

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, 27. 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:** 15 str., 8 sl., 0 pregl., 22 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:** 15 p., 8 fig., 0 tab., 22 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 . . . . .	2
2.3 Izračun konsumpcijske krivulje . . . . .	2
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 Ročni izračun parametrov hidroelektrarne . . . . .	10
3.2 Izračun parametrov hidroelektrarne s programom . . . . .	11
<b>4 ZAKLJUČEK</b>	<b>12</b>
<b>POVZETEK</b>	<b>13</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>14</b>
<b>VIRI</b>	<b>15</b>
<b>DODATKI</b>	<b>15</b>

**KAZALO SLIK**

2.1	Prečni prerez pravokotne struge . . . . .	3
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	Struga vodotoka katerega bomo preračunali . . . . .	10
3.2	Struga vodotoka trapezne oblike . . . . .	11



## **KAZALO PREGLEDNIC**

## LIST OF FIGURES

2.4 Chosen part of the river channel . . . . .	6
--	---

## **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 večja, vendar se le okoli 2% te količine vode učinkovito 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). [citation missing]

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 ali z meritvami ali pa dimenzije ocenimo na podlagi ortofoto posnetkov. Naklon se lahko določi s pomočjo Geopedije, kjer so vneseni podatki o višinski razliki izbranih točk rečne struge in razdalje med točkami. Manningov koeficient hrapavosti rečnega korita lahko določimo izkustveno na terenu s pomočjo priročnikov ali pa z umerjanjem na podlagi podatkov o nivojih vode in pretokih. Podatke o pretokih slovenskih vodotokov lahko pridobimo iz arhiva, ki se nahaja na spletni strani agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO).

### 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

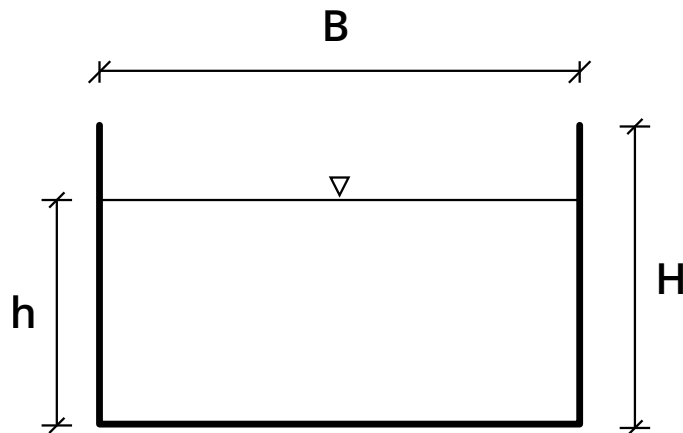
Za izračun konsumpcijske krivulje potrebujemo pretok vodotoka v odvisnosti od višine gladine vode  $h$  v strugi. Gladina vode  $h$  poteka od dna struge do maksimalne višine struge  $H$ . Pretok vode v strugi se za vsak cm višine  $h$  izračuna po Manningovi enačbi:

$$Q(h) = \frac{1}{ng} \sqrt{I} \frac{S(h)^{5/3}}{P(h)^{2/3}} \quad (2.1)$$

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:



Slika 2.1: Prečni prerez pravokotne struge

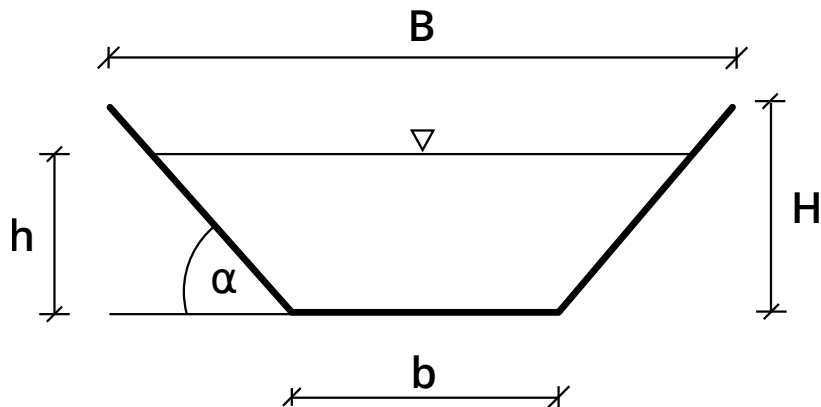
Omočeni obod pravokotne struge dobimo kot seštevek širine dna struge in dvakratne višine struge  $h$ .

$$P_p(h) = B + 2h \quad (2.2)$$

Ploščino pravokotne struge dobimo po enačbi:

$$S_p(h) = B * h \quad (2.3)$$

#### 2. Trapezna struga:



Slika 2.2: Prečni prerez trapezne struge

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

$$P_t(h) = b + 2 * \sqrt{h^2 + \left(\frac{h}{\tan \alpha}\right)^2} \quad (2.4)$$

Ploščino trapezne struge pa dobimo po enačbi za pravokotnik:

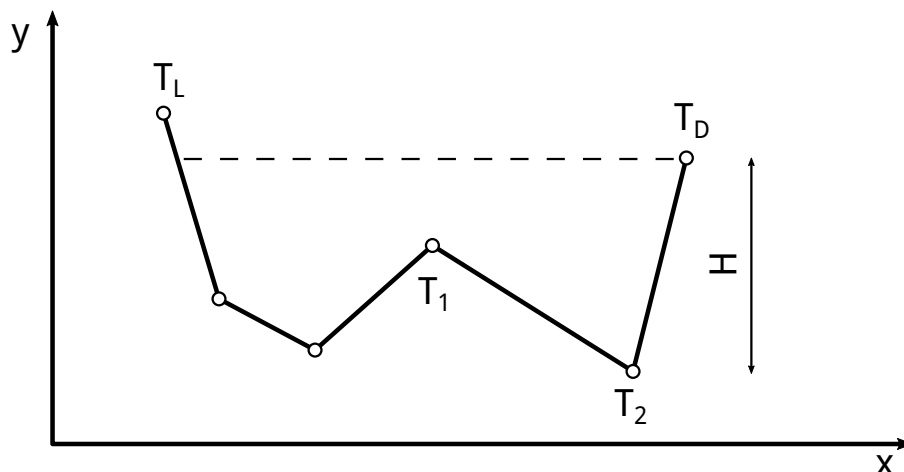
$$S_t(h) = b * h + 2h \left(\frac{h}{\tan \alpha}\right)^2 \quad (2.5)$$

Ko poznamo vse parametre Manningove enačbe 2.1, 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

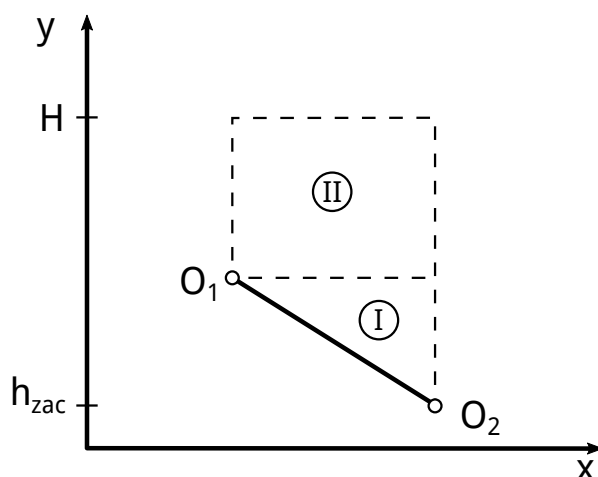
Program razdeli podano strugo na odseke po dve točki  $T_1 (x_1, y_1)$  in  $T_2 (x_2, y_2)$ . Za podan odsek se najprej določi enačba linearne funkcije.

$$f(x) = kx + n \quad (2.6)$$

Naklon funkcije  $k$  se izračuna po formuli:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.7)$$

Če v enačbo linearne funkcije 2.6 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.

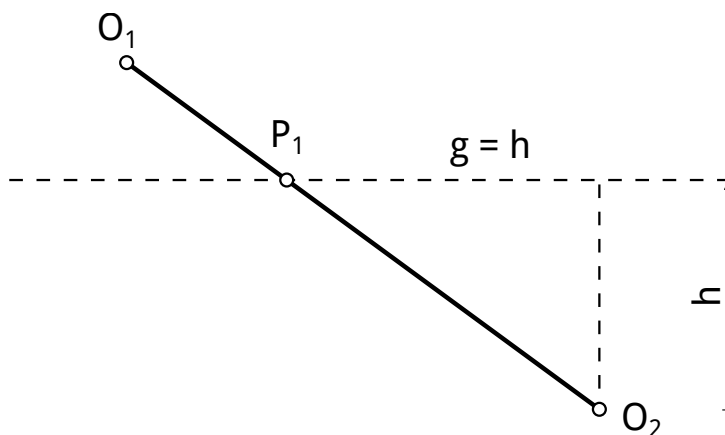


Slika 2.4: Izbrani odsek struge

Figure 2.4: Chosen part of the river channel

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  $dh$ .

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:

$$P = \sqrt{(T_{zac}x - P_1x)^2 + (T_{zac}y - P_1y)^2} \quad (2.8)$$

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:

$$S = \frac{|T_{zac}x - P_1x| * |T_{zac}y - P_1y|}{2} \quad (2.9)$$

2. V primeru, da se presečišče  $P_1$  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:

$$P = \sqrt{(O_1x - O_2x)^2 + (O_1y - O_2y)^2} \quad (2.10)$$

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

$$S = S_I + S_{II} \quad (2.11)$$

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

$$S_I = \frac{(O_2y - O_1y) * (O_2x - O_1x)}{2} \quad (2.12)$$

$$S_{II} = (O_2x - O_1x) * (H - O_1y) \quad (2.13)$$

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

$$P(h) = P_1(h) + P_2(h) + P_3(h) + \dots + P_{n-1}(h) + P_n(h) \quad (2.14)$$

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

$$S(h) = S_1(h) + S_2(h) + S_3(h) + \dots + S_{n-1}(h) + S_n(h) \quad (2.15)$$

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 2.1

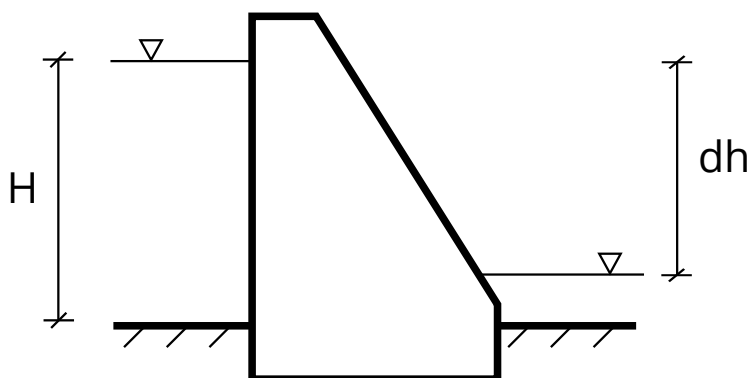
Ko imamo posamezne pretoke po višinah za vse odseke izračunane, jih medsebojno seštejemo in dobimo končne vrednosti pretokov:

$$Q(h) = Q_1(h) + Q_2(h) + Q_3(h) + \dots + Q_{n-1}(h) + Q_n(h) \quad (2.16)$$

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:

$$dh = H - H_{spodaj} \quad (2.17)$$

Moč hidroelektrarne izračunamo po enačbi

$$P = \mu * g * Q * dh \quad (2.18)$$

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:

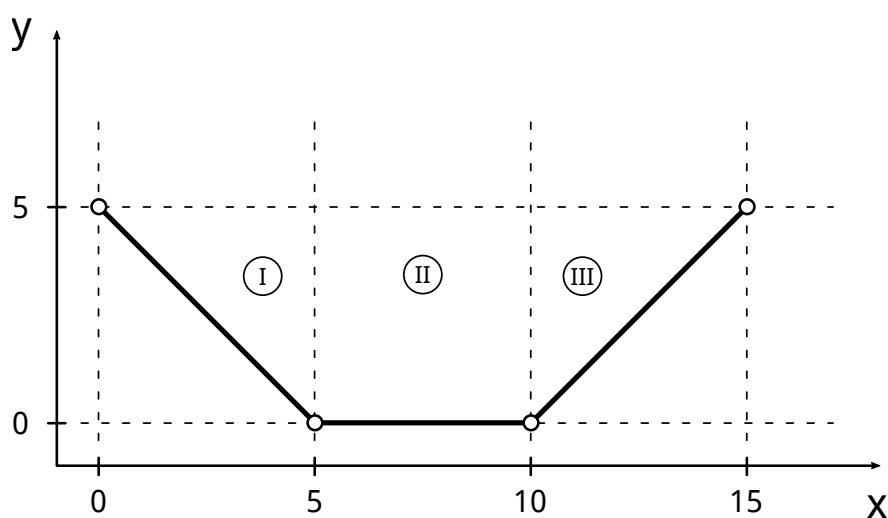
$$E = \frac{P * d * 24}{1000} \quad (2.19)$$

Pri čemer so:

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

### 3 Izračun

V tem poglavju bom s primerom dokazal, da program računa parametre pretočne hidroelektrarne pravilno. Za dokaz bom uporabil namišljen primer trapezno oblikovane struge vodotoka prikazane na sliki 3.1 z Manningovim koeficientom hrapavosti 0,3 in z 1% naklonom struge. Rezultate ročnega izračuna primerjal z rezultati ki jih izračuna program po trapezni metodi in numerični metodi opisani v poglavju 2.3.1 oz. 2.4.



Slika 3.1: Struga vodotoka katerega bomo preračunali

#### 3.1 Ročni izračun parametrov hidroelektrarne

I. Odsek

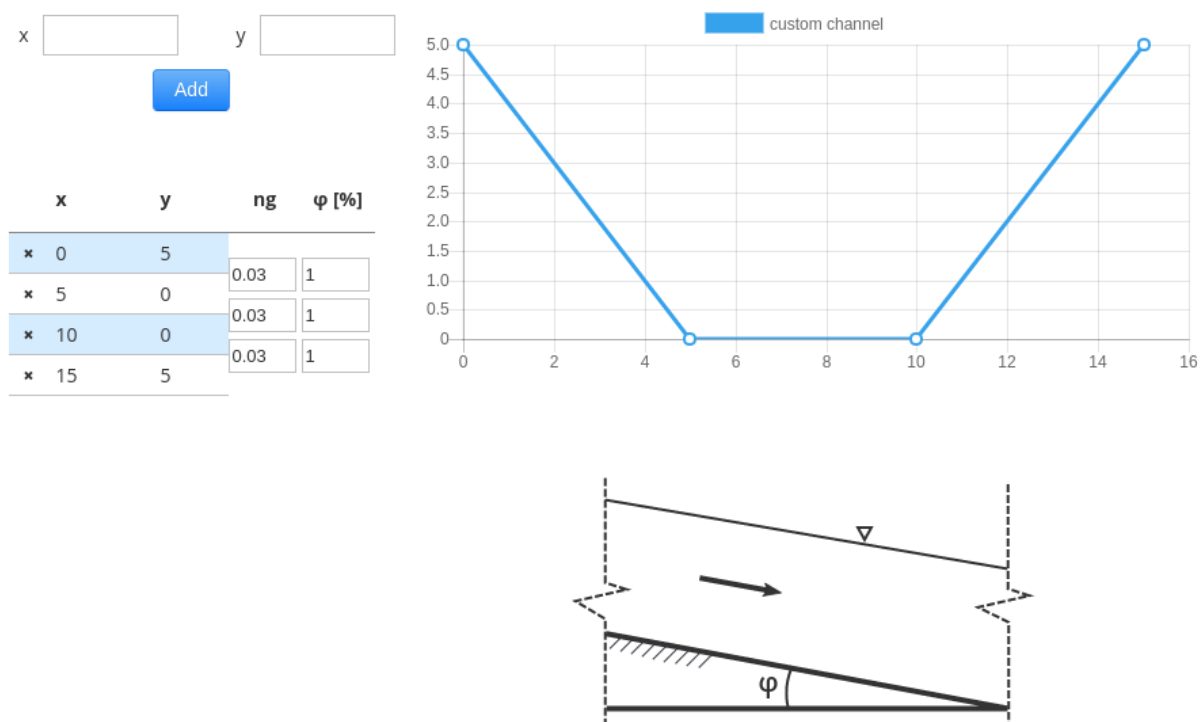
$$S_I = \frac{5 \cdot 5}{2} = 12,5 \quad (3.1)$$

$$P_I = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,07 \quad (3.2)$$

$$Q_1 = \frac{\sqrt{0,01}}{0,03} \cdot \frac{12,5^{5/3}}{7,07^{2/3}} = \quad (3.3)$$

### 3.2 Izračun parametrov hidroelektrarne s programom

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



Slika 3.2: Struga vodotoka trapezne oblike

## **4 ZAKLJUČEK**

Predstavljena formulacija končnih elementov ...



## **POVZETEK**

V disertaciji obravnavamo problem...

## SUMMARY

In the present dissertation we study ...

## **SEZNAM DODATKOV**