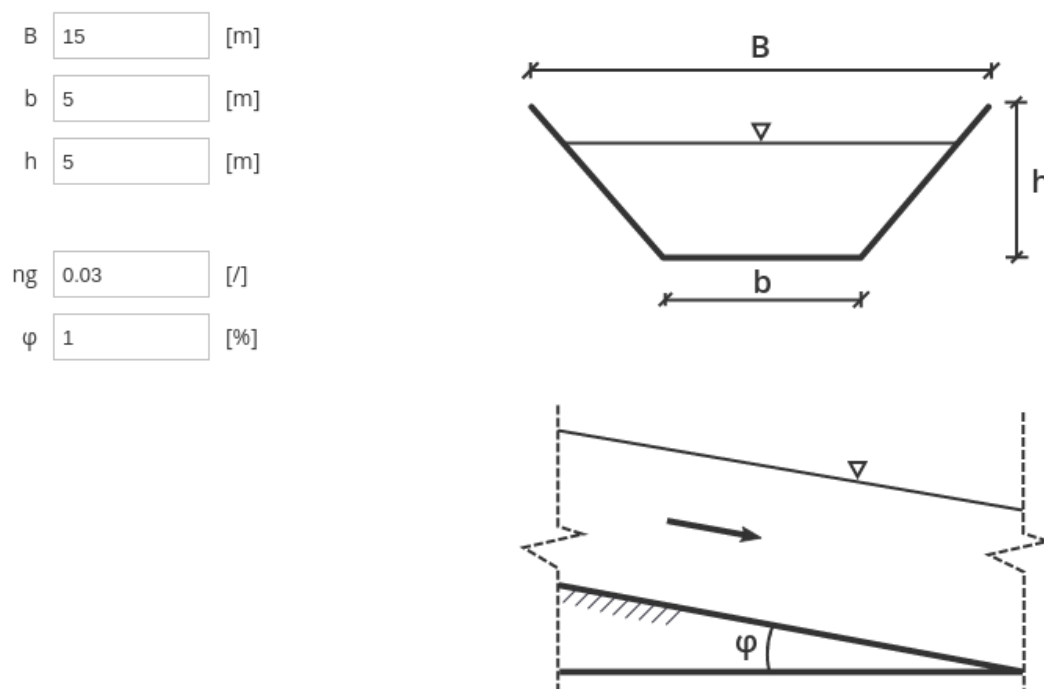
$$P(h) = b + 2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{h}{\tan \alpha}\right)^2} = 5 + 2 \cdot \sqrt{5^2 + \left(\frac{5}{\tan 45}\right)^2} = 19,1 \text{ m} \quad (3.1)$$

$$S(h) = b \cdot h + \frac{h^2}{\tan \alpha} = 5 \cdot 5 + \frac{5^2}{\tan 45} = 50 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

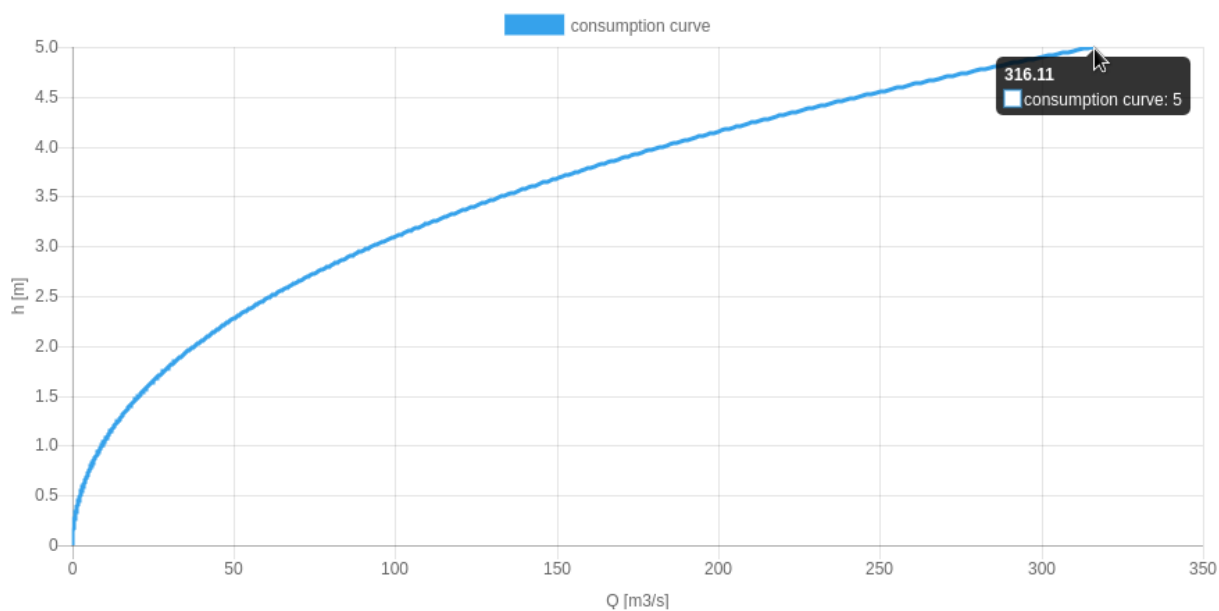
$$Q(h) = \frac{\sqrt{0,01}}{0,03} \cdot \frac{50^{5/3}}{19,1^{2/3}} = 316,6 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.3)$$

##### 3.1.2 Izračun s programom

V program vnesemo podatke o rečnem koritu kot je prikazano na sliki 3.2.



Slika 3.2: Vnos podatkov v program



Slika 3.3: Konsumpcijska krivulja izračunana po trapezni metodi

S slike 3.3 lahko odčitamo pretok struge izračunane po trapezni metodi pri višini  $h = 5\text{m}$ .

### 3.2 Izračun parametrov po numerični metodi

V tem podpoglavju bomo primerjali rezultate ročno izračunanih parametrov in parametrov izračunanih s programom po trapezni metodi omenjeni v poglavju 3.1.

#### 3.2.1 Ročni izračun parametrov hidroelektrarne

##### I. Odsek

$$S_I = \frac{55}{2} = 12,5 \text{ m}^2 \quad (3.4)$$

$$P_I = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,07 \text{ m} \quad (3.5)$$

$$Q_I = \frac{\sqrt{0,01}}{0,03} \cdot \frac{12,5^{5/3}}{7,07^{2/3}} = 60,9 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.6)$$

##### II. Odsek

$$S_{II} = 55 = 25 \text{ m}^2 \quad (3.7)$$

$$P_{II} = 5 \text{ m} \quad (3.8)$$

$$Q_{II} = \frac{\sqrt{0,01}}{0,03} \cdot \frac{25^{5/3}}{5^{2/3}} = 243,7 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.9)$$

##### III. Odsek

$$S_{III} = S_I = 12,5 \text{ m}^2 \quad (3.10)$$

$$P_{III} = S_I = 7,07 \text{ m} \quad (3.11)$$

$$Q_{III} = Q_I = 60,9 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.12)$$

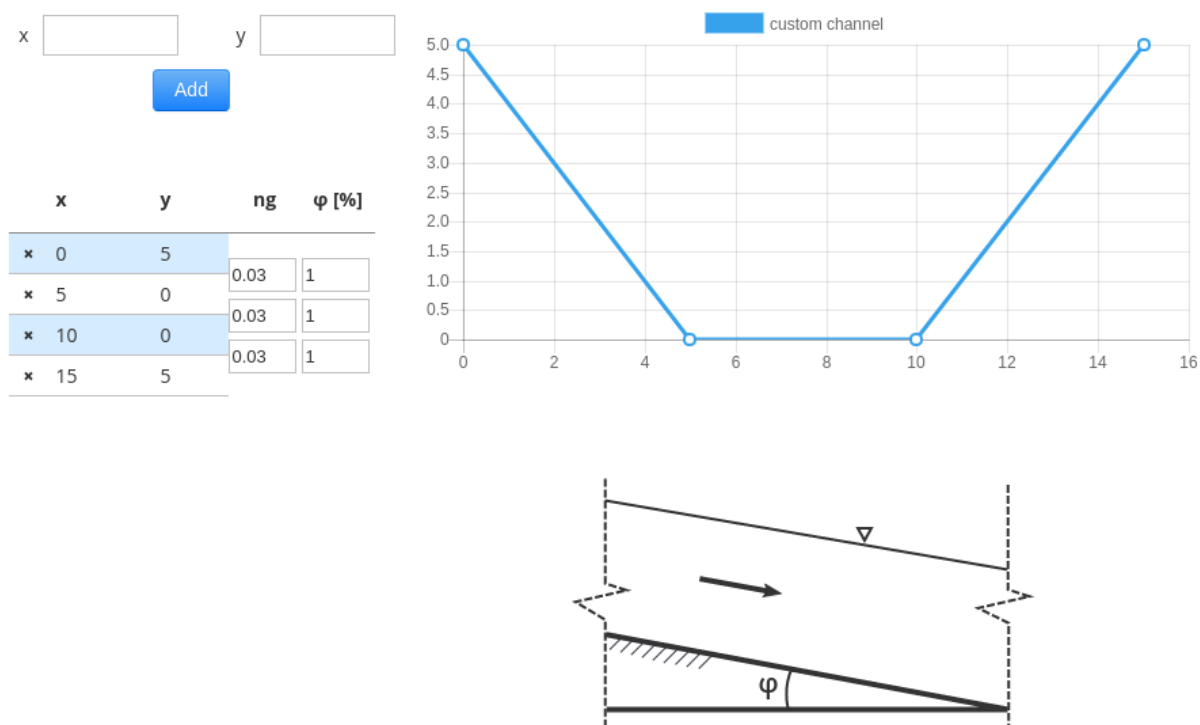
Skupni pretok za višino  $h = 5\text{m}$ :

$$Q_s = Q_I + Q_{II} + Q_{III} = 60,9 + 243,7 + 60,9 = 365,5 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.13)$$

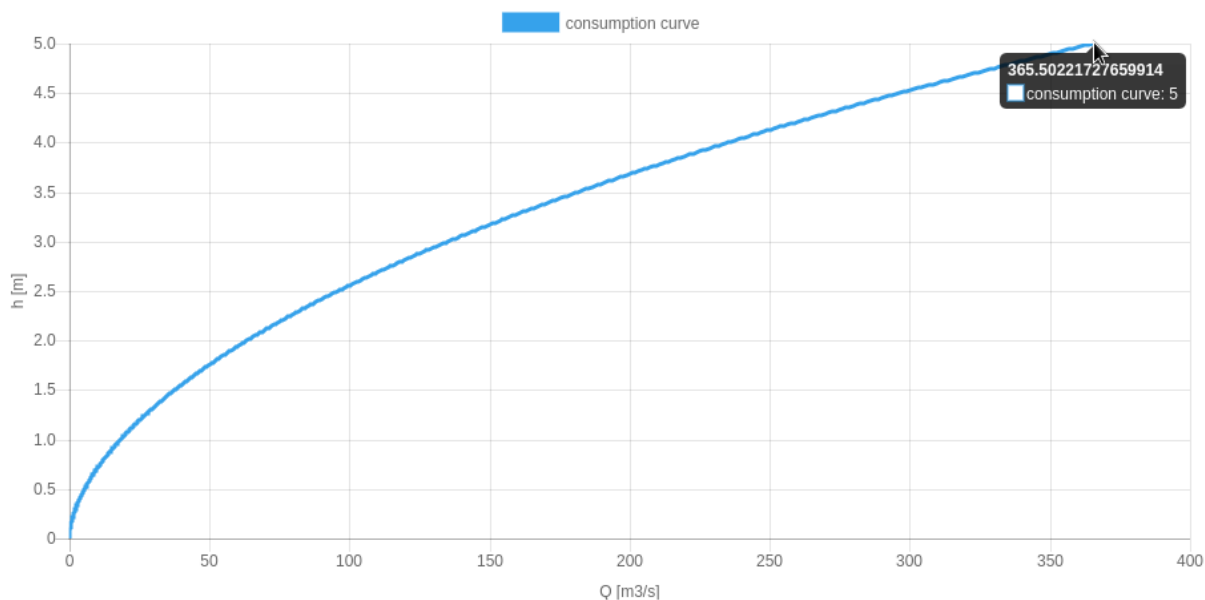
#### 3.2.2 Izračun parametrov hidroelektrarne s programom

S pomočjo uporabniškega vmesnika v koordinatni sistem vnašamo serijo točk, s katerimi modeliramo robove izbrane struge. V tabeli na levi strani diagrama, za vsak odsek med dvema točkama dodajamo Manningove koeficiente hrapavosti  $n_g$  in naklone struge na sliki označene s  $\varphi$ . V našem primeru so vrednosti koeficientov za vse odseke rečne struge enake.





Slika 3.4: Vnos podatkov v program



Slika 3.5: Graf konsumpcijske krivulje izračunani po numerični metodi

Z grafa konsumpcijske krivulje 3.5 pri višini  $h = 5\text{ m}$  lahko preberemo da je pretok  $Q = 365,5\text{ m}^3/\text{s}$ . Rezultat numerične metode s programom je enak rezultatu ki smo ga izračunali ročno.

### **3.3 Rezultati**

V podpoglavjih [3.1](#) in [3.2](#) smo preverili da sta rezultata po isti metodi ročnega izračuna in izračuna s programom enaka.

## **4 ZAKLJUČEK**

Predstavljena formulacija končnih elementov ...

## **POVZETEK**

V disertaciji obravnavamo problem...

## **SUMMARY**

In the present dissertation we study ...

## **VIRI**

- [1] Kryžanowski, A., Mikoš, M., Brilly, M. 2011. Dragocen obnovljivi vir energije nam teče skozi prste?: Hidroelektrarne na srednji Savi. Delo 155: 3.
- [2] Chow, V. T. 1956. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company.

## **SEZNAM DODATKOV**