

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Simončič, K., 2014. Ocena energetskega potenciala potoku Pendirejevka pri Šentjerneju. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kryžanowski, A.): 33 str.

Datum arhiviranja: 14-10-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Simončič, K., 2014. Ocena energetskega potenciala potoku Pendirejevka pri Šentjerneju. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kryžanowski, A.): 33 pp.

Archiving Date: 14-10-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

KLEMEN SIMONČIČ

**OCENA ENERGETSKEGA POTENCIALA POTOKU
PENDIREJEVKA PRI ŠENTJERNEJU**

Diplomska naloga št.: 154/B-GR

**ASSESSMENT OF HYDROELECTRIC POWER
POTENTIAL OF PENDIRJEVKA STREAM**

Graduation thesis No.: 154/B-GR

Mentor:
doc. dr. Andrej Kryžanowski

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 23. 09. 2014



Stran za popravke, Errata

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Izjave

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 15. 9. 2014

Klemen Simončič

Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček

UDK: 627.8.09(497.4)(043.2)

Avtor: Klemen Simončič, dipl. inž. grad. uni

Mentor: doc. dr. Andrej Kryžanowski

Naslov: Izračun hidroenergetskega potenciala potoka Pendirjevka pri Šentjerneju

Tip dokumenta: diplomska naloga – univerzitetni študij

Obseg in oprema: 33 str., 9 pregl., 19 sl., 7. graf., 1 pril.

Ključne besede: elektrarna, potok, energija, pretok, inštalirani pretok, pregrada, cevovod, turbina.

Izvleček

V diplomski nalogi smo izvedli oceno potenciala za proizvodnjo električne energije na manjšem potoku, Pendirjevki na porečju reke Krke lociranem na pobočju Gorjancev. Oceno smo izvedli na odseku med dvema obstoječima prodnima pregradama. Ker hidrološki podatki za ta odsek niso bili na voljo smo najprej naredili preveritev karakterističnih pretokov z uporabo empiričnih enačb in jih primerjali s sosednjim porečjem za katerega smo imeli na voljo dolgoletni niz povprečnih dnevnih pretokov. Na osnovi potrditve podobnosti med porečjema smo določili niz povprečnih dnevnih pretokov v obravnavanem obdobju za Pendirjevko.

V naslednjem koraku smo določili razpoložljive dnevne pretoke, ki jih lahko izkoristimo za energetske rabo in na osnovi izbranega instaliranega pretoka turbin določili energetske karakteristike hidroelektrarne. Instaliran pretok smo povečevali postopoma in vsakič izračunali proizvedeno energijo ter prihodek proizvedene energije. Na ta način smo določili optimalni instalirani pretok in karakteristike elektrarne za katerega je investicija ekonomsko upravičljiva.

Bibliographic-documentalistic information and abstract

UDC: 627.8.09(497.4)(043.2)

Author: Klemen Simončič,

Supervisor: Assist. Prof. Andrej Kryžanowski

Title: Assessment of hydroelectric power potential of Pendirjevka stream

Document type: Graduation Thesis–University studies

Scope and tools: 33 p., 9 tab., 19 fig., 7. graph., 1 ann.

Keywords: power plant, stream, power, flow, rated flow, barrier, pipeline, turbine.

Abstract

In this dissertation we evaluated the potential for generating electrical energy on a smaller stream, Pendirjevka, within the Krka river basin located on the Gorjanci hillside. The estimate was made on a section between two gravel barriers. Since the hydrologic data for this section were not available, we first checked the characteristic flows using empirical formulas and then compared them with those of an adjacent river basin, whose long-time series of average daily flows were accessible. Based on the confirmation of the two basins being similar, we determined the series of Pendirjevka's average daily flows in the discussed period.

The next step consisted of determining the available daily flows which can be exploited for energy purposes and determining the energy characteristics of the hydroelectric power station based on the chosen installed flow of the turbine. We gradually increased the installed flow and each time calculated the produced energy and its earnings. By doing so we determined the optimum installed flow and the characteristics of a power station for which an investment is economically legitimate.

Zahvala

Za pomoč pri diplomskem delu se najprej zahvaljujem Bogu Očetu, ki je bil ves čas z menoj in me je podpiral.

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Andreju Kryžanowskemu, ker me je vodil skozi proces zbiranja podatkov, njihovega vrednotenja in izračuna rezultatov.

Za pomoč pri pridobivanju hidroloških podatkov se zahvaljujem gospodu Robertu Kepi, ki mi je priskrbel podatke iz arhiva ARSO Novo mesto.

Za svetovanje pri uporabi empiričnih obrazcev pri izračunu pretokov se zahvaljujem doc. dr. Mojci Šraj.

Iskreno zahvalo izrekam tudi gospodoma Damjanu Severu iz podjetja VGP Novo mesto in Mihi Pišljariju iz podjetja Turboinštitut Ljubljana. Prvemu za opis pregrad, njihovega upravljanja in svetovanje pri določitvi višinske razlike med njima, drugemu pa za oceno stroškov s turbino in svetovanje pri izbiri pravilnega tipa.

Kazalo vsebine

Stran za popravke, Errata	II
Izjave	III
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček	IV
Bibliographic-documentalistic information and abstract	V
Zahvala	VI
Kazalo vsebine	VII
Kazalo preglednic	IX
Kazalo grafikonov	X
Kazalo slik	XI
Kazalo prilog	XII
1 Uvod	1
2 Opis naravnih danosti	2
2.1 Ocena pretokov s pomočjo empiričnih obrazcev	2
2.1.1 Opis območja vodotoka in izbira profilov	3
2.1.2 Izhodišča za računanje	5
2.1.3 Izračuni	9
2.2 Ocene pretokov v dostopnih raziskavah	11
2.3 Določitev hidrograma	11
2.4 Analiza niza podatkov	13
2.4.1 Obdobje med letoma 1961 in 1972	13
2.4.2 Obdobje med letoma 1976 in 1983	14
2.4.3 Izbira niza podatkov za nadaljevanje računa	16
3 Zasnova hidroelektrarne	18
3.1 Opis sestavnih delov	19
3.1.1 Zajem vode	19
3.1.2 Cevovod	20
3.1.3 Strojnica	21
4 Določitev višinske razlike	22

5	Določitev minimalnega ekološko sprejemljivega pretoka.....	24
6	Izračun energetskega potenciala.....	25
6.1	Ocene manjkajočih količin.....	25
6.2	Računanje pretoka, ki teče skozi turbino	25
7	Izbira velikosti turbine in ekonomika elektrarne	29
8	Zaključek	31
9	Viri	32
9.1	Uporabljeni viri.....	32
9.2	Drugi viri.....	33

Kazalo preglednic

Preglednica 1: Velikosti prispevnih območij nad posamezno pregrado [4].	5
Preglednica 2: Efektivne poljske kapacitete tal [4].	7
Preglednica 3: Povprečne letne merjene količine padavin [4].	8
Preglednica 4: Povprečne letne izmere padavin na dežemerni postaji Planina v Podbočju [5].	8
Preglednica 5: Povprečna letna temperatura [4].	9
Preglednica 6: Izračun ocene srednjega letnega pretoka glede na izbrani M_q	11
Preglednica 7: Rezultati raziskave Osnovne hidrološke karakteristike pritokov reke Krke [1].	11
Preglednica 8: Proizvodnja energije po posameznih letih za različne vrednosti Q_{inst} v kWh.	27
Preglednica 9: Ocena stroškov, pričakovanih prihodkov in časa povrnitve investicije.	29

Kazalo grafikonov

Graf 1: Hidrogram obdobja 1961–1972 z označeno srednjo vrednostjo in standardnim odklonom [6].	14
Graf 2: Hidrogram obdobja 1976–1984 z označeno srednjo vrednostjo in standardnim odklonom [6].	15
Graf 3: Hidrogram obdobja 1976–1984 z zmanjšano y osjo [6].	15
Graf 4: Spreminjanje letnega števila dni s padavinami in števila dni z nevihtami v obdobju 1961–2013 [5].	16
Graf 5: Spreminjanje letne količine padavin v obdobju 1961–2013 [5].	17
Graf 6: Sprememba proizvodnje električne energije pri večanju inštaliranega pretoka.	28
Graf 7: Proizvodnja energije po letih za različne vrednosti inštaliranega pretoka.	28

Kazalo slik

Slika 1: Razdelitev struge vodotoka na ravninski in hribovit del [2].	3
Slika 2: Letalski posnetek območja z označenimi lokacijami pregrad.	3
Slika 3: Pregrada na profilu vodotoka ob vznožju hriba.	4
Slika 4: Pregrada na pobočju hriba.	4
Slika 5: Izmera prispevnega območja nad pregrado ležečo gorvodno [4].	5
Slika 6: Izmera prispevnega območja nad pregrado ležečo dolvodno [4].	6
Slika 7: Pedološka karta z označenim prispevnim območjem [4].	6
Slika 8: Poraščenost prispevnega območja [4].	7
Slika 9: Padavinska karta z označenim prispevnim območjem [4].	8
Slika 10: Temperaturna karta z označenim prispevnim območjem [4].	9
Slika 11: Medsebojni lokaciji Pendirjevke in Pleterskega potoka [3].	12
Slika 12: Prispevno območje Pleterskega potoka pred merilno postajo [4].	12
Slika 13: Prerez talnega odvzema vode [8].	19
Slika 14: Razdalja med profiloma po osi struge [4].	20
Slika 15: Sestava Francisove turbine [10].	21
Slika 16: Topografska karta na območju zgornje pregrade [3].	22
Slika 17: Topografska karta na območju spodnje pregrade [3].	23
Slika 18: Merjenje višine spodnje pregrade.	23
Slika 19: Struga potoka gorvodno od zgornje pregrade.	24

Kazalo prilog

Izračun minimalnega ekološko sprejemljivega pretoka	A.1
---	-----

1 Uvod

Energija predstavlja eno najbolj osnovnih surovin, ki jo ljudje množično uporabljamo. Potreba po njej raste sorazmerno z rastjo prebivalstva, gospodarsko rastjo in rastjo življenjskega standarda. V Sloveniji trenutno nimamo nobene od naštetih rasti, zaradi česar je energije, predvsem električne, v tem trenutku preveč. Kljub slabemu trenutnemu stanju se globalno gledano potreba po energiji povečuje. Število prebivalcev raste, podobno pa je z gospodarsko aktivnostjo in življenjskim standardom.

Veliki in izdatni viri, ki jih trenutno izkoriščamo, so omejeni in pod pritiskom okoljevarstvenih organizacij. Evropa in z njo Slovenija se že dalj časa zavzemata za povečanje deleža obnovljivih virov v skupni proizvodnji energije, kar daje temu delu energetskega sektorja še dodatno perspektivo. Obnovljivi viri so številni, a najlažje izluščimo najperspektivnejše, če pogledamo, kaj so uporabljali naši predniki. Na območju Slovenije je bila ravno voda glavno gonilo mlinov, žag, pa tudi črpalk.

Vodni potencial najdemo praktično na vsakem koraku, a niso vse lokacije enako kvalitetne. Naravne danosti so, za njihovo izkoriščanje pa potrebujemo znanje. S to nalogo želim pridobiti znanje, s katerim bom znal ločiti kvalitetno lokacijo od nekvalitetne in izbrati najboljšo.

V nalogi bom analiziral energetske izrabe potoka Pendirjevka, ki teče v bližini mojega doma in je na pogled energetske zanimiva. Za ta namen bom izvedel sledeče korake:

- pregledal vso dostopno literaturo in podatke o danosti prostora (hidrologija, geodezija, že izdelane študije ali projektna dokumentacija, ipd.)
- v naslednjem koraku bom na osnovi pridobljenih podatkov izvedel oceno hidroenergetskega potenciala Pendirjevke na odseku med obstoječima prodnima pregradama
- v zadnjem koraku bom analiza možnosti izvedbe mHE in ocenil njene energetske in ekonomske pokazatelje

2 Opis naravnih danosti

Potok Pendirjevka je manjši vodotok v porečju reke Krke. Izvira na pobočju Gorjancev, po nekaj kilometrih priteče na ravno Krško polje, kjer se po ovinkasti strugi vije do izliva v Krko. Na potoku niso dokumentirane nobene meritve pretokov, kar pomeni, da se moram v tej diplomski nalogi zanesti na empirične izračune. V nalogi bom uporabil iste metode računa, kot so bile uporabljene v raziskavi širšega območja, ki jo je opravilo Vodnogospodarsko podjetje Novo mesto [1].

2.1 Ocena pretokov s pomočjo empiričnih obrazcev

Osnovno oceno pretokov nemerjenega porečja lahko naredimo s pomočjo obrazcev, ki so jih za ta namen razvili različni tuji avtorji, za območje Slovenije pa jih je priredil in izdal Jože Brus, dipl.ing.gr. Podrobneje so opisani v [2]. Ti so prvenstveno namenjeni ocenjevanju visokih voda za potrebe poplavnega varovanja, uporaba za ocenjevanje srednjih in malih voda pa je dopuščena le v ekstremnem primeru. Ob pomanjkanju zanesljivejših virov podatkov lahko za to uporabim Krebsovo [2] enačbo in enačbo Iskowskega [2].

Krebsova [2] enačba precej natančno upošteva meteorološke podatke. Upošteva tako povprečno letno višino padavin kot povprečno letno temperaturo zraka. Slabost enačbe je, da ne upošteva reliefnih značilnosti terena, značilnosti tal in njihove pokritosti. Avtor zbirke enačb ponuja možnost upoštevanja tudi teh parametrov, vendar le za izračune ekstremnih pretokov.

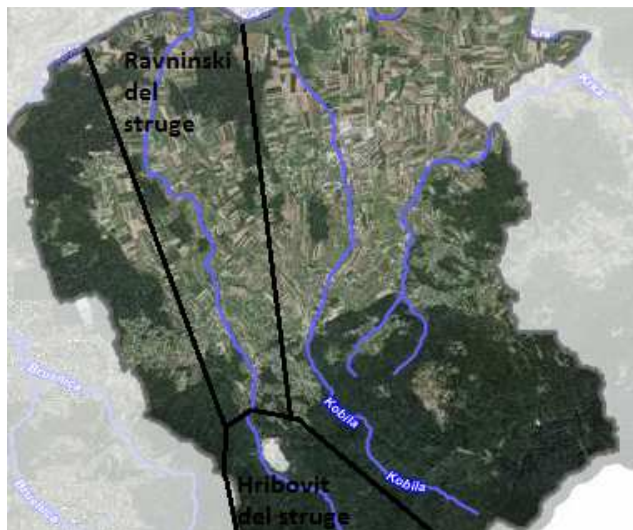
Enačba Iskowskega [2] po drugi strani slabše upošteva meteorološke značilnosti, a natančneje upošteva značilnosti terena. Še vedno upošteva povprečno letno višino padavin, za razliko od Krebsa [2] pa ne upošteva temperature. Značilnosti terena so natančneje upošteevane s koeficientom, ki obsega naslednje rubrike:

1. Barja in podore	0.20
2. Nižine in položne visokoravni	0.25
3. Mešani nižinski in gričevnat svet	0.30
4. Položno gričevje	0.35
5. Mešano sredogorje in gričevje ali strmo gričevje	0.40
6. Gorovja nepropustnih tal	0.50
7. Gorovja zelo nepropustnih tal	0.55
8. Tla normalne poraslosti (mešana tla)	0.47
9. Zelo propustna tla	0.45

Z obema izbranimi enačbama v osnovi računamo specifični površinski odtok, tega pa pomnožimo z velikostjo prispevnega območja, da dobimo pretok na izbranem profilu.

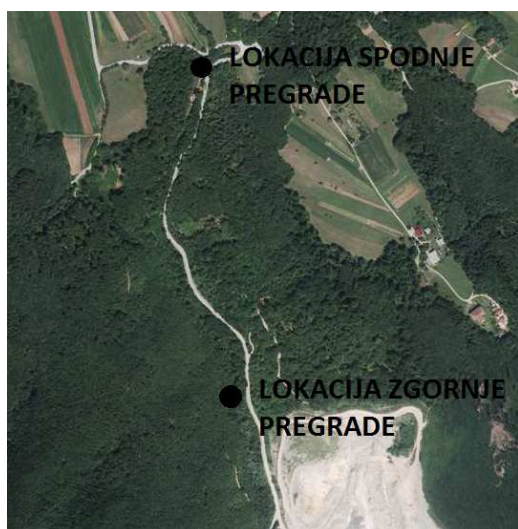
2.1.1 Opis območja vodotoka in izbira profilov

Strugo vodotoka lahko v grobem razdelimo na dva dela in sicer na hribovit in ravninski del. Območje potoka sem si večkrat ogledal na terenu in na podlagi velikosti struge ocenil, da na njem ne moremo pričakovati velikih pretokov. Zato sem sklepal, da energetska izraba ravninskega dela ni smiselna.



Slika 1: Razdelitev struge vodotoka na ravninski in hribovit del [2].

Z odločitvijo, da v nadaljevanju analiziram le hribovit del potoka, sem se zavestno odpovedal največjim pretokom, saj se s približevanjem izviru močno manjša prispevno območje profilov. Tako sem izbral profil potoka ob vznožju hriba, kjer je še mogoče doseči želeno višinsko razliko, hkrati pa je pretok največji možen. Med ogledom terena sem ugotovil, da na tem profilu stoji pregrada, ki mi omogoča večmetrski padec na eni točki.

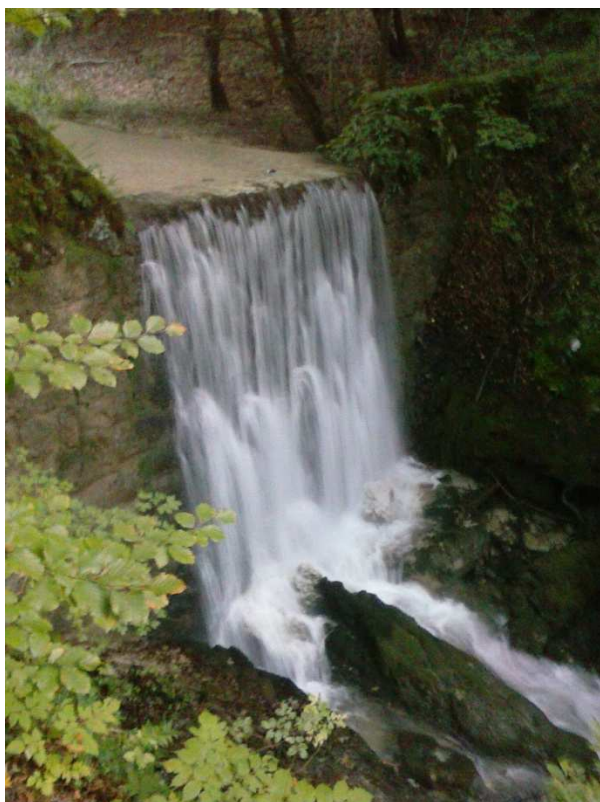


Slika 2: Letalski posnetek območja z označenimi lokacijami pregrad



Slika 3: Pregrada na profilu vodotoka ob vznožju hriba

Z ogledom območja sem nadaljeval in ugotovil, da gorvodno leži še ena podobna pregrada, ki je na videz nekoliko višja.



Slika 4: Pregrada na pobočju hriba

Za več podatkov o pregradah, njihovem namenu in upravljanju sem se obrnil na Vodnogospodarsko podjetje Novo mesto, pri katerem je za to področje odgovoren gospod Damjan Sever. Povedal mi je, da gre za prodni pregradi, ki sta bili postavljeni z namenom zmanjšanja padca struge, kar upočasni

tok in zmanjša erozijo. Območje pred zgornjo pregrado je popolnoma zapolnjeno z naplavinami, ki jih v preteklosti ni nihče čistil. Gospod Sever pravi, da za to ni potrebe, saj je bila pregrada tako načrtovana, zato pri VGP-ju v bližnji prihodnosti ne načrtujejo nobenih posegov na njej. Pregrada je dobro temeljena in stabilna. Območje pred spodnjo pregrado ni popolnoma zapolnjeno, saj so ga v preteklosti večkrat čistili. Ta pregrada je slabše temeljena, manj stabilna in bo v prihodnosti potrebna sanacije.

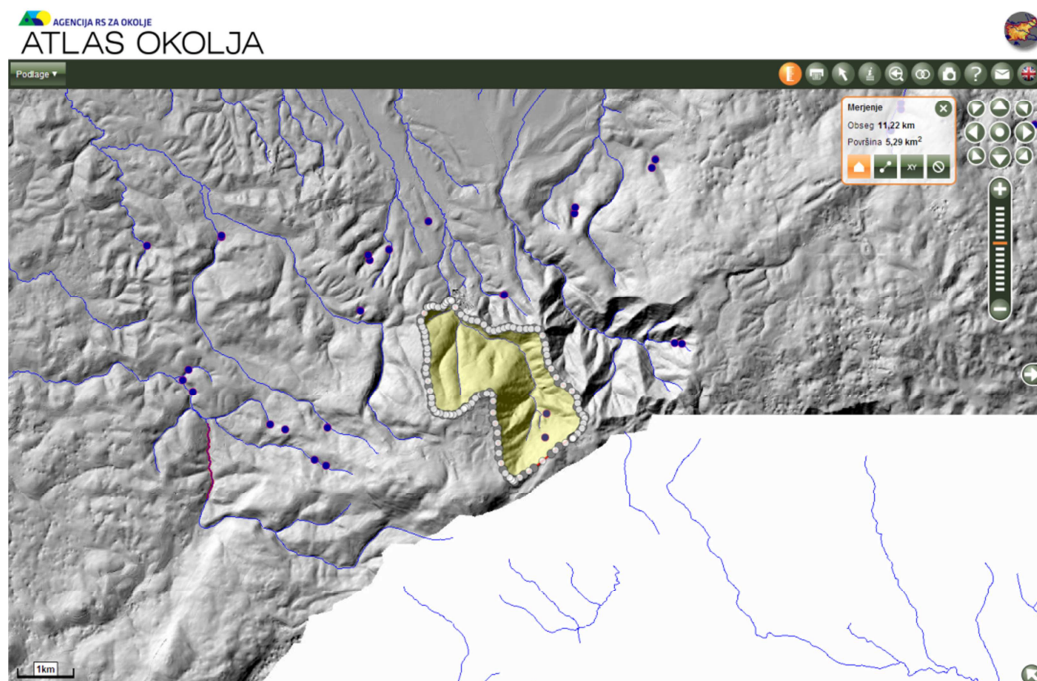
Obe pregradi sta po današnji zakonodaji neprimerni, saj ne omogočata prehoda rib v obe smeri. Kljub določenim težavam povezanim z obema obstoječima objektoma sem ocenil, da je na tem mestu potencial za proizvodnjo električne energije.

2.1.2 Izhodišča za računanje

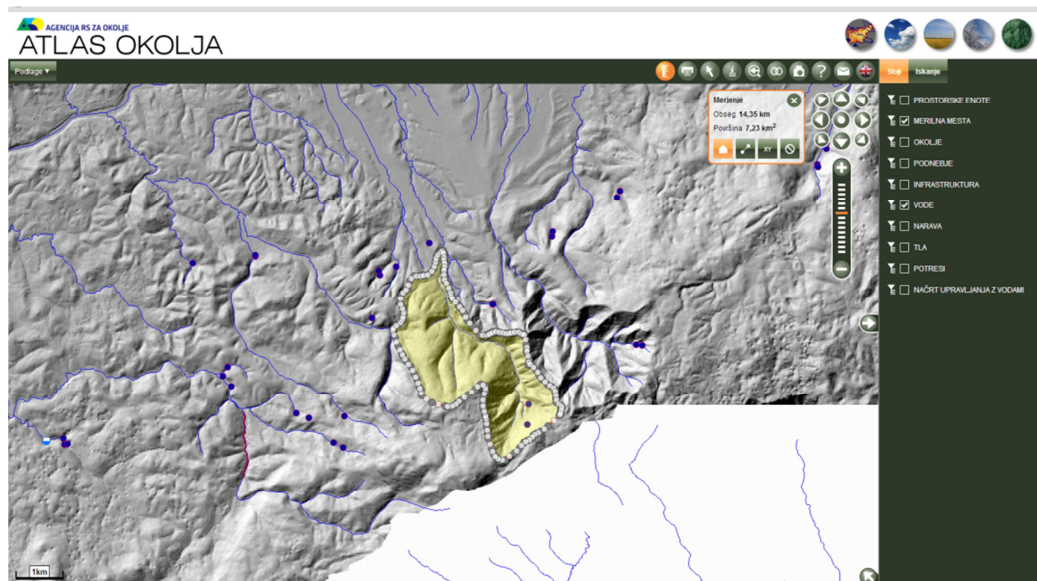
Velikost prispevnega območja sem določil s pomočjo spletne aplikacije Atlas okolja [4], dostopne na straneh ARSO. Obravnavam dva profila istega vodotoka, kar pomeni, da moram določiti velikosti dveh prispevnih območij.

PREGRADA	GORVODNO	DOLVODNO
VELIKOST OBMOČJA [km ²]	5.3	7.2

Preglednica 1: Velikosti prispevnih območij nad posamezno pregrado [4]

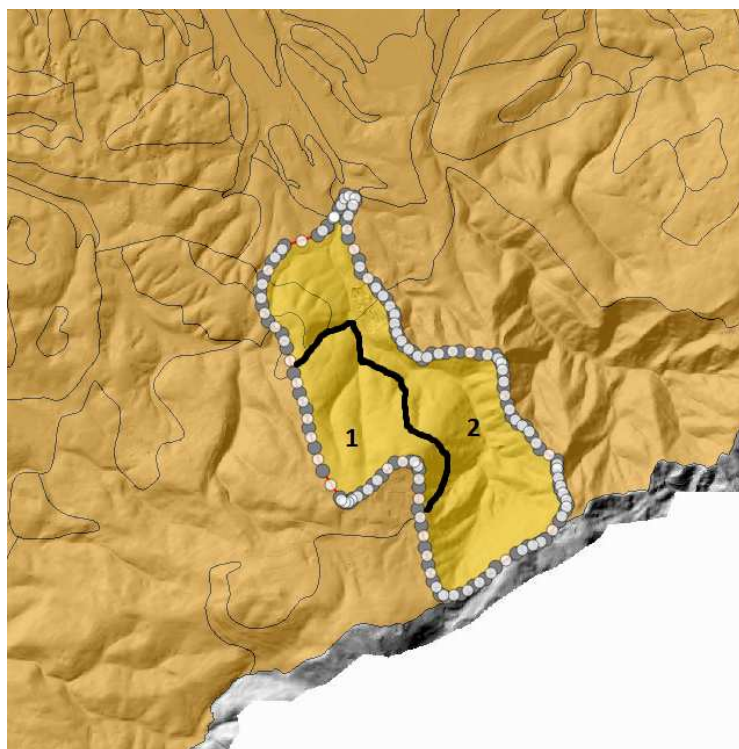


Slika 5: Izmera prispevnega območja nad pregrado ležečo gorvodno [4]



Slika 6: Izmera prispevnega območja nad pregrado ležečo dolvodno [4]

Izhodišča pomembna predvsem za izračun po enačbi Iskowskega [2] so tudi oblika reliefa, propustnost in poraslost območja. V prejšnjem poglavju smo zavestno izbrali hribovit teren, pedološke podatke sem odčital iz pedološke karte, poraslost pa je za potrebe te ocene dovolj dobro razvidna iz zračnega posnetka območja.

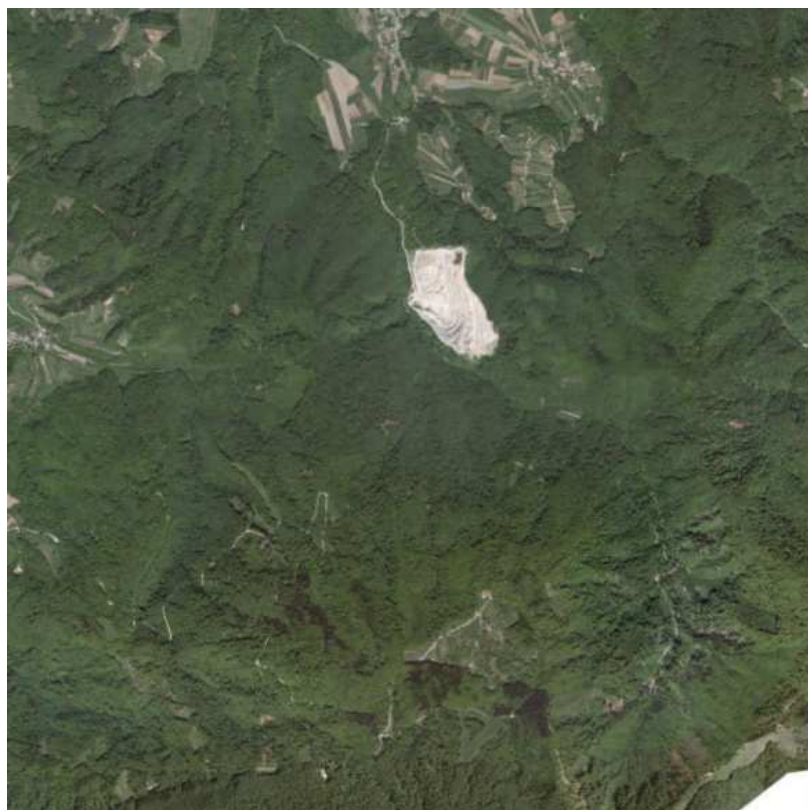


Slika 7: Pedološka karta z označenim prispevnim območjem [4]

Območje	1		2	
Efektivna poljska kapaciteta	Razred 3	81-150mm	Razred 4	31-80mm

Preglednica 2: Efektivne poljske kapacitete tal [4]

Iz pedološke karte odčitana efektivna poljska kapaciteta je precej nizka, kar pomeni, da tla slabo zadržujejo vodo na plitvini dostopni rastlinam. Žal mi ta podatek ne pove veliko o tem, kam gre preostala voda. Odgovor na to vprašanje lahko poiščem v bližnjem dnevnem koku kamnitega agregata, kjer je dobro viden profil tal. Ta nam razkriva, da je humusna plast na površju razmeroma tanka, pod njo pa so obsežne plasti peska in zelo propustne skalnate podlage.



Slika 8: Poraščenost prispevnega območja [4]

Povprečno letno merjeno količino padavin lahko za potrebe te ocene zadovoljivo natančno odčitamo iz padavinske karte. Ta je bila izdelana za podatke merjene med leti 1961 in 1990. Na višjem delu prispevnega območja tik pod grebenom Gorjancev je pričakovano nekoliko več padavin kot v nižjem delu, vendar ta razlika ni velika.



Slika 9: Padavinska karta z označenim prispevnim območjem [4]

Območje	1	2
Povprečna letna količina padavin [mm]	1200 – 1300	1100 - 1200

Preglednica 3: Povprečne letne merjene količine padavin [4]

Za natančnejšo oceno padavin na obravnavanem območju lahko uporabimo odčitke za dežemerno postajo Planina v Podbočju. To sicer ni najbližja dežemerna postaja, saj je od osi vodotoka oddaljena preko 14 kilometrov [4], je pa najprimernejša, saj leži na pobočju Gorjancev, tik pod grebenom, na območju, iz kakršnega se napaja tudi potok Pendirjevka.

Leto	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	povprečje
Višina padavin [mm]	1213	1349	1536	917	1299	1556	1180	1227	1089	1132	1249.8

Preglednica 4: Povprečne letne izmere padavin na dežemerni postaji Planina v Podbočju [5]

Temperaturo zraka lahko podobno kot količino padavin odčitamo na temperaturni karti. Ta je bila izdelana za podatke merjene med leti 1971 in 2000. Podobno kot pri padavinah vrednosti na območju niso enotne.

Natančnejše določanje povprečne letne temperature je z dostopnimi podatki precej zahtevno, saj se prispevno območje razteza na zelo različnih nadmorskih višinah. Zaradi tega vrednost za potrebe ocene pretoka preprosto izberemo.



Slika 10: Temperaturna karta z označenim prispevnim območjem [4]

Območje	1	2
Povprečna letna temperatura °C	6 – 8	8 - 10

Preglednica 5: Povprečna letna temperatura [4]

2.1.3 Izračuni

2.1.3.1 Krebsova enačba [2]

Osnovna oblika Krebsove [2] enačbe se glasi:

$$M_q = \frac{A}{3156}; \quad A = 0.88N - 2.6t - 24$$

Pri čemer imajo simboli sledeč fizikalen pomen:

M_q – povprečni letni specifični odtok [$m^3/s \cdot km^2$]

A – povprečni letni odtok [cm]

N – povprečna letna višina padavin [cm]

t – povprečna letna temperatura zraka [°C]

Na osnovi zgoraj opisanih izhodišč izberemo podatke:

$N = 122$ cm

$t = 9$ °C

in izvedemo izračun:

$$A = (0.88 * 122) - (2.6 * 9) - 24 = 59.96 \text{ cm}$$

$$M_q = \frac{59.96}{3156} = 0.019 \frac{m^3}{s * km^2}$$

2.1.3.2 Enačba Iskowskega [2]

Osnovna oblika enačbe Iskowskega [2] se glasi:

$$M_q = 0.03171 * C_m * h$$

Pri čemer imajo simboli sledeč fizikalen pomen:

M_q – povprečni letni specifični odtok [$m^3/s * km^2$]

h – povprečna letna višina padavin [m]

C_m – koeficient odvisen od oblike in sestave tal (specificiran v opisu enačbe)

Na osnovi zgoraj opisanih izhodišč izberemo podatke:

$$h = 1.22$$

$$C_m = 0.42$$

In izvedemo izračun:

$$M_q = 0.03171 * 1.22 * 0.42 = 0.016 \frac{m^3}{s * km^2}$$

Jože Brus v svoji knjigi odsvetuje računanje aritmetične sredine izračunov za določanje najverjetnejše vrednosti, zato velikost srednjega specifičnega pretoka izberemo glede na poznavanje terena in enačb.

Krebsova [2] enačba upošteva povprečno letno temperaturo, ki je v našem primeru nizka, kar prispeva k večjemu pretoku, zanemarija pa značilnosti terena, ki vodi omogočajo ponikovanje. Enačba Iskowskega [2] upošteva ravno obratno, zato je njena ocena nekoliko premajhna.

Menim, da ima povprečna letna temperatura zraka manjši vpliv na pretok kot sestava terena, zato sem za oceno srednjega pretoka izbral specifični odtok:

$$M_q = 0.017 \frac{m^3}{s * km^2}$$

Ob upoštevanju velikosti prispevnega območja za srednji letni pretok dobimo sledeče vrednosti:

Pregrada	Gorvodno	Dolvodno
F [km ²]	5.3	7.2
Qsr [m ³ /s]	0.090	0.122

Preglednica 6: Izračun ocene srednjega letnega pretoka glede na izbrani M_q

2.2 Ocene pretokov v dostopnih raziskavah

Pretok Pendirjevke je v svoji raziskavi z naslovom: *Osnovne hidrološke karakteristike pritokov reke Krke* (1981) [1] ocenjevalo Vodnogospodarsko podjetje Novo mesto. Za oceno so se poleg zgoraj uporabljenih enačb oprli še na nekatere druge, a je ocena specifičnega srednjega pretoka identična zgornji. To dokazuje, da so bila izhodišča za račun smiselno izbrana, rezultati pa najboljši možni glede na izbrano metodo. Poleg tega so v raziskavi podani še pretoki z različnimi povratnimi dobami.

Stacionaža[km]	F [km ²]	Q100 [m ³ /s]	q100 [m ³ /s*km ²]	Q80 [m ³ /s]	Q50 [m ³ /s]	Q30 [m ³ /s]	Q20 [m ³ /s]	Q10 [m ³ /s]	Q5 [m ³ /s]	Qsr [m ³ /s]	qsr [m ³ /s*km ²]	letni odtok [m ³]
0	28.53	47.795	1.5	40.66	35.95	31.67	28.67	23.97	20.11	0.485	0.017	15278
1.5	26.95	41.503	1.54	39.43	34.86	30.71	27.81	23.24	19.51	0.458	0.017	14432
1.5	25.14	39.470	1.57	37.5	33.15	29.21	26.44	22.1	18.55	0.427	0.017	13426
2.8	24.74	39.089	1.58	37.13	32.83	20.93	26.19	21.89	18.37	0.421	0.017	13248
2.8	17.84	29.971	1.68	28.47	25.18	22.18	20.08	16.78	14.09	0.303	0.017	9553
4	16.9	28.223	1.67	26.81	23.71	20.89	18.91	15.8	13.26	0.287	0.017	9050
6	14.2	24.140	1.7	22.93	20.28	17.86	16.17	13.52	11.35	0.241	0.017	7604
8	11.3	20.340	1.8	19.32	17.09	15.05	13.63	11.39	9.56	0.192	0.017	6051
10	7.5	16.050	2.14	15.25	13.48	11.88	10.75	8.99	7.56	0.128	0.017	4016
13	4	12.880	3.22	12.24	10.82	9.53	8.63	7.22	6.05	0.068	0.017	2142

Preglednica 7: Rezultati raziskave Osnovne hidrološke karakteristike pritokov reke Krke [1]

2.3 Določitev hidrograma

Končna rešitev zgornjega izračuna je ocena srednjega pretoka, kar pa je za izračun hidroenergetskega potenciala preveč splošen podatek. Za proizvodnjo energije je ključno, kako so pretoki porazdeljeni, saj na osnovi tega dimenzioniramo vse sestavne dele elektrarne.

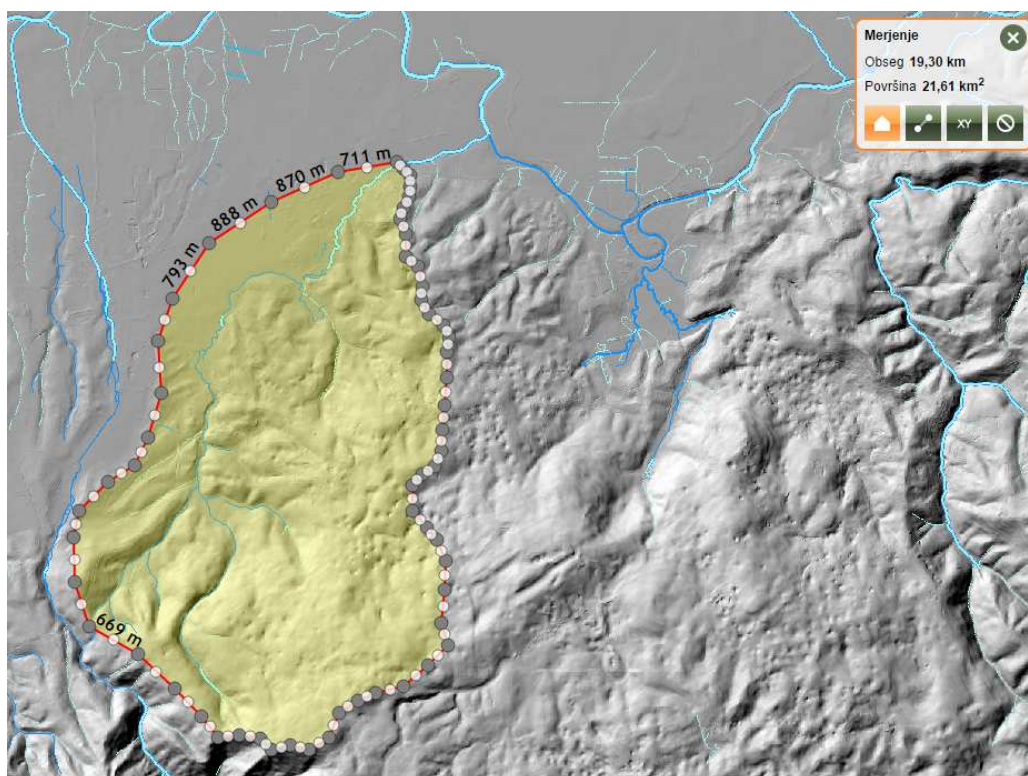
Najenostavneje določimo hidrogram, če poiščemo vodotok, ki teče po podobnem območju in so zanj dostopni podatki o meritvah pretokov. Te lahko v razmerju prispevnih območij prenesemo na Pendirjevko.

Vzporedno z njo teče Pleterski potok. Ta prav tako zbira vodo na pobočju Gorjancev, enako po nekaj kilometrih priteče na ravnino in se izlije v reko Krko. Ima enake padavinske in temperaturne razmere, enako konfiguracijo terena, podobno sestavo tal in rastlinskega pokrova. Pleterski potok je bil pri vasi Prekopa merjen med leti 1961 in 1983, podatki pa so dostopni v arhivu hidroloških meritev [6].



Slika 11: Medsebojni lokaciji Pendirjevke in Pleterskega potoka [3]

V naslednjem koraku moramo ugotoviti, ali je specifični površinski odtok prispevnega območja Pleterskega potoka podoben tistemu, ki smo ga izračunali za prispevno območje Pendirjevke. Za to potrebujemo podatke o srednjem letnem pretoku in velikosti prispevnega območja.



Slika 12: Prispevno območje Pleterskega potoka pred merilno postajo [4]

Pretok izračunamo kot povprečje celotnega niza podatkov, prispevno območje pa izmerimo s pomočjo spletne aplikacije *Atlas okolja* [4]. Na podlagi teh podatkov izvedemo izračun:

$$Q_{sr} = 0.380 \frac{m^3}{s} ; F = 21.6 km^2 ; M_q = 0.0176 \frac{m^3}{s * km^2}$$

Razlika med specifičnima odtokoma območij je zelo majhna, kar nam omogoča, da analizo nadaljujemo na podlagi meritev Pleterskega potoka [6]. Pretok Pendirjevke tako ocenimo s pomočjo razmerja velikosti prispevnih območij.

$$Q_{Pendirjevka} = \frac{F_{Pendirjevka}}{F_{Pleterski\ potok}} * Q_{Pleterski\ potok}$$

2.4 Analiza niza podatkov

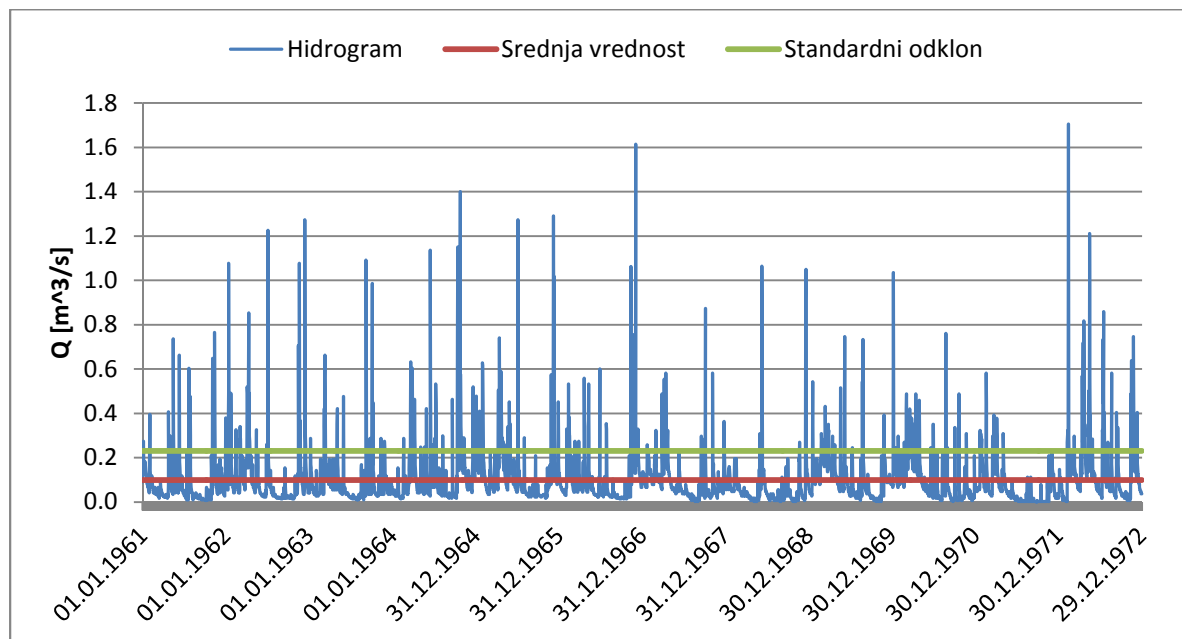
Meritve na Pleterskem potoku so bile izvajane med leti 1961 in 1983, vendar niz podatkov ni zvezen. Manjkajo podatki za leta 1973, 1974 in 1975. Tako imamo popolne podatke dnevni meritev za 21 let, za lažjo predstavitev in statistično analizo pa jih bomo razdelili na dve obdobji. Prvo obdobje bo vključevalo meritve od leta 1961 do vključno leta 1972, drugo pa meritve od leta 1976 do vključno leta 1983. Analizirali bomo podatke aplicirane na Pendirjevko, in sicer na profil zgornje pregrade, kjer je predviden zajem vode in je to za naš primer relevanten podatek. V tej fazi naloge, kjer zgolj ocenjujemo potencial, ta nivo obdelave ustreza. V podrobnejših analizah in optimizaciji obratovanja pa je smiselno, da se upošteva tudi prispevno območje med profiloma, predvsem v smislu zagotavljanja ekoloških razmer na odseku.

Za vsako od navedenih obdobji izdelamo hidrogram in izračunamo karakteristične vrednosti pretokov.

2.4.1 Obdobje med letoma 1961 in 1972

V tem obdobju so meritve neprekinjeno potekale 12 let, v katerih se je nabral niz 4383 dnevni meritev. Na podlagi teh izračunov lahko izdelamo hidrogram.

Ta nam kaže pojav zelo visokih pretokov, ki pa ne trajajo dolgo. Izračun standardnega odklona nam pokaže, da so meritve zelo razpršene, saj je ta večji od srednje vrednosti. To tudi pomeni, da je porazdelitev podatkov izrazito asimetrična. Ugotovitve, do katerih pridemo na podlagi hidrograma, se skladajo z nizko efektivno poljsko kapaciteto tal, kar pomeni, da tla padavinske vode ne zadržijo, ampak ta hitro obogati vodotok, bazni odtok pa je tako razmeroma majhen.



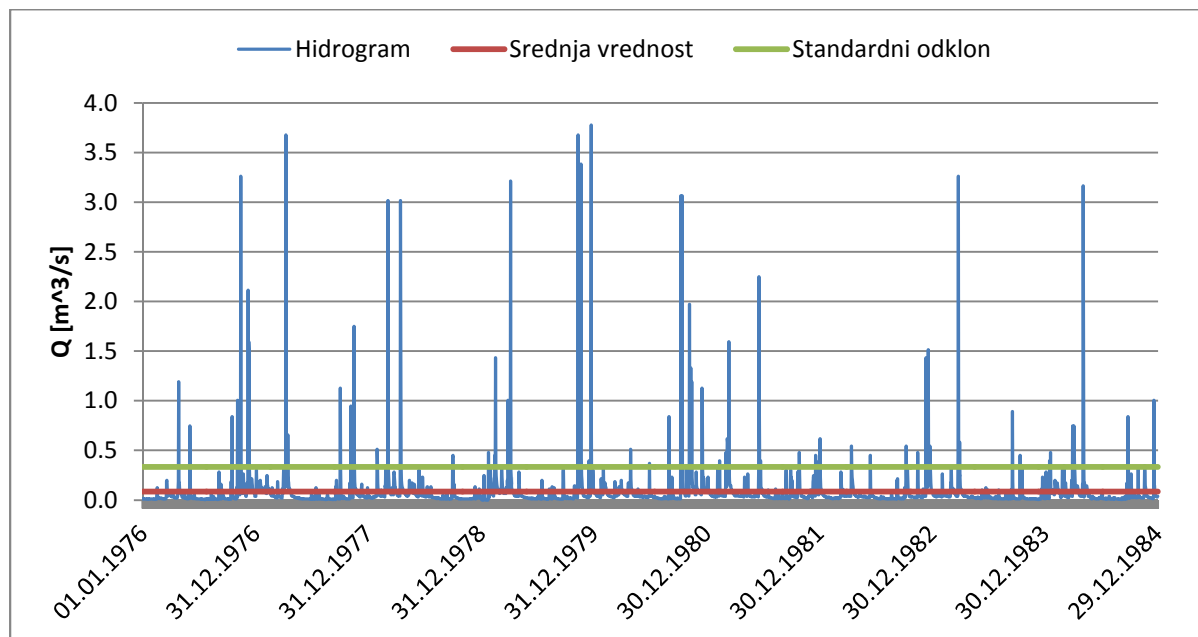
Graf 1: Hidrogram obdobja 1961–1972 z označeno srednjo vrednostjo in standardnim odklonom [6]

Maksimalna velikost pretoka v tem obdobju znaša $Q_{\max} = 1,705 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalna $Q_{\min} = 0,000 \text{ m}^3/\text{s}$, srednja vrednost znaša $Q_{\text{sr}} = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}$, standardni odklon pa $\sigma = 0,131 \text{ m}^3/\text{s}$. Pretok, ki se največkrat pojavi v nizu podatkov in je tako najverjetnejši, znaša $Q_{\text{mod}} = 0,017 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ta niz podatkov ne kaže dobrih obetov, saj so meritve zelo razpršene. Iz tega lahko sklepamo, da elektrarna daljša obdobja ne bi obratovala s polno močjo (ali sploh ne bi obratovala), istočasno pa bi nam veliko vode steklo mimo turbine ob konicah.

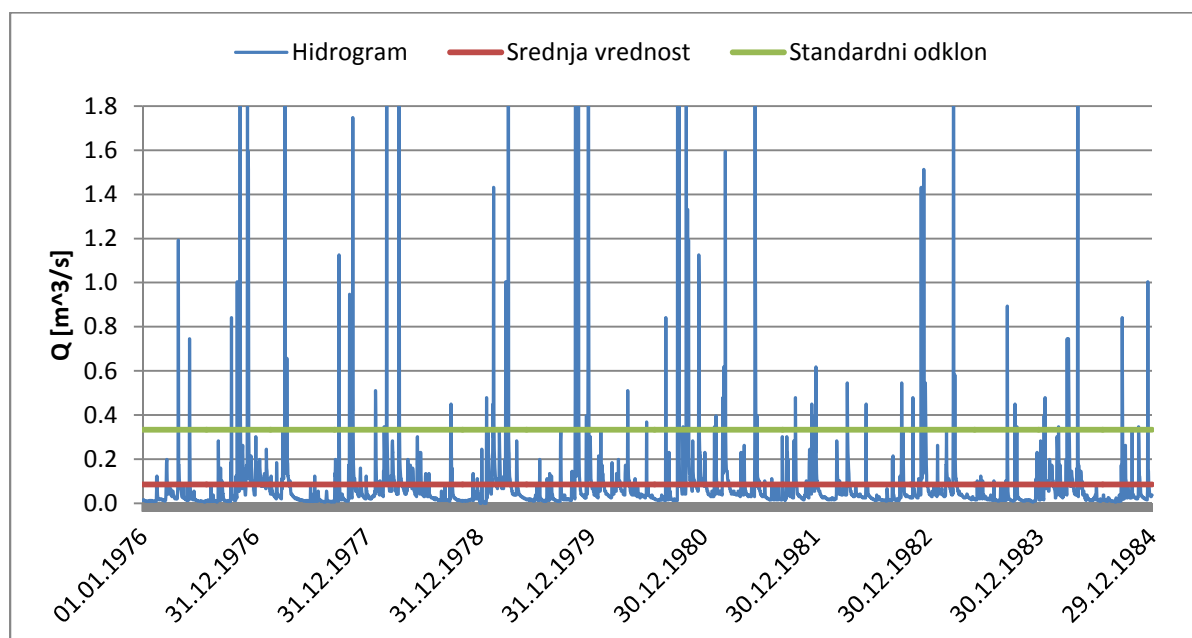
2.4.2 Obdobje med letoma 1976 in 1983

Podobno analizo podatkov izvedemo tudi za niz med letoma 1976 in 1983. Ponovno izdelamo hidrogram in na njem označimo srednjo vrednost ter standardno deviacijo.



Graf 2: Hidrogram obdobja 1976–1984 z označeno srednjo vrednostjo in standardnim odklonom [6]

Ta niz podatkov kaže še večjo raztresenost, ki je predvsem posledica bistveno večjih maksimalnih pretokov. Za lažjo primerjavo hidrogramov obeh obdobj na drugem zmanjšamo y os. S tem odrežemo ekstremne pretoke, ki za izkoriščanje energetskega potenciala niso zanimivi, pridobimo pa na preglednosti hidrograma, s čimer lažje izluščimo njegovo sporočilo.



Graf 3: Hidrogram obdobja 1976–1984 z zmanjšano y osjo [6]

Na tem grafu lahko jasneje vidimo vpliv višjih ekstremnih vrednosti pretokov. Ti so povzročili še večji raztros vrednosti kljub temu, da je bilo vode v tem obdobju nekoliko manj.

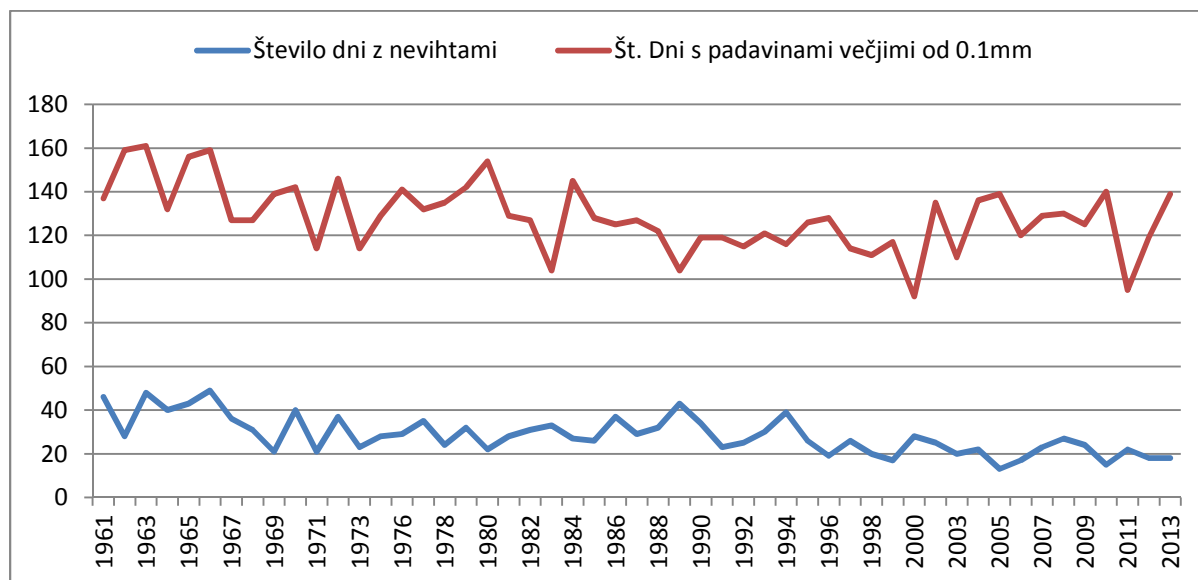
Maksimalni pretok je v tem obdobju znašal kar $Q_{\max}=3,777 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalni je bil enak kot v prejšnjem obdobju $Q_{\min}=0,000 \text{ m}^3/\text{s}$, srednja vrednost je nekoliko manjša in znaša $Q_{\text{sr}}=0,085 \text{ m}^3/\text{s}$, standardni odklon pa je skoraj dvakrat večji od prejšnjega $\sigma=0,248 \text{ m}^3/\text{s}$. Najverjetnejši pretok znaša $Q_{\text{mod}}=0,015 \text{ m}^3/\text{s}$ in je pričakovano nekoliko manjši od prejšnjega.

2.4.3 Izbira niza podatkov za nadaljevanje računa

Oba niza se med seboj kar precej razlikujeta, kar ni možno pojasniti s spremembo konfiguracije terena ali posegom na vodotoku. Edini dejavnik, ki ga lahko preverimo, je sprememba vremenskih razmer, analiza teh pa je dokaj zahtevna. Zaradi velike količine podatkov, pri katerih je vprašljiv vpliv na spremembo pretoka, se omejimo na letne podatke.

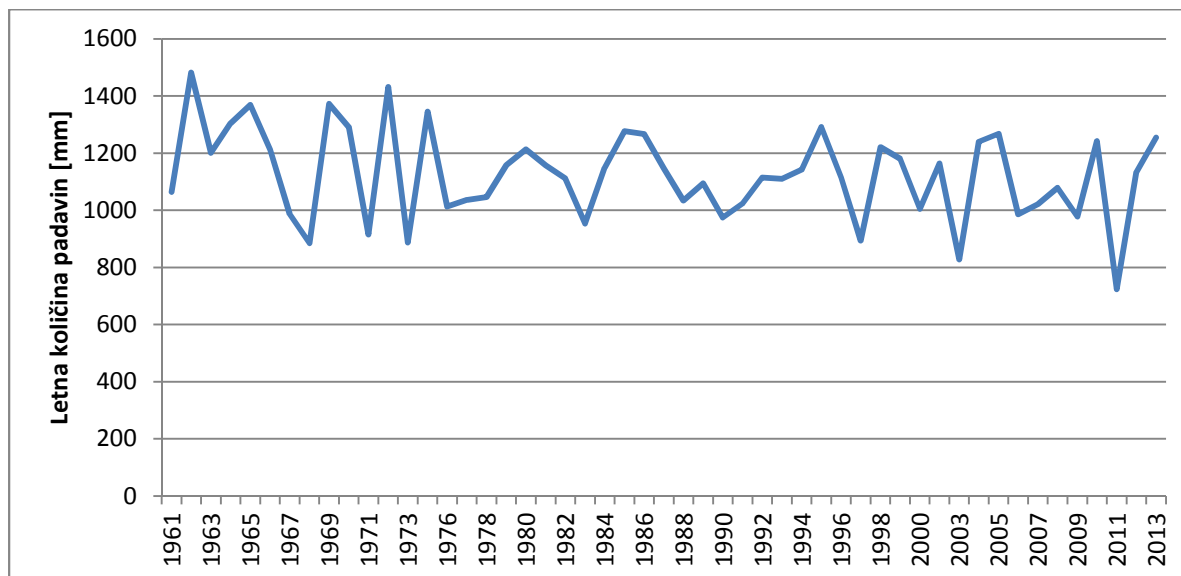
Velike konice pretokov so običajno posledica močnega deževja ali nevihte. Njihov pojav lahko razložimo z manjšanjem števila deževnih dni ob enaki letni količini padavin. Nekoliko lahko na to vplivajo tudi nevihte.

V bližini Pendirjevke je več vremenskih postaj, a za osnovno analizo trendov ni pomembno katero izberemo. Ključno je, da ima postaja čim daljši niz podatkov o številu deževnih dni, številu neviht in letni količini padavin. Po teh kriterijih sem izbral postajo Vinji vrh pri Beli cerkvi [5].



Graf 4: Spreminjanje letnega števila dni s padavinami in števila dni z nevihtami v obdobju 1961–2013 [5]

Zgornji graf nakazuje trend zmanjševanja števila dni s padavinami in nevihtami. Če je ob tem letna količina padavin ostala enaka, pomeni, da so padavine intenzivnejše, to pa pojasni izrazitejše konice pretokov v obdobju 1976–1984. Domnevo preverimo na grafu letnih količin padavin za isto obdobje.



Graf 5: Spreminjanje letne količine padavin v obdobju 1961–2013 [5]

Ta nam kaže trend zmanjševanja količine padavin, kar pojasni zmanjševanje števila dni s padavinami. S tem domneve o intenzivnejših padavinah ne moremo dokazati, zato izračun nadaljujemo s celotnim nizom podatkov za pretoke.

3 Zasnova hidroelektrarne

Hidroelektrarna spreminja vodno moč najprej v mehansko delo, tega pa v električno energijo.

Osnovna surovina za proizvodnjo je torej vodna moč, to pa fizikalno razložimo kot spremembo potencialne energije vode v določenem času. Odvisna je torej od masnega pretoka, gravitacijskega pospeška in višinske razlike, ki jo prepotuje vodni delec.

$$P = \Phi * g * H = \rho * Q * g * H$$

P – vodna moč [W]

Φ – masni pretok [kg/s]

g – gravitacijski pospešek [m/s²]

H – višinska razlika, ki jo prepotuje delec vode [m]

ρ – gostota vode [kg/m³]

Q – volumski pretok vode [m³/s]

Gostota vode in gravitacijski pospešek sta konstantni količini, masni pretok pa je odvisen od gostote vode in volumskega pretoka. Tako nam za dosego vodne moči ostaneta dve neodvisni spremenljivki, in sicer volumski pretok in višinska razlika, ki jo prepotuje vodni delec. Obe sta pogojeni z naravnimi danostmi in značilnostmi vodotoka, te pa lahko z zasnovo elektrarne izkoristimo v večji ali manjši meri.

Velikost pretoka je odvisna od izbranega profila vodotoka, od tega pa je odvisna velikost prispevnega območja, s katerega se vode stekajo vanj. To količino smo že fiksirali z izbiro obravnavanih profilov v drugem poglavju. Za izbrana dva profila smo tudi izračunali pričakovane pretoke.

Edina prosta spremenljivka, na katero lahko vplivamo z zasnovo elektrarne, je tako višinska razlika. Točkovni padci vode preko prodnih pregrad nam omogočajo postavitev dveh elektrarn s točkovnim odvzemom vode (voda se vrne v strugo na istem mestu oziroma pod jezom [7]), kar nam omogoča izkoriščanje večjega dela pretoka, saj je v tem primeru manjši minimalni ekološko zahtevani pretok. Po kratkem inženirskem razmisleku pridemo do ugotovitve, da s tako majhnimi pretoki in le nekaj metriškimi padci ne dobimo skoraj nobene vodne moči.

Rešitev je postavitev elektrarne z odvzemom vode z deviacijo. To pomeni, da vodo zajamemo na čim višjem profilu, v našem primeru je to zajem na nivoju krone zgornje pregrade, izpustimo pa jo na čim nižjem profilu, kar je v našem primeru dno struge pod spodnjo pregrado. Vmes jo vodimo po tlačnem cevovodu. S tem se zavestno odpovemo tudi možnosti izkoriščanja pritokov med zgornjim in spodnjim profilom, a kot smo že predhodno ugotovili na energetske izrabo to nima bistvenega vpliva [7].

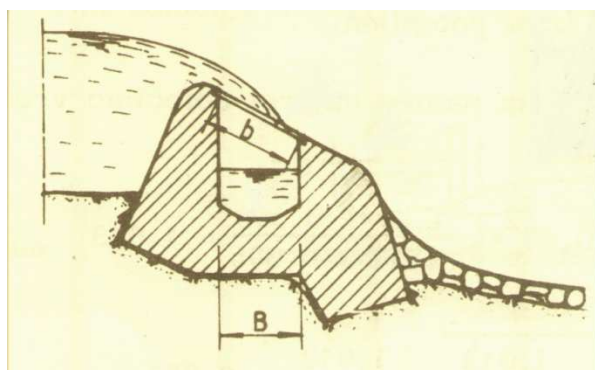
3.1 Opis sestavnih delov

Vodi želimo energetsko izkoristiti, zato moramo opraviti tri naloge. Prva naloga je zajem. Pri tem moramo poskrbeti, da poleg vode ne zajamemo še plavin, ki bi nam lahko povzročile škodo na derivacijskem sistemu in turbinah. To nalogo opravi prvi sestavni del elektrarne, ki se imenuje zajetje z usedalnikom. V nadaljevanju moramo zajeto vodo pripeljati do iztočnega profila, kar naredimo s pomočjo cevovoda. Pri tem delu elektrarne je ključno, da dobro prenaša obremenitve pri obratovanju (vodni udar), saj voda v tlačnem cevovodu vseskozi ohranja potencialno energijo iz zgornjega dela. Zadnja naloga, ki jo moramo opraviti je pretvorba potencialne energije v električno in izpust vode nazaj v vodotok. To nalogo opravi strojnica oziroma v njej postavljena turbina, nanjo pa je priključen generator, ki mehansko delo vrtenja turbinskega gonilnika in rotorja generatorja spreminja v električno energijo.

3.1.1 Zajem vode

Zajem vode iz majhnih prodonosnih potokov običajno izvedemo kot talno zajetje, imenovano tudi tirolski jez [8]. Na tem mestu moramo poskrbeti, da v sistem ne vnesemo prevelike količine plavin in da delci niso preveliki. Če vode ne očistimo dovolj, nam to lahko poškoduje ostale dele elektrarne.

Talni odvzem vode je zasnovan kot majhen preliv, ki ima na dolvodni strani zbirni kanal. Ta je zavarovan z rešetko, ki vodo očisti večjih kamnov, vej, listov in drugih večjih delcev. Ti se nabirajo na njej, kar lahko privede do zmanjšanja vtoka ali zamašitve. Rešetka na vtoku v zajetje je nagnjena v smeri toka, da nam jo voda sama čisti. Kljub temu je priporočljivo vtok redno pregledovati in po potrebi čistiti [8].



Slika 13: Prerez talnega odvzema vode [8]

Zbrano vodo moramo še dodatno očistiti drobnih frakcij, preden jo spustimo naprej. Majhni delci niso nevarni za zamašitev, poškodujejo pa turbino, ko z veliko hitrostjo udarjajo po njenih delih. Da se

temu izognemo in podaljšamo življenjsko dobo turbine, na zajetje namestimo peskolov. To je kanal, v katerem se voda toliko upočasni, da se pesek izloči z usedanjem. Peskolov je za pravilno delovanje elektrarne potrebno redno čistiti.

3.1.2 Cevovod

Zgornji in spodnji profil povežemo s cevovodom, po katerem teče voda pod vedno večjim tlakom. Pri njegovem načrtovanju moramo največjo pozornost posvetiti izbiri trase. Ta mora biti čim manj razgibana, saj vsak prelom, vsako koleno ali krivina povzroči izgubo energije [8]. Pomembno je tudi, da izberemo čim krajšo traso. Za to obstajata dva razloga. Krajši cevovod je praviloma cenejši, saj za izdelavo porabimo manj materiala, hkrati pa zmanjšamo trenjske izgube, saj so te odvisne od dolžine cevovoda.



Slika 14: Razdalja med profiloma po osi struge [4]

Pri izbiri trase cevovoda moramo misliti tudi na njegovo izgradnjo. Cevi lahko postavimo na površje in jih točkovno pritrdimo [8], druga možnost pa je, da cevi zakopljemo v zemljo. V obeh primerih moramo zagotoviti dostop mehanizacije na celotno traso cevovoda.

Poleg trase moramo izbrati tudi premer cevi in material, iz katerega bo cev izdelana. Premer je odvisen od inštaliranega pretoka, v grobem ga določimo po enačbi [8]:

$$D = 0.653 * Q^{0.429}$$

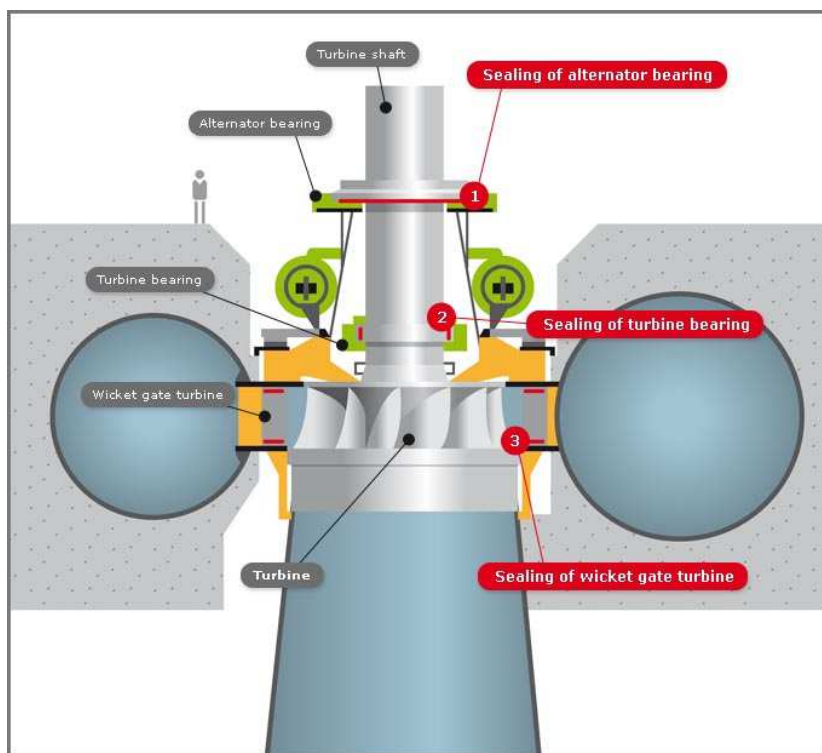
Oba profila naše elektrarne bo povezoval tlačni cevovod, kar pomeni, da moramo izbrati cevi iz materiala z visokimi nateznimi trdnostmi. Za take potrebe najpogosteje uporabljamo kompozitne materiale iz umetnih mas ali jeklene cevi [8].

3.1.3 Strojnica

Strojnica je končni del elektrarne, kjer se na turbini energija vode pretvori v mehansko delo, v generatorju povezanem na skupni osi pa naprej v električno energijo. Iz gradbenega vidika je pri malih hidroelektrarnah običajno majhna betonska stavba, ki je zgrajena tako, da je vanjo možno pripeljati cevovod, montirati vso strojno in elektroopremo ter vodo iz nje odvesti.

Bistveno pomembnejša od zasnove strojnice je zasnova turbine. V svetu so najbolj razširjene tri vrste turbin in sicer Peltonova, Kaplanova in Francisova turbina [9]. Peltonova je zasnovana tako, da najbolj ekonomično izkorišča velike hidravlične padce in majhne pretoke, Kaplanova deluje najbolj ekonomično pri velikih pretokih in majhnih hidravličnih padcih, Francisova pa je zelo prilagodljiva in pokriva široko vmesno področje.

Za nasvet glede vrste uporabljene turbine sem se obrnil na Turboinštitut Ljubljana, kjer mi je gospod Miha Pišljar, vodja oddelka za hidroenergetiko, svetoval uporabo Francisove turbine, ob upoštevanju vseh podatkov predstavljenih v tej diplomski nalogi.



Slika 15: Sestava Francisove turbine [10]

4 Določitev višinske razlike

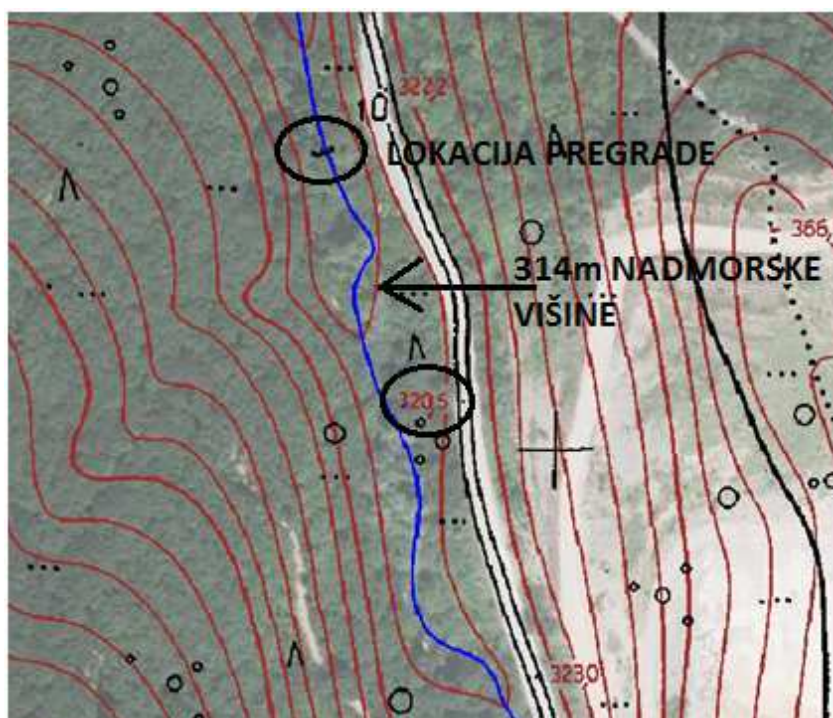
Višinsko razliko med gladino vode na vtoku v elektrarno in gladino vode na iztoku iz elektrarne določimo na osnovi hidravličnih krivulj profila. V tem primeru tovrstna analiza ni potrebna, saj je nihanje gladine v profilih v odvisnosti od pretoka zelo majhno v primerjavi s celotno geodetsko razliko. Iskano količino lahko tako določimo iz geodetskih podatkov, in sicer iščemo višinsko razliko med kruno zgornje pregrade in dnom struge pod spodnjo pregrado.

Na Agenciji za okolje in na Vodnogospodarskem podjetju Novo mesto je dostopen vzdolžni profil potoka, a je žal izdelan le za območje spodnje pregrade, kar pomeni, da ga ne moremo uporabiti.

Vzdolž potoka poteka cesta, katere vzdolžni profil bi nam lahko služil kot osnova za izmero višinske razlike. Od izbranega prečnega profila ceste bi lahko z nivelirjem izmerili višinsko razliko do krone ali dna pregrade. Na ta način bi dobili zelo natančne podatke, kar pa v tej oceni ni potrebno.

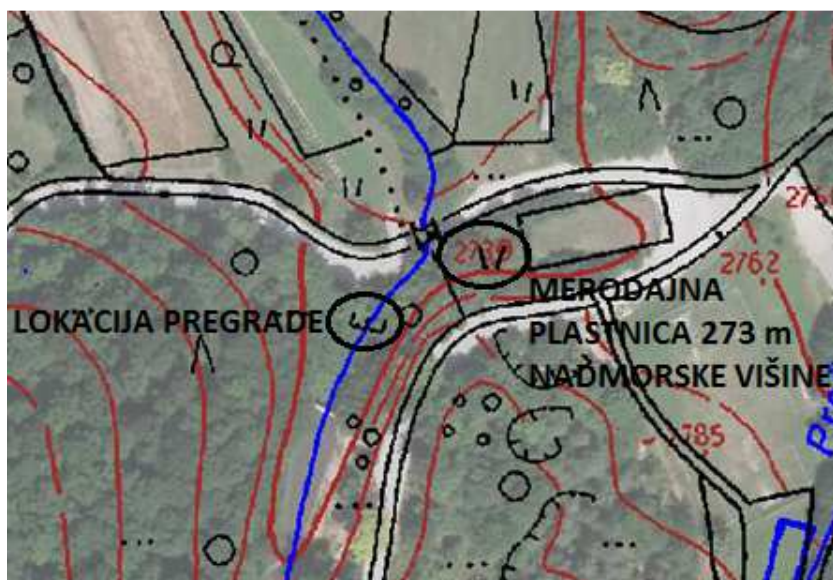
Natančnost, s katero smo ocenili pretoke, je bistveno manjša.

Višinsko razliko med pregradama lahko določimo tudi na podlagi topografske karte. Primerna karta z vrisanimi plastnicami in pregradama je dostopna na spletnem portalu PISO [3] (*Prostorski informacijski sistem občin*). Ta metoda sicer temelji na nekaterih ocenah in zaokrožitvah, a je kljub temu dovolj natančna za uporabo v tej nalogi.



Slika 16: Topografska karta na območju zgornje pregrade [3]

Na zgornji sliki je dobro vidna plastnica z nadmorsko višino 320,5 m. Tej po strugi navzdol sledi plastnica, ki ustreza nadmorski višini 314,0 m, naprej od te pa je označena lokacija pregrade. Na podlagi teh dveh plastnic, njunih medsebojnih razdalj in razdalje do lokacije pregrade lahko ocenimo, da leži krona zgornje pregrade na nadmorski višini 312 m. Na tej nadmorski višini predpostavimo vtok v našo elektrarno.



Slika 17: Topografska karta na območju spodnje pregrade [3]

Za določitev nadmorske višine dna spodnje pregrade je merodajna plastnica na nadmorski višini 273 m. Ta prečka strugo na začetku jezera, ki se nabira pred spodnjo pregrado. Ustrezno nadmorsko višino tako dobimo, če od te višine odštejemo višino pregrade, ki znaša 4 m in sem jo izmeril na terenu (slika 18). Predpostavljena nadmorska višina strojnice je tako 269 m, višinska razlika, ki jo lahko izkoristimo za proizvodnjo energije pa 43 m.



Slika 18: Merjenje višine spodnje pregrade

5 Določitev minimalnega ekološko sprejemljivega pretoka

Po veljavni zakonodaji ni dovoljeno vse vode speljati na turbino, strugo pa pustiti suho. Količina vode, ki jo moramo vedno pustiti v strugi in jo odštejemo od predpostavljenega pretoka v našem izračunu, se imenuje minimalni ekološko sprejemljivi pretok. Tega določimo po enačbi [7]:

$$Q_{\text{minimalni}} = f * Q_{\text{srednji mali}}$$

Srednji mali pretok določimo na podlagi podatkov o pretokih, faktor f pa na podlagi ekološkega tipa vodotoka in vrste odvzema. V našem primeru gre za dolg odzem, kar pomeni, da je faktor f različen v vodnatem in v sušnem obdobju. Ekološki tip vodotoka je določen glede na območje, v katerem leži, kar Pendirjevko uvršča v drugo kategorijo, k potokom v preddinarskem hribovju in na ravninah. Faktor f se tako spreminja od 1.2 do 1.9, minimalni ekološko sprejemljivi pretok pa od 9 do 14 l/s. Podrobnejši izračun je v prilogi A.1.



Slika 19: Struga potoka gorvodno od zgornje pregrade

6 Izračun energetskega potenciala

6.1 Ocene manjkajočih količin

Za izračun energije, ki bi jo bilo možno proizvesti na opisovani lokaciji, moramo predpostaviti še tri količine. Te so precej predvidljive in podobne pri vseh tovrstnih projektih, zato zanje na tem mestu ni potrebno opraviti posebne raziskave.

Oceniti moramo izgubo energije zaradi trenja v cevovodu, izkoristek turbine in minimalni pretok, pri katerem lahko turbina še obratuje. Vse podatke ocenimo v deležu, saj je izguba na cevovodu odvisna od njegove dolžine, minimalen potreben pretok za delovanje turbine je odvisen od inštaliranega pretoka, izkoristek turbine pa je vedno podan v odstotkih. Po posvetu z mentorjem sem predpostavil, da na cevovodu izgubimo 10 % energije, turbina v mehansko delo spremeni 86 % vodne energije in obratuje pri pretokih večjih od 20 % inštaliranega pretoka, kar je meja za tehnološki minimum.

6.2 Računanje pretoka, ki teče skozi turbino

Osnovni podatek za izračun proizvodnje električne energije je pretok. Uporabimo oba niza podatkov [6] za obdobji 1961–1972 in 1976–1984, saj smo ugotovili, da nobenega od njiju ne moremo utemeljeno ovreči. Predpostavimo, da naša hipotetična elektrarna obratuje od leta 1961, vseskozi 21 let, ko imamo na voljo dnevne podatke o pretokih. Na ta način lahko dokaj realno ocenimo možno energetske proizvodnje in rentabilnost elektrarne.

Od merjenega naravnega pretoka moramo odšteti minimalni ekološko sprejemljivi pretok, ki ga ne smemo voditi na turbino, velikost tega pa se spreminja glede na značilno hidrološko obdobje je različna za (sušno in ali mokro obdobje). Predpostavil sem, da je obdobje sušno, če je vrednost srednjega dnevnega pretoka manjša od povprečne vrednosti vseh uporabljenih srednjih dnevnih pretokov. Tako za vsak dan dobimo oceno razpoložljivega pretoka, ki ga smemo voditi na turbino, ga lahko izkoristimo za energetske namene.

Račun nadaljujemo za različne velikosti turbin, ki bi jih lahko uporabili. Glede na podatke sem se odločil, da je najmanjši inštalirani pretok, ki ga je smiselno preveriti, z računom $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, ki sem ga stopenjsko povečeval, za vsako naslednjo turbino pa ima inštalirani pretok večji za $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$.

V naslednjem koraku za vsako možno velikost turbine poiščemo dejanski razpoložljiv dnevni pretok, ki ga lahko energetske izrabimo. Predpostavili smo, da turbina še obratuje, če pretok dosega vsaj 20 % inštaliranega pretoka, kar velikosti pretokov razdeli v tri območja:

- **razpoložljiv pretok je manjši od 20 % instaliranega pretoka:** obratovanje turbine v tem območju je onemogočeno zaradi velikih hidravličnih izgub in nevarnosti nastanka kavitacije
- **razpoložljiv pretok se nahaja v območju od tehničnega minimuma do instaliranega pretoka turbine:** turbina obratuje z izkoristkom glede na razpoložljiv pretok
- **razpoložljiv pretok je večji od instaliranega pretoka turbine:** turbina obratuje z nazivnim pretokom in izkoristkom, višek vode se preliva in ga energetsko ne moremo izkoristiti.

Pretoki v prvem območju so premajhni, da bi lahko gnali turbino, zato jih v nadaljevanju zanemarimo. Pretoki v tretjem območju so preveliki, da bi jih lahko turbina izbrane velikosti v celoti izkoristila. Kadar imamo tako velike pretoke predpostavimo, da skozi turbino teče pretok Q_{inst} . Če pretok pade v drugo območje, ga lahko turbina v celoti izkoristi in ob tem obratuje čim bolj ekonomično.

Iz pretoka skozi turbino, višinske razlike zmanjšane za velikost izgube v cevovodu, gostote vode in gravitacijskega pospeška po spodnji enačbi izračunamo moč, ki jo vsak dan oddaja turbina.

$$P = g * Q * \rho * H * \mu$$

P – moč, ki jo oddaja turbina [W]

g – gravitacijski pospešek [m/s^2]

Q – pretok skozi turbino [m^3/s]

ρ – gostota vode [kg/m^3]

H – višinska razlika med profiloma zmanjšana za hidravlične izgube na cevovodu (90 % bruto višine) [m]

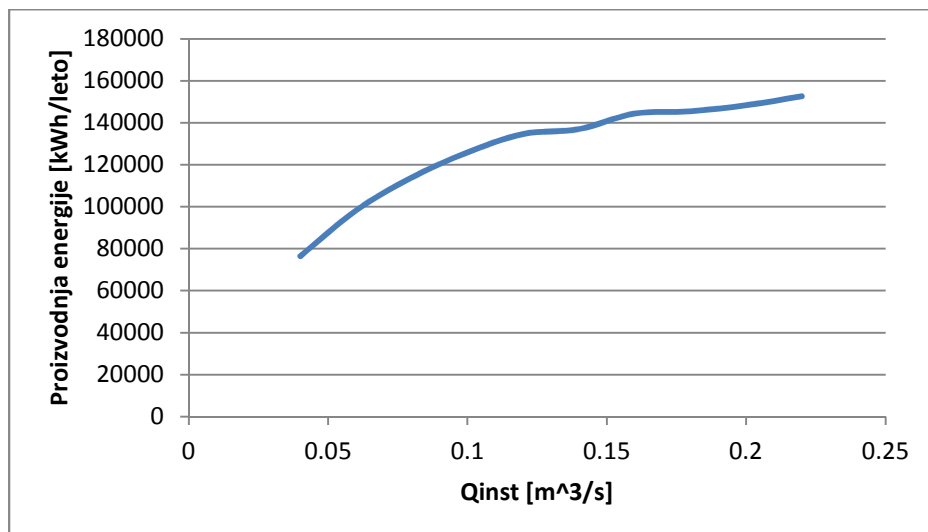
μ – izkoristek turbine (0.86)

Predpostavimo, da je gostota vode $1000 kg/m^3$ in gravitacijski pospešek $9.81 m/s^2$, v računu pa upoštevamo tudi izkoristek turbine. Količino dnevno proizvedene energije izračunamo tako, da upoštevamo dnevne pretoke in tako izračunano moč pomnožimo s 24 urami. Proizvodnjo energije po letih za posamezno vrednost Q_{inst} prikažemo v tabeli.

	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22
1961	80603	102024	116178	124868	135220	136256	141837	136490	139834	142745
1962	88319	116214	135763	151779	167230	174581	184367	185491	192534	198609
1963	88539	112145	128344	136854	146113	142878	148172	139842	143697	147327
1964	94399	124071	145002	160451	176913	182873	193021	190375	198267	205181
1965	100168	136458	163587	188183	203883	215324	228778	232504	241981	250039
1966	88532	113988	129420	144591	150677	154617	162575	161496	167119	171538
1967	92962	122554	144599	157613	171034	173193	180115	185570	179255	182400
1968	64306	76817	87916	89137	95424	93921	97148	99953	93565	95149
1969	91199	123518	152317	169755	187647	197685	210362	219790	218882	224208
1970	84282	111106	135198	151154	169288	179808	192685	203283	204606	210504
1971	62575	79918	93625	101666	110862	112940	118667	123734	119591	122839
1972	96052	131587	163132	186539	208621	220496	235242	247789	252071	260723
1976	44246	56088	63403	70893	74594	77074	81763	83307	86182	88805
1977	57559	74026	85203	96390	100865	102588	107422	106397	109344	111995
1978	67127	83722	93398	102515	105326	105266	109686	107664	110855	113865
1979	61683	79292	93588	106485	113974	116203	123933	126595	133030	138535
1980	81999	104763	118877	130311	133594	131254	136836	133591	138046	141680
1981	82235	100158	111205	120709	121623	117152	123107	118801	123738	128307
1982	62615	73197	77481	84718	83444	77955	83088	82414	86354	89391
1983	51415	58449	61515	66142	64143	59161	61758	56726	58753	60726
1984	64370	82213	91460	102193	106980	105701	110684	112855	116820	120508
Povprečje	76437	98205	113867	125855	134641	136997	144345	145460	148311	152622

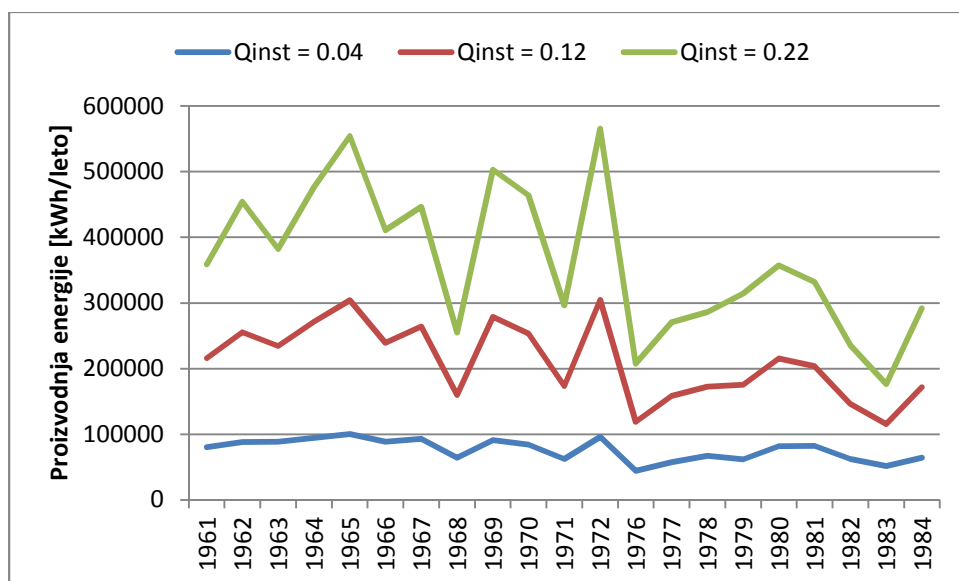
Preglednica 8: Proizvodnja energije po posameznih letih za različne vrednosti Q_{inst} v kWh

Izračun smo izvedli za deset vrednosti Q_{inst} , zato nas zanima, kako se z rastjo inštaliranega pretoka spreminja proizvodnja energije. Iz grafa 8 je razvidno, da s postopnim povečevanjem instaliranega pretoka proizvodnja približno do pretoka 0,12 m³/s proporcionalno narašča, zatem pa je kljub povečevanju pretoka naraščanje proizvodnje v rahlem upadu. To lahko razložimo s tem, da se s povečanjem instaliranega pretoka zvišuje tudi prag obratovalnega minimuma, kar pomeni, da ne moremo izkoristiti manjših pretokov. Elektrarna sicer obratuje z večjo močjo, vendar se čas obratovanja zaradi tehničnega minimuma krajša, kar tudi vliva na manjšo rast proizvodnje kljub večjem instaliranem pretoku.



Graf 6: Sprememba proizvodnje električne energije pri večanju inštaliranega pretoka

Pri analizi niza podatkov za pretoke smo celoten vzorec razdelili na dve obdobji. Podatki so se med seboj precej razlikovali, a nismo našli pravega vzroka. Na osnovi izračunanih podatkov lahko preverimo, kako se proizvodnja energije spreminja skozi čas pri različnih inštaliranih pretokih. Za to analizo izberemo najmanjši, največji in srednji inštalirani pretok. Rezultate prikažemo na grafu.



Graf 7: Proizvodnja energije po letih za različne vrednosti inštaliranega pretoka

Pri vseh treh nizih podatkov lahko opazimo znatno zmanjšanje proizvodnje energije po letu 1976. Po pričakovanju v obdobju, v katerem so vrednosti bolj raztresene povprečni pretok pa nižji, proizvedemo manj energije. Velikost turbine pri tem ni pomembna.

7 Izbira velikosti turbine in ekonomika elektrarne

Postavitev male hidroelektrarne je običajno povezana z velikimi investicijskimi stroški in preden se takega projekta lotimo, moramo izračunati, v kolikšnem času se nam vložena sredstva povrnejo. V fazi načrtovanja je pomembno, da vse dele elektrarne dimenzioniramo tako, da nam proizvedejo optimalno količino energije pri čim manjših stroških postavitve. Pri tem je najpomembnejša izbira inštaliranega pretoka. Če je ta premajhen, lahko v daljših bolj deževnih obdobjih izgublamo energijo in posledično prihodke, če pa je ta prevelik, predstavlja nepotrebno podražitev investicije, poleg tega pa izgublamo energijo, kadar je razpoložljivi pretok premajhen, da bi turbina delovala.

Elektrarna ustvarja prihodke s prodajo proizvedene električne energije, cena te pa se določa na trgu in močno niha. Investitorjem v male hidroelektrarne je na pomoč priskočila država preko zajamčene odkupne cene elektrike. Po podatkih Elektra Celje je ta cena 0,105 €/kWh [11]. Na podlagi te cene lahko izračunamo, kolikšne prihodke bi lahko ustvarili s prodajo energije v posameznem letu.

Ključno vprašanje pri tovrstnih investicijah je, v kolikšnem času se bo investitorju vložek povrnil. Za izračun časa povrnitve investicije potrebujemo čim boljše oceno stroškov postavitve objekta. Za nasvet sem se obrnil na gospoda Miha Pišljarja iz Ljubljanskega Turboinštituta. Svetoval mi je, naj v izračunu časa povrnitve investicije predpostavim, da cena strojne opreme doseže 1000 €/kW, pri čemer izračunam moč turbine pri inštaliranem pretoku. Mentor mi je svetoval, da za elektroopremo uporabim enako oceno, gradbena dela pa običajno pomenijo 60 % investicije. Ta delež bom nekoliko zmanjšal ob upoštevanju dejstva, da na potoku že stojita obe pregradi in da je gradnja cevovoda nekoliko cenejša zaradi bližine kamnoloma. Končna ocena stroškov tako znaša 4000€/kW.

Inštaliran pretok [m ³ /s]	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	0.22
Povprečna proizvodnja [kWh]	76437	98205	113867	125855	134641	136997	144345	145460	148311	152622
Inštalirana moč [kW]	13	20	26	33	39	46	52	59	65	72
Investicija [€]	52239	78359	104479	130599	156718	182838	208958	235077	261197	287317
Prihodki [€/leto]	7949	10213	11842	13089	14003	14248	15012	15128	15424	15873
Čas izplačila [let]	7	8	9	10	11	13	14	16	17	18

Preglednica 9: Ocena stroškov, pričakovanih prihodkov in časa povrnitve investicije

Stroški gradbenih del običajno niso premosorazmerni z velikostjo inštalirane moči, zato se na njihovi podlagi oceni ekonomsko najbolj upravičen inštaliran pretok. Primerjave so bile narejene ob predpostavki stalnosti cen. V izračunu nismo upoštevali podražitve, inflacije, ki čas povrnitve investicije še podaljša. Glede na primerjave vidimo, da se nekje do inštaliranega pretoka 0,12 m³/s

proizvodnja enakomerno povečuje, nato pa začne upadati, kot smo že predhodno ugotovili. Tudi doba povračila sredstev se do višine instaliranega pretoka 0,12 m³/s proporcionalno povečuje, potem pa se doba skokovito povečuje. Iz navedenega lahko zaključimo, da je za naš primer najbolj rentabilna proizvodnja z instaliranim pretokom okoli 0,120 m³/s. Dokončno pa bi bilo potrebno to oceno podkrepiti še z detajlnimi analizami finančne izvedljivosti projekta.

8 Zaključek

V nalogi smo obravnavali možnost energetske izrabe potoka Pendirjevka v porečju reke Krke. Izbrali smo odsek, kjer sta že zgrajeni prodni pregradi. Na obravnavani lokaciji obstaja potencial za ekonomsko upravičeno izkoriščanje vodne energije. Konfiguracija terena nam omogoča izkoristiti sorazmerno velik hidravlični padec med pregradama za pridobivanje električne energije.

Potok sem si večkrat ogledal na terenu in tako izbral dva profila, ki imata po moji oceni največji potencial za proizvodnjo energije. Na teh dveh profilih se nahajata prodni pregradi, ki ju upravlja Vodnogospodarsko podjetje Novo mesto. Zbral sem informacije o stanju pregrad in o načrtih upravljavca.

V nalogi sem s pomočjo empiričnih obrazcev ocenil velikost srednjega pretoka in s pomočjo te vrednosti poiskal hidrološko podobno povodje z dnevnimi meritvami pretokov. Te sem prenesel na Pendirjevko s pomočjo razmerja velikosti prispevnih območij.

S pomočjo topografske karte in meritev na terenu sem ugotovil, kolikšen hidravlični padec lahko izkoristimo. Opisal sem zasnovo elektrarne in na podlagi vseh zbranih podatkov izračunal hidroenergetski potencial. Z upoštevanjem povprečne cene energije za tovrstni tip elektrarne sem ugotovil, da je najbolj rentabilna proizvodnja pri instaliranem pretoku 0,12 m³/s, kar pri privzetih energetskega karakteristikah pomeni 135 MWh povprečne letne proizvodnje v obdobju oziroma 14.000 EUR letnega prihodka iz naslova proizvedene električne enrgije. Pri teh pokazateljih, ter z upoštevanjem fiksnosti cen se vložev v investicijo povrne v 11 letih. Dokončno pa bo potrebno to oceno podkrepiti še z detajlnimi analizami finančne izvedljivosti projekta.

9 Viri

9.1 Uporabljeni viri

- [1] Brus, J., 1981, Osnovne hidrološke karakteristike pritokov reke Krke. Hidrologija. Novo mesto, Vodnogospodarsko podjetje Novo mesto
- [2] Brus, J., 1981, Grafikoni za določanje velikih voda in numerične tabele za določanje odtočnih koeficientov ter povprečnih letnih specifičnih pretokov po empiričnih obrazcih nekaterih poznanih tujih avtorjev. Ljubljana, Zveza vodnih skupnosti Slovenije: str. 15, 18, 19.
- [3] PISO – Šentjernej
<http://www.geoprostor.net/piso/ewmap.asp?obcina=SENTJERNEJ> (Pridobljeno 13. 9. 2014.)
- [4] Atlas okolja 2014
http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (Pridobljeno 10. 5. 2014.)
- [5] meteo.si
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/app/webmet/#webmet==8Sdwx2bhR2cv0WZ0V2bvEGcw9ydlJWbIR3LwVnaz9SYtVmYh9iclFGbt9SaulGdugXbsx3cs9mdl5WahxXYyNGapZXZ8tHZv1WYp5mOnMHbvZXZulWYnwCchJXYtVGdlJnOn0UQQdSf>; (Pridobljeno 5. 9. 2014.)
- [6] Arhiv hidroloških podatkov – dnevni podatki
http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (Pridobljeno 20. 5. 2014.)
- [7] Uredba o kriterijih za določitev ter načinu spremljanja in poročanja ekološko sprejemljivega pretoka. Uradni list RS, št. 97/09
- [8] Valant, I., Šolc, L. 1986. Zgradimo majhno hidroelektrarno. 6. Del: Gradbena izvedba majhne hidroelektrarne. Ljubljana, Zveza organizacij za tehnično kulturo Slovenije: p. 101-103, 180-194.
- [9] Litostroj Power
<http://www.litostrojpower.eu/index.php?page=documents&item=81&id=140> (Pridobljeno 14. 9. 2014.)
- [10] PXL Seals
<http://www.pxlseals.com/turbine-francis> (Pridobljeno 14. 9. 2014.)

- [11] Elektro Celje Energija
<http://www.ece.si/dom/za-dom-ustvarjanje-energije/hidroelektrarna> (Pridobljeno 9. 9. 2014.)

9.2 Drugi viri

- [12] Šauta, M. 2010. Hidrološka analiza hudournika Kroparica s pritoki. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Šauta): 71 f.
- [13] Sovre, K. 2009. Hidrološka študija visokih voda Bistrice v porečju Sotle. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Sovre): 113 f.
- [14] Kestnar, K. 2012. Določanje največjih pretokov na nemerjenih porečjih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Kerstnar): 50 f.
- [15] Ranfl, M. 2009. Idejna študija obnove male HE Kitič na Bohinjski Bistrici. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Ranfl): 96 f.
- [16] Džamastagić, E. 2013. Ocena energetskega potenciala akumulacije Vogršček. . Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba E. Džamastagić): 78 f.