

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidatka:

Tijana Mičić

Matematični model kakovosti treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku

Diplomska naloga št.: 66

Mentor:

prof. dr. Boris Kompare

Somentor:

doc. dr. Nataša Atanasova

Ljubljana, 26. 10. 2006

- II Mičić, T. 2006. Matematični model kakovosti Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku.
Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **TIJANA MIČIĆ** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom: »**MATEMATIČNI MODEL KAKOVOSTI TREH RIBNIKOV V MARIBORSKEM MESTNEM PARKU**«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 13.10.2006

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 519.61/.64:556.55(043.2)
- Avtor:** Tijana Mičić
- Mentor:** izr. prof. dr. Boris Kompare;
- Somentor:** asist. dr. Nataša Atanasova
- Naslov:** Matematični model kakovosti Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku
- Obseg in oprema:** 81 str., 31 pregl., 42 sl.
- Ključne besede:** Trije ribniki, Maribor, mestni park, limnološki model, kvaliteta vode. Vollenweiderjev model, dinamični model, model fosforja

Izveček:

Eno najpomembnejših orodij pri upravljanju z vodami v prihodnosti bo zagotovo matematično modeliranje. Eden izmed ciljev diplomske naloge je bil približati ta način upravljanja z vodami tudi širši populaciji ljudi, ki nima inženirskega predznanja, in sicer na enostaven in razumljiv način. V ta namen smo izdelali Vollenweiderjev model v Excelu, s katerim lahko napovemo evtrofnost vodnega telesa. To je enostaven matematični model, s pomočjo katerega na grobo ocenimo koncentracijo fosforja pri določeni obremenitvi. Model smo preizkusili na primeru Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku. Rezultati enostavnega modela kažejo, da so vsi trije ribniki v hiperevtrofnem stanju. Največjo koncentracijo fosforja ima 3. ribnik. Zaradi nenatančnosti enostavnih modelov, je pogosto potrebno posamezne procese modelirati s kompleksnejšimi modeli. V diplomski nalogi smo s programsko opremo Stella izdelali dinamični model fosforja v Treh ribnikih. Stella nam z uporabo že definiranih grafičnih blokov omogoča boljši vizualni pregled nad snovmi, ki vstopajo in izstopajo iz fosforjevega kroga. Procese v modelu opišemo z diferencialnimi enačbami in s številnimi parametri, ki nastopajo v njih, zato je ta vrsta modelov primerna za uporabnike z inženirsko izobrazbo. Za dobre rezultate dinamičnega modela potrebujemo kvalitetne vhodne podatke. V diplomski nalogi smo izdelali samo koncept modela fosforja, saj ga zaradi pomanjkanja meritev nismo mogli umeriti. Umerjen model pa je pogoj za pripravo dolgoletnih napovedi stanja kakovosti vode v ribnikih. Že na podlagi osnovnega zagona modela lahko ugotovimo, da je dogajanje v ribnikih zelo dinamično in da je kakovost dolvodnega ribnika močno odvisna od kakovosti vode v gorvodnem ribniku.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:556.55(043.2)
Author: Tijana Mičić
Supervisor: Assoc. prof. dr. Boris Kompare
Co Supervisor: asist.dr. Nataša Atanasova
Title: Mathematical water quality model of »Three fish ponds« in Maribor's city park
Notes: 81 p., 31 tab., 42 fig.
Key words: Vollenweider model, simple model, dynamic model, phosphorus model, ponds, water quality Maribor city park,

Abstract:

Mathematical modeling will probably be one of the most important management tools for managing water bodies in the future. One of the goals of this thesis paper is to make water management more understandable for general population with no knowledge in engineering. For this purpose we created Vollenweider model in Microsoft Excel program to predict the trophic state of the water body. This is a simple one-box model for predicting the total phosphorus concentration resulting from a given phosphorus load. The model was tested on »Three fish ponds« in Maribor city park. Simple model results show that all three ponds are in hipereutrophic state. The highest concentration of phosphorus is in the third pond. The simple model will never be as good a predictive tool as a model based on a more accurate data and which takes more processes into consideration. In this thesis paper we used Stella software for creating a dynamic model for phosphorus concentration in the Three ponds. With a predefined »building blocks« Stella makes models and processes that occur in the model more understandable. Processes in the model are described with differential equations and with numerous parameters. For that reason dynamic models require knowledge of an engineer. Quality input data are necessary for good dynamic model results. Due to poor quality data, we created only a concept for phosphorus model because the model could not be calibrated and the calibrated model stands as a condition for long-term water quality prediction. Based on the first run simulation of the model we can ascertain that water quality of a specific downstream pond is highly depended upon the quality of the upstream pond.

ZAHVALA

Za pomoč in potrpežljivost pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. B. Komparetu in somentorici asist. dr. N. Atanasovi.

Prav tako hvala M. Uršiču, ki mi je pomagal s številnimi nasveti.

Zahvalila bi se tudi svojima staršema, ki sta verjela vame in me skozi vsa leta študija vzpodbujala in mi pomagala.

Na koncu bi se zahvalila še vsem sostanovalcem študentskega doma 10, ki so me v težkih trenutkih vedno znali nasmejati.

KAZALO VSEBINE:

UVOD	1
1 ZGODOVINA	3
1.1 Nastanek mariborskega Mestnega parka	3
1.2 Nastanek in zgodovina Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku.....	3
2 DOSEDANJI UKREPI ZA IZBOLJŠANJE STANJA RIBNIKOV	6
2.1 Projekt sanacije Treh ribnikov	6
2.1.1 Stanje ribnikov pred sanacijo	6
2.1.2 Sanacija Treh ribnikov	7
2.1.2.1 Čiščenje dna ribnikov	7
2.1.2.2 Ureditev brežin.....	8
2.1.2.3 Retencijska zmogljivost II. Ribnika	8
2.1.2.4 Ureditev okolice.....	9
2.2 Osnovna odvodnja za Tremi ribniki - Ribniško selo	9
2.2.1 Prvotni projekt	9
2.2.2 Izveden projekt.....	10
2.3 Zadnja sanacija Treh ribnikov	10
3 OCENA STANJA DANES	11
3.1 Prispevne površine	11
3.1.1 Pokrovnost tal širšega območja	13
3.2 Hidrologija in kanalizacijski sistem	14
3.3. Določitev kvalitete vode v ribnikih	15
3.3.1 Kvaliteta vode na dotoku v drugi ribnik na podlagi vzorčenja komunalnega podjetja Nigrad v Mariboru v obdobjih november 2004 in marec 2005	16
3.3.2 Kvaliteta vode v ribnikih glede na opravljene meritve in analize v laboratoriju Katedre za zdravstveno hidrotehniko FGG	17
3.3.3 Določanje stopnje trofičnosti po OECD kriterijih	19
3.3.3.1 Uvrstitev Treh ribnikov v trofični razred po OECD kriteriju	23

4 UPORABA MODELOV ZA OCENO STANJA.....	24
4.1. Enostavni model.....	24
4.1.1 Določitev obremenitve sistema s hranili	25
4.1.1.1 Izpiranje iz prispevnih površin	25
4.1.1.2 Obremenitev s hranili iz padavin.....	27
4.1.1.3 Obremenitev s hranili iz antropogenega onesnaženja	28
4.1.2 Določanje oz. napoved koncentracije hranil v vodnem sistemu.....	29
4.1.2.1 Vollenweiderjev model (1969)	29
4.1.3 Izdelava pripomočka za račun obremenitve s Vollenweiderjevim modelom	32
4.1.3.1 Idejna zasnova	32
4.2 Dinamični model.....	38
4.2.1 Opis modela fosforjevega kroga in matematični zapis biokem. procesov v njem ...	38
4.2.1.1 Primarna produkcija (rast alg)	41
4.2.1.2 Modeliranje koncentracije zooplanktona.....	43
4.2.1.3 Rast rib	44
4.2.2 Modeliranje koncentracije hranil v Treh ribnikih z uporabo Stelle	45
4.2.2.1 Opis programske opreme Stella	45
5 REZULTATI MODELOV	46
5.1 Izračuni Vollenweiderjevega modela za primer Treh ribnikov.....	46
5.2 Izračuni dinamičnega modela Treh ribnikov s Stello	51
5.2.1 Konceptualni model fosforja izdelan s Stello.....	51
5.2.2 Rezultati modela (osnovni zagon modela).....	57
5.2.3 Analiza občutljivosti.....	60
5.2.4 Umerjanje modela	63
6 DISKUSIJA REZULTATOV MODELOV.....	66
7 ZAKLJUČEK IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO	68
VIRI	71
PRILOGE.....	76

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Velikost lastnih prispevnih površin za posamezen ribnik in velikost ribnikov	13
Preglednica 2: Rezultati analize vzorcev vode na dotoku v drugi ribnik za november 2004 in marec 2005 (Nigrad, 2005)	16
Preglednica 3: Rezultati analize vzorcev vode iz Treh ribnikov iz dne 24.8.2005	18
Preglednica 4: Rezultati analize vzorcev vode iz Treh ribnikov iz dne 18.7.2006.....	19
Preglednica 5: Parametri in trofične kategorije po OECD kriterijih (Zupan, 2001).....	20
Preglednica 6: Osnovne značilnosti vodnega telesa v posameznem trofičnem stanju (University of Florida, 2002)	22
Preglednica 7: Verjetnost uvrstitve posameznega ribnika v ustrezni trofični razred glede na opravljene meritve julij 2006	23
Preglednica 8: Količina vnosa hranil iz prisp. površin (Jørgensen & Vollenweider, 1989)....	25
Preglednica 9: Obremenitev iz lastnih prispevnih površin Treh ribnikov	26
Preglednica 10: Koncentracije hranil v padavinah (Jørgensen. & Vollenweider, 1989)	27
Preglednica 11: Izračun obremenitve s hranili iz padavin za posamezen ribnik	27
Preglednica 12: Obremenitev iz poseljenih območij.	28
Preglednica 13: Medsebojni vpliv ribnikov	46
Preglednica 14: Skupna obremenitev. Treh ribnikov s fosforjem.	47
Preglednica 15: Skupna obremenitev. Treh ribnikov z dušikom.....	47
Preglednica 16: Obremenitev treh ribnikov s fosforjem in dušikom, ter izračun klorofila a ..	47
Preglednica 17: Razvrstitev ribnikov v posamezni trofični razred glede na skup. fosfor	47
Preglednica 18: Obremenitev iz lastnih prispevnih površin neposredno v ribnik	48
Preglednica 19: Obremenitev iz dotokov.....	49
Preglednica 20: Medsebojna obremenitev ribnikov.....	49
Preglednica 21: Skupna obremenitev Treh ribnikov s fosforjem.	49
Preglednica 22: Skupna obremenitev Treh ribnikov z dušikom1	50
Preglednica 23: Obremenitev treh ribnikov s fosforjem in dušikom, ter izračun klorofila a ..	50
Preglednica 24: Razvrstitev ribnikov v posamezni trofični razred glede na skupni fosfor.	50
Preglednica 25: Mejna dopustna obremenitev Treh ribnikov za posamezno trofično stanje.	51
Preglednica 26: Parametri modela	54
Preglednica 27: Odvisne spremenljivke modela.....	54

Preglednica 28: Neodvisne spremenljivke modela.....	54
Preglednica 29: Začetne vrednosti odvisnih spremenljivk pri stabilnem sistemu.....	58
Preglednica 30: Občutljivost (%) na zmanjšanje posameznega parametra za -50%	62
Preglednica 31: Občutljivost (%) na povečanje posameznega parametra za +50%	62

KAZALO SLIK

Slika 1: Zemljevid mariborskega Mestnega parka danes (http://maribor.uni-mb.si)	5
Slika 2: Celotno prispevno območje Treh ribnikov z izrisanimi plastnicami	11
Slika 3: Digitalni model reliefa celotnega prispevnega območja	12
Slika 4: Shema vodozbirnega območja	12
Slika 5: Pokrovnost tal širšega območja Treh ribnikov (ARSO, 2005).....	13
Slika 6: Preliv, ki povezuje drugi ribnik.....	14
Slika 7: Z rešetko zaščiten iztok iz prvega.....	14
Slika 8: Iztok meteorne kanalizacije v drugi ribnik..	15
Slika 9: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na povp. prosojnost (OECD, 1982)...	20
Slika 10: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na totalni fosfor (OECD, 1982)	21
Slika 11: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede povp. letni klorofil a (OECD, 1982)21	
Slika 12: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na max. klorofil a (OECD, 1982)....	22
Slika 13: Vollenweiderjev graf za izračun trofičnega stanja jezer (Jørgensen & Bendoricchio, 2001)	32
Slika 14: Šest strani v programu Excel za izračun in oceno stanja ribnika	33
Slika 15: Stran – »Vhodni podatki«. Prikaz vnosa vhodnih podatkov.	34
Slika 16: Stran – »Vhodni podatki« Določitev povezanosti ribnikov med seboj	35
Slika 17: Stran – »Ocena evtrofnosti« prikazuje rezultate izračunov.....	36
Slika 18: Stran – »Želeno stanje«.	37
Slika 19: Stran – »Predlagane rešitve«	38
Slika 20: Enostavna shema kroženja fosforja v vodnem ekosistemu (prirejeno po EPA).....	39
Slika 21: Proces kopičenja in sproščanja fosforja iz sedimentov (prirejeno po Jørgensen & Bendoricchio, 2001).....	40
Slika 22: Konceptualni model primarne produkcije	41
Slika 23: Osnovni prikaz modela Treh ribnikov izdelan s programsko opremo Stella	52
Slika 24: Konceptualni diagram fosforjevega kroga izdelan s programom Stella.....	53
Slika 25: Mesečna temperatura vode v ribnikih za obdobje enega leta.	55
Slika 26: Dotok fosforja iz lastnega povodja v prvi ribnik	56
Slika 27: Dotok fosforja iz lastnega povodja v drugi ribnik	56
Slika 28: Dotok fosforja iz lastnega povodja v tretji ribnik.....	56

Slika 29: Simulacija dogajanj v 3. ribniku tekom enega leta (osnovni zagon modela).....	58
Slika 30: Simulacija dogajanj v 2. ribniku tekom enega leta (osnovni zagon modela).....	59
Slika 31: Simulacija dogajanj v 1. ribniku tekom enega leta (osnovni zagon modela).....	59
Slika 32: Koncentracija fitoplanktona v časovnem obdobju od 1. aprila do 15. maja.	64
Slika 33: Prameter μ_{\max_fito} za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)	77
Slika 34: Prameter μ_{\max_zoo} za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)	77
Slika 35: Prameter k_{rel_det} za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj).....	78
Slika 36: Prameter: k_s_fito za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj).....	78
Slika 37: Prameter: k_s_zoo za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj).....	79
Slika 38: Prameter: m_fito za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)	79
Slika 39: Prameter: m_zoo za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj).....	80
Slika 40: Prameter: Θ_1 za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj).....	80
Slika 41: Prameter: Θ_2 za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj).....	81
Slika 42: Prameter: Θ_3 za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj).....	81

XII Mičić, T. 2006. Matematični model kakovosti Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku.
Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

DMR	digitalni model reliefa
DMV	digitalni model višin
STELLA	Structural Thinking, Experiential Learning Laboratory with Animation
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
VGP	vodnogospodarsko podjetje
BPK	biokemijska potreba po kisiku
KPK	kemijska potreba po kisiku

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Retencija	ali zadrževanje. Del padavin, padlih na prispevno površino, ki v določenem obdobju ne odteče kot površinski tok. (Mikoš, M. et al., 2002)
Evaporacija	ali izhlapevanje. Izhlapevanje vode s površine golih tal, izločanje vodne pare s proste gladine vode pri temperaturah pod vreliščem.
Evapotranspiracija	Količina vode, ki preide v ozračje iz tal z izhlapevanjem in transpiracijo rastlin.
Evtrofikacija	ali bogatenje s hranili. Bogatenje vode s hranili, zlasti z dušikom in fosforjem, ki spodbujajo rast alg in višje razvitih rastlin.
Primarni producenti	oz. proizvajalci so organizmi (npr. rastline), ki s pretvorbo sončne energije vežejo anorganski ogljik in druge anorganske snovi v organske. (Gosar, 1973)
Preliv	ali prelivni objekt. Objekt, čez katerega teče prelivna visoka voda. (Mikoš, M. et al., 2002)
Zamuljevanje	Proces kopičenja in dvigovanja dna vodotoka ali vodnega telesa zaradi usedanja drobnih plavin (Mikoš, M. et al., 2002)
Matematični model	Model, ki sloni na procesih, ki so predstavljeni v obliki matematičnih enačb.

UVOD

Razvite države v svetu se danes, zaradi nekontroliranega razvoja urbanizacije in številnih človeških posegov v okolje, soočajo z vedno večjim problemom onesnaženja vode v ribnikih in jezerih iz točkovnih in razpršenih virov. Degradacija vodnega okolja in vodnih virov je danes predmet razprave po celem svetu.

Iz teh razlogov je potrebno vedno večjo pozornost posvečati urejanju vodnih habitatov. V nasprotju z dosedanja prakso v svetu, kjer so kot problem obravnavali samo jezero oziroma ribnik, je potrebno obravnavati problem celostno. Upoštevati je potrebno vse medsebojne vplive med vodnim telesom, prispevnimi površinami in človeško dejavnostjo.

Eno najpomembnejših orodij pri upravljanju z vodami v prihodnosti bo zagotovo matematično modeliranje. Za izbiro pravega matematičnega modela moramo najprej določiti natančen in želen cilj, ki ga želimo doseči z uporabo določenega modela. Vendar se je pri uporabi modelov potrebno zavedati, da z modeli poenostavljamo realnost, zato je potrebno biti pri uporabi rezultatov, ki jih da model, zelo pazljiv in natančen. V naravi se pogosto pojavijo presenečenja oziroma nepričakovani pojavi, zato je potrebno razviti fleksibilno strategijo upravljanja, ki se veliko lažje spopada s takšnimi dogodki kot dogmatična strategija (Straškraba et al., 1999).

Namen diplomske naloge je bil spoznati se z orodji matematičnega modeliranja in ta način upravljanja z vodami približati širši populaciji ljudi na enostaven in razumljiv način. Pridobljeno znanje smo uporabili pri izdelavi najprej enostavnega in nato kompleksnejšega dinamičnega matematičnega modela Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku. Na poti do tega cilja je bilo potrebno proučiti zgodovino in dosedanje posege na tem območju ter se spoznati z obstoječimi matematičnimi modeli vodnih ekosistemov.

Naloga je razdeljena na sedem poglavij, in sicer v prvem poglavju je na kratko predstavljena zgodovina mestnega parka ter nastanek in raba Treh ribnikov v preteklosti.

Edini večji poseg na ribnikih se je zgodil v začetku osemdesetih let prejšnjega stoletja. Stanje ribnikov je zaradi dotokov tesno povezano z naseljem Ribniško selo, ki se razprostira severno od ribnikov, zato je projekt sanacije zajemal tudi to območje. Projekt sanacije in dejanska izvedba del sta podrobneje predstavljena v drugem poglavju diplomske naloge.

Tretje poglavje obsega opis stanja danes. V njem sem opisala stanje prispevnih površin in kvaliteto vode glede na opravljene meritve.

Četrto poglavje zajema opis enostavnega in dinamičnega modela fosforja v ribnikih. Eden od ciljev te diplomske naloge je bil, da izdelamo enostavni model za oceno stanja vodnega telesa v takšni obliki, da bo uporaben tudi za uporabnike, ki nimajo inženirskega predznanja. Izdelali smo Vollenweiderjev model v Excelu, ki jasno in pregledno prikaže rezultate obremenitve vodnega telesa s fosforjem, ter ga uvrsti v ustrezno trofično stanje po OECD (Jørgensen, 1989). V sklopu opisa dinamičnega modela so v tem poglavju podrobneje opisani tudi procesi in enačbe, ki nastopajo pri kroženju fosforja v vodnem ekosistemu.

V petem poglavju so prikazani rezultati obremenitve Treh ribnikov, ki smo jih dobili z enostavnim in dinamičnim modelom. Pri enostavnem modelu smo naredili izračun obremenitve na dva načina in ju primerjali med seboj. Pri prvem načinu izračuna obremenitve ribnikov s fosforjem nismo upoštevali opravljenih meritev na dotokih, temveč smo upoštevali samo spiranje iz lastnih prispevnih površin ter onesnaženje iz padavin. V drugem načinu izračuna po Vollenweiderjevem modelu pa smo upoštevali opravljene meritve na dotokih.

Za izdelavo dinamičnega modela fosforjevega kroga smo uporabili programsko opremo Stella (www.iseesystems.com), s pomočjo katere smo na podlagi grafičnih blokov izdelali fosforjev krog. Stella na ta način omogoča uporabniku vizualni pregled nad količinami, ki v krog vstopajo in iz njega izstopajo. Da smo ugotovili, kateri parametri v modelu so najbolj občutljivi smo naredili tudi analizo občutljivosti.

Rezultate, ki sem jih dobila z modeli, sem primerjala med seboj in jih komentirala v šestem poglavju.

V sedmem poglavju so povzeti zaključki in ugotovitve ter podana navodila za nadaljnje delo.

1 ZGODOVINA

1.1 Nastanek mariborskega Mestnega parka

Mestni parki imajo svojega predhodnika v Ljudskem vrtu, ki je začel nastajati leta 1843, ko je bila zgrajena Villa Langer na sredini privatnega parka, ki je bil odprt tudi za javnost. Leta 1847 je občina odkupila ves park, skupaj z vilo in odtlej je vrt služil tudi raznim rekreativnim in športnim namenom, zabavi in prireditvam. Med leti 1905 – 1930 so dele ljudskega vrta postopoma spreminjali v športna igrišča: na vzhodu v nogometno igrišče, na zahodu v tenis igrišče (Povzeto po Pirkmajer, 1979).

Glavni mestni park je nastal ob grajskem drevoredu leta 1872 na zemljišču, ki ga je občina 1871 odkupila od grofa Brandisa. Vzhodno od drevoreda je tekkel potok od treh ribnikov do mestnega jarka.

Novi del mestnega parka je bil zasajen 1889-1896 po prvo nagrajenem načrtu dr. Juliusa Feldbacherja. (povzeto po Pirkmajer, 1979) V sklopu izgradnje novega dela mestnega parka je bil leta 1890 zgrajen glasbeni paviljon, in sicer na hribčku, ki je nastal iz odvečnega materiala ob izkopu ribnika.

1.2 Nastanek in zgodovina Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku

Trije ribniki predstavljajo območje doline, ki leži med Piramido in Mestnim hribom. V tej dolini se je razvilo Ribniško selo. V vseh Slovenskih goricah je bilo nekoč nad 140 ribnikov, do danes pa se jih je ohranilo manj kot dvajset, med katere sodijo tudi trije ribniki v mariborskem Mestnem parku (Slika 1).

Trije ribniki so najverjetneje srednjeveškega izvora. V začetku so to bili akumulacijski bazeni, v katerih se je zbirala voda za polnjenje jarkov pod mestnim obzidjem v času turških vpadov, in sicer leta 1445 je cesar Friderik izdal povelje oskrbnikom gornje-mariborskega gradu, Konradu Herlenfelderju in Andreju Trauttmansdorfferju, da morata potok iz Treh ribnikov speljati v mestni jarek.

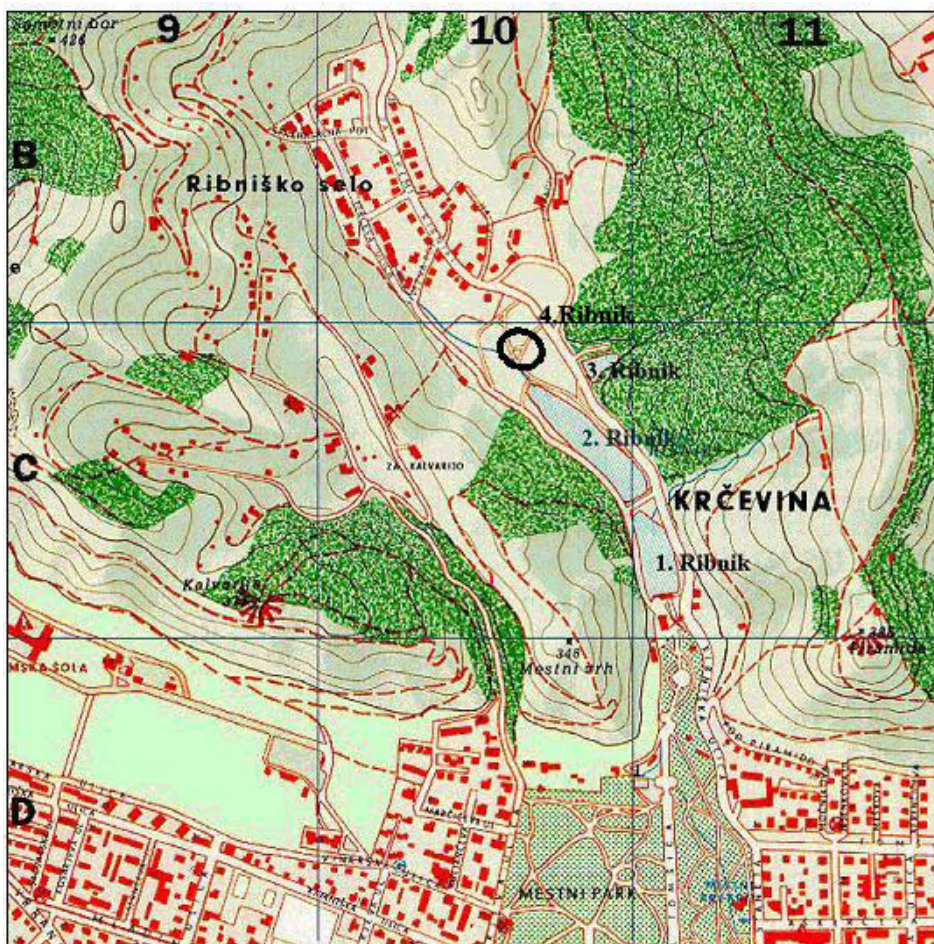
- 4 Mičić, T. 2006. Matematični model kakovosti Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku. Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.

Potoka izza Kalvarije (Barbarski potok) in Piramide (Triribniški potok) sta dovajala vode v mestni jarek pred mestnim obzidjem, ki so ga v času vojne nevarnosti napolnili z vodo. (Povzeto po Pirkmajer, 1979)

V mariborskem glasilu Komunala je bil novembra leta 1978 objavljen članek Mirka Šoštariča z naslovom »Trije ribniki«, iz katerega lahko povzamemo naslednje dogajanje okrog Treh ribnikov:

- leta 1445 je tudi dokumentarno omenjen mestni jarek, potok skozi današnji park in Trije ribniki. Ker potok tedaj ni tekkel po svoji naravni strugi (današnji potok v mestnem parku), ampak po nasipu (danes kostanjev drevored v mestnem parku severno od glasbenega paviljona) do mestnega jarka, bi po nalogu deželnega kneza morali obnoviti obzidje, očistiti Trije ribnike ter vrniti potok skozi park z nasipa v prvotno strugo.
- V letih 1525 – 1556 so bile obnovljene mestne utrdbe ter zgrajene nove, v tej akciji so bili gotovo obnovljeni tudi Trije ribniki.
- Leta 1847 je razen treh ribnikov bil še četrti. Po mnenju pokojnega Vončine je bil četrti ribnik v sotočju potokov nad drugim ribnikom, močvirni travnik, ki so ga v času pred sanacijo zasipavali z blatom, izkopanim v ribnikih (Slika 1).
- Leta 1871 je bilo v prostoru tretjega ribnika civilno strelišče; v gozdu so še danes vidni nasipi, ki so lovili krogle.
- Leta 1884 je olepševalno društvo že vzdrževalo drsališče na ribniku, leta 1898 pa je društvo imelo dohodke od čolnarne pri Treh ribnikih.
- Tretji ribnik so napajali izviri, ki so pritekali iz gozda okoli njega. Ko je lastnik baron Twickl te gozdove malo pred prvo svetovno vojno posekal, so izviri skoraj presahnili.

- Medtem, ko je čolnarna pri spodnjem ribniku obstajala že pred letom 1905, so okoli 1925 zgradili sedanjo zidano čolnarno, ki so ji takrat pravili »žabji grad«.



Slika 1: Zemljevid mariborskega Mestnega parka danes, z označenimi Tremi ribniki ter z vrisanim 4. ribnikom, ki ga po sanaciji leta 1980 ni več. (<http://maribor.uni-mb.si>)

Iz tega kratkega opisa lahko povzamemo kot sklepno ugotovitev, da so Trije ribniki z ožjim in širšim območjem enkraten primer prehoda mestnega jedra prek urejenih površin parka s promenado v naravno okolje. Gre za krajinsko bogat, členjen prostor, ki so mu dali obeležje trije ribniki z okoliško naravno in kulturno dediščino. Mestni park, Piramida, Trije ribniki in Kalvarija imajo kulturno-pričevalno (krajevna značilnost), rekreacijsko (sprehodi, razgledišča, počivališča, akvarij, ribniki), krajinsko oblikovno in učno-vzgojno namembnost (Pirkmajer, 1979).

2 DOSEDANJI UKREPI ZA IZBOLJŠANJE STANJA RIBNIKOV

2.1 Projekt sanacije Treh ribnikov

Sanacija Treh ribnikov je potekala od leta 1979 do leta 1982. Leta 1979 je bil objavljen članek v dnevnem časopisu Večer, kjer je bilo zapisano:

»Trije ribniki (ki to že leta niso več) so zavoljo svoje zanemarjenosti dovolj dolgo jezili Mariborčane, a jih ne bodo več. Medtem ko so manjša preureditvena dela že začeli (vsaj pri tem je bila suša dobrodošla) bodo avgusta zasadili lopate prav zares. Že jeseni naj bi uredili oba ribnika (ju tudi napolnili z vodo) in njuno okolje, če bodo pravočasno na voljo lokacijska in druga dovoljenja, pa naj bi se že jeseni lotili območja južno od prvega ribnika in severno od drugega (plato pod Ribniškim selom).« (Večer, 1979)

Celovit projekt obnove območja Treh ribnikov je izdelal arhitekt Tom Pirkmajer. Nosilec projekta je bil Inženiring biro, sodelovali pa so še Vodnogospodarsko podjetje Maribor, SOZD Komunala, DES in ZUM. VGP – Projektivni biro je pripravil projekt čiščenja usedlin iz ribnikov in ureditve deponije ter dokumentacijo za ureditev brežin in sanacijo prelivnih objektov. Inženiring biro je pripravil dokumentacijo za ureditev ceste (proti prašna zaščita) in peš poti.

Izvajanje del se je začelo spomladi 1980.

2.1.1 Stanje ribnikov pred sanacijo

Skozi mestni park vodi promenada, ki povezuje Tri Ribnike z mestnim jedrom. Ta promenada se je takrat na severnem koncu parka končala brez zaključka. Tukaj se je začelo področje Treh ribnikov, ki je bilo neurejeno in zanemarjeno.

Od konca starega dela promenade se teren v treh platojih dviga proti prvemu ribniku. Ti platoji so bili že urejeni ob gradnji starega dela promenade, ker je bilo predvideno nadaljevanje te poteze.

Mag. Niko Stare kraj. arh. je v članku časopisa Večer zapisal:

»Postavlja se vprašanje, ali obstoječo promenado – enako ko je – nadaljevati proti gostišču oziroma k Trem ribnikom. Moje mnenje je, da tako nadaljevanje ni primerno. Zaradi lažje predstave bi omenil park Tivoli v Ljubljani, kjer je stanje podobno. Nadaljevanje promenade v Tivoliju je opravičljivo, saj se lahko konča z izredno lepo turnsko graščino. Toda vrnimo se v Maribor, kjer imamo povsem drug primer in kjer ni mogoče tako nadaljevati promenado in jo skleniti na takšen način. Rešitev bi bila v kompromisu med sedanjo promenado in sodobnim oblikovanjem v krajinski arhitekturi. To pomeni današnjo promenado skleniti na primer s platojem, s pogledom na Piramido, nadaljevanje promenade pa sproščeno prilagoditi krajini ob upoštevanju že obstoječe vegetacije in konfiguracije terena. Seveda pa je treba nadaljevanje oblikovno in vsebinsko razčleniti s poudarkom na socialni vsebini. Pri ureditvi treh ribnikov pa moramo upoštevati ekološke parametre, to pomeni ohraniti moramo naravne sisteme oziroma jih obnoviti in jim omogočiti medsebojno delovanje. Plato za Tremi ribniki pa moramo urediti v igralni park.«

Na terasi pred prvim ribnikom je stala zaščitena stavba gostišča. Pri treh ribnikih, nekaj stanovanjskih hiš in stara čolnarna. Stara čolnarna stoji tik ob vodi in je bila delno zgrajena med leti 1920 – 1925.

2.1.2 Sanacija Treh ribnikov

2.1.2.1 Čiščenje dna ribnikov

Sanacija Treh ribnikov je zajemala tudi čiščenje usedlega blata na dnu ribnikov. Odstranitev vseh usedlin do trdne podlage ni predstavljala posebnega tehničnega problema, ker je bilo mogoče uporabiti običajno razpoložljivo mehanizacijo. Ta izvedba je bila povezana tudi z visokimi stroški izvedbe (VGP Maribor, 1976). Ribnike so pred začetkom del izpraznili in odstranjen mulj iz ribnikov deponirali na plato za drugim ribnikom (Pirkmajer, 1979).

2.1.2.2 Ureditev brežin

Presojo stabilnosti brežin I. ribnika »Treh ribnikov« v Mariboru je izdelal Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij Ljubljana novembra 1978 (Poročilo o presoji stabilnosti brežine ribnika 1 »Treh ribnikov« v Mariboru, 1978).

Najprej so opravili ročno sondažo terena, da se ugotovi globina trdne podlage – laporja v dnu ribnika in sicer v območju, kjer je predvidena spodnja žična košara.

Rezultati stabilnostnih analiz so dali naslednje ugotovitve (Poročilo o presoji stabilnosti brežine ribnika 1 »Treh ribnikov« v Mariboru, 1978):

- Naklon brežin naj bo 1:2 oziroma blažji (1:2.5, 1:3), namreč brežine pod naklonom 1:1.5 so v vseh profilih labilne.
- Žične košare v vznožju naj se položijo na lapornato podlago, katera se nahaja cca od 0,20 do 1,5 m pod očiščenim dnom ribnika.
- Stopničenje naj se vrši pod naklonom 1:1 oziroma blažjim naklonom
- Gramozno nasutje je potrebno komprimirati po plasteh.

2.1.2.3 Retencijska zmogljivost II. Ribnika

Ugotovljeno je bilo, da kljub malim obstoječim retencijskim možnostim ribnikov do takrat ni bilo večjih problemov oziroma prelivanja vode čez nasip, kar je tudi razumljivo z ozirom na takrat nerazvito odvodno mrežo. Vendar, ker se je s sanacijo Treh ribnikov pripravljala tudi projekt ureditve odvodnje v Ribniškem selu nad Tremi ribniki, je bilo potrebno ribnik obravnavati kot retencijski zadrževalnik. Pri tem so preučili predvsem retencijske zmogljivosti II. Ribnika, ki je največji.

Na osnovi preračuna retencijskega učinka so ugotovili, da retencijski prostor 19.000 m^3 zadostuje, da se val dotoka stoletne povratne dobe splošči tako, da znaša max odtok $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$, pri čemer je dvig gladine $\Delta H = 1,58 \text{ m}$.

Glede na majhno prispevno površino ribnika I ($P = 12,5 \text{ ha}$) lahko pri ocenjevanju ta prispevek zanemarimo in potrebujemo v tem ribniku dvig gladine le v taki meri, kolikor je potrebno, da se doseže hidravlično funkcioniranje obstoječih, a ustrezno prirejenih prelivnih

objektov. Ocenjeno je namreč, da lahko odtočni sistem iz prvega ribnika prevzame max odtok cca 1,5 m³/s. (VGP Maribor, 1976)

2.1.2.4 Ureditev okolice

Projekt ureditve območja Treh ribnikov je za diplomsko delo pripravil arhitekt Tom Pirkmajer decembra leta 1979. Pri ureditvi je hotel čimbolj ohraniti naravo s čim manj posegi vanjo, kar je bila tudi zahteva Zavoda za spomeniško varstvo Maribor.

Pokrajinski koncept oblikovanja je razdelil na tri območja (Pirkmajer, 1979):

- Navezava mestnega parka do prvega ribnika,
- Območje treh ribnikov,
- Območje od drugega ribnika do Ribniškega sela

V prvem primeru je območje obdelano kot nadaljevanje parkovnih rešitev in kot navezava na obstoječo promenado v spodnjem delu parka. Ker se je obstoječa promenada končala brez zaključka, je bila osnovna ideja ureditve tega območja nadaljevanje promenade proti platoju pred prvim ribnikom. Ta plato predstavlja nekakšen prehod iz parkovne ureditve v naravno območje treh ribnikov z gozdovi in vinogradi. Okoli ribnikov so speljane sprehajalne poti. Predvideni so bili tudi polkrožni pomoli, ki bi omogočali še boljši kontakt z vodo, vendar na koncu niso bili izvedeni. Območje od drugega ribnika do Ribniškega sela se z mehкими oblikami približa obliki okoliških hribov, urejena je zelenica in pešpoti. (povzeto po Pirkmajer, 1979)

2.2 Osnovna odvodnja za Tremi ribniki - Ribniško selo

2.2.1 Prvotni projekt

Projekt za pridobitev gradbenega dovoljenja za ureditev Treh ribnikov je vseboval tudi predlog ureditve osnovne odvodnje v Ribniškem selu.

Skupna velikost povodja meri 9,28 km² gričevnatega sveta. Približno 47% povodja pokriva gozdna zarast, 38% travniki in njive, 15% površine pa je poseljene. Najvišja kota povodja je 426 m, najnižja pa 212,40 m. Dolžina povodja je 1300 m, najdaljša pot vodnega toka od skrajne točke povodja do izliva v ribnik pa približno 900. (VGP Maribor, 1980)

Nekoč je stari Ribniški potok odtekal skozi območje naselja po dnu doline v dveh strugah. Strugi vodotoka je uničila obstoječa zazidava, vrtovi in krajevna cesta, ki ležijo na strugi starega Ribniškega potoka. Tako so se nizke vode zaradi uničenja struge porazgubile, višje vode so odtekale delno tudi v kanalizacijo, visoke vode pa so odtekale preko vrtov in dvorišč v obliki lokalnih poplav. Ker imajo odprti odvodniki večjo prevodno sposobnost, možnost sprejemanja dotokov vzdolž celotne trase in ozračnost vode, je bil predviden odprt odvodnik vzdolž naselja po najnižji legi doline.

V vseh nadaljnjih ureditvah so stremeli za tem, da bo odtekalo čim več vode neovirano v ribnik. (povzeto po VGP Maribor, 1980)

2.2.2 Izveden projekt

Kot je zgoraj napisano, je prvotni projekt iz leta 1980, katerega je izdelal VGP Maribor, predvideval rešitev odvodnje z odprtim kanalom po najnižjem delu obravnavanega območja oz. po trasi nekdanjega urejenega potoka, kar bi omogočilo nemoten odtok 100-letnih povratnih visokih vod $Q = 4,30 \text{ m}^3/\text{s}$ (VGP Maribor, 1985).

Do realizacije omenjenega projekta ni prišlo, ker se prizadeti lastniki parcel s tako rešitvijo niso strinjali. Medtem pa je stanovanjska zadruga, ki je v tem naselju takrat gradila vrstne hiše, morala nadaljevati z vsemi deli in tako je bilo izvedeno cca 227,0 m kanaliziranega odvodnika, vmesni del v dolžini cca 190 m pa so naredili naknadno.

V novem naselju so torej bile zgrajene kanalske in drenažne mreže, ki omogočajo odtok precejšnjemu delu meteornih vod. S tem je odvodnik razbremenjen in je s svojo prispevno površino $F = 0,8 \text{ km}^2$ sposoben prevajati vsaj 10-letne povratne visoke vode (povzeto po VGP Maribor, 1985)

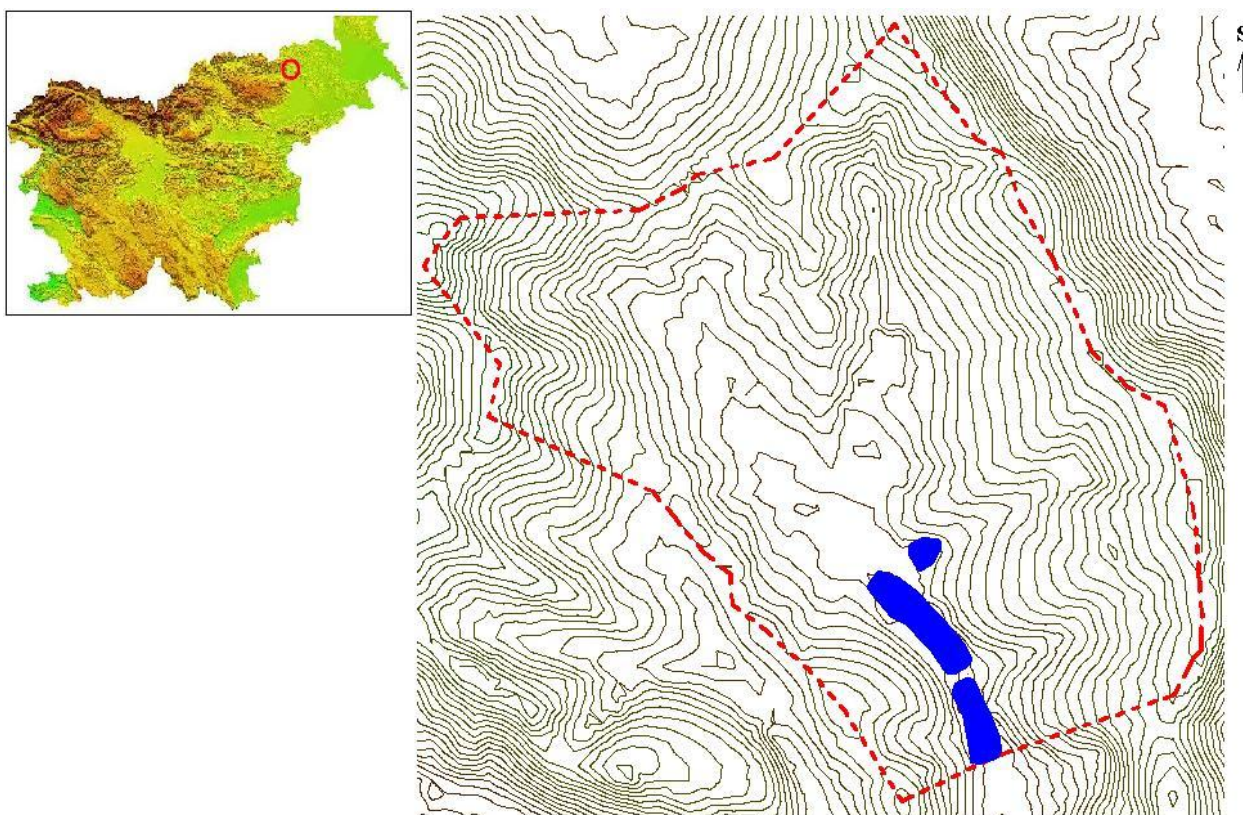
2.3 Zadnja sanacija Treh ribnikov

Od začetka osemdesetih let, ko so bila končana zadnja ureditvena dela v primeru sanacije Treh ribnikov, pa do leta 2000 ni bilo večjih posegov v ribnike. Leta 2000 je podjetje Florina, ki je tudi upravljalec ribnikov, očistilo in saniralo tretji ribnik, medtem ko je celjsko podjetje Hidronik izvajalo poskusni projekt bistrenja vode v drugem ribniku (Vrbnjak, 2000). Leta 2001 so ribiči opravili izlov rib iz drugega ribnika, saj so ugotovili, da je v ribniku preveč rib (Vrbnjak, 2001).

3 OCENA STANJA DANES

3.1 Prispevne površine

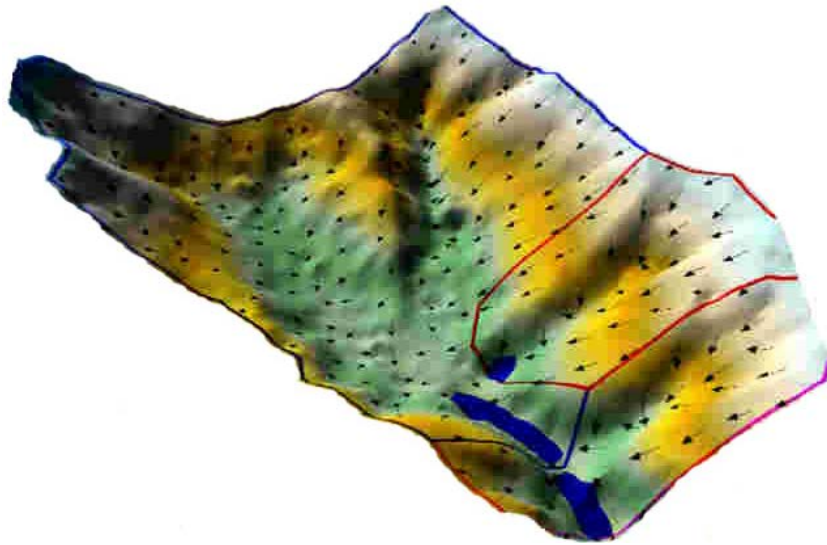
Prispevne površine Treh ribnikov smo izračunali s programom Surfer 8.0. Najprej smo izdelali digitalni model višin (DMV) in izrisali plastnice (Slika 2), na podlagi katerih smo izrisali konture prispevnih površin za celotno območje in za vsak ribnik posebej.



Slika 2: Celotno prispevno območje Treh ribnikov z izrisanimi plastnicami.

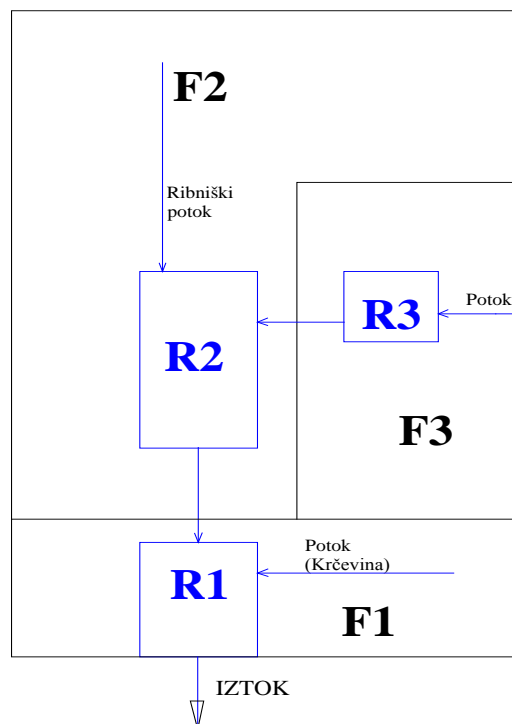
S programom Surfer smo prav tako izdelali digitalni model reliefa (Slika 3) in nato izračunali prispevne površine za vsak ribnik. Za boljšo predstavbo kako pada teren, smo dodali še puščice, ki ponazarjajo padec terena.

Na sliki 3 odtenki rjave barve prikazujejo območja z večjo nadmorsko višino, medtem ko odtenki zelene barve predstavljajo nižinske predele.



Slika 3: Digitalni model reliefa celotnega prispevnega območja z vrisanimi prispevnimi površinami posameznega ribnika in puščicami, ki ponazarjajo smer padca terena.

Zaradi boljše preglednosti smo naredili še poenostavljeno shemo prispevnih površin Treh ribnikov (slika 4).



Slika 4: Shema vodozbirnega območja, kjer so R1, R2 in R3 oznake za ribnike, F1, F2 in F3 pa oznake za lastne prispevne površine posameznega ribnika.



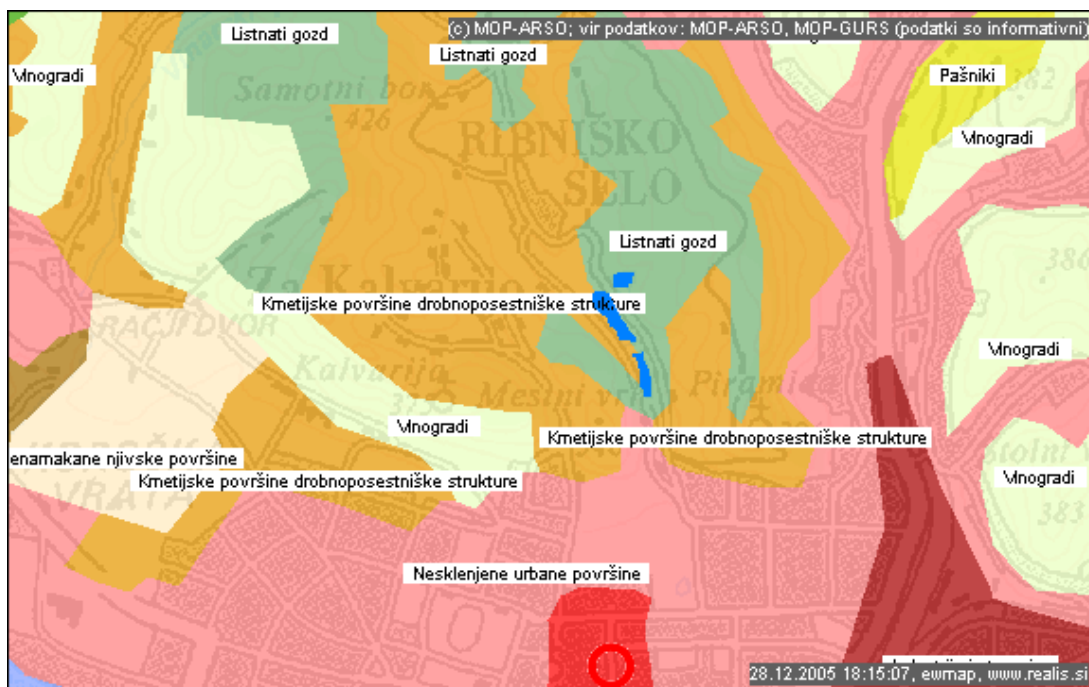
V preglednici 1 so povzeti izračuni za prispevne površine posameznega ribnika. Celotno prispevno območje za vse tri ribnike obsega približno 95 ha. Največji delež lastnih prispevnih površin pripada drugemu ribniku (68 ha), ki je tudi po velikosti največji (1,2 ha), sledi mu tretji ribnik, ki je najmanjši izmed ribnikov, z lastnimi prispevnimi površinami v skupni velikosti 15 ha in nazadnje še prvi ribnik z 12 ha lastnih prispevnih površin, sicer pa skupaj 95 ha.

Preglednica 1: Velikost lastnih prispevnih površin za posamezen ribnik in velikost ribnikov

	1. Ribnik	2. Ribnik	3. Ribnik
Površina lastnega povodja [ha]	11,95	67,86	15,22
Površina celotnega povodja [ha]	95,03		
Površina ribnika [ha]	0,72	1,21	0,12

3.1.1 Pokrovnost tal širšega območja

Kot že omenjeno, se trije ribniki nahajajo v mariborskem Mestnem parku, ki na severu prehaja v Ribniško selo na jugu pa ga omejuje mestno središče. Slika 5 prikazuje rabo prostora, oz. tal v neposredni okolici in na širšem območju ribnikov.



Slika 5: Pokrovnost tal širšega območja Treh ribnikov. Za lažjo orientacijo so v sliko vrisani Trije ribniki. (ARSO, 2005)

Na vzhodni strani območja se razprostira listnati gozd, v katerem se nahaja tretji ribnik. Tretji ribnik od ostalih dveh ločuje asfaltna cesta, ki povezuje Ribniško selo s središčem Maribora. Na JZ in JV strani zapirajo območje trije hribi, in sicer Mestni vrh (348 m n.v.), Kalvarija (375 m.n.v.) in Piramida (386 m n.v.). Južna pobočja Kalvarije in Piramide so obdelana z vinogradi, ostale površine pa so pretežno listnati gozd. Na zahodni strani se neposredno ob drugem ribniku nahajajo individualne hiše, med katerimi je tudi nekaj takšnih, ki imajo kmetijske površine. Mestni park se na severu zaključi z večjo travnato površino in od tukaj preide v Ribniško selo. Ribniško selo sestavljajo individualne hiše z manjšim ali večjim pripadajočim dvoriščem, kjer so pogosto urjeni sadovnjaki ali manjši vrtovi.

3.2 Hidrologija in kanalizacijski sistem

Vsi trije ribniki so med seboj povezani. Drugi ribnik ima dotok Ribniškega potoka, tretji ribnik pa ima dotok manjšega potoka v gozdu. Tudi prvi ribnik ima dotok potoka, kar je razvidno iz slike 1, vendar je speljan s cevjo pod cesto neposredno v ribnik. Zaradi njegove majhnosti in nedostopnosti za izvajanje meritev, ga v okviru diplomske naloge nismo upoštevali. Dotoka v 2. in 3. ribnik v sušnem obdobju presahnetata. Tretji ribnik ima urejen talni izpust pod cesto v drugi ribnik, medtem ko je drugi ribnik s prelivom povezan s prvim (Slika 6). V prvem ribniku so ob paviljonu postavljeni trije odtoki, od tega dva odvajata samo visoke vode in sta v času nizkih pretokov suha. Vsi odtoki so zaščiteni z rešetko, ki ustavi večje odpadke, da ne pride do zamašitve (Slika 7). Voda iz prvega ribnika teče naprej v potoku do manjšega ribnika v južnem delu parka. Okoli ribnikov so urejene sprehajalne poti, v prvem ribniku pa je zadnjih nekaj let postavljen tudi vodomet.



Slika 6: Preliv, ki povezuje drugi ribnik s prvim



Slika 7: Z rešetko zaščiten iztok iz prvega ribnika.

Za Ribniško selo je zgrajena kanalizacija ločenega sistema, kar pomeni, da se meteorne in fekalne vode odvajajo ločeno. Fekalna kanalizacija je priključena na obstoječe kanalizacijsko omrežje za razbremenilnikom nad drugim ribnikom, tako da se te vode ne razbremenjujejo v sistem Treh ribnikov.

Meteorne vode ožjega zaledja (ceste, strehe, ...) se lovijo z ločenim sistemom kanalov. Pred zadnjim jaškom so nameščeni lovilniki olj in maščob, nato pa se kanali združijo s sistemom meteornih vod širšega zaledja in izlivajo v odprti jarek. Tik pred iztokom v ribnik, se na glavni meteorni kanal priključi meteorni kanal s Terčeve ulice. Voda iz meteornega kanala odteka v drugi ribnik (Slika 8). Meteorna kanalizacija poteka vzporedno z osjo cest ob robniku pločnika za pešce.

Odvod zalednih voda je urejen z odprtimi jarki. Dno jarkov je obloženo s kanaletami, brežine jarkov pa imajo nagib 1:2 in so zatravljene (VGP Maribor, 1982).



Slika 8: Iztok meteorne kanalizacije v drugi ribnik. Dotok Ribniškega potoka je zaradi sušnega obdobja na sliki suh.

3.3. Določitev kvalitete vode v ribnikih

Za doseganje dobre kvalitete vode je potrebno izvajati redno vzorčenje in analize kvalitete vode. Na območju Treh ribnikov se ne izvaja redno vzorčenje in analiza kakovosti vode v

ribnikih. Občasno vzorčenje izvede komunalno podjetje Nigrad, kadar v ribniku pride do morebitnega pogina rib ali v primeru, ko naključni sprehajalci sporočijo vidne spremembe v kakovosti vode (penjenje vode, oljni madeži, ...). (Nigrad, 2004)

3.3.1 Kvaliteta vode na dotoku v drugi ribnik na podlagi vzorčenja komunalnega podjetja Nigrad v Mariboru v obdobjih november 2004 in marec 2005

Monitoring meteorne kanalizacije je Nigrad izvajal zaradi preverjanja prisotnosti komunalnih vod v kanalih, ki se iztekajo v ribnike centralnega mestnega parka (Preglednica 2).

Preglednica 2: Rezultati analize vzorcev vode na dotoku v drugi ribnik za november 2004 in marec 2005 (Nigrad, 2005)

Parameter	Enota	Mejna vrednost (UI RS 35/96, 21/2003)	Izmerjene vrednosti			
			november		marec	
			glavni meteorni kanal	odprti kanal (Ribniški potok)	glavni meteorni kanal	glavni meteorni kanal + kanal s Terčeve
merilno mesto (oznaka na Prilogi A)			2	4	2	3
temperatura	°C	30	12,2	15,2	5,1	5,6
pH	-	6,5-9,0	7,89	7,65	7,83	7,86
neraztopljene snovi	mg/l	80	322	44	70	28
usedljive snovi	mg/l	0,5	30	1	0,9	<0,1
amonijev dušik	mg/l	10	0,72	<0,04	0,088	0,14
celotni vezani dušik	mg/l	/	2,84	3,5	2,68	2,55
celotni fosfor	mg/l	2	0,19	0,06	0,12	0,113
BPK ₅	mg/l	25	16	20	5	<3
KPK	mg/l	120	98	53	<30	<30
Skupno št. koliformnih bakterij	št./100ml	20000	/	/	4600	11000
Število fekalnih streptokokov	št./100ml	2000	/	/	4500	11000
Število koliformnih bakterij fekalnega izvora	št./100ml	12000	/	/	4600	11000

Na podlagi novembrskih meritev in analiz so ugotovili, da vzorec odpadne vode meteorne kanalizacije Ribniško selo – glavni meteorni kanal, glede na obseg meritev in rezultate preskušanja ne ustreza normativom, ki jih določa Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda iz virov onesnaženja (UI RS 35/96, 21/2003).

Normative sta v glavnem kanalu presegala parametra neraztopljene snovi in usedljive snovi, v odprtem kanalu pa koncentracija usedljivih snovi. Tako odpadna voda ni primerna za izpust v ribnik mestnega parka brez primerne predčiščenja. Prav tako so zaradi večje koncentracije kemijsko in biokemijsko razgradljivih snovi, sumili na prisotnost komunalnih odpadnih vod. (povzeto po Nigrad, 2004) Iz tega razloga so pri meritvah marca prav tako ugotavljali tudi prisotnost fekalnih bakterij v vzorcih. V vzorcu odpadne vode meteorne kanalizacije – glavni meteorni kanal iz meseca marca, presegata normative parametra usedljive snovi in število fekalnih streptokokov. V skupnem vzorcu, t.j. glavni meteorni kanal in kanal s Terčeve ulice, normative presegata parametra število fekalnih streptokokov in število koliformnih bakterij fekalnega izvora. Odpadna voda glavnega meteornega kanal prav tako vsebuje več neraztopljenih snovi (obremenitev z mineralnimi snovmi: pesek in blato), pralnih sredstev in manj fekalnih bakterij od odpadne vode po združitvi glavnega meteornega kanala ter priključka s Terčeve ulice. Iz analiz vzorcev odpadne vode so zaključili, da so na oba preiskovana kanala vezani občasni večji ali stalni manjši viri onesnaževanja. (Nigrad, 2005)

Kot sem že omenila je Nigrad za mejne vrednosti parametrov upošteval Uredbo o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadne vode iz virov onesnaženja. Glede na to, da se meteorna voda izliva neposredno v ribnik bi bilo potrebno upoštevati strožje kriterije, in sicer iz Uredbe o kakovosti površinskih voda za življenje sladkovodnih rib (UI RS, št. 46/2002).

3.3.2 Kvaliteta vode v ribnikih glede na opravljene meritve in analize v laboratoriju Katedre za zdravstveno hidrotehniko FGG

Vzorčenje (trenutni vzorec) smo izvedli avgusta 2005 in julija 2006, in sicer na vtoku v vsak ribnik in na iztoku iz prvega ribnika. Volumen vzorca je bil 2,5 L. Vzorčili smo po metodi ISO 5667-10 (ročno). Rezultati prvega vzorčenja so povzeti v Preglednici 3.

Preglednica 3: Rezultati analize vzorcev vode iz Treh ribnikov iz dne 24.8.2005

Parameter	Enota	Izmerjene vrednosti			
		Vtok v 3. ribnik	Vtok v 2. ribnik	Vtok v 1. ribnik	Iztok iz 1. ribnika
temperatura	°C	14,8	17,3	21,2	20,0
pH	-	6,40	6,41	6,52	6,75
O ₂ (nasičenost v %)	mg/l	9,8 (98)	10,6 (115)	9,0 (107)	9,8(112)
prevodnost	μS/cm	178	586	403	352
suspendirane snovi	mg/l	2	3	6	3
neraztopljene snovi	mg/l	54	80	21	3
anorganske neraz.sn.	mg/l	1	4	4	1
amonijev dušik	mg/l	0,09	0,30	0,23	0,29
nitritni dušik	mg/l	0,002	0,011	0,007	0,008
nitratni dušik	mg/l	0,2	1,7	0,8	0,3
celotni dušik	mg/l	0,3	2,1	1,0	0,6
ortofosfat	mg/l	1,81	0,92	0,84	0,72
celotni fosfor	mg/l	1,82	0,93	0,85	0,73
BPK ₅	mg/l	2	3	12	7
KPK	mg/l	3	6	15	9

Na podlagi meritev, ki smo jih naredili avgusta 2005, lahko ugotovimo, da je koncentracija celotnega fosforja največja na vtoku v tretji ribnik. Meritev za tretji ribnik Nigrad ni izvajal, zato ne moremo primerjati rezultatov kvalitete vode. Iz meritev je razvidno, da je na vtoku v drugi ribnik količina neraztopljenih snovi dosegla mejno vrednost 80 mg/l, kar ne preseneča, če primerjamo rezultat z meritvami podjetja Nigrad (november in marec), kjer ugotovimo podobna opažanja.

Meritve smo ponovili julija 2006 (Preglednica 4). Zaradi daljšega sušnega obdobja, je dotok v tretji ribnik presahnil, zato smo vzeli vzorec vode iz ribnika. Presahnil je tudi Ribniški potok, ki se izliva v 2. ribnik. Majhen dotok je bil iz meteorne kanalizacije. Prav tako je bil suh tudi preliv med drugim in prvim ribnikom, zato smo vzorec vode vzeli iz drugega ribnika malo višje od preliva. Na podlagi meritev, ki smo jih izvedli julija 2006 lahko ugotovimo, da je koncentracija fosforja na vtoku bistveno manjša kot pri meritvah avgusta 2005. Rezultati analiz so zelo podobni rezultatom analiz, ki so jih naredili v laboratoriju podjetja Nigrad. Poudariti je potrebno, da je bilo v času vzorčenja sušno obdobje, zato so bili pretoki dotokov v drugi in tretji ribnik zelo nizki. Mejno vrednost je presegel parameter neraztopljene snovi, in sicer na vtoku v prvi ribnik.

Preglednica 4: Rezultati analize vzorcev vode iz Treh ribnikov iz dne 18.7.2006

Parameter	Enota	Izmerjene vrednosti			
		3. ribnik	Vtok v 2. ribnik	2. ribnik	1. ribnik
temperatura	°C	23,0	13,7	25,6	23,8
pH	-	7,48	8,00	8,77	9,00
O ₂ (nasičenost v %)	mg/l	4,0 (48)	8,6 (85)	7,2 (88)	6,7 (78)
prevodnost	µS/cm	204	734	387	379
suspendirane snovi	mg/l	22	9	30	229
neraztopljene snovi	mg/l	69	71	87	26
anorganske neraz.sn.	mg/l	17	15	45	7
amonijev dušik	mg/l	0,27	0,40	0,25	0,67
nitritni dušik	mg/l	0,003	0,005	0,012	0,013
nitratni dušik	mg/l	0,3	0,6	0,2	0,3
celotni dušik	mg/l	0,6	1,1	0,5	1,2
ortofosfat	mg/l	0,09	0,13	0,13	0,05
celotni fosfor	mg/l	0,10	0,14	0,14	0,05
BPK ₅	mg/l	11	5	12	12
KPK	mg/l	38	49	43	39

3.3.3 Določanje stopnje trofičnosti po OECD kriterijih

Pri nas določamo trofičnost jezer/ribnikov po OECD evtrofnem programu iz leta 1982, katerega glavni nosilec je Vollenweider. Vollenweider je pri prvi klasifikaciji trofičnih stanj jezer (1976) s čisto kvantitativnega vidika upošteval razmerje med obremenitvijo s hranili iz vseh vrst virov, natančneje fosforja in dušika, ter trofičnim odzivom vodnega telesa na posamezni faktor. Ugotovil je, da je eden ključnih faktorjev povprečna globina vodnega telesa. Večja kot je globina, večja je lahko obremenitev vodnega telesa s fosforjem, preden nastopi evtrofično stanje. V petletnem obdobju je Vollenweider v svoji študiji klasifikacije trofičnosti zajel preko 200 vodnih teles iz zahodne Evrope, Severne Amerike, Japonske in Avstralije. (Lee, F.G., 2002) V nadaljevanju je Vollenweider posodobil klasifikacijo s tem, da je obravnaval povprečno koncentracijo klorofila planktonskih alg, kot funkcijo letne obremenitve s fosforjem, ki se normalizira s površino vodnega telesa, povprečno globino in hidravličnim zadrževalnim časom.

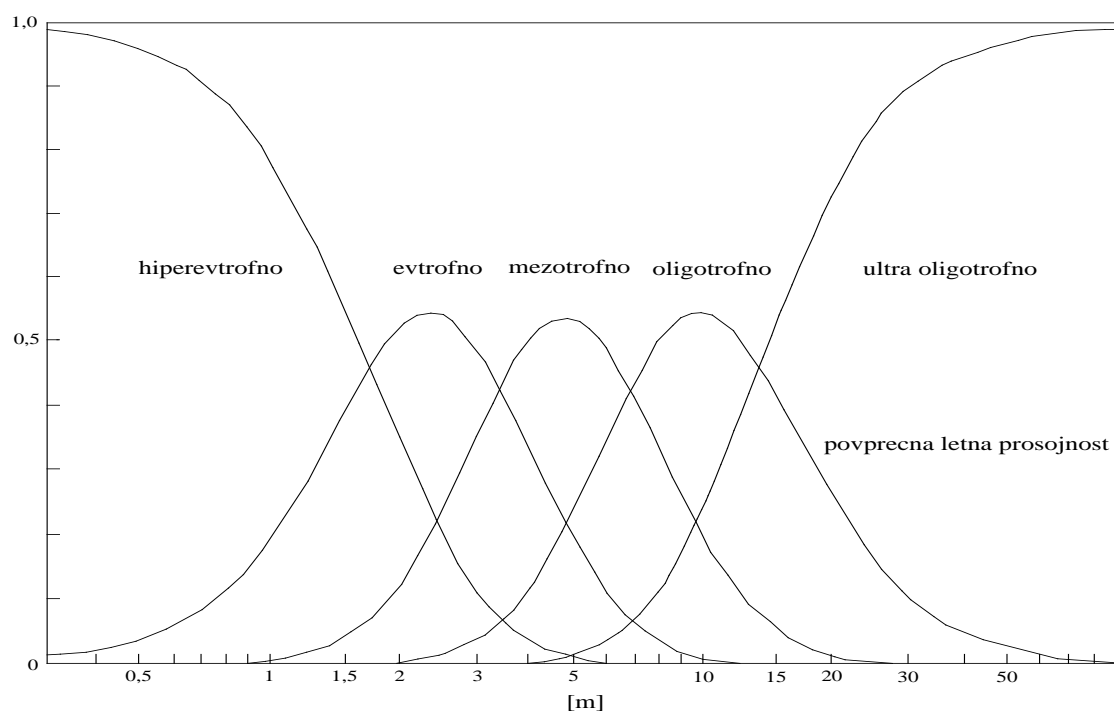
Trofično stanje jezera ni točno določeno. Tako lahko le z določeno verjetnostjo trdimo, v kateri razred trofičnosti spada vodno telo. (Jones et al., 1985). Vodno telo lahko uvrstimo v

pet kakovostnih razredov – trofičnih stopenj na osnovi povprečne letne vsebnosti celotnega anorganskega dušika, povprečne letne vsebnosti celotnega fosforja, povprečne letne in maksimalne vsebnosti klorofila a, ter povprečne in minimalne prosojnosti jezera, ki jo merimo s Secchi-jevo ploščo (Preglednica 5).

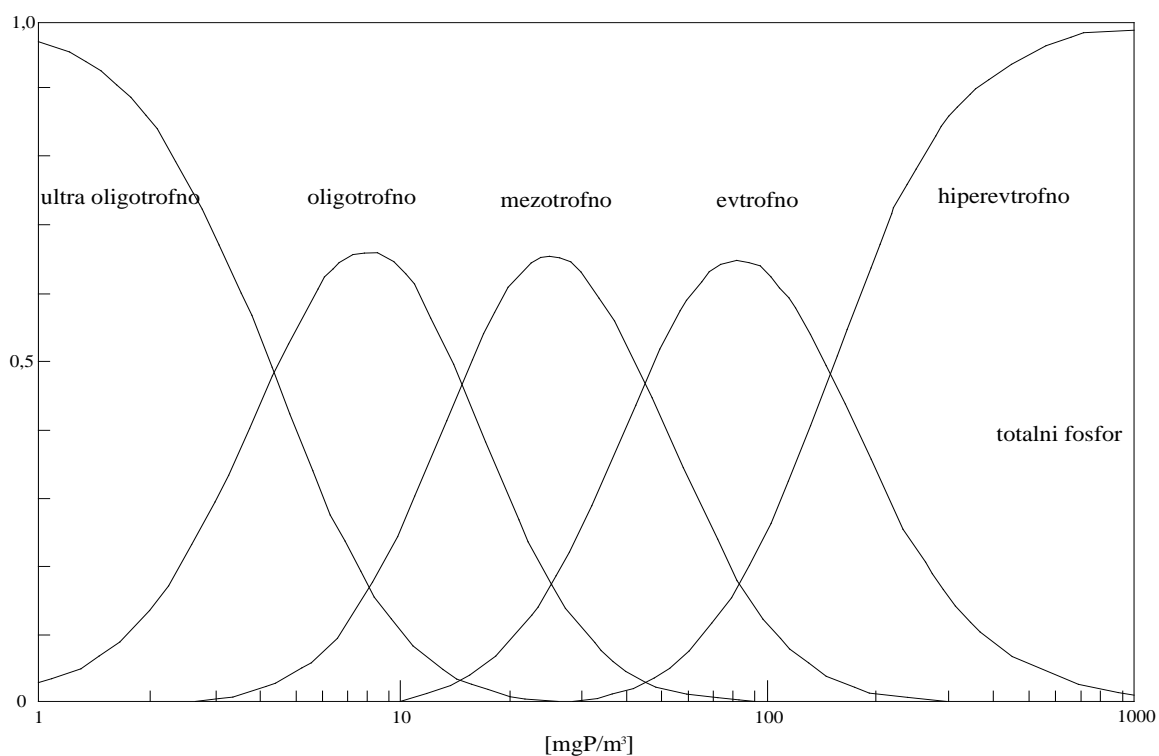
Preglednica 5: Parametri in trofične kategorije po OECD kriterijih (Zupan, 2001)

	totalni fosfor (povprečje)	anorganski dušik (povprečje)	prosojnost (povprečje)	prosojnost (minimalno)	klorofil a (povprečje)	klorofil a (maksimalno)
TIP JEZERA	µgP/l	µgN/l	m	m	µg/l	µg/l
ultraoligotrofno	< 4	< 200	> 12	> 6	< 1	< 2,5
oligotrofno	<10	200 - 400	> 6	> 3	< 2,5	< 8
mezotrofno	10 - 35	300 - 650	6 - 3	3 - 1,5	2,5 - 8	8 - 25
eutrofno	35 - 100	500 - 1500	3 - 1,5	1,5 - 0,7	8 - 25	25 - 75
hiperevtrofno	> 100	> 1500	< 1,5	< 0,7	> 25	> 75

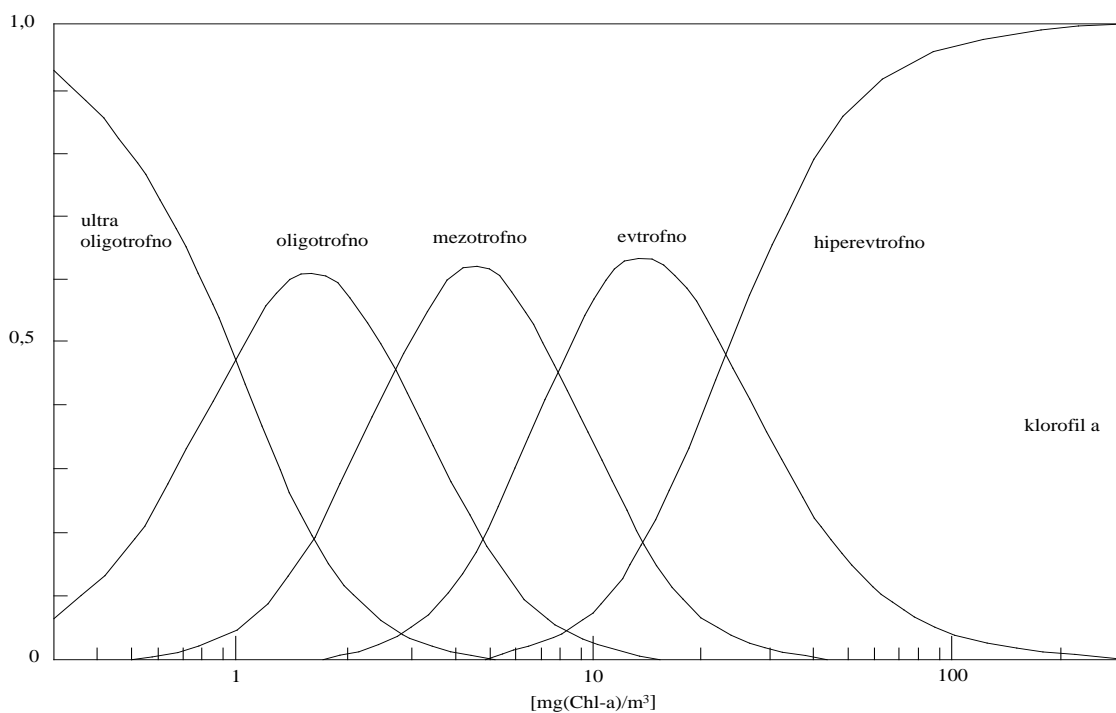
Slike 9, 10, 11 in 12 nam pomagajo pri odločitvi, v kateri razred trofičnosti lahko vodno telo uvrstimo.



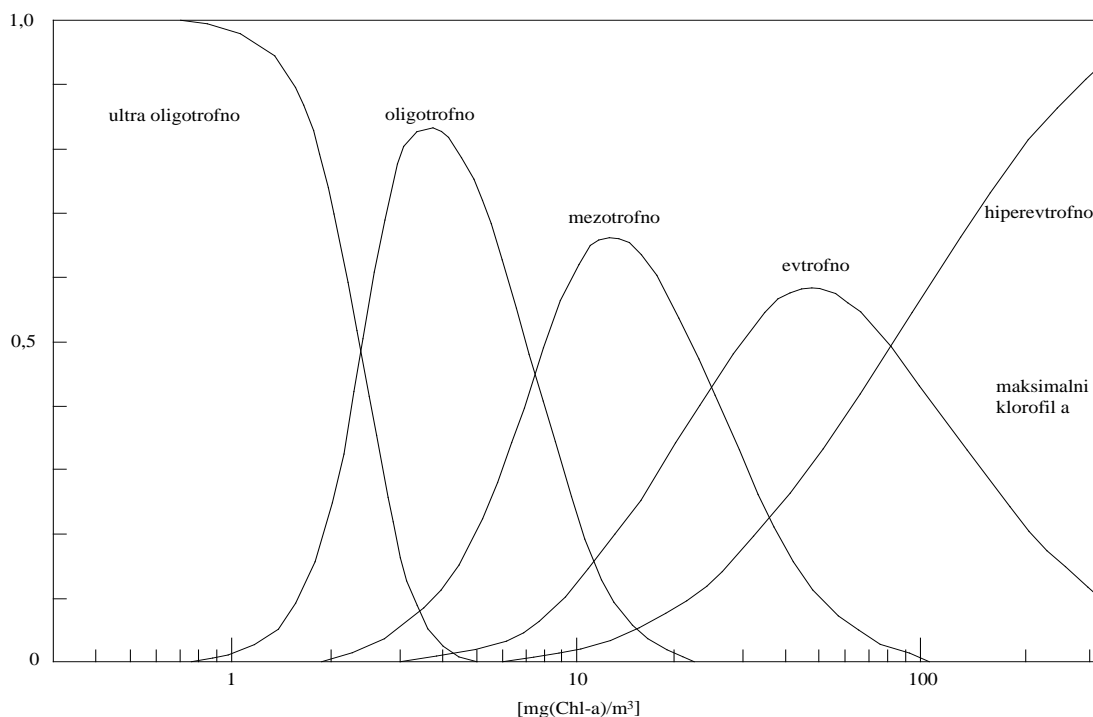
Slika 9: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na povprečno prosojnost (OECD, 1982)



Slika 10: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na totalni fosfor (OECD, 1982)



Slika 11: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na povprečni letni klorofil a (OECD, 1982)



Slika 12: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na maksimalni klorofil a (OECD, 1982)

V preglednici 6 so opisane in tipične značilnosti vodnega telesa za posamezno trofično stanje.

Preglednica 6: Osnovne značilnosti vodnega telesa v posameznem trofičnem stanju (University of Florida, 2002)

Trofično stanje	Značilnosti	Shema
OLIGOTROFNO	<ul style="list-style-type: none"> - dobra prosojnost (čista voda) - zelo malo vodnih rastlin - zelo malo rib - nizka primarna produkcija - peščeno dno 	
MEZOTROFNO	<ul style="list-style-type: none"> - zmerna vidljivost - zmerna primarna produkcija - srednje število vodnih rastlin 	
EVTOFNO	<ul style="list-style-type: none"> - visoka primarna produkcija - veliko vodnih rastlin, ki omogočajo življenje številnim živalskim vrstam 	
HIPEREVTROFNO	<ul style="list-style-type: none"> - motnost vode - najvišja stopnja primarne produkcije - veliko število živalskih in rastlinskih vrst 	

3.3.3.1 Uvrstitev Treh ribnikov v trofični razred po OECD kriteriju glede na opravljene meritve

Glede na meritve podjetja Nigrad in Katedre za zdravstveno hidrotehniko FGG lahko za uvrstitev ribnikov trofični razred uporabimo samo zadnje meritve FGG, ki so bile opravljene julija 2006. Ostale meritve niso primerne, saj je bila izmerjena koncentracija fosforja na dotokih in ne v samem ribniku.

Na podlagi preglednice 5 in slike 10 lahko uvrstimo ribnike v ustrezni trofični razred glede na izmerjeno koncentracijo totalnega fosforja v posameznem ribniku. Preglednica 7 prikazuje verjetnost uvrstitve ribnika v posamezni trofični razred.

Preglednica 7: Verjetnost uvrstitve posameznega ribnika v ustrezni trofični razred glede na opravljene meritve julij 2006

	ultraoligotrofno	oligotrofno	mezotrofno	evtrofno	hiperevtrofno
I. ribnik (P=50 µgP/l)	0%	1%	44%	51%	4%
II. ribnik (P=140 µgP/l)	0%	0%	10%	64%	26%
III.ribnik (P=100 µgP/l)	0%	0%	18%	62%	20%

Iz dobljenih rezultatov lahko zaključimo, da se vsi trije ribniki uvrščajo z več kot 50% verjetnostjo v evtrofni razred. Najbolj obremenjen je drugi ribnik s koncentracijo fosforja 140 µgP/l, sledi mu tretji ribnik in nazadnje še prvi ribnik. Dobljene rezultate ne moremo primerjati z rezultati, ki jih bomo dobili z uporabo modelov, saj so v času meritev bili vsi dotoki suhi, medtem ko smo za izračun v modelu predpostavili neko povprečno vrednost za obremenitev ribnikov s fosforjem iz dotokov.

4 UPORABA MODELOV ZA OCENO STANJA

Za oceno in napoved kvalitete vode v posameznem vodnem telesu si lahko pomagamo s številnimi okoljskimi matematičnimi modeli, za katere je značilno, da opisujejo glavne značilnosti ekosistema v matematični obliki. Matematični modeli niso docela natančen posnetek dejanskih procesov, razumeti jih moramo kot poenostavitve, ki odkrivajo trende ključnih kakovostnih sprememb, ki so za presojo kakovosti voda relevantne. Modeliranje kakovostnih procesov v naravnih vodah povezuje hidrološke, podnebne, hidravlične, morfološke, fizikalne, kemične in mikrobiološke zakonitosti in lastnosti jezera (Birska, 2004).

Pri tem je potrebno poudariti, da naše odločitve o nadaljnjih posegih v vodno telo nikakor ne smejo temeljiti samo na rezultatih modelov, temveč je potrebno okoljske modele obravnavati kot uporabno orodje, ki nam lahko pomaga pri nadaljnjih ukrepih.

Eden najbolj razširjenih procesov, ki so ga znanstveniki modelirali in je prisoten pri številnih vodnih sistemih (ribnikih, jezerih, akumulacijah,...), je eutrofikacija. Razvitih je že kar nekaj eutrofikacijskih modelov različne stopnje kompleksnosti. Pravo stopnjo kompleksnosti modela izberemo glede na razpoložljive podatke. Parametre oz. podatke dobimo z meritvami na terenu, z laboratorijskimi analizami in eksperimenti ali z umerjanjem modela. Iz tega lahko sklepamo, da ocena vrednosti parametrov ni nikoli brez napak. Napake, ki jih vnesemo v model skupaj s parametri, pripomorejo k nezanesljivosti napovedi modela.

4.1. Enostavni model

Kadar imamo na voljo malo podatkov, izberemo enostavnejše modele, kateri uporabniku prav tako dovolj dobro ponazorijo probleme, ki se pojavijo pri modeliranju eutrofikacije. Izdelavo enostavnega eutrofikacijskega modela lahko razdelimo na tri glavne korake (Jørgensen. & Vollenwider, 1989):

1. Določanje obremenitve s hranili
2. Določitev oz. napoved koncentracije hranil v sistemu
3. Ocena eutrofikacije

4.1.1 Določitev obremenitve sistema s hranili

Osnova vseh evtrofikacijskih modelov je določitev masne bilance. Ta nam pove, koliko snovi doteka iz prispevnih površin v ribnik, izteka iz ribnika ter koliko se jih zadrži ali pretvori v ribniku. Če nimamo na voljo podatkov pridobljenih z meritvami, lahko vnos hranil v vodno telo ocenimo s pomočjo empirično določenih vrednosti za vnos hranil v ribnik. Kadar imamo meritve, le-te integriramo preko celega leta. Skupno količino hranil vnesenih v vodno telo izračunamo tako, da seštejemo izračunani naravni vnos P in N iz prispevnih površin (I_{Pt} in I_{Nt}), naravni vnos P in N v vodno telo s padavinami (I_{Pp} in I_{Np}) ter umetni vnos P in N v vodno telo (I_{Pw} in I_{Nw}) (Jørgensen. & Vollenwider, 1989):

$$I_P [\text{mg/leto}] = I_{Pp} + I_{Pn} + I_{Pw} \quad (1)$$

$$I_N [\text{mg/leto}] = I_{Np} + I_{Nn} + I_{Nw} \quad (2)$$

Ta način določitve vnosa hranil v jezero se uporablja izključno takrat, ko nimamo podatkov pridobljenih z meritvami.

4.1.1.1 Izpiranje iz prispevnih površin

Za izračun deleža vnosa hranil iz prispevnih površin moramo poznati površino prispevnega območja (A_i) in klasifikacijo vsakega območja glede rabe tal in geološko sestavo. Preglednica 8 podaja količino hranil, ki se stekajo v vodno telo iz prispevnih površin glede na geološko klasifikacijo (Jørgensen. & Vollenweider, 1989).

Preglednica 8: Količina vnosa hranil iz prispevnih površin (Jørgensen & Vollenweider, 1989)

vrsta prispevne površine	E_P (mgP/m ² leto)		E_N (mgN/m ² leto)	
	metamorfne	sedimenti	metamorfne	sedimenti
gozdovi (povprečje)	0,7-9,0 (4,7)	7,0-18 (11,7)	130-300 (200)	150-500 (340)
gozdovi + pašniki (povprečje)	6,0-12,0 (10,2)	11,0-37,0 (23,3)	200-600 (400)	300-800 (600)

»Se nadaljuje...«

»...nadaljevanje«

vrsta prispevne površine	E_P (mgP/m ² leto)		E_N (mgN/m ² leto)	
	metamorfne	sedimenti	metamorfne	sedimenti
kmetijske površine:				
sadovnjaki	18		2240	
pašniki	15-75		100-850	
polja, njive	22-100		500-1200	

Skupni vnos fosforja (I_{Pt}) in dušika (I_{Nt}) iz prispevnih površin izračunamo kot seštevek vnosov iz posameznih območij:

$$I_{Pt} [mg/leto] = \sum_{i=1} A_i [m^2] \cdot E_{Pi} [mg/m^2 leto] \quad (3)$$

$$I_{Nt} [mg/leto] = \sum_{i=1} A_i [m^2] \cdot E_{Ni} [mg/m^2 leto] \quad (4)$$

Kot je že omenjeno v pod poglavju 3.1.1 se okrog treh ribnikov razprostira večinoma listnati gozd ter nekaj kmetijskih površin, katere predstavljajo predvsem manjši vrtovi in sadovnjaki zasebnih hiš. Glede na geološko klasifikacijo območje treh ribnikov uvrstimo med sedimente (Fridl et al., 1998).

V Preglednici 9 so na podlagi Slike 5 in predhodno izračunanih prispevnih površin določeni odstotki pokritosti prispevnih površin z gozdom ter s kmetijskimi površinami. Iz enačb 3 in 4 ter z uporabo preglednice 8 lahko nato izračunamo obremenitev posameznega ribnika iz prispevnih površin.

Preglednica 9: Obremenitev iz lastnih prispevnih površin Treh ribnikov

	velikost prisp. površin (ha)	Pokrovnost prispevnih površin		Obremenitev	
		gozd (%)	kmetijske površine (%)	I_{Pt} (kg P/leto)	I_{Nt} (kg N/leto)
I. ribnik	12	50	50	1,78	154,8
II. ribnik	68	40	60	9,67	748
III. ribnik	15	100	/	1,76	51

4.1.1.2 Obremenitev s hranili iz padavin

Na osnovi letne količine padavin P (mm/leto) lahko izračunamo letno obremenitev zaradi padavin. V pomoč nam je preglednica 10. (Jørgensen. & Vollenweider, 1989)

$$I_{PP} [mg/leto] = P \cdot C_{PP} \cdot A_S \quad (5)$$

$$I_{NP} [mg/leto] = P \cdot C_{NP} \cdot A_S \quad (6)$$

Kjer so: A_S ... površina jezera (m^2)

C_{PP} , C_{NP} ... koncentracija fosforja in dušika v padavinah (mg/l) (Preglednica 10)

Preglednica 10: Koncentracije hranil v padavinah (Jørgensen. & Vollenweider, 1989)

	C_{PP} (mgP/l)	C_{NP} (mgN/l)
količina P in N v dežju	0,025-0,1	0,3-1,6
(povprečje)	(0,07)	(1)

V preglednici 11 so prikazane letne padavine za obdobje petih let, in sicer za obdobje od leta 2000 do 2004. Za izračun obremenitve s hranili iz padavin vzamemo povprečje letnih padavin za to obdobje.

Preglednica 11: Izračun obremenitve s hranili iz padavin za posamezen ribnik

Leto	Skupne letne padavine (mm)	I_{PP} (kg/leto)			I_{NP} (kg/leto)		
		I. ribnik	II. ribnik	III. ribnik	I. ribnik	II. ribnik	III. ribnik
2000	937	0,472	6,7464	0,793639	11,3377	0,078708	1,1244
2001	868	0,437472	6,2496	0,735196	10,5028	0,072912	1,0416
2002	931	0,469224	6,7032	0,788557	11,2651	0,078204	1,1172
2003	742	0,373968	5,3424	0,628474	8,9782	0,062328	0,8904
2004	1051	0,529704	7,5672	0,890197	12,7171	0,088284	1,2612
	Povprečje	0,456523	6,52176	0,767213	10,96018	0,076087	1,08696

4.1.1.3 Obremenitev s hranili iz antropogenega onesnaženja

Za izračun antropogenega onesnaženja moramo poznati število prebivalcev na prispevnih površinah. Upoštevamo naslednje podatke:

- 1.) letna obremenitev s fosforjem znaša približno 800-1800 g P/(preb.let), medtem ko z dušikom pa 3000-3800 g N/(preb.let)
- 2.) z mehanskim čiščenjem odpadne vode se odstrani 10-15% hranil
- 3.) z biološkim čiščenjem odpadne vode (brez denitrifikacije) se odstrani 10-15% hranil
- 4.) z defosfatizacijo odstranimo 80-90% fosforja in z denitrifikacijo odstranimo do 90% dušika

Na osnovi zgornjih podatkov izračunamo vnos P (I_{Pw}) in vnos N (I_{Nw}) iz poseljenih območij, seveda upoštevaje neposreden dotok s kanalizacijo in pa posreden s prelivanjem iz ločene kanalizacije.

Poseljeni del območja treh ribnikov predstavlja Ribniško selo, ki se razprostira na severu mestnega parka. Po podatki statističnega urada Slovenije, je na območju Ribniškega sela 290 prebivalcev, katerih hiše so v večini priključene na obstoječe kanalizacijsko omrežje. Na podlagi meritev podjetja Nigrad, ki kažejo na prisotnost koliformnih bakterij v meteornem kanalu, lahko sklepamo, da je v naselju tudi nekaj takšnih hiš, ki komunalne odplake spuščajo neposredno v meteorni kanal in tako posledično tudi v ribnik. Ker nimamo natančnih podatkov, saj jih je zaradi nedostopnosti na terenu težko določiti, lahko ocenimo, da je v Ribniškem selu in v okolici približno 5% prebivalstva, katerih hiše niso priključene na javno kanalizacijo. Na podlagi tega lahko izračunamo vnos P in N iz poseljenih območij (Preglednica 12).

Preglednica 12: Obremenitev iz poseljenih območij.

	Obremenitev brez predčiščenja		Vrsta predčiščenja				Obremenitev s predčiščenjem	
	I_{Pw}	I_{Nw}	biološko	mehansko	mehansko in biološko	defosfatizacija in denitrifikacija	I_{Pw}	I_{Nw}
	kg P/leto	kg N/leto					kg P/leto	kg N/leto
1. ribnik	0	0	0	0	0	0	0	0
2. ribnik	15,6	40,8	0	0,1	0	0	1,56	4,08
3. ribnik	0	0	0	0	0	0	0	0

4.1.2 Določanje oz. napoved koncentracije hranil v vodnem sistemu

Hranila, ki prihajajo oz. obremenjujejo vodno telo, se nadalje vključujejo v krogotok hranil, ki predstavlja vrsto procesov, preko katerih se hranila transformirajo v različne oblike.

Na podlagi dušikovega in fosforjevega kroga so razvili nekaj modelov za določitev oziroma napoved koncentracije dušika in fosforja v vodnem telesu. S pomočjo teh modelov lahko lažje razumemo, kakšen vpliv ima povečanje ali zmanjšanje obremenitve s hranili na trofično stanje jezera ali ribnika.

4.1.2.1 Vollenweiderjev model (1969)

Vollenweiderjev model je uporaben za jezera (ribnike), kjer je limitirajoči element fosfor. Vodno telo obravnava kot popolnoma premešan reaktor in vsebuje le eno notranjo spremenljivko - totalni fosfor. Vollenweider je predvideval, da je sprememba koncentracije fosforja s časom v jezeru enaka količini skupnega fosforja na enoto volumna, ki priteče v vodno telo, minus izgube skozi iztok in sedimentacija (s pojmom sedimentacija so pravzaprav upoštevane vse reakcije fosforja v jezeru, od katerih je dolgoročno najvplivnejša abiotska komponenta sedimentacije). (Jørgensen & Bendoricchio, 2001)

$$d \frac{[P]}{dt} = \frac{I_{Pt} + I_{PP} + I_{Pw}}{V} - s[P] - r[P], \quad (7)$$

kjer so:

$[P]$ skupna koncentracija fosforja (mg/l),

V volumen vodnega telesa (l),

s stopnja sedimentacije (1/leto),

r stopnja odtoka = hitrost izmenjave vode (1/leto), kjer je $r = Q/V$,

Q skupni volumen odtoka na leto (l/leto).

Zgornjo enačbo lahko rešimo za stacionarni režim, t.j. ko se $[P]$ s časom ne spreminja (Jørgensen & Vollenweider, 1989):

$$d \frac{[P]}{dt} = \frac{I_{Pt} + I_{PP} + I_{Pw}}{V} - s[P] - r[P] = 0 \quad (8)$$

$$I_P = I_{Pt} + I_{PP} + I_{Pw}$$

$$[P] = \frac{I_P}{V \cdot (s + r)} \quad (9)$$

Podobne so enačbe za določitev dušika:

$$N = \frac{I_N}{V \cdot (s + r)}, \text{ kjer je } I_N = I_{Nt} + I_{NP} + I_{NW}.$$

Iz zgornjih enačb je razvidno, da je potrebno izračunati ali izmeriti Q . V nekaterih primerih lahko dolgoletni povprečni dotok Q_{in} izračunamo po enačbi (Jørgensen & Vollenweider, 1989):

$$Q_{in} = A_i \cdot P \cdot (1 - k'), \quad (10)$$

kjer je:

k' razmerje med evapotranspiracijo in letnimi padavinami (P); k je pogosto znano za določeno geografsko območje

A_i velikost prispevnih površin.

Enačbo lahko zapišemo tudi drugače:

$$Q_{in} = A_i \cdot P \cdot \psi,$$

kjer je ψ koeficient odtoka.

Q lahko določimo na podlagi vodne bilance (Jørgensen & Bendoricchio, 2001):

$$Q = Q_{in} + A_s \cdot p + A_s \cdot E_v, \quad (11)$$

kjer je:

E_v evaporacija ($\text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{leto}$),

A_s površina jezera (ribnika) (m^2).

Stopnjo sedimentacije (s) je razmeroma težko določiti. Pri globokih jezerih jo lahko določimo z lovilniki sedimentov. Če ne moremo določiti stopnje sedimentacije, lahko uporabimo retencijski koeficient R , ki je enak delu obremenitve vodnega telesa, ki ne zapusti vodnega telesa skozi odtok. Kirchner in Dillon (1975) sta ugotovila da je R močno povezan s koeficientom obremenitve vode na določenem območju Q/A_s (Jørgensen & Bendoricchio, 2001).

$$R = 0,426 \cdot e^{(-0,271 \cdot \frac{Q}{A_s})} + 0,574 \cdot e^{(-0,00949 \cdot \frac{Q}{A_s})} \quad (12)$$

Na podlagi raziskav, ki so jih naredili na osemnajstih jezerih v Skandinaviji, so ugotovili, da je retencijski koeficient za dušik približno 10-20% nižji (povprečno 16%) kot za fosfor.

Z uporabo retencijskega koeficienta (R) namesto stopnje sedimentacije (s) dobimo naslednjo poenostavljeno enačbo za koncentracijo totalnega fosforja.:

$$[P] = \frac{I_P \cdot (1 - R)}{Q} \quad (13)$$

Vollenweider je s prvim poskusom modela hotel razložiti povezavo med obremenitvijo in trofičnim stanjem jezera. S spodnjo enačbo je povezal povprečno koncentracijo fosforja in klorofila a (Jørgensen & Bendoricchio, 2001):

$$Chl - a = 0,28 \cdot [P]^{0,96}, \quad (14)$$

ki ima korelacijski koeficient $r=0,88$. Pri tej raziskavi ni upošteval jezer, kjer je razmerje $N/P < 10$.

Kasneje sta tudi Dillon in Rigler (1974) razvila enačbo, ki opisuje povezanost klorofila a (v poletnih mesecih) in totalni fosfor za jezera, kjer je fosfor limitirajoči element:

$$\log_{10}(Chl - a) = 1,45 \cdot \log_{10}([P] \cdot 1000) - 1,14 \quad (15)$$

Kadar je limitirajoči element dušik, velja naslednja enačba:

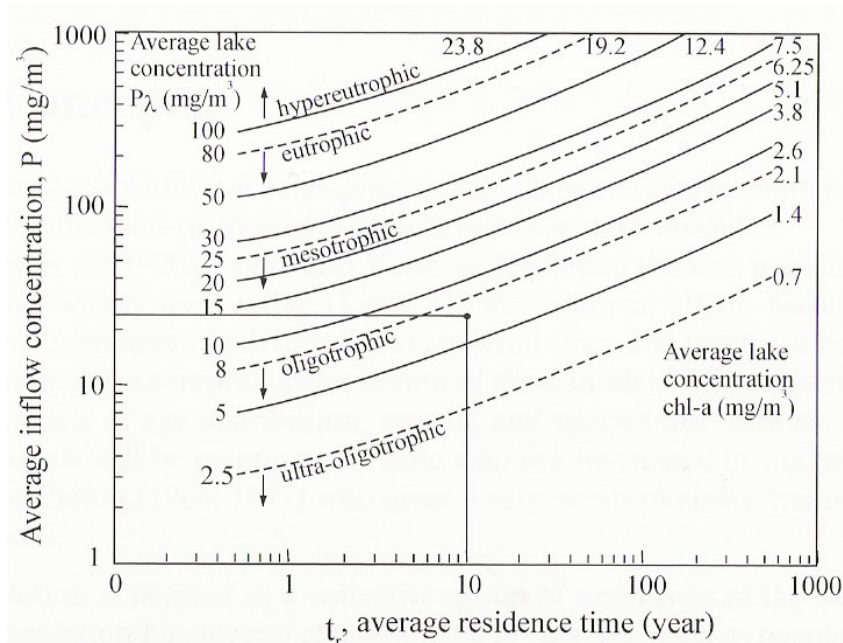
$$\log_{10}(Chl - a) = 1,4 \cdot \log_{10}([N] \cdot 1000) - 1,9 \quad (16)$$

V drugi bolj podrobni raziskavi je Vollenweider (1975) popravil enačbo za določitev koncentracije obremenitve jezera s fosforjem in dušikom tako, da je upošteval pretočni čas jezera (t_w) (Jørgensen & Bendoricchio, 2001):

$$P = 1,55 \cdot \left(\frac{I_P}{(1 + \sqrt{t_w})} \right)^{0,82}; \quad N = 5,34 \cdot \left(\frac{I_N}{(1 + \sqrt{t_w})} \right)^{0,78}$$

Eden najpomembnejših uspehov Vollenweiderjevega modela je njegova uporaba pri zagotavljanju ustrezne kvalitete vode v jezeru. Na podlagi OECD poročila je Vollenweider izdelal diagram (Slika 13), ki temelji na najpomembnejših limnoloških spremenljivkah. S pomočjo diagrama lahko napovemo spremembe v trofičnosti jezera glede na obremenitev. X-os predstavlja zadrževalni čas t_r , medtem ko je na y-osi povprečna vrednost obremenitve s fosforjem. Krivulje predstavljajo povprečno koncentracijo fosforja in klorofila a v jezeru.

Na diagramu (Slika 13) je predstavljen primer, kjer lahko v grobem ocenimo potrebno povprečno koncentracijo fosforja, da dosežemo določeno trofično stanje jezera. Če želimo v jezeru, ki ima pretočni čas vode 10 let ter koncentracijo klorofila a 2 mg/m^3 , vzdrževati oligotrofno stanje, je lahko količina fosforja na dotoku približno 25 mg/m^3 .



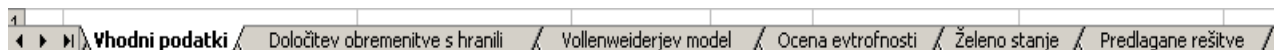
Slika 13: Vollenweiderjev graf za izračun trofičnega stanja jezer (Jørgensen & Bendoricchio, 2001)

4.1.3 Izdelava pripomočka za račun obremenitve s Vollenweiderjevim modelom

4.1.3.1 Idejna zasnova

Eden izmed ciljev diplomske naloge je bil izdelati enostavni računalniški pripomoček za izračun Vollenweiderjevega modela. Pripomoček sem izdelala s programom Microsoft Office->Excel, ki bi uporabniku na preprost, razumljiv in pregleden način prikazal rezultate stanja opazovanega ribnika. Idejna zasnova tega izračuna je, da uporabnik, ki ni nujno, da ima inženirsko predznanje, vnese vhodne podatke za svoj ribnik, program pa bi nato izvedel izračun potrebnih parametrov po enačbah Vollenweiderjevega modela za oceno stanja ribnika. V naslednjem koraku uporabnik izbere željeno stanje za opazovan ribnik in program bi izračunal in predlagal možne ukrepe.

Izračun je zasnovan tako, da imamo v programu Excel en zvezek s šestimi stranmi, in sicer: Vhodni podatki, Določitev obremenitve s hranili, Vollenweiderjev model, Ocena evtrofnosti, Želeno stanje in Predlagane rešitve (Slika 14).



Slika 14: Šest strani v programu Excel za izračun in oceno stanja ribnika

Uporabnik na prvi strani »Vhodni podatki« vnese vhodne podatke, ki so razdeljeni na tri sklope, in sicer na splošne podatke o vodnem telesu (površina, volumen in srednja globina), lastnosti prispevnih površin in hidrologija (dotoki v ribnik, letna količina padavin,...). Uporabnik vhodne podatke za izbrani ribnik preprosto vpiše v izbrano celico ali izbere eno izmed podanih kombinacij v padajočem seznamu (npr. vrsto kamnine in način predčiščenja v sklopu prispevnih površin) (Slika 15).

Zaradi boljše preglednosti smo pri oblikovni zasnovi upoštevali tudi barvno usklajenost celic. Tako celice oranžne barve predstavljajo polja, v katere uporabnik vnaša podatke za ustrezni izračun. To so tudi edina polja, v katera uporabnik vnaša podatke. Polja modre barve so izračuni modela.

Za izračun hidrologije je potrebno podati Q_{iztoka} . Kadar tega podatka nimamo, lahko izračunamo pretok skozi ribnik na podlagi Q_{dotoka} v ribnik in evaporacije (mm/leto). Kadar nimamo opravljenih meritev na dotokih, lahko za približno oceno dotokov v ribnik uporabimo podatke evapotranspiracije (le-ti so ponavadi znani za posamezna območja), kjer v izračunu upoštevamo letno količino padavin na prispevna območja, od tega odštejemo količino vode, ki se izgubi skozi listne reže in z izhlapevanjem in dobimo odvečno vodo, ki predstavlja dotok v ribnik.

Zavedati se moramo, da so to izračuni, ki temeljijo na enačbah, ki ne morejo nadomestiti natančnosti podatkov, ki jih dobimo z meritvami na terenu. Iz tega razloga ta način izračuna uporabimo izključno takrat, kadar nimamo na voljo ustreznih podatkov.

A	B	C	D	E	F	G
1	VHODNI PODATKI					
2						
3	a) RIBNIK					
4						
5	V ustrezna polja vpiši zahtevane podatke!					
6						
7		1. ribnik	2. ribnik	3. ribnik		
8	Površina (m²)	7.200	12.100	1.200		
9	Volumen (m³)	9.000	19.000	2.000		
10	Srednja globina (m)	2	3	2		
11						
12						
13	b) PRISPEVNE POVRŠINE					
14						
15	Iz padajočega seznama izberi vrsto kamnin, na katerih je območje ribnika (sedimenti ali metamorfne					
16						
17	Vrsta podlage:	sedimenti				
18		metamorfne sedimenti				
19	V spodnji tabeli vpiši pod ustrezno pokrovnost tal velikost posameznih prispevnih površin (m²)!					
20						
21	Vrsta površine oz pokrovnost tal:	Površina (m²)				
22		1. ribnik	2. ribnik	3. ribnik		
23	gozdovi	60.000	408.000	150.000		
24	gozdovi + pašniki	0	0	0		
25	sadovnjaki	60.000	272.000	0		
26	pašniki	0	0	0		
27	polja, njive	0	0	0		
28	Σ	120.000	680.000	150.000		
29						
30	V spodnjo tabelo vpiši število prebivalcev, ki živijo na prispevnih območjih ribnika in spuščajo odplake v ribnik oziroma niso priključeni na javno kanalizacijsko omrežje!					
31						
32		1. ribnik	2. ribnik	3. ribnik		
33	Število prebivalcev na prispevnih območjih, ki spuščajo odplake v ribnik oz. niso priključeni na javno kanalizacijo	0	12	0		
34						
35	Iz padajočega seznama izberi vrsto prediščevanja, ki je prisotna na obravnavanem območju!					

S klikom na puščico se odpre padajoči seznam, v katerem izberemo ustrezno vrsto podlage.

Slika 15: Stran – »Vhodni podatki«. Prikaz vnosa vhodnih podatkov.

Ko uporabnik vnese vhodne podatke, bo Excel samodejno izračunal vse potrebne parametre in oceno stanja po Vollenweiderjevem modelu. To pomeni, da uporabnik lahko po želji pogleda vmesne rezultate na straneh »Določitev obremenitve s hranili« in »Vollenweiderjev model«, vendar na teh straneh ne vnaša nobenih podatkov. Program bo izračunal obremenitev s hranili glede na podane vhodne podatke, in sicer upošteva izpiranje iz prispevnih površin, dotoke v ribnik, obremenitev s hranili iz padavin, antropogeno onesnaženje, ter medsebojni vpliv ribnikov, kadar imamo več ribnikov povezanih med seboj. V našem primeru imamo med seboj vezane tri ribnike. Na strani vhodni podatki uporabnik določi kako so ribniki vezani med seboj. Iz padajočega seznama lahko izbere »da«, če sta ribnika povezana med seboj, v nasprotnem primeru izbere »ne« (Slika 16). Pri tem upoštevamo smer toka vode. Stran »Vhodni podatki« je prirejena na primer Treh ribnikov. Kadar želimo modelirati samo en

ribnik nastavimo vrednosti za povezanost ribnikov na »ne«, medtem ko v primeru, da imamo med seboj povezane več kot tri ribnike, lahko z osnovnim znanjem Excela prilagodimo izračun na poljubno število ribnikov.

A	B	C	D	E	F
62	sadovnjaki	0	30.000	0	
63	pašniki	0	0	0	
64	polja, njive	0	0	0	
65	Σ	0	30.000	0	
66					
67					
68	Iz padajočih seznamov izberi "da", če je ribnik povezan z drugim, v nasprotnem prim				
69					
70		Povezanost			
71	I → II	ne			
72	II → I	da			
73	I → III	ne			
74	III → I	ne			
75	II → III	ne			
76	III → II	da			
77					
78					
79	Letna količina padavin P(mm)				
80	Vnesemo lahko letno količino padavin za preteklo leto ali pa za obdobje do 5 let. Prog				
81					
82	Leto	P (mm)			
83	2000	937			

Slika 16: Stran – »Vhodni podatki« Določitev povezanosti ribnikov med seboj

Program bo pri izračunu upošteval medsebojni vpliv tako, da je dotok v 2. ribnik skupek dotoka iz lastnega zaledja in iztoka iz 3. ribnika, medtem ko je stanje v 1. ribniku posledica dotoka z lastnega zaledja in dotoka iz 2. ribnika. Izračun obremenitve (I) za drugi in tretji ribnik lahko prikažemo tudi z enačbami:

$$I_{I.RIB.} = I_{(I.RIB.)} + I_{(II.RIB.)} \quad (17)$$

$$I_{(II.RIB.)} = [P]_{II.RIB.} \cdot Q_{iztoka(II.RIB.)}$$

$$I_{II..RIB.} = I_{(II.RIB.)} + I_{(III.RIB.)} \quad (18)$$

$$I_{(III.RIB.)} = [P]_{III.RIB.} \cdot Q_{iztoka(III.RIB.)}$$

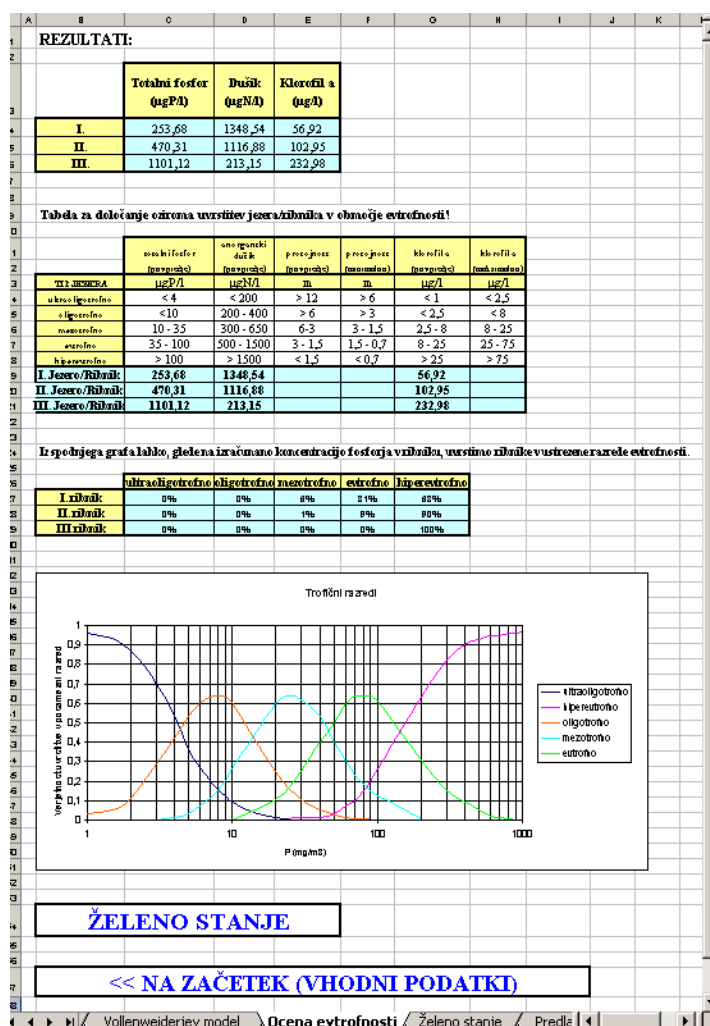
kjer je P koncentracija fosforja na dotoku (mg/m^3), v kateri je že z retencijskim koeficientom R (enačba 12) upoštevana redukcija fosforja na račun internega delovanja ribnika (sedimentacija, rast alg,...). Q je pretok ribnika (m^3/leto).

Za izračun obremenitve Ipp, Ipw in Ipt so uporabljene enačbe za določanje obremenitve s hranili, ki so podrobneje opisane v poglavju 4.1.

Z Vollenweiderjevim modelom izračunamo totalni fosfor in dušik po enačbi 13. Na podlagi izračunanega fosforja lahko izračunamo tudi koncentracijo klorofila a v ribniku. Če uporabnika zanimajo samo končni rezultati, preprosto pogleda na stran »Ocena evtrofnosti«, v

katerega lahko pride s klikom miške na povezavo »>>> Rezultati«, ki se nahaja na dnu strani »Vhodni podatki«, ali izbere ustrezno stran v zvezku v orodni vrstici programa Excel. V prvi tabeli so predstavljeni rezultati predhodnih izračunov, medtem ko je druga tabela tabela za določitev stopnje evtrofnosti po OECD kriterijih (Slika 17). Uporabniku se pod tabelo v ustrezni stolpec še enkrat izpišejo izračunani rezultati za izbrani ribnik, na podlagi katerih lahko uvrsti ribnik v ustrezen razred evtrofnosti. S pomočjo grafa »verjetnost uvrstitve v posamezen trofični razred glede na totalni fosfor« (glej tudi sliko 10), nam program izračuna verjetnost, da ribnik »pade« v določen razred evtrofnosti.

Na podlagi dobljenih rezultatov se lahko uporabnik odloči o nadaljnjih ukrepih. V primeru, da s kakovostjo vode v ribniku nismo zadovoljni, se s pritiskom na povezavo »Željeno stanje, premaknemo na naslednjo stran. S povezavo »Na začetek (Vhodni podatki)« se vrnemo na prvo stran, v kateri lahko spremenimo vhodne podatke.



Slika 17: Stran – »Ocena evtrofnosti« prikazuje rezultate izračunov.

V naslednjem koraku lahko uporabnik izbere želeno stanje za izbrani ribnik. V zgornjem delu uporabnik izbere iz padajočega seznama želeno trofično stanje (Slika 18) in program bo v spodnjih izračunih upošteval mejne vrednosti za izbrano stanje.

Glede na izračunan pretočni čas t_w (leto) ter predhodno izračunano trenutno obremenitev ribnika s fosforjem, izračunamo globino, ki je potrebna, da dosežemo želeno trofično stanje. Na koncu je pas mejnega območja prikazan tudi grafično.

ŽELENO STANJE

I. Iz padajočega seznama izberi želeno stanje ribnika!

Izberi želeno stanje:	1.ribnik	2.ribnik	3.ribnik
	mezotrofnost	mezotrofnost	mezotrofnost

Mejne vrednosti koncentracije fosforja za izbrano trofično stanje

P_{crit} (mg/m ³)			
	1.ribnik	2.ribnik	3.ribnik
min	11	11	11
max	35	35	35

Obstoječe stanje

P (mg/m ³)			
	1.ribnik	2.ribnik	3.ribnik
	253,68	470,31	1101,12
$L_{d,0}$ (mgP/m ³ leto)			
	10014,63	11995,23	47098,01

Izračun dopustne obremenitve ribnikov

$L_{d,0}$ (mgPto t/(m ³ leto))			
	1.ribnik	2.ribnik	3.ribnik
min	434,26	280,56	470,50
max	1.381,72	892,68	1.497,05

Pretočni čas ribnikov

Pretočni čas (leto)			
	1.ribnik	2.ribnik	3.ribnik
	0,06	0,13	0,04

Izračun mejnih vrednosti dopustne obremenitve pri podanem pretočnem času in različnih globinah

z	t_w			qs	I. Ribnik		II. Ribnik	
m	leto			m/leto	Ldop(11)	Ldop(35)	Ldop(11)	Ldop(35)
	I. Ribnik	II. Ribnik	III. Ribnik	I. Ribnik	II. Ribnik	III. Ribnik	mgP _{tot} (m ³ leto)	mgP _{tot} (m ³ leto)
0,5	0,06	0,13	0,04	7,88	3,73	11,83	188,86	345,43
1	0,06	0,13	0,04	15,77	7,47	23,65	217,12	690,86
1,5	0,06	0,13	0,04	23,65	11,20	35,48	324,60	1036,29

S klikom na puščico se odpre padajoči seznam, v katerem izberemo želeno stanje

Slika 18: Stran – »Želena stanje«.

Na strani »Predlagane rešitve« bo predlagana potrebna poglobitev ribnika glede na trenutno globino, ki smo jo podali v vhodnih podatkih (Slika 19). Pod »Obremenitev« se izpišeta minimalna in maksimalna mejna vrednost koncentracije fosforja v ribniku, za izbrano trofično stanje na strani »Želena stanje«. Program nato z uporabo ustrezne formule izračuna potrebno poglobitev ribnika (v primeru, da poglobitev ni potrebna bo izračunana vrednost »0«), da dosežemo želena stanje ob obstoječi obremenitvi. Seveda pa je veliko bolj dolgotrajna in učinkovita rešitev redukcija vnosa hranil v ribnik. Uporabnik lahko na strani »želena stanje« pogleda, kakšna je mejna vrednost obremenitve s hranili glede na želena izbrano stanje ribnika.

PREDLAGANE REŠITVE:					
I. Potrebna globina ribnika pri danem pretočnem času t_w in obstoječi obremenitvi, da zagotovim					
				potrebna globina	Foglobitev obstoječega ribnika (m)
1. ribnik	Obremenitev (mg/l)	min	11	46,12	44,12
		max	35	14,50	12,50
2. ribnik	Obremenitev (mg/l)	min	11	106,89	104,39
		max	35	33,59	31,09
3. ribnik	Obremenitev (mg/l)	min	11	150,15	146,65
		max	35	47,19	45,69

<< NAZAJ (ŽELENO STANJE)
<< NA ZAČETEK (VHODNI PODATKI)

Slika 19: Stran – »Predlagane rešitve«

4.2 Dinamični model

Ekosistemi so dinamični sistemi, v katerih se prepletajo številni procesi. Te procese lahko ponazorimo v dinamičnih modelih z uporabo diferencialnih enačb, s katerimi opišemo odziv sistema na zunanje dejavnike v odvisnosti od časa. Dinamični modeli so veliko bolj kompleksni od enostavnih statičnih modelov, saj v prvi vrsti upoštevajo časovne spremembe posameznih spremenljivk, v drugi vrsti pa zaradi natančnejšega opisa vzročno-posledičnih povezav vsebujejo veliko spremenljivk in upoštevajo več vplivnih faktorjev. Zaradi njihove kompleksnosti in velikega števila podatkov, s katerimi operirajo, je njihova zanesljivost v veliki meri odvisna od kvalitete (oz. količine) vhodnih podatkov. Glede na namen modela, meritve in natančnost vhodnih podatkov, se odločamo za spremenljivke in procese, ki najbolj karakterizirajo obravnavani sistem. Pri modeliranju evtrofikacije se najpogosteje odločamo za hranilo, ki najbolj omejuje rast fitoplanktona.

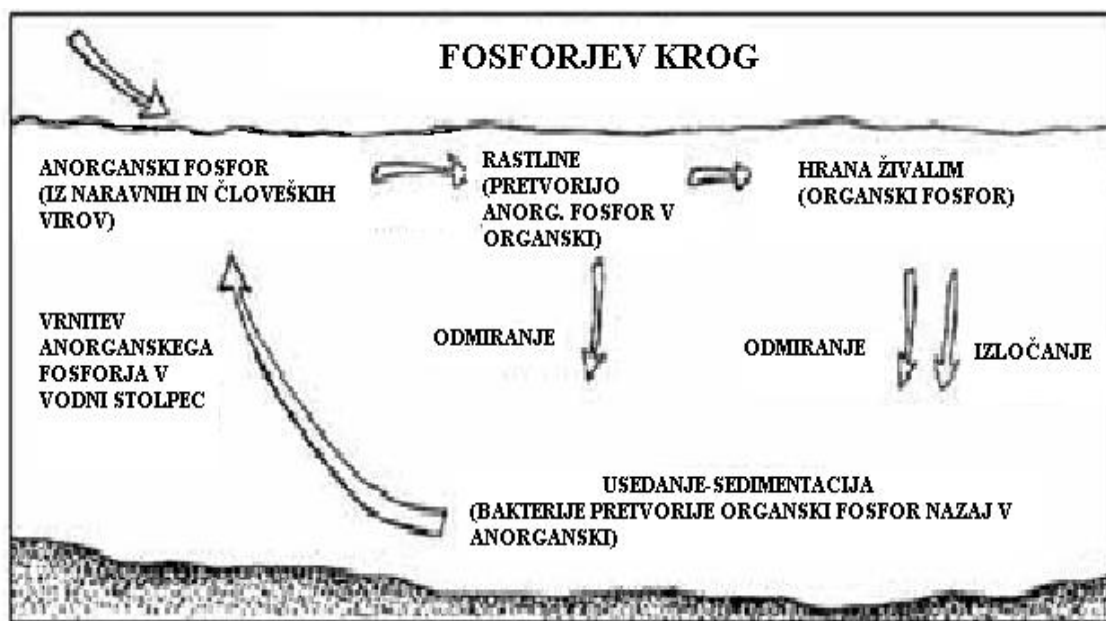
Razvitih je bilo kar nekaj kompleksnih evtrofikacijskih dinamičnih modelov. V tej diplomski nalogi bomo za izdelavo dinamičnega modela fosforja in kisika uporabili programsko opremo STELLA, ki je podrobneje opisana v nadaljevanju.

4.2.1 Opis modela fosforjevega kroga in matematični zapis biokemijskih procesov v njem

Fosforjev krog je za okolje zelo pomemben, saj je pogosto fosfor element, ki sproži delovanje zakona o minimumu (Liebig). Fosfor v vodno okolje prihaja preko naravnih procesov

izpiranja preperin, preko človekove dejavnosti pa zaradi izpusta odpadnih vod, gnojenja poljedelskih površin ter zaradi uporabe detergentov v industriji in gospodinjstvih. Fosfati niso strupeni za zdravje ljudi, omogočajo pa povečanje rasti primarnih producentov, kar lahko posredno privede do eutrofnosti vodnega telesa (Panjan, 2003).

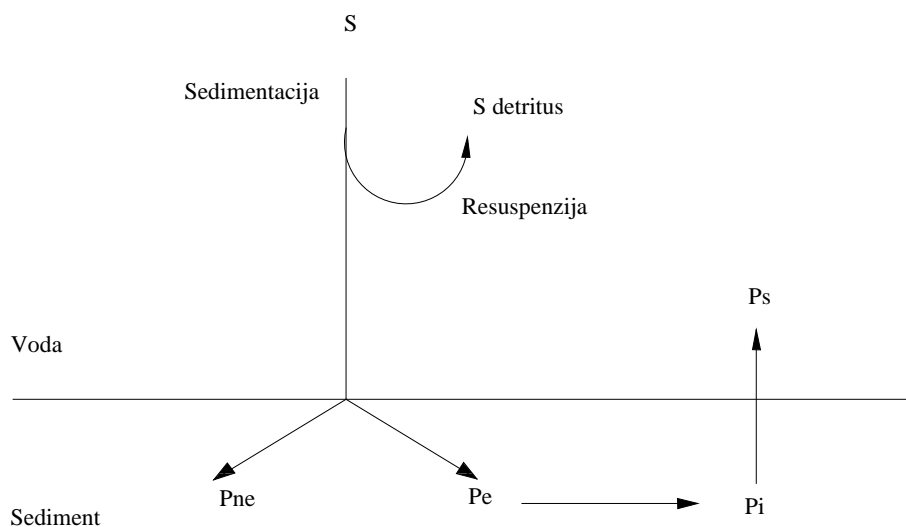
V vodnih ekosistemih se fosfor nahaja v štirih oblikah, in sicer kot organski neraztopljeni, t.j. partikularni fosfor, kot organski raztopljeni, kot anorganski raztopljeni fosfor in kot anorganski neraztopljeni fosfor. Partikularni fosfor je fosfor, ki je vezan v algah, mikroorganizmih, drugih rastlinah in živalih itd. Raztopljeni fosfor v vodi se deli na ortofosfate, polifosfate, ki so večinoma sintetičnega izvora, ter na organski fosfor (izločki organizmov). Četrta oblika, anorganski neraztopljeni fosfor se kosmiči in odseda iz vodne raztopine. Na sliki 20 je prikazan fosforjev krog, na katerem so označeni procesi v njem.



Slika 20: Enostavna shema kroženja fosforja v vodnem ekosistemu (prirejeno po EPA).

Fosfor vstopa v vodni ekosistem iz zunanje ali notranje obremenitve. Zunanjo obremenitev predstavljajo padavine, dotoki ali izpiranje lastnih prispevnih površin. Notranji vir fosforja pa predstavljajo izločki živih organizmov, mineralizacija in sproščanje sedimentov (Atanasova, 2005). Vodne rastline porabljajo del ortofosfatov za primarno produkcijo (fotosinteza), del fosforja, ki pa se ne porabi v prehranjevalni verigi ter tisti del, ki ga dobimo na račun odmrlih rastlin in živali, se posede na dno in se kopiči v sedimentih.

Fosfor se v sedimentih kopiči v dveh oblikah, in sicer v nepovratni (P_{ne}) in povratni obliki (P_e). Slednji se ponovno vključuje v fosforjev krog. Iz tega razloga so lahko sedimenti pomemben vir fosforja v ribnikih, zato je potrebno njim posvetiti veliko pozornost (Slika 21). Vollenweider (1976) je pri svojih opazovanjih ugotovil, da je kopičenje fosforja v sedimentih povezano z zadrževalnim časom. To pomeni, daljši kot je zadrževalni čas, večja je verjetnost, da se bo določen atom fosforja usedel v sediment, namesto, da bi jezero zapustil skozi iztok (Andersen, 1997).



Slika 21: Proces kopičenja in sproščanja fosforja iz sedimentov (prirejeno po Jørgensen & Bendoricchio, 2001), kjer je P_e – povratna oblika fosforja, P_{ne} – nepovratna oblika fosforja, P_s – raztopljeni fosfor v vodi, $S_{detritus}$ – sedimenti iz odmrlih organizmov.

Lorenzen je s sodelavci (Lorenzen et al., 1976) razvil enega od modelov za sproščanje fosforja iz sedimentov. Model je sestavljen iz dveh diferencialnih enačb, in sicer iz enačbe za raztopljeni fosfor (P_s) in enačbe za fosfor, ki se sprošča nazaj iz sedimentov (P_e).

$$\frac{dP_s}{dt} = \frac{P_{sIN}}{V_L} + \frac{k_2 \cdot A \cdot P_e}{V_L} - \frac{k_1 \cdot A \cdot P_s}{V_L} - \frac{Q}{V_L} \cdot P_s \quad (19)$$

$$\frac{dP_e}{dt} = \frac{k_2 \cdot A \cdot P_e}{V_s} + \frac{k_1 \cdot A \cdot P_s}{V_s} - \frac{k_1 \cdot k_3 \cdot A \cdot P_s}{V_s} \quad (20)$$

kjer je P_s - koncentracija raztopljenega fosforja, P_{sIN} - dotok fosforja, V - volumen jezera (m^3), A - površina jezera (m^2), P_e - koncentracija povratne oblike fosforja (mg/l), Q - iztok, V_s - volumen sedimentov (m^3), k_1 - koeficient kopičenja fosforja v sedimentih ($m/leto$), k_2 -

koeficient sproščanja fosforja iz sedimentov, k_3 - razmerje med celotnim fosforjem, ki pride v sediment in nepovratno obliko fosforja (m/dan).

Procese in kinetiko modela fosforja lahko opišemo z diferencialnimi enačbami prvega reda. Model bo sestavljen iz štirih odvisnih spremenljivk, torej bomo imeli tudi štiri diferencialne enačbe – za vsako spremenljivko modela po eno bilančno enačbo – s toliko členi, kolikor je procesov, ki vplivajo na posamezno spremenljivko. Zaradi pomanjkanja potrebnih podatkov, v modelu ne bomo upoštevali sproščanja fosforja iz sedimentov.

4.2.1.1 Primarna produkcija (rast alg)

Dinamiko primarne produkcije (pp) in anorganskih hranil (S) lahko zapišemo z enostavnima formulama (slika 22):

$$\frac{d(pp)}{dt} = \text{rast} - \text{respiracija}. \quad (21)$$

$$\frac{d(S)}{dt} = -k_1 \cdot \text{rast} + k_2 \cdot \text{respiracija} \quad (22)$$



Slika 22: Konceptualni model primarne produkcije

Rast alg najpogosteje modeliramo z naslednjo enačbo:

$$\mu = \mu_{\max}(T_{ref}) \cdot f_1(T) \cdot f_2(L) \cdot f_3(C, N, P), \quad (23)$$

kjer je $\mu_{\max}(T_{ref})$ hitrost rasti primarnih producentov pri optimalnih pogojih in referenčni temperaturi, manjka opis $f_1(T)$, $f_2(L)$ funkcija vpliva svetlobe, $f_3(C, N, P)$ omejitvena funkcija koncentracij hranil (Atanasova, 2005).

Večina modelov upošteva tri glavne kategorije vpliva temperature na maksimalno rast, in sicer:

- linearno naraščanje rasti s temperaturo

$$f_1(T) = \frac{T - T_{\min}}{T_{ref} - T_{\min}}, \quad (24)$$

- eksponentno naraščanje rasti s temperaturo (Arrheniusov model)

$$f_1(T) = \Theta^{(T-T_{ref})}, \quad (25)$$

- naraščanje do optimalne temperature, nato pa upadanje z naraščanjem temperature

$$f_1(T) = e^{\left[-2.3 \cdot \left(\frac{T-T_{opt}}{T_s-T_{opt}}\right)^2\right]}, \quad (26)$$

kjer je T_{min} spodnja temperaturna meja, pri kateri je rast=0, T_{max} je maksimalna temperatura, pri kateri je rast $\neq 0$, T_{opt} je optimalna temperatura za rast in T_{ref} je referenčna temperatura in običajno znaša 20°C; $T_s = T_{min}$, če je $T < T_{opt}$; $T_s = T_{max}$, če je $T > T_{opt}$. (Jørgensen & Bendoricchio, 2001)

Za potrebe modeliranja v tej diplomski nalogi je najbolj primeren Arrheniusov temperaturni model. Model linearnega naraščanja je za naš primer preveč splošen, medtem ko je za uporabo modela optimalne temperature potrebno imeti podatke o vrsti vodnih rastlin v ribniku, saj se optimalna temperatura za rast (T_{opt}) razlikuje za posamezno vrsto alg..

Omejitev rasti zaradi koncentracije hranil bomo ponazorili z Mondovim modelom, ki upošteva konstantno stehiometrično sestavo celic alg:

$$f_3 = \frac{S}{k_s + S}, \quad (27)$$

kjer je S koncentracija limitirajočega hranila in k_s koncentracija S pri $\mu_{max} / 2$. Kadar je rast primarnih producentov omejena z več kot enim hranilom, lahko skupni vpliv vseh hranil izrazimo kot produkt omejitvenih funkcij:

$$f(C,N,P) = f(C) \cdot f(N) \cdot f(P) = \frac{C}{k_C + C} \cdot \frac{N}{k_N + N} \cdot \frac{P}{k_P + P} \quad (28)$$

Za to funkcijo je ponavadi značilno, da premočno omejuje rast.

Proces respiracije lahko zapišemo z naslednjo enačbo:

$$respiracija = k_3 \cdot PP \quad (29)$$

Iz zgornjih enačb lahko oblikujemo bilančno enačbo matematičnega modela za proces primarne produkcije in rabe hranil:

$$\frac{d(pp)}{dt} = \mu \cdot \Theta^{(T-T_{ref})} \cdot \frac{S}{k_s + S} \cdot pp - k_3 \cdot pp \quad (30)$$

$$\frac{d(S)}{dt} = -k_1 \cdot \mu \cdot \Theta^{(T-T_{ref})} \cdot \frac{S}{k_s + S} \cdot pp + k_2 \cdot k_3 \cdot pp \quad (31)$$

4.2.1.2 Modeliranje koncentracije zooplanktona

Tako kot alge, lahko tudi zooplankton modeliramo globalno, kar pomeni, da zooplanktona ne ločujemo po posameznih taksonomskih skupinah ali po načinu prehranjevanja.

Rast zooplanktona (Z) ponavadi modeliramo z naslednjo enačbo (Jørgensen & Bendoricchio, 2001):

$$\frac{dZ}{dt} = (g - r - ex - m) \cdot Z - G,$$

kjer je:

- Z koncentracija zooplanktona
- g celotna stopnja rasti (1/t)
- r respiracija (1/t)
- ex izločanje hranil (1/t)
- m odmiranje (1/t)
- G izgube na račun prehranjevalcev z zooplanktonom (npr. ribe). G je konstanta, če zooplankton predstavlja vrh prehranjevalne verige, v nasprotnem primeru se izračuna z enačbo $G = \gamma \cdot Z_p$, kjer je γ stopnja plenilstva in Z_p biomasa plenilcev, ki se prehranjuje z zooplanktonom.

S stopnjo rasti zooplanktona ponavadi simuliramo razmnoževanje populacije in individualno rast biomase, ki sta odvisni od zaužite hrane in presnove. Učinkovitost obeh procesov je odvisna od (Jørgensen & Bendoricchio, 2001):

- vrste, starosti, velikosti, spola, reprodukcijske stopnje zooplanktona
- koncentracije, vrste, kvalitete in vsečnosti hrane
- temperature.

V našem modelu nas zanima rast zooplanktona na račun prehranjevanja s fitoplanktonom, zato sem kot omejitveno funkcijo hrane izbrala fitoplankton.

$$rast_{zoo} = \mu_{\max_{zoo}} \cdot f(T) \cdot f(fito) \cdot zoo,$$

kjer je $\mu_{\max_{zoo}}$ maksimalna stopnja rasti zooplanktona, $f(T)$ temperaturna funkcija in zoo koncentracija zooplanktona. Vpliv temperature na rast in razmnoževanje zooplanktona je podoben kot pri algah.

4.2.1.3 Rast rib

Ribe kot komponenta ekosistema so zelo redko vključene v kompleksne modele ekosistemov. Predstavljajo zadnji člen v vodni prehranjevalni verigi in se prehranjujejo z algami ali zooplanktonom, ali obojim. Modeli večinoma lahko simulirajo samo eno vrsto rib, in sicer modeliramo lahko ribe individualno ali zajamemo večjo populacijo rib. Modeli, ki simulirajo rast rib, so se razvijali v smeri, da upoštevajo čim več faktorjev, ki bi lahko vplivali na rast. Ti faktorji so:

- notranji: vrsta in rod rib, velikost rib, razvitost, plavalna sposobnost, starost;
- zunanji: delimo jih na:
 - abiotični: temperatura, količina kisika v vodi, pH, CO₂, različne strupene substance kot so amoniak, nitriti, težke kovine itd., slanost, intenziteta svetlobe
 - biotični: predpisano hranjenje, dnevni obrok, pogostost hranjenja, bolezni, ...

Vključiti vse te faktorje v en model rasti je skoraj nemogoče, zato so ugotovili, da vsak model rasti mora vključevati vsaj naslednje tri faktorje: dnevni obrok (potreba po hrani), velikost rib in temperaturo. (povzeto po Jørgensen & Bendoricchio, 200)




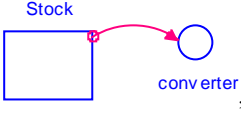
Modela rasti rib v tej diplomski nalogi ne bomo podrobneje obravnavali, saj za naš primer Treh ribnikov nismo dobili ustreznih podatkov o vrstah in številčnosti rib v ribnikih, in ga zato tudi ne bomo vključili v model. Za zadnji člen v prehranjevalni verigi bomo upoštevali zooplankton. Izgube fosforja na račun prehrane rib pa upoštevamo pod zunanje izgube pri zooplanktonu (*P_{zoo out}*, glej sl. 24 v nadaljevanju).

4.2.2 Modeliranje koncentracije hranil v Treh ribnikih z uporabo Stelle

4.2.2.1 Opis programske opreme Stella

Stella - Structural Thinking, Experiential Learning Laboratory with Animation (www.iseesystems.com) je program, ki se veliko uporablja v modeliranju. Oblikovan je za modeliranje dinamičnosti medsebojno odvisnih spremenljivk. Program Stella je močno orodje za preverjanje hipotez, razjasnitev konceptov in povezovanje različnih teorij. Z njim lahko enostavno modeliramo dinamiko tako enostavnih kot tudi zelo kompleksnih procesov. Prednost Stelle je, da pri oblikovanju modela ne operiramo z zapletenimi diferencialnimi enačbami (diferencialne enačbe napiše in rešuje Stella), temveč uporabljamo enostavne grafične bloke, s katerimi sestavljamo proces (konceptualni diagram), ki ga želimo modelirati.

V Stelli obstajajo štiri glavni grafični bloki:

-  , pravokotnik (škatlica) predstavlja zbiralnike, t.j. komponente sistema (odvisna spremenljivka sistema), v katerih se akumulirajo oz. zbirajo snovi, ki dotekajo ali odtekajo iz njih (npr. vodni rezervoar).
-  , votla puščica z ventilom (s krogom) na sredini predstavlja smer toka in prenos snovi (proces). Njihov namen je, da dovajajo oziroma odvajajo snovi iz »zbiralnikov«. Če puščica kaže v smeri zbiralnika, potem v njega dovaja snovi in obratno. V ventilu opišemo pogoje (načine) pretoka.
-  , krog predstavlja neodvisne spremenljivke, ki se vključujejo v proces. To so lahko različne konstante, pretvorniki enot ali razmerja.
-  , enojna rdeča puščica je informacijske narave in povezuje neodvisne spremenljivke v proces.

5 REZULTATI MODELOV

5.1 Izračuni Vollenweiderjevega modela za primer Treh ribnikov

Izračun Vollenweiderjevega modela za Tri ribnike v mariborskem Mestnem parku smo izvedli na dva načina. V prvem načinu smo računali obremenitev ribnikov brez merjenih podatkov o dotokih v ribnik, pri drugem načinu pa smo uporabili meritve FGG. Na koncu smo primerjali rezultate obeh izračunov in določili odstopanje med njimi. Za izračun na dva način smo se odločili zaradi slabih oz. nepopolnih meritev.

Izračun obremenitve Treh ribnikov brez uporabe merjenih parametrov v dotokih

Pri tem načinu izračuna smo izračunali obremenitev ribnikov na podlagi spiranja hranil iz prispevnih površin in letnih padavin. Obremenitev sistema s hranili smo izračunali že v poglavju 4.1.1, zato bomo v tem poglavju povzeli samo rezultate izračunov obremenitve s hranili iz prispevnih površin, padavin in antropogenih virov. Povprečni iztok za posamezni ribnik smo ocenili, in sicer za 3. ribnik na 1,5 l/s, za 2. ribnik 3 l/s in 1. ribnik 4 l/s. V našem primeru sistem sestavljajo trije ribniki, ki so med seboj povezani, in sicer tretji ribnik se izliva v drugega in drugi v prvega. To lastnost smo vključili v program, in sicer na strani »Vhodni podatki«. Z uporabo enačb (17) in (18) program izračuna obremenitev na račun medsebojnega vpliva ribnikov in rezultate prikaže na strani »Obremenitev s hranili« (Preglednica 13).

Preglednica 13: Medsebojni vpliv ribnikov

	Obremenitev	
	I_{Pm}	I_{Nm}
	kgP/leto	kgN/leto
1. ribnik	6,14	441,79
2. ribnik	1,11	34,81
3. ribnik	0,00	0,00

Skupno obremenitev s hranili (I) za posamezni ribnik izračunamo tako, da seštejemo posamezne obremenitve (Preglednica 14 in Preglednica 15).

Preglednica 14: Skupna obremenitev. Treh ribnikov s fosforjem, kjer I_P vsota posameznih obremenitev.

	I_{PP} (kg P/leto)	I_{Pt} (kg P/leto)	I_{pw} (kg P/leto)	I_{Pm} (kg P/leto)	I_P (kg P/leto)
1. ribnik	0,46	1,78	0,00	6,14	8,38
2. ribnik	0,77	9,67	1,56	1,11	13,10
3. ribnik	0,08	1,76	0,00	0,00	1,83

Preglednica 15: Skupna obremenitev. Treh ribnikov z dušikom, kjer I_N vsota posameznih obremenitev.

	I_{NP} (kg N/leto)	I_{Nt} (kg N/leto)	I_{NW} (kg N/leto)	I_{Nm} (kg N/leto)	I_N (kg N/leto)
1. ribnik	6,52	154,80	0,00	441,79	603,11
2. ribnik	10,96	748,00	4,08	34,81	797,85
3. ribnik	1,09	51,00	0,00	0,00	52,09

S pomočjo enačb Vollenweiderjevega modela iz poglavja 4.1.2.1 izračunamo obremenitev posameznega ribnika s fosforjem in dušikom. Po enačbi 14 lahko izračunamo tudi vsebnost klorofila a. Rezultati so prikazani v Preglednici 16.

Preglednica 16: Obremenitev treh ribnikov s fosforjem in dušikom, ter izračun klorofila a

	Totalni fosfor $\mu\text{g P/l}$	Dušik mg N/l	Klorofil a $\mu\text{g/l}$
1. Ribnik	30,82	2543,04	7,52
2. Ribnik	43,28	3113,10	10,42
3. Ribnik	23,42	735,88	5,78

Na podlagi dobljenega totalnega fosforja lahko ribnike uvrstimo v ustrezni razred trofičnosti (Preglednica 17).

Preglednica 17: Razvrstitev ribnikov v posamezni trofični razred glede na skup. fosfor v vodi.

	ultraoligotrofno	oligotrofno	mezotrofno	evtrofno	hiperevtrofno
1. ribnik	0%	10%	64%	25%	1%
2. ribnik	0%	5%	54%	40%	1%
3. ribnik	0%	25%	64%	11%	0%

Glede na dobljene rezultate modela lahko ugotovimo, da vsi ribniki padejo z največjo verjetnostjo v mezotrofno stanje. Najbolj obremenjen je drugi ribnik, ki se kar s 40% verjetnostjo uvršča v evtrofni razred. Dobljeni rezultati se ne ujemajo z ugotovitvami, ki smo jih dobili na podlagi meritev (glej preglednico 7). Iz tega lahko zaključimo, da se s prispevnih površin spira veliko več hranil v ribnik, kot smo to upoštevali v modelu. Dodatni vir hranil lahko predstavlja večji odstotek izpusta fekalnih vod v ribnik, večji delež kmetijskih površin, pranje avtomobilov v naselju itd. Odstopanje v rezultatih je lahko tudi posledica poenostavitve izračuna v Excelu, kjer smo v intervalu predlaganih vrednosti za posamezen parameter uporabili srednjo vrednost. Vsak primer vodnega telesa, ki ga modeliramo je edinstven in zahteva veliko izkušenj pri izbiri ustreznih vrednosti parametrov.

Izračun obremenitve Treh ribnikov z uporabo meritev na dotokih

Pri drugem načinu izračuna obremenitve z Vollenweiderjevim modelom smo pri izračunu obremenitve uporabili meritve, ki smo jih izvedli na dotokih. Poudariti je potrebno, da v primeru, ko ima ribnik dotok potoka, program ne računa obremenitve s fosforjem na podlagi celotnih prispevnih površin lastnega povodja, saj se del hranil iz prispevnih površin izpira že v vodotok. Zato je v tem primeru potrebno za posamezno povodje ribnika določiti velikost prispevnih površin, ki se izpira neposredno v ribnik. Dotok ima drugi in tretji ribnik. Za 3. ribnik lahko iz slike 3 predpostavimo, da se hranila iz celotnega lastnega prispevnega območja spirajo v potok, zato je obremenitev iz lastnih prispevnih površin 3. ribnika neposredno v ribnik 0, medtem ko za 2. ribnik ocenimo, da se iz 3 ha površin hranila spirajo neposredno v ribnik, iz preostalega dela pa v Ribniški potok. Prav tako predpostavimo, da na teh 3 ha ni onesnaženja iz antropogenih virov. Iz enačb 3 in 4 ter z uporabo preglednice 7 izračunamo obremenitev posameznega ribnika iz lastnih prispevnih površin. (Preglednica 18).

Preglednica 18: Obremenitev iz lastnih prispevnih površin neposredno v ribnik

	Velikost celotnega prispevnega območja (m ²)	Velikost lastnih prisp. površin, s katerih se hranila spirajo neposredno v ribnik (m ²)	Pokrovnost prispevnih površin		Obremenitev iz prisp.p. neposredno v ribnik	
			gozd (%)	Kmetijske površine (%)	I _{Pt} (kg P/leto)	I _{Nt} (kg N/leto)
I. rib.	120.000	120.000	50	50	1,8	154,8
II. rib.	680.000	30.000	100	0	0,54	67,2
III. rib.	150.000	0	0	0	0	0

Preglednica 19 prikazuje izračune obremenitve iz dotokov (I_{Pd} , I_{Nd}).

Preglednica 19: Obremenitev iz dotokov

Dotoki (II. Ribnik)	Obremenitev		Skupna obremenitev iz dotokov	
	P (kg P/leto)	N(kg P/ leto)	I_{Pd} (kg P/leto)	I_{Nd} (kg N/leto)
Ribniški potok	29	66,0	89	198
Meteorna kanalizacija	60	132,00		
Dotoki (III. Ribnik)	Obremenitev		Skupna obremenitev iz dotokov	
	P (kg P/leto)	N(kg P/leto)	I_{Pd} (kg P/leto)	I_{Nd} (kg N/leto)
Potok	86	14	86	14

V preglednici 20 so izračuni obremenitve na račun medsebojne povezanosti ribnikov.

Preglednica 20: Medsebojna obremenitev ribnikov

	Obremenitev	
	I_{Pm}	I_{Nm}
	kgP/leto	kgN/leto
1. ribnik	127,33	240,21
2. ribnik	68,86	12,55
3. ribnik	0,00	0,00

Za izračun skupne obremenitve za 1. in 2. ribnik upoštevamo tudi obremenitev iz dotokov (Preglednica 21 in 22).

Preglednica 21: Skupna obremenitev Treh ribnikov s fosforjem, kjer I_P vsota posameznih obremenitev.

	I_{PP}	I_{Pt}	I_{pw}	I_{Pm}	I_{Pd}	I_P
	(kg P/leto)	(kg P/leto)	(kg P/leto)	(kg P/leto)	(kg P/leto)	(kg P/leto)
1. ribnik	0,46	1,78	0,00	127,33	0,00	129,57
2. ribnik	0,77	0,54	0,00	68,86	89,00	159,17
3. ribnik	0,08	0,00	0,00	0,00	86,00	86,08

Preglednica 22: Skupna obremenitev Treh ribnikov z dušikom, kjer I_N vsota posameznih obremenitev.

	I_{NP} (kg N/leto)	I_{Nt} (kg N/leto)	I_{NW} (kg N/leto)	I_{Nm} (kg N/leto)	I_{Nd} (kg N/leto)	I_N (kg N/leto)
1. ribnik	6,52	154,80	0,00	240,21	0,00	401,53
2. ribnik	10,96	67,20	0,00	12,55	198,00	288,71
3. ribnik	1,09	0,00	0,00	0,00	14,00	15,09

S pomočjo enačb Vollenweiderjevega modela iz poglavja 4.1.2.1 izračunamo obremenitev posameznega ribnika s fosforjem in dušikom. Rezultati so prikazani v Preglednici 23.

Preglednica 23: Obremenitev treh ribnikov s fosforjem in dušikom, ter izračun klorofila a

	Totalni fosfor $\mu\text{gP/l}$	Dušik $\mu\text{gN/l}$	Klorofil a $\mu\text{g/l}$
1. Ribnik	253,68	1348,54	56,92
2. Ribnik	470,31	1116,88	102,95
3. Ribnik	1101,12	213,15	232,98

Na podlagi dobljenega totalnega fosforja lahko ribnike uvrstimo v ustrezni razred trofičnosti (preglednica 24)

Preglednica 24: Razvrstitev ribnikov v posamezni trofični razred glede na skupni fosfor v vodi.

	ultraoligotrofno	oligotrofno	mezotrofno	evtrofno	hiperevtrofno
1. ribnik	0%	0%	6%	31%	63%
2. ribnik	0%	0%	1%	9%	90%
3. ribnik	0%	0%	0%	0%	100%

Z izračunom Vollenweiderjevega modela po drugem načinu, kjer upoštevamo obremenitev iz dotokov, lahko ugotovimo, da se vsi trije ribniki z največjo verjetnostjo uvrščajo v hiperevtrofni razred. Največji dotok hranil ima 2. ribnik, vendar je zaradi njegovega velikega volumna (9 krat večji od 3. ribnika) koncentracija fosforja manjša kot v 3. ribniku. Visoka obremenitev 3. ribnika je posledica obremenitve iz dotoka. Zaradi njegovega majhnega volumna se takšna obremenitev takoj pozna v kvaliteti vode.

Visoko koncentracijo fosforja ima tudi 1. ribnik. Glavni delež fosforja dobi na račun dotoka iz 2. ribnika. Podobne rezultate uvrstitve dobimo tudi iz koncentracije klorofila a. To tudi ne preseneča, saj smo klorofil a izračunali analitično na podlagi z modelom izračunanega skupnega fosforja. Nekoliko drugačne rezultate pa dobimo za skupni dušik, kjer lahko ugotovimo, da je največja koncentracija dušika v prvem in drugem ribniku, kar je posledica visoke koncentracije dušika na dotoku v drugi ribnik. Glede na analize vzorcev, ki jo jih naredili na podjetju Nigrad, kjer so v vzorcih našli sledi fekalnih streptokokov, je visoka koncentracija na vtoku v 2. ribnik najverjetneje posledica emisije odpadnih voda iz greznic okoliških hiš. Najnižjo koncentracijo dušika ima po pričakovanjih tretji ribnik, ki leži v zavetju gozda in ni izpostavljen kmetijskim površinam.

Z modelom v Excelu lahko na podlagi dobljenih rezultatov izračunamo, kakšna je mejna dopustna obremenitev za izbrano želeno stanje (stran »Želeno stanje«). V preglednici 25 je prikazana dopustna obremenitev ribnikov za minimalno in maksimalno koncentracijo fosforja za posamezno trofično stanje. Torej, če želimo, da je 1. ribnik v mezotrofnem stanju, je dopustna obremenitev med 434 in 1381,72 mg P_{tot}/(m²·leto).

Preglednica 25: Mejna dopustna obremenitev Treh ribnikov za posamezno trofično stanje.

		L _{dop} (mgP _{tot} /(m ² ·leto))		
Trofično stanje	Mejna vrednost konc. P (mg/m ³)	1.ribnik	2.ribnik	3.ribnik
ultraoligotrofno	min = 1	39,48	25,51	42,77
	max = 4	157,91	102,02	171,09
oligotrofno	min = 2	197,39	127,53	213,86
	max = 5	394,78	255,05	427,73
mezotrofno	min = 11	434,26	280,56	470,50
	max = 35	1.381,72	892,68	1.497,05
eutrofno	min = 36	1.421,20	918,18	1.539,83
	max = 100	3.947,78	2.550,50	4.277,30
hiperevtrofno	min = 101	3.987,26	2.576,01	4.320,07
	max	-	-	-

5.2 Izračuni dinamičnega modela Treh ribnikov s Stello

5.2.1 Konceptualni model fosforja izdelan s Stello

Pri izdelavi konceptualnega modela fosforja smo uporabili metodo »od zgoraj navzdol«, kar pomeni, da smo model zasnovali najprej na osnovnem nivoju in postopoma prešli k

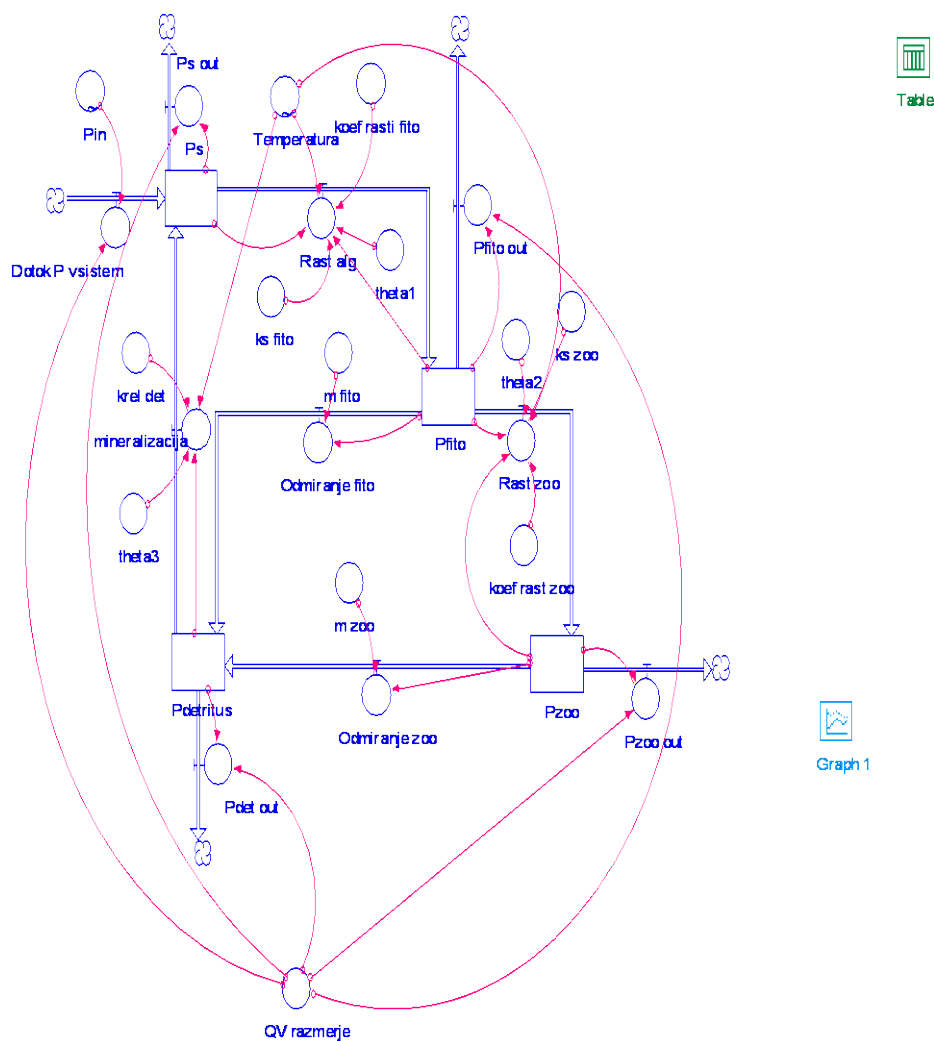
zahtevnejšim funkcijam. Pri izdelavi modela smo upoštevali medsebojno povezanost ribnikov, zato je bilo potrebno modelirati vse tri ribnike hkrati. To lahko izvedemo na dva načina, in sicer s pod modeli ali z uporabo funkcionalnih okvirjev. Zaradi boljše preglednosti smo se odločili za slednjo možnost. Izrisali smo tri funkcionalne okvirje, kjer vsak okvir ponazarja posamezen ribnik (Slika 23).



Slika 23: Osnovni prikaz modela Treh ribnikov izdelan s programsko opremo Stella, kjer rdeče puščice prikazujejo zunanje vplive na model posameznega ribnika, ter medsebojno povezanost ribnikov.

Na naslednjem nivoju smo s pomočjo grafičnih blokov programa Stella izrisali konceptualni model fosforja za posamezni ribnik, v katerega smo vključili ključne elemente fosforjevega kroga. Ribnike smo obravnavali kot popolnoma premešan sistem, zato v modelu nismo upoštevali slojenja. Zaradi boljše preglednosti je na sliki 24 izrisan samo primer fosforjevega kroga za tretji ribnik. Skoraj enaka sta fosforjeva kroga za drugi in prvi ribnik, razlikujeta se

le pri dotoku hranil v sistem, kjer smo upoštevali, da se tretji ribnik izliva v drugi in drugi v prvi.



Slika 24: Konceptualni diagram fosforjevega kroga izdelan s programom Stella.

Zaradi pomanjkanja podatkov v konceptualni model nismo vključili podmodela kopičenja in sproščanja fosforja iz sedimentov, zato smo za prenos fosforja iz enega ribnik v drugega uporabili Prairie-jevo ugotovitev. Prairie (1989) je na podlagi analiz 120 različnih jezer ugotovil, da je za povprečno jezero značilno, da se samo 0,08 % celotnega fosforja v jezeru usede v sedimente na dan oziroma 29% na leto (povzeto po Andersen, 1997). Ta odstotek smo upoštevali pri vtoku fosforja v drugi in prvi ribnik. Parametri modela so opisani v preglednici 26.

Preglednica 26: Parametri modela

Oznaka parametra	Opis	Vrednost	Enota
k_{rel_fito}	Koeficient hitrosti mineralizacije razt. fosforja iz fitoplanktona	0,13	d^{-1}
k_{rel_det}	Koeficient hitrosti mineralizacije razt. fosforja iz nežive organske mase	0,0015	d^{-1}
k_{s_fito}	Pol-saturacijska konstanta za fitoplankton	0,07	g/m^3
k_{s_zoo}	Pol-saturacijska konstanta za zooplankton	0,1	g/m^3
m_{fito}	Koeficient odmiranja fitoplanktona	0,005	d^{-1}
m_{zoo}	Koeficient odmiranja zooplanktona	0,05	d^{-1}
μ_{max_fito}	Koeficient maksimalne rasti fitoplanktona	0,7	d^{-1}
μ_{max_zoo}	Koeficient maksimalne rasti zooplanktona	0,16	d^{-1}
Θ_1	Temperaturni korekcijski faktor za asimilacijo fitoplanktona	1,01	
Θ_2	Temperaturni korekcijski faktor za asimilacijo zooplanktona	1,03	
Θ_3	Temperaturni korekcijski faktor za mineralizacijo	1,0	

Pomen in začetno vrednost odvisnih in neodvisnih spremenljivk v diagramu prikazujeta spodnji preglednici (Preglednica 27 in 28).

Preglednica 27: Odvisne spremenljivke modela

Oznaka odvisne spremenljivke	Opis	Začetna vrednost	Enota
Ps	Raztopljeni fosfor v vodi	0,05	g/m^3
Pfito	Koncentracija fosforja v fitoplanktonu	0,1	g/m^3
Pzoo	Koncentracija fosforja v zooplanktonu	0,001	g/m^3
Pdet	Koncentracija fosforja v neživi organski masi	0,001	g/m^3

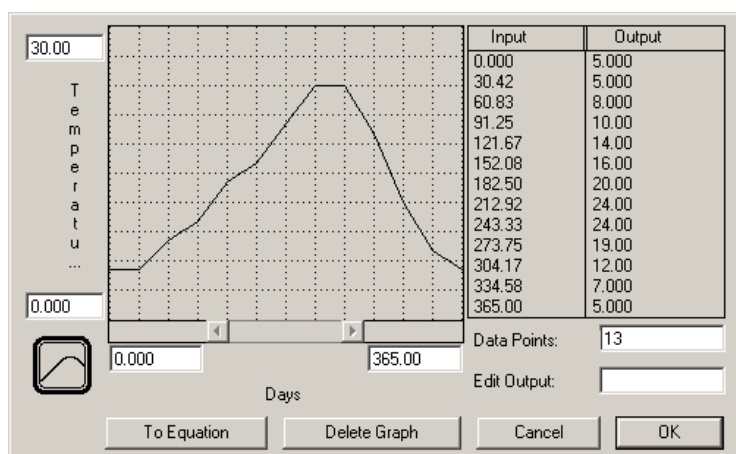
Preglednica 28: Neodvisne spremenljivke modela

Neodvisna spremenljivka	Opis	Način vnosa	Enota
T	Temperatura	Funkcija časa	$^{\circ}C$
Pin	Fosfor, ki doteka v ribnik	Funkcija časa	g/m^3
Q	pretok	konstanta	m^3/dan

Vrednosti neodvisnih spremenljivk

1.) Temperatura

Ker nismo imeli meritev mesečnih temperatur v ribnikih, smo njihove vrednosti predpostavili in jih vključili v model, kot je prikazano na sliki 25. Predpostavili smo, da sta najtoplejša poletna meseca julij in avgust, v ostalih mesecih pa temperatura vode ustrezno pada, glede na temperaturo zraka v okolju. Prav tako predpostavimo, da je čez leto v vseh treh ribnikih enaka mesečna temperatura.

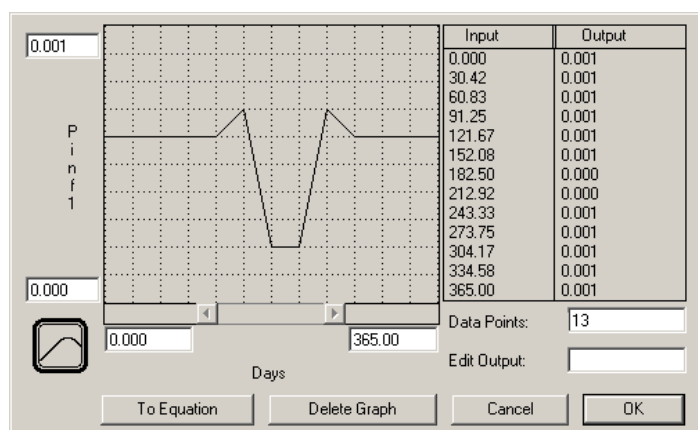


Slika 25: Mesečna temperatura vode v ribnikih za obdobje enega leta.

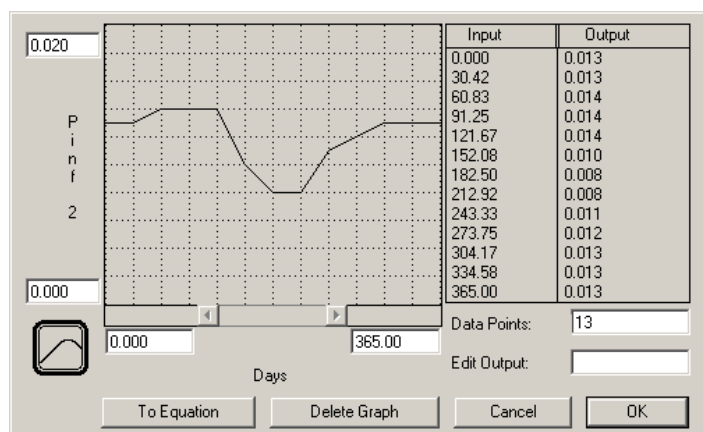
2.) Obremenitev s fosforjem

Za vrednost prihajajočega fosforja iz prispevnih površin in dotokov smo prevzeli kar izračunano vrednost iz enostavnega Vollenweiderjevega modela iz poglavja 5.1. Ker smo z Vollenweiderjevim modelom izračunali koncentracijo totalnega fosforja v ribnikih, predpostavimo da je delež topnega fosforja v njem 90%. Glede na dotoke in obremenitev iz prispevnih površin je izračunana letna količina topnega fosforja za prvi ribnik 2 kg P/leto, drugi ribnik 81 kg P/leto in tretji ribnik 77 kg P/leto. To letno količino smo porazdelili v obliki dnevnega dotoka hranil v skladu s poglavitnimi dejavnostmi na območju vsakega ribnika (Slika 26, 27, 28). Tako imamo v drugem ribniku nekoliko povečan dotok fosforja spomladi, ki je posledica povečanega dotoka hranil v ribnik na račun manjših vrtov iz okoliških hiš. V poletnih mesecih sem upoštevala izsušitev dotokov, zato je tudi vnos hranil v tem obdobju manjši.

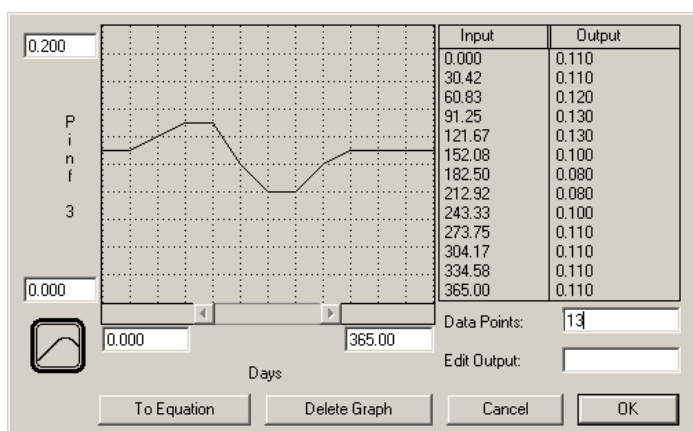
Poudariti je potrebno, da v tej letni količini fosforja ni zajeta obremenitev na račun medsebojnega vpliva ribnika, saj smo to lastnost upoštevali v Stelli. Prav tako predpostavimo, da je $Q_{\text{dotoka}} = Q_{\text{iztoka}}$.



Slika 26: Dotok fosforja iz lastnega povodja v prvi ribnik



Slika 27: Dotok fosforja iz lastnega povodja v drugi ribnik



Slika 28: Dotok fosforja iz lastnega povodja v tretji ribnik

Na podlagi biokemijskih procesov opisanih v podpoglavju 4.2.1, smo sestavili 4 diferencialne enačbe (en. 32 – 35), ki opisujejo dogajanje v fosforjevem krogu. Parametri, ki nastopajo v enačbah, so opisani v preglednici 25.

$$\frac{dP_s}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot P_{in} + k_{rel_det} \cdot \Theta_3^{(t-20)} \cdot P_det + k_{rel_fito} \cdot \Theta_3^{(t-20)} \cdot P_fito - \frac{Q}{V} \cdot P_s - \mu_{max_fito} \cdot \Theta_1^{(t-20)} \cdot \frac{P_s}{P_s + k_{s_fito}} \quad (32)$$

$$\frac{dP_fito}{dt} = (\mu_{max_fito} \cdot \Theta_1^{(T-20)} \cdot \frac{P_s}{P_s + k_{s_fito}} - k_{rel_fito} - m_{fito}) \cdot P_fito - \frac{Q}{V} \cdot P_fito - \mu_{max_zoo} \cdot \Theta_2^{(T-20)} \cdot \frac{P_fito}{P_fito + k_{s_zoo}} \cdot P_zoo \quad (33)$$

$$\frac{dP_zoo}{dt} = (\mu_{max_zoo} \cdot \Theta_2^{(T-20)} \cdot \frac{P_fito}{P_fito + k_{s_zoo}} - m_{zoo}) \cdot P_zoo - \frac{Q}{V} \cdot P_zoo \quad (34)$$

$$\frac{dP_det}{dt} = m_{fito} \cdot P_fito + m_{zoo} \cdot P_zoo - k_{rel_det} \cdot P_det - \frac{Q}{V} \cdot P_det \quad (35)$$

5.2.2 Rezultati modela (osnovni zagon modela)

Rezultati modela so krivulje časovnega poteka opisanih odvisnih spremenljivk P_s , P_{fito} , P_{zoo} in P_{det} za posamezni ribnik. Pri interpretaciji rezultatov je potrebno upoštevati, da smo začetno vrednost parametrov privzeli iz literature, zato bo potrebno model še umeriti, tako da dobimo optimalno ujemanje računa z meritvami. Iz tega razloga rezultati pri osnovnem zagonu modela ne morejo biti zanesljivi kvantitativno, temveč le kvalitativno. Na osnovi rezultatov osnovnega zagona modela lahko opazujemo, kako se model obnaša pod določenimi pogoji in zaključimo, ali model kvalitativno kaže predvidene rezultate dogajanja v ribnikih ter na podlagi tega naredimo analizo občutljivosti in še kvantitativno umerimo model.

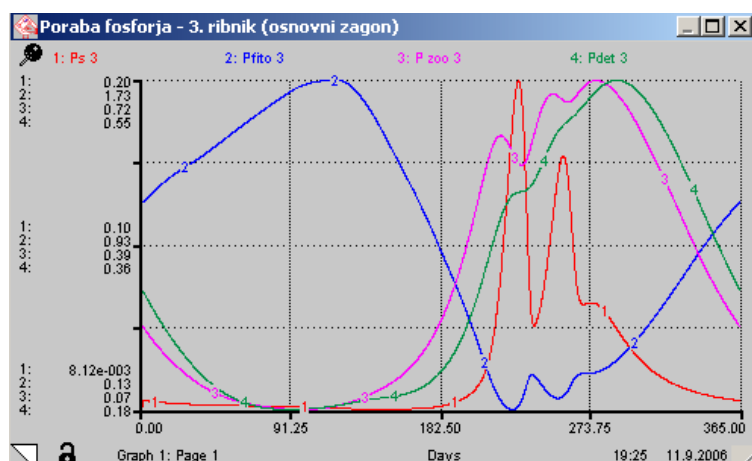
Prav tako je potrebno upoštevati napake v podanih začetnih vrednostih izračunljivih (sistemskih) spremenljivk in zato ponoviti simulacijo za več zaporednih let, seveda z enakimi robnimi pogoji, le izračunane spremenljivke na koncu leta prenesemo v naslednje leto. Po nekaj letih se vrednosti izračunanih spremenljivk na začetku naslednjega leta ujamejo s tistimi iz predhodnega, kar pomeni, da smo dosegli dinamično stabilen sistem in odpravili začetne

napake v vrednostih izračunljivih (sistemskih) spremenljivk. Na začetku smo predpostavili enake začetne vrednosti za odvisne spremenljivke (glej preglednico 27). Preglednica 29 prikazuje nove začetne vrednosti za posamezni ribnik ob dinamično stabilnem sistemu.

Preglednica 29: Začetne vrednosti odvisnih spremenljivk pri stabilnem sistemu.

	Ps	Pfito	Pzoo	Pdet
	g/m ³			
1. ribnik	0,01	0,43	0,11	0,20
2. ribnik	0,02	0,21	0,29	0,70
3. ribnik	0,01	1,14	0,23	0,31

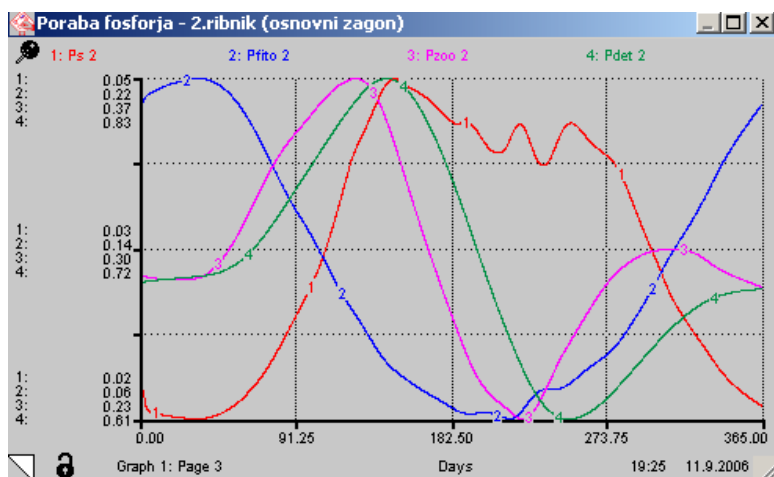
Glede na vhodne podatke ima 3. ribnik največji dotok hranil na razmeroma majhen volumen ribnika. Fitoplankton asimilira raztopljeni fosfor, ki je v tem modelu razen temperature edini limitirajoči faktor za njegovo rast. Zaradi velike koncentracije raztopljenega fosforja, ki doteka v ribnik, fitoplankton začne strmo naraščati, medtem ko posledično močno upada koncentracija raztopljenega fosforja. Fitoplankton narašča nekje do pozne spomladi, nato pa začne upadati, kot posledica manjšega vnosa hranil (poleti suh dotok) in naraščanja koncentracije zooplanktona, ki se hrani s fitoplanktonom. Zaradi odmiranja strmo naraste koncentracija fosforja v neživi organski masi. Pospešen proces mineralizacije organskega fosforja v raztopljen anorganski fosfor ter ustavljena rast fitoplanktona za kratek čas povečajo koncentracijo raztopljenega fosforja v ribniku. (Slika 29)



Slika 29: Simulacija dogajanj v 3. ribniku tekom enega leta (osnovni zagon modela)

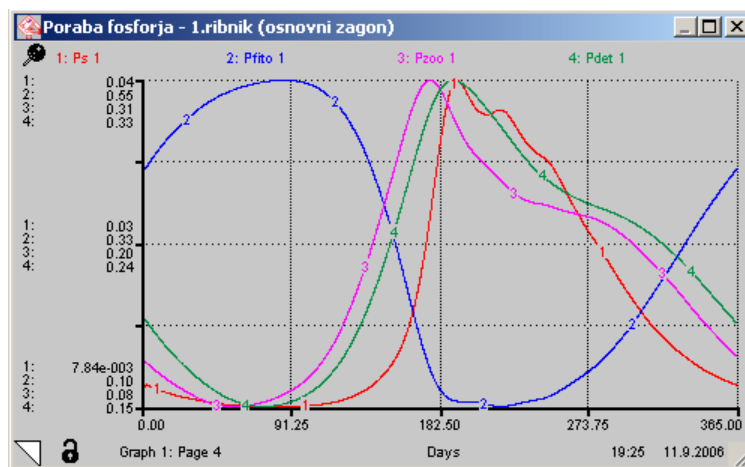
Specifična obremenitev 2. ribnika je veliko manjša na račun njegovega velikega volumna v primerjavi s 3. ribnikom. Iz grafa (Slika 30) lahko vidimo, da rast fitoplanktona doseže vrh že

v februarju, najverjetneje na račun velikega vnosa hranil iz tretjega ribnika. Nato koncentracija fitoplanktona začne počasi padat, posledično se večja koncentracija zooplanktona.



Slika 30: Simulacija dogajanj v 2. ribniku tekom enega leta (osnovni zagon modela)

Največji delež hranil, ki doteka v 1. ribnik je posledica povezanosti ribnika z 2. ribnikom. Del hranil se spira tudi iz lastnega prispevnega območja, vendar je ta količina zanemarljiva v primerjavi z obremenitvijo iz 2. ribnika. Iz grafa (Slika 31) vidimo, da je koncentracija fitoplanktona visoka že na začetku leta, podobno kot pri drugem ribniku. Koncentracija fitoplanktona doseže vrh konec pomladi, potem pa krivulja strmo pada, na račun zmanjšane dotoka hranil iz drugega ribnika. V poletnih mesecih se pogosto zgodi da je preliv med ribnikoma suh.



Slika 31: Simulacija dogajanj v 1. ribniku tekom enega leta (osnovni zagon modela)

Iz zgoraj prikazanih rezultatov osnovnega zagona modela, lahko ugotovimo, da je dogajanje v ribnikih zelo dinamično in da je kakovost vode v 1. in 2. ribniku močno odvisna od stanja ribnika gorvodno. Količina hranil, ki potuje naprej v dolvodni ribnik je odvisna od pretoka iz ribnika. V našem primeru smo uporabili konstantni dnevni pretok čez celo leto, kar pa ne odraža realnega dogajanja v Treh ribnikih. Za rezultate, ki bi bili primerljivi z meritvami bi potrebovali časovno merjene pretoke za obdobje najmanj enega leta.

5.2.3 Analiza občutljivosti

Z analizo občutljivosti dobimo dober pregled nad najbolj občutljivimi komponentami v modelu. Stopnjo občutljivosti lahko določamo tako za parametre modela (začetne vrednosti) kot tudi za odvisne in neodvisne spremenljivke, odvisno od procesa, ki ga modeliramo. Običajno analizo občutljivosti izvajamo tako, da spreminjamo začetne vrednosti parametrov modela in opazujemo, kako se pomembne odvisne spremenljivke odzivajo na spremembe parametrov.

Parametre v modelu podamo vedno z neko stopnjo zanesljivosti. Glede na stopnjo zanesljivosti, spreminjamo vrednost parametrov. Na primer, če je določen parameter podan z zanesljivostjo $\pm 50\%$, bomo za analizo občutljivosti najverjetneje izbrali parametre znotraj območja $\pm 10\%$ in $\pm 50\%$ od podane vrednosti parametra in spremljali spremembe ključne odvisne spremenljivke.

Na ta način sem izvedla tudi analizo občutljivosti na primeru Treh ribnikov. Analizo sem izvedla s pomočjo programske opreme Stella (www.iseesystems.com), ki ima posebej zasnovan modul za izvajanje analize občutljivosti. Najprej je potrebno izbrati parameter, za katerega bomo izvedli analizo, nato določiti mejne vrednosti, znotraj katerih se naj izračun izvede in nazadnje določimo še, na koliko intervalov naj program razdeli podano mejno območje.

V našem primeru smo izbrali 3 intervale, in sicer poleg začetne vrednosti še za 50% zmanjšanje začetne vrednosti in 50% povečanje. Pri tem so vrednosti neobravnanih

parametrov ostale nespremenjene. Rezultate lahko spremljamo tako v grafični kot tudi v obliki tabelnega izpisa vrednosti. Analizo občutljivosti smo naredili za vseh 10 parametrov in pri tem spremljali spremembo štirih ključnih odvisnih spremenljivk, in sicer raztopljeni fosfor v vodi (P_s), koncentracija fosforja v fitoplanktonu (P_{fito}), koncentracija fosforja v zooplanktonu (P_{zoo}) in koncentracija fosforja v neživi organski masi ($P_{detritus}$). Analizirali smo obdobje 365 dni. Časovni korak izračuna smo izbrali 1 dan.

Občutljivost posamezne spremenljivke na določen parameter smo izračunali kot odstopanje kvadratov vrednosti posamezne spremenljivke pri spremembi posameznega parametra (Var_{Δ}^2) od kvadratov vrednosti spremenljivke pri osnovnem zagonu modela (Var_0^2). Pri tem seštejemo spremenljivke po času ($t=[0,360]$). Občutljivost (O) izračunamo po naslednji enačbi:

$$O = \frac{V_{\Delta} - V_0}{V_0}, \text{ kjer sta}$$

$$V_{\Delta} = \sum_{t=0}^{360} Var_{\Delta}^2(t)$$

$$V_0 = \sum_{t=0}^{360} Var_0^2(t)$$

Analiza občutljivosti za parametre s spremembo -50% je podana v preglednici 30, medtem ko je v preglednici 31 podana analiza občutljivosti za parameter s spremembo +50%. Vrednosti so prikazane v procentih. Poleg velikosti vpliva spremembe parametra na posamezno spremenljivko je v preglednici s predznakom označeno, ali sprememba parametra spremenljivko povečuje (+) ali zmanjšuje (-). Grafično je analiza občutljivosti prikazana v PRILOGI B.

Preglednica 30: Občutljivost (%) na zmanjšanje posameznega parametra za -50%

Parameter	Začetna vrednost	1. Ribnik				2. Ribnik				3. Ribnik			
		Ps	Pfito	Pzoo	Pdet	Ps	Pfito	Pzoo	Pdet	Ps	Pfito	Pzoo	Pdet
		%				%				%			
ks_fito	0,07	-73	1	5	4	-75	0	3	3	-74	0	7	5
ks_zoo	0,1	2285	-35	25	10	3826	0	-19	0	3142	28	-73	-57
krel_det	0,0015	-1	0	-2	2	0	0	0	0	-2	0	-1	2
m_fito	0,005	3	6	5	-7	0	2	2	-1	22	6	2	-12
m_zoo	0,05	659	-69	228	-25	3242	0	102	-47	9471	-36	71	-53
μmax_fito	0,7	1110	0	-22	-18	1791	87	-21	-19	4097	36	-81	-65
μmax_zoo	0,16	-85	211	-99	-85	-99	3195	-95	-75	-96	84	-99	-84
Θ1	1,01	10512	61	-52	-46	4869	979	-34	-26	10473	38	-88	-72
Θ2	1,03	98151	-100	-89	-90	81713	-99	-95	-88	94645	-100	-87	-90
Θ3	1	21	52	37	-38	4847	551	255	-73	5	26	13	-47

LEGENDA

	< -100%
	> 100%

Preglednica 31: Občutljivost (%) na povečanje posameznega parametra za +50%

Parameter	Začetna vrednost	1. Ribnik				2. Ribnik				3. Ribnik			
		Ps	Pfito	Pzoo	Pdet	Ps	Pfito	Pzoo	Pdet	Ps	Pfito	Pzoo	Pdet
		%				%				%			
ks_fito	0,07	111	-1	-5	-4	109	-1	-3	-3	151	0	-8	-6
ks_zoo	0,1	-60	45	-39	-28	-63	0	-13	0	-83	13	-27	-19
krel_det	0,0015	2	1	2	-2	0	0	0	0	2	0	1	-2
m_fito	0,005	-1	-5	-5	8	0	-2	-2	1	-12	-6	-2	13
m_zoo	0,05	-82	139	-91	-61	-82	497	-64	-8	-96	78	-99	-81
μmax_fito	0,7	-63	1	4	4	-64	0	3	3	-79	0	7	6
μmax_zoo	0,16	1506	-84	95	58	3061	23	-6	-16	17213	-42	14	-11
Θ1	1,01	58312	4	-98	-92	41357	1281	-94	-84	63852	-51	-99	-93
Θ2	1,03	17344	140	-85	-83	21979	2192	-85	-78	31025	18	-89	-84
Θ3	1	4	-1	2	0	13	-3	-2	2	9	-1	1	0

LEGENDA

	< -100%
	> 100%

Z analizo občutljivosti smo ugotovili, kateri parametri so najbolj občutljivi in njihov vpliv na posamezne odvisne spremenljivke. Na prvi pogled lahko iz preglednic 30 in 31 vidimo, da so spremenljivke veliko bolj občutljive na zmanjšanje posameznih parametrov kot na povečanje. Na podlagi analize občutljivosti vidimo, da se na spremembe parametrov v vseh treh ribnikih najbolj odziva raztopljeni fosfor (P_s). Raztopljeni fosfor je najbolj občutljiv na spremembo temperaturnega korekcijskega faktorja za asimilacijo zooplanktona (Θ_2) in za asimilacijo fitoplanktona (Θ_1). Na koncentracijo raztopljenega fosforja prav tako vplivajo tudi koeficient rasti zooplanktona in fitoplanktona ter koeficient odmiranja zooplanktona.

Na P_{zoo} ima po pričakovanjih v vseh treh ribnikih največji vpliv koeficient odmiranja zooplanktona (m_{zoo}). Večji kot je koeficient odmiranja, manjša je koncentracija fosforja v zooplanktonu in obratno.

Spremenljivki P_{fito} in P_{det} sta najbolj občutljivi v 2. ribniku, in sicer na povečanje temperaturnega korekcijskega faktorja za asimilacijo zooplanktona (Θ_2) in za asimilacijo fitoplanktona (Θ_1), ter na zmanjšanje spremenljivke maksimalne rasti zooplanktona (μ_{max_zoo}).

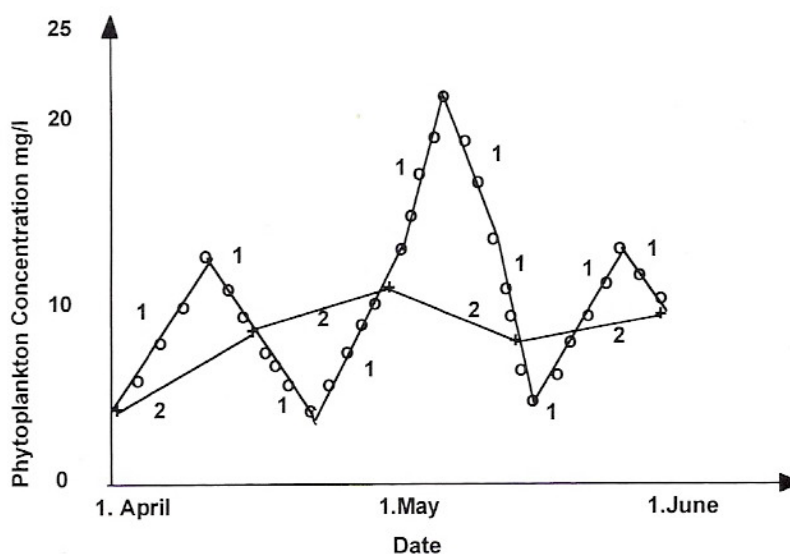
5.2.4 Umerjanje modela

Za osnovni zagon modela smo uporabili parametre iz literature. Ti parametri niso fiksne vrednosti, temveč smo jih izbrali znotraj podanih intervalov, zato je potrebno model tudi umeriti. Umerjanje modela pomeni, da v modelu preizkusimo različne vrednosti parametrov, ter različne rezultate modela primerjamo z izmerjenimi vrednostmi iste odvisne spremenljivke. Iščemo tiste vrednosti parametrov, s katerimi se rezultati modela najbolj približajo dejanskim izmerjenim vrednostim (odvisnih, oz. sistemskih) spremenljivk v ribniku. Pri samem umerjanju je priporočljivo, da umerjamo parametre posamezno in postopoma, ter se osredotočimo najprej na spremembe največ ene ali dveh odvisnih spremenljivk.

Najprej spreminjamo parametre, za katere so spremenljivke pokazale največjo občutljivost, nato pa nadaljujemo proti manj občutljivim.

Na tem mestu je potrebno poudariti, da modelov, ki temeljijo na slabi kvaliteti izvedenih meritev, pogosto ne moremo umeriti. Namreč kvaliteta podatkov je ključnega pomena za kvalitetno umerjen model.

Takšno situacijo ponazarja spodnji primer, ki sta ga navedla Jørgensen in Bendoricchio (2001). Primerjala sta karakteristiko dveh enakih modelov koncentracije fitoplanktona v odvisnosti od časa, in sicer v časovnem obdobju od 1. aprila – 15. maja v hiperevtrofnem jezeru (Slika 32). V prvem primeru sta izvedla izračun na podlagi podatkov s pogostostjo merjenja dvakrat na mesec (krivulja 2) in ta izračun primerjala z rezultati modela s podatki s pogostostjo merjenja trikrat na teden (krivulja 1). Kot lahko vidimo na sliki, se krivulji med seboj občutno razhajata in kakršenkoli poskus realnega umerjanja modela s premalo podatki (krivulja 2) ni mogoč. Ta primer nazorno prikaže, da je za dober model nujno potrebno imeti ne samo podatke z visoko zanesljivostjo (točnostjo), temveč tudi z ustrezno pogostostjo vzorčenja glede na dinamiko sistema.



Slika 32: Koncentracija fitoplanktona v časovnem obdobju od 1. aprila do 15. maja. Krivulja (2)= pogostost vzorčenja dvakrat na mesec; krivulja (1) = pogostost vzorčenja trikrat na teden (Jørgensen & Bendoricchio, 2001).

Z zgoraj opisanim problemom smo se srečali tudi v tej diplomski nalogi, kjer nas težave zaradi pomanjkanja podatkov spremljajo že od začetka. Tako smo pri izdelavi modela predpostavili letni dotok fosforja iz dotokov in ga glede na opravljene meritve razporedili čez

celo leto. V sklopu opravljenih meritev smo določali samo raztopljeni fosfor v vodi, zato lahko izvedemo grobo umerjanje samo za odvisno spremenljivko P_s (koncentracija raztopljenega fosforja v vodi). Za ostale odvisne spremenljivke nimamo opravljenih meritev, zato rezultatov modela ne moremo primerjati z realnimi vrednostmi.

Pri umerjanju parametrov se je potrebno osredotočiti na procese, ki potekajo v ribniku, predvsem na tiste, ki so se v analizi občutljivosti pokazali za najbolj pomembne. Umerjanje modela je lahko zelo zahtevna naloga, še posebej, če v modelu nastopa veliko število parametrov. Procesni so lahko med seboj tesno povezani in sprememba enega parametra vpliva na celotni sistem. Pogosto moramo umerjati že predhodno umerjene parametre in tako lahko poženemo izračune tudi več stokrat, preden končni rezultati modela kažejo trend dogodkov v realnosti.

Glede na uporabljene vhodne podatke, modela fosforja za primer Treh ribnikov ne moremo umeriti, saj bi za to potrebovali časovno merjene pretoke in opravljene meritve kakovosti vode na dotokih in v ribniku v različnih obdobjih leta. Za izdelavo diplomske naloge smo imeli opravljeno samo eno meritev v letu, kar ne zadostuje za korektno umerjanje modela. Prav tako bi bilo potrebno izmeriti koncentracijo P_{fito} , da bi lahko umerili model tudi na to spremenljivko in tako izračunali dejansko koncentracijo totalnega fosforja.

6 DISKUSIJA REZULTATOV MODELOV

V diplomski nalogi smo za izračun obremenitve Treh ribnikov uporabili dva modela, in sicer Vollenweiderjev model fosforja in dinamični model fosforja izdelan s Stello.

Izračun po Vollenweiderjevem modelu smo izvedli za dve varianti vhodnih podatkov. S primerjavo obeh izračunov obremenitve Treh ribnikov po Vollenweiderjevem modelu (brez in z uporabo meritev na dotokih), lahko zaključimo, da je obremenitev ribnikov iz lastnega povodja bistveno večja kot to upošteva model na podlagi spiranja iz identificiranih prispevnih površin in letnih padavin. To je lep primer, ki nam pokaže kako pomembni so kvalitetni podatki za dobre rezultate modela. Če primerjamo obe metodi med seboj ugotovimo, da so po prvem načinu izračuna vsi ribniki z največjo verjetnostjo v mezotrofnem razredu, medtem ko pri drugem načinu vsi trije ribniki »padejo« v hiperevtrfni razred. Koncentracija fosforja v drugem primeru je tudi do 50 krat višja kot kaže izračun po prvem načinu. Razlika med posameznima metodama je tako po OECD kriteriju kar za dva trofična razreda.

Rezultate dobljene z modelom ne moremo primerjati z rezultati, ki smo jih dobili na podlagi meritev julija 2006 (glej preglednico 7). Robni pogoji v modelu so namreč popolnoma drugačni od tistih, ki so nastopali v času opravljenih meritev. Meritve smo izvedli v sušnem obdobju, ko so dotoki in pretoki med ribniki presahnil, medtem ko smo v modelu za izračun obremenitve ribnikov upoštevali dotoke in medsebojno povezanost ribnikov. Meritve kažejo, da so vsi trije ribniki z največjo verjetnostjo v evtrofnem stanju. Na tem mestu je potrebno opozoriti, da enostavni model v izračunu upošteva letno obremenitev vodnega telesa. V našem izračunu smo letno obremenitev iz dotokov določili na podlagi meritev avgusta 2005. To seveda ni realno, saj z enkratno meritvijo ne moremo opisati celoletne dinamike vnosa hranil. Prav tako lahko sklepamo, glede na rezultate Vollenweiderjevega modela brez upoštevanja naših meritev (glej preglednico 17), da bi moral biti dotok hranil v tretji ribnik, glede na rabo površin lastnega prispevnega območja, bistveno nižji kot so pokazale meritve avgusta 2005. Na podlagi tega lahko sumimo na trenutno onesnaženje potoka iz točkovnega vira. Za izračun medsebojnega vpliva ribnikov smo predpostavili letni pretok, od pretoka pa je

odvisna dinamika povezanosti ribnikov in s tem količina hranil, ki potuje naprej v dolvodni ribnik. Na račun številnih predpostavk se zmanjša tudi zanesljivost rezultatov.

Za dobljene rezultate na podlagi enostavnega Vollenweiderjevega modela je potrebno upoštevati, da gre le za okvirne vrednosti, saj se obremenitev s fosforjem spreminja skozi leto in posledično se spreminja tudi kakovost vode v ribnikih. Tako na podlagi rezultatov enostavnega modela ne moremo sprejemati odločitev o posegu v prostor, vendar so rezultati lahko temelj za nadaljnje meritve in raziskave.

V sklopu diplomske naloge smo izdelali tudi koncept dinamičnega modela fosforja, ki je sicer zelo poenostavljen, saj ne vsebuje podmodela kisika in sproščanja sedimentov. Zaradi pomanjkanja podatkov, smo izvedli samo osnovno simulacijo dogajanja v ribnikih.

Rezultati Stelle kažejo podobne rezultate kot drugi način izračuna po Vollenweiderjevem modelu. Najbolj obremenjen s fosforjem je 3. ribnik, kar je posledica velike koncentracije hranil, ki prihaja v ribnik. Upoštevati moramo, da smo obremenitev ribnika čez celo leto predpostavili glede na eno samo opravljeno meritev na dotoku v ribnik (avgust 2005), ki kaže na zelo visoko obremenitev s hranili iz dotoka. V zasnovi modela smo predpostavili nizek dnevni pretok med tretjim in drugim ribnikom, in sicer 1,5 l/s, zato se veliko hranil zadrži v ribniku, kar se odraža v visoki koncentraciji totalnega fosforja v 3. ribniku. Pretok iz 2. v 1. ribnik je trikrat večji, zato večina hranil teče naprej in se akumulira v 1. ribniku. Posledica tega je visoka koncentracija totalnega fosforja v 1. ribniku, ne glede na majhno lastno prispevno območje. Na rezultate Stele vplivajo tudi številni drugi parametri kot je koeficient rasti za fitoplankton in zooplankton, koeficient odmiranja, koeficient mineralizacije itd.. Za vse uporabljene parametre smo prevzeli vnaprej definirane vrednosti iz literature, zato dobljeni rezultati ne morejo biti zanesljivi kvantitativno pač pa le kvalitativno.

Za uporabne rezultate je potrebno model nujno umeriti, vendar tega na podlagi ene točke ni mogoče narediti, saj skozi eno točko lahko poteka nešteto premic. Za korektno umerjanje modela potrebujemo časovno serijo meritev za simulirano obdobje. Ko imamo umerjen model, ga lahko uporabimo za večletne napovedi z različnimi scenariji. Na podlagi dinamičnih modelov lahko simuliramo spremembe v koncentraciji hranil v ribniku po opravljeni sanaciji (redukcija vnosa hranil iz prispevnega območja, uvedba predčiščenja,...) in se na podlagi tega lažje odločimo o ustreznih ukrepih.

7 ZAKLJUČEK IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO

Matematični modeli so v zadnjih letih zagotovo postali najbolj in najhitreje razvijajoča se metoda upravljanja z vodnimi telesi. Njihova prednost se kaže predvsem v napovedovanju kratkoročnih in dolgoročnih sprememb kakovosti vode, ne da bi pri tem delali kakšne posege v vodno okolje. Prav pri iskanju optimalnih tehničnih in planskih ukrepov so matematični modeli nepogrešljivo orodje, s katerim lahko potem upravičimo pomen sanacijskega ukrepa.

Glavni namen diplomske naloge je bil izdelati enostavni stacionarni in nekoliko kompleksnejši dinamični model kakovosti vode v Treh ribnikih. Oba modela temeljita na določitvi koncentracije celotnega fosforja v vodi, saj je fosfor najpogosteje ključno limitirajoče oz. omejitveno hranilo v sladkovodnih ekosistemih v naši geografski širini in pri jezerih s pretočnim časom do nekaj let. Iz tega razloga se pogosto kot ukrep za zagotavljanje ustrezne kakovosti vode uporabljajo različne metode za zmanjševanje vnosa fosforja v jezerih in ribnikih.

Eden izmed ciljev naloge je bil tudi približati matematično modeliranje širši populaciji ljudi. Kmalu sem ugotovila, da so za laično publiko uporabni samo enostavni modeli. S pomočjo analitično rešljivih enačb, ki ponazarjajo nekatere procese v ribniku, sem v Excelu izdelala tako imenovani »one-box« model, ki ga je uveljavil Vollenweider. Z vnosom potrebnih vhodnih podatkov lahko laični uporabnik enostavno dobi oceno stanja njegovega ribnika.

Model sem preizkusila na primeru Treh ribnikov v mariborskem parku. Že pri izdelavi enostavnega modela sem kmalu ugotovila, da so kvalitetni podatki meritev ključnega pomena za dobre rezultate modela. Glede na to, da se na Treh ribnikih ne izvaja redni monitoring, saj se po Uredbi o kemijskem stanju površinskih voda (Ur.l.št. 11/2002) ugotavljanje kemijskega stanja obvezno izvaja v naravnih in umetnih jezerih s površino nad 0,5 km² in prostornino, ki je pomembna za celotno hidrografska zaledje, so bili naši podatki odvisni od posameznih vzorčenj podjetja Nigrad in vzorčenj FGG. Tako sem za izdelavo modela imela na razpolago zelo skope podatke, še posebej kvantitativno.

Zaradi pomanjkanja podatkov sem morala že na stopnji enostavnega modela nekatere vrednosti vhodnih podatkov predpostaviti. S tem se je zanesljivost modela avtomatično zmanjšala, zato je pred izdelavo modela potrebno upoštevati, da je metoda zbiranja in vrednotenja podatkov v povezavi z zastavljenimi cilji, ki smo si jih zastavili na začetku naloge. Prav tako se moramo zavedati, da je zbiranje in vrednotenje podatkov najdražji del, saj zajema od 80% do 90% vseh stroškov modeliranja. Iz tega razloga izvajanje novih kontinuiranih meritev v tem primeru ni bilo izvedljivo.

Prednost enostavnih modelov je, da lahko tudi v situaciji z malo zanesljivimi podatki, dobimo neko okvirno oceno stanja in se na podlagi tega odločimo za morebitne nadaljnje ukrepe. Slabost enostavnih modelov pa je močna poenostavitev nekaterih karakteristik jezera na zgolj morfološke in hidravlične parametre, medtem ko je pogled na jezero kot živi ekosistem popolnoma zanemarjen.

Nekoliko več znanja pri matematičnem modeliranju zahteva izdelava dinamičnega modela, zato so ti modeli primerni za uporabnike z inženirskim in naravoslovnim predznanjem. Posebna modelirna orodja, kot npr. Stella (www.iseesystems.com), omogočajo dinamično modeliranje na konceptualnem nivoju procesov in ključnih spremenljivk, pri tem pa ni potrebno obširno znanje infinitezimalne in numerične matematike. Z dinamičnimi modeli lahko opišemo tudi časovno odvisne procese znotraj ribnika, kot so poraba fosforja za rast fitoplanktona in naprej v celi prehranjevalni verigi.

Kljub dejstvu, da imamo na razpolago slabe podatke, smo se odločili, da izdelamo tudi dinamični model. Kmalu nas je pomanjkanje podatkov prisililo, da smo številne parametre v modelu morali predpostaviti ter nekatere pomembne procese zanemariti. Eden od teh je zagotovo kopičenje in sproščanje hranil iz sedimentov. Sedimenti lahko predstavljajo pomemben notranji vir fosforja (še posebej v plitvih ribnikih) in tako močno vplivajo na kakovost vode v ribniku. Ker v sklopu opravljenih meritev nismo zajeli sedimentov, smo ta pomemben vir fosforja v modelu zanemarili. S tem se je zanesljivost modela močno zmanjšala. Prav tako smo pri izdelavi modela prehranjevalno verigo zaključili z zooplanktonom, medtem ko vemo, da so v ribniku tudi višje razvite živalske vrste (ribe in želve). Glede na številne predpostavke na račun slabih podatkov pri izdelavi dinamičnega modela, lahko zaključimo, da je za izdelavo kvalitetnega modela pogosto potrebno veliko

izkušenj in inženirske prakse. Dober inženir lahko na podlagi svojih in tujih izkušenj poda zelo dobro oceno dejanske vrednosti nepoznanih parametrov v modelu.

V sklopu dinamičnega modela bi bilo zanimivo izdelati tudi podmodel kisika kot produkcijo fotosinteze. Njegova poraba pa je posledica razkroja v sedimentih in respiracije fitoplanktona. Z izdelanim modelom kisika bi lahko spremljali njegovo koncentracijo in tako napovedali morebitno hipoksijo ali celo anoksijo. Takrat koncentracija pade pod 2 g/m^3 , kar vodi posledično v pogin rib. Prav tako bi bilo potrebno izdelati podmodel sproščanja fosforja iz sedimentov, saj so sedimenti lahko pomemben notranji vir fosforja.

Kljub temu, da rezultatov enostavnega in dinamičnega modela ne moremo primerjati z opravljenimi meritvami, saj so bile meritve opravljene v relativno neugodnem časovnem obdobju (avgust 2005 in julij 2006), ko so bili pretoki zelo nizki ali pa so le-ti presahnili, lahko ugotovimo, da bo na območju Treh ribnikov potrebna temeljita redukcija hranil. Glede na to, da se v drugem ribniku pojavljajo sledi koliformnih bakterij, bi bilo potrebno odpraviti problem s spuščanjem fekalnih voda iz okoliških hiš v Ribniški potok, ki se izliva v ribnik. Te hiše bi bilo potrebno priključiti na obstoječo kanalizacijo oz. urediti primerne greznice. Alternativna rešitev tega problema je tudi izgradnja male rastlinske čistilne naprave, ki posnema samočistilno sposobnost narave za čiščenje onesnaženih voda. Drugi ribnik je prav tako obremenjen z neraztopljenimi in usedljivimi snovmi, ki dotekajo predvsem iz meteornege kanala, zato bi bilo potrebno pred vtokom v drugi ribnik urediti peskolov.

Pri nadaljnjem delu na območju Treh ribnikov bi bilo potrebno najprej načrtovati dober program merjenja, še posebej za drugi ribnik, zaradi bližine Ribniškega sela in velikih prispevnih površin, ter za tretji ribnik, zaradi njegovega majhnega volumna. Na podlagi novih meritev bi bilo potrebno umeriti dinamični model in z modelom simulirati vpliv redukcije vnosa fosforja na izboljšanje kakovosti vode v ribnikih v naslednjih nekaj letih.

Na koncu lahko povzamemo, da je matematično modeliranje lahko večmesečno delo in od inženirja zahteva veliko iznajdljivosti in znanja na področju poznavanja procesov, ki jih modeliramo, ter lastnosti programske opreme in njene zmogljivosti.

Ne glede na to, da Trije ribniki spadajo med ribnike estetske namena, je skrb za njihovo kakovost nujno potrebna za ohranjanje vrednote mestnega parka.

VIRI

Uporabljeni viri

Andersen, T., 1997. Pelagic Nutrient Cycles. Herbivores as Source and Sinks. Springer-Verlag: 280 str.

Atanasova, N., 2005. Priprava in uporaba ekspertnega predznanja za avtomatizirano modeliranje vodnih ekosistemov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Birsa M., 2005. Izdelava matematičnega modela Blejskega jezera z orodji DYRESM in CAEDYM. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Birsa, M., 2004. Matematično modeliranje evtrofnosti jezer. Seminarska naloga. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani: 90 str.

Deaton, M.L., Winebrake, J.J., 2000. Dynamic modeling of environmental systems. Springer-Verlag: 194 str.

Fridl, J. (ur.), Kladnik, D. (ur.), Adamič, M. (ur.), Perko, D. (ur.), 1998. Geografski atlas Slovenije. Ljubljana, DZS: 360 str.

Jones, R.A., Lee, G.F., 1985. Eutrophication Modelling for Water Quality Management: An Update of the Vollenweider-OECD Model. Department of Civil and Environmental Engineering. New Jersey Institute of Technology
http://www.gfredlee.com/nut_limit.html (14.1.2006)

72 Mičić, T. 2006. Matematični model kakovosti Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku. Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.

Jørgensen, S.E., Vollenweider, R.A., 1988. Guidelines of Lake Management. Principles of Lake Management. Volume 1, International Lake Environment Committee. United Nations Environment Programme: 199 str.

<http://www.ilec.or.jp/eg/> (20.12.2004).

Jørgensen S.E., Bendoricchio G., 2001. Fundamentals of Ecological Modelling, 3rd Edition. Developments in environmental modelling. Netherlands, Elsevier: 525 str

B., Z., 1979. Kmalu ureditev Treh ribnikov. Večer 148: 8.

Lee, G.F., 2002. Evaluating Nitrogen and Phosphorus Control in Nutrient TMDLs. Stormwater. The Journal for Surface Water Quality professionals.

http://www.forester.net/sw_0201_evaluating.html (14.1.2006)

Mičić, T., 2006: Načrtovanje in upravljanje z ribniki v urbanem okolju. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Mikoš, M., Brilly, M., Kranjc, A., Matičič, B., Muller, J., Rakovec, J, Roš, M., 2002.

Hidrološko izrazje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 323 str.

<http://ksh.fgg.uni-lj.si/ksh/>

Nigrad d.d., vzdrževanje javne kanalizacije Meteorna kanalizacija – Ribniško selo: Glavni meteorni kanal in priključek na glavni meteorni kanal s Terčeve ulice. Maribor, Nigrad d.d. Oddelek za laboratorijske preiskave, 2005

Pirkmajer, T., 1979. Rekreatijske in parkovne površine s krajinsko-oblikovalskega vidika. Ureditev območja treh ribnikov v Mariboru. Diplomaska naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo

Stare, N. 1979. Kako nadaljevati promenado. Večer 87: 8.

Starškraba, M., Tundisi, J.G., 1999. Guidelines of Lake Management. Reservoir Water Quality Management. International Lake Environment Committee. United Nations Environment Programme: 200 str.

Statistični letopisi 2001-2005. Ljubljana, Statistični urad RS.

<http://www.stat.si> (23.2.2006)

Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih vod v vode in javno kanalizacijo. Ur. l. RS, št. 47-1902/2005: 4737-4749.

Uredba o kakovosti površinskih voda, ki se jih odvzema za oskrbo s pitno vodo. Ur. l. RS, št. 46/2002, 41/2004-ZVO-1

Uredba o kakovosti površinskih voda za življenje sladkovodnih vrst rib. Ur. l. RS, št. 125-5239/2000: 14315-14318.

Using Water Chemistry To Determine a Waterbody's Trophic State. Florida Lakewatch University of Florida. Department of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002

<http://lakewatch.ifas.ufl.edu> (31.1.2006)

Vrbnjak, T., 2000. Bodo vsi ribniki parkovni ribniki? Večer, 200:16

Ostali viri:

Angelo, D.J., Hartle, M., Hock, W.K., 1998. Pond Management and Aquatic Plant Control, Pennstate College of Agricultural Science

<http://pubs.cas.psu.edu/freepubs/pdfs/ags76.pdf> (30.6.2005)

Austin, M., Devine, H., Goedde, L., Greenlee, M., Hall, T., Johnson, L., Moser, P., 1996. Ohio Pond Management Handbook, A guide to managing ponds for fishing and attracting wildlife, Division of Wildlife, Ohio Department of Natural Resources: 55 str.

<http://www.dnr.state.oh.us/wildlife/Fishing/pond/default.htm> (30.8.2005)

74 Mičić, T. 2006. Matematični model kakovosti Treh ribnikov v mariborskem Mestnem parku. Dipl. nal. - UNI. Ljubljana, UL, FGG, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva.

B.S., 1986: Kritično o Treh ribnikih: Kaj počnejo ribiči?. Večer 289: 7.

Bendorf, J. (1979): A contribution to the phosphorus loading concept. Int. Revue ges. Hydrobiol. 64, 2, 177-188.

Bendoricchio, G., Coffaro, G. in De Marchi, C. (1994): A trophic model for *Ulva rigida* in the Lagoon of Venice. Ecological Modelling: 75-76, 485-496.

Biggs, J., Williams, P., Whitfield, M., Fox, G., Nicolet, P., junij 2000. Ponds, pools and lochans (Guidence on good practice in the management and creation of small waterbodies in Scotland), SEPA: 89 str.

<http://www.sepa.org.uk/publications/leaflets/hei/index.htm> (4.5.2005).

Bowie G.L., Mills W.B., Porcella D.B., Campbell C.L., Pagenkopf J.R., Rupp G.G., Johnson K.M., Chan P. W.H., Gherini S.A., 1985. Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modelling (2nd Edition). U.S. Environmental Protection Agency, Georgia.

Crochet, D.W., 1999. Fish pond management guide, SC Department of Natural resources: 27 str.

<http://www.dnr.state.sc.us/wild/freshfish/img/fishpond.pdf> (30.6.2005)

Cvetnič, D., 1978. Ponos in sramota. Večer 82:11.

Gal, G., Parparov, A., Rozenberg, T., Wagner, U., 2004. Testing the Impact of Management Scenarios on Water Quality Using an Ecosystem Model, Kinneret Limnological Laboratory <http://www.iemss.org/iemss2004/pdf/infotech/galtest.pdf> (14.9.2005)

Levenspiel, O., 1999. Chemical reaction engineering. Third edition. Department of Chemical Engineering. Oregon State University. John Wiley & Sons, Inc.: 668 str.

Lorenzen, M.W., Smith, O.J., Kimmel, L.V., 1976. A long-term phosphorus model for lakes: Application to Lake Washington. In: R.P. Canale (ed.), Modeling Biochemical Processes in Aquatic Ecosystems. Ann Arbor Science, Michigan: 75-92.

Mariborčani o urejanju Treh ribnikov. Skrajni čas, 1979. Večer 167: 8.

Rogelj, D., Bat, M., Latić, B., Frantar, P., 2002. Poročilo o stanju okolja, Naravne karakteristike celinskih površinskih voda, Agencija RS za okolje

Swistock, B., Sharpe, W.E., 1998. Water Quality Concerns for Ponds. Pennstate, College of Agricultural Sciences

www.sfr.cas.psu.edu/water (30.6.2005).

UNEP. Planning and Management of Lakes and Reservoirs: An Integrated Approach to Eutrophication. Newsletter and Technical Publications

<http://www.unep.or.jp/ietc/publications/techpublications/techpub-11/index.asp> (15.5.2006)

Uredba o kemijskem stanju površinskih voda. UL RS št.11/2002: 818

Williams, B., 2005. Hydrobiological modelling. University of Newcastle. Australia.

<http://www.iseesystems.com/resources/CaseStudies/STELLA/STELLA-Biology.pdf>

Monitoring and assessing water quality, poglavje 5.6. Phosphorus

<http://www.epa.gov/volunteer/stream/vms56.html> (20.5.2006)

Zakon o varstvu okolja (ZVO-1). Ur. l. RS, št. 41-1694/2004: 4818-4853.

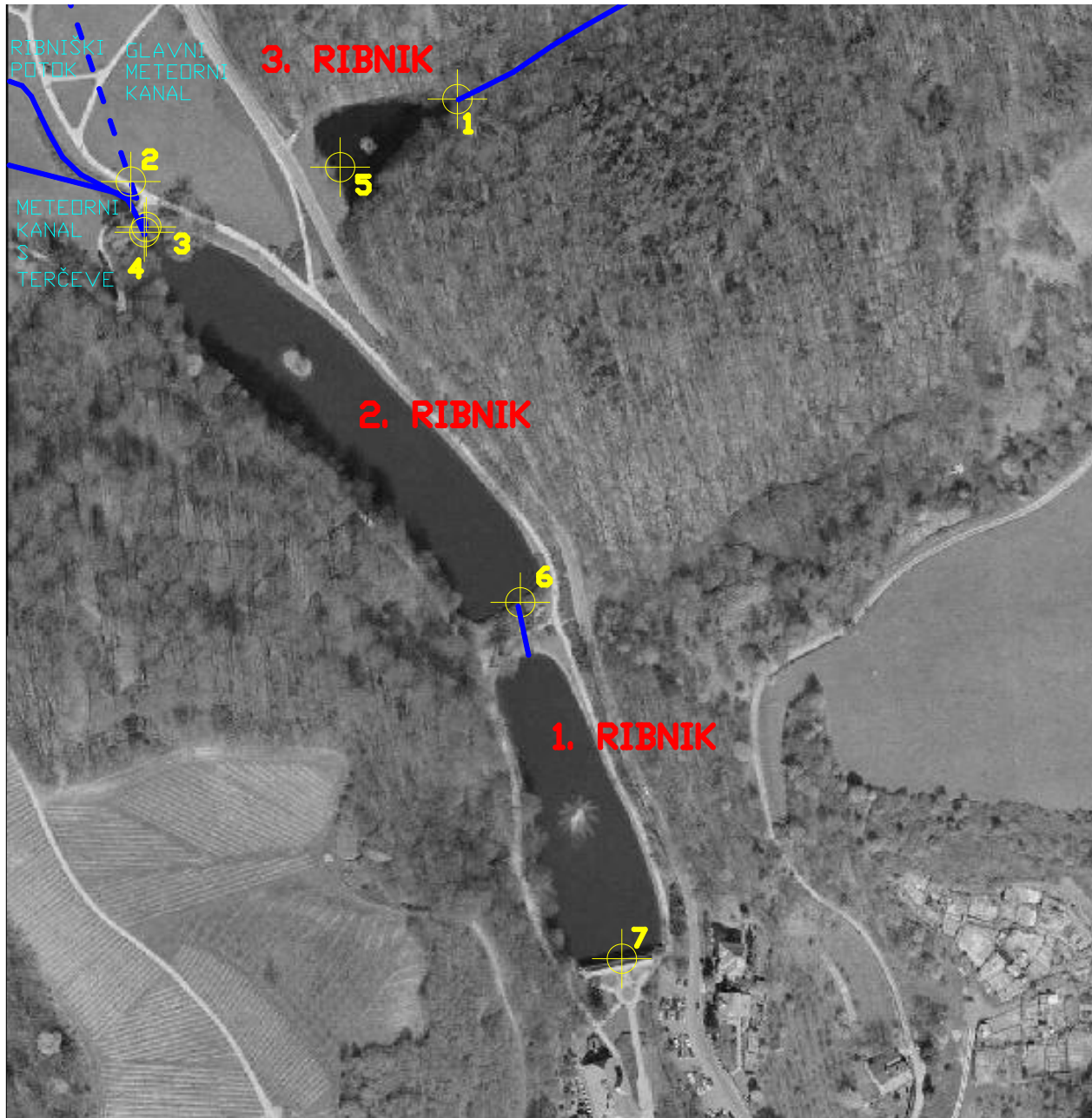
Zakon o vodah (ZV-1). Ur. l. RS, št. 67-3237/2002: 7648-7680.

Zupan M., 2002. Poročilo o stanju voda v Sloveniji 2002. Poročilo. Ljubljana, Agencija RS za okolje: 52 str.

<http://maribor.si>

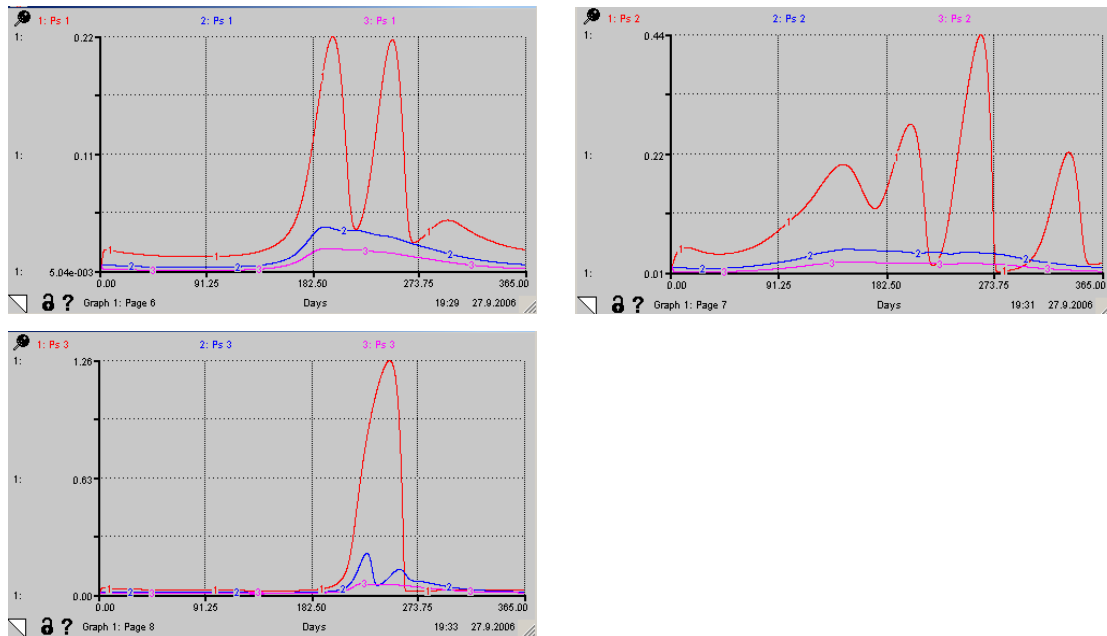
PRILOGA A: Mesta vzorčenja podjetja NIGRAD in FGG

Mesta vzorčenja (1-7) so označena z rumenimi križci.

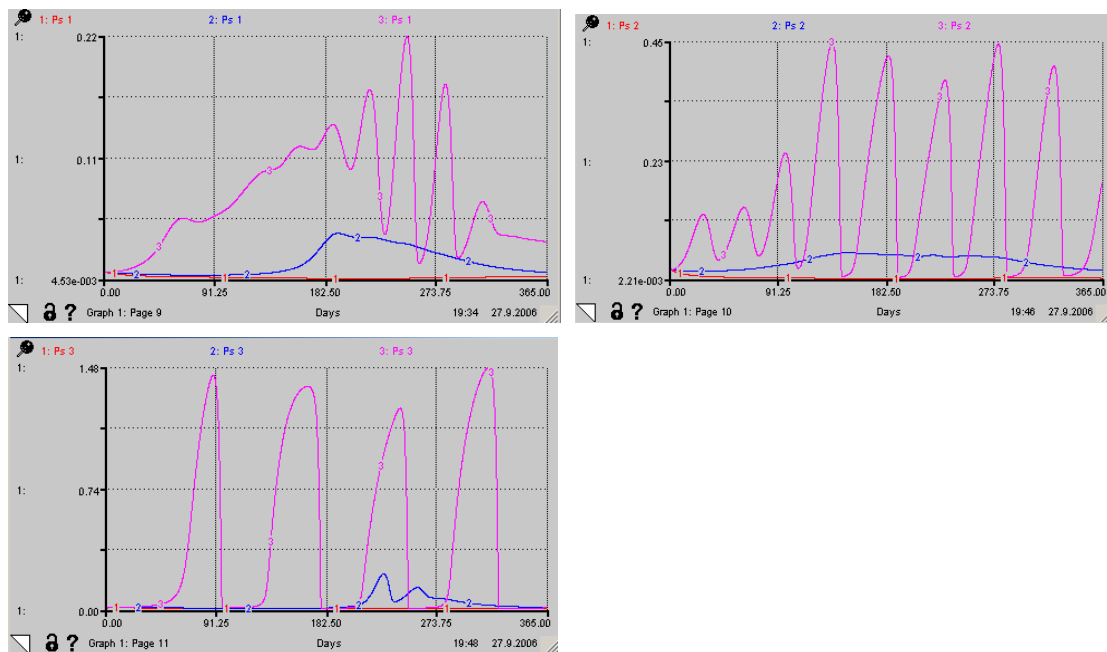


PRILOGA B: Grafični prikaz analize občutljivosti (STELLA)

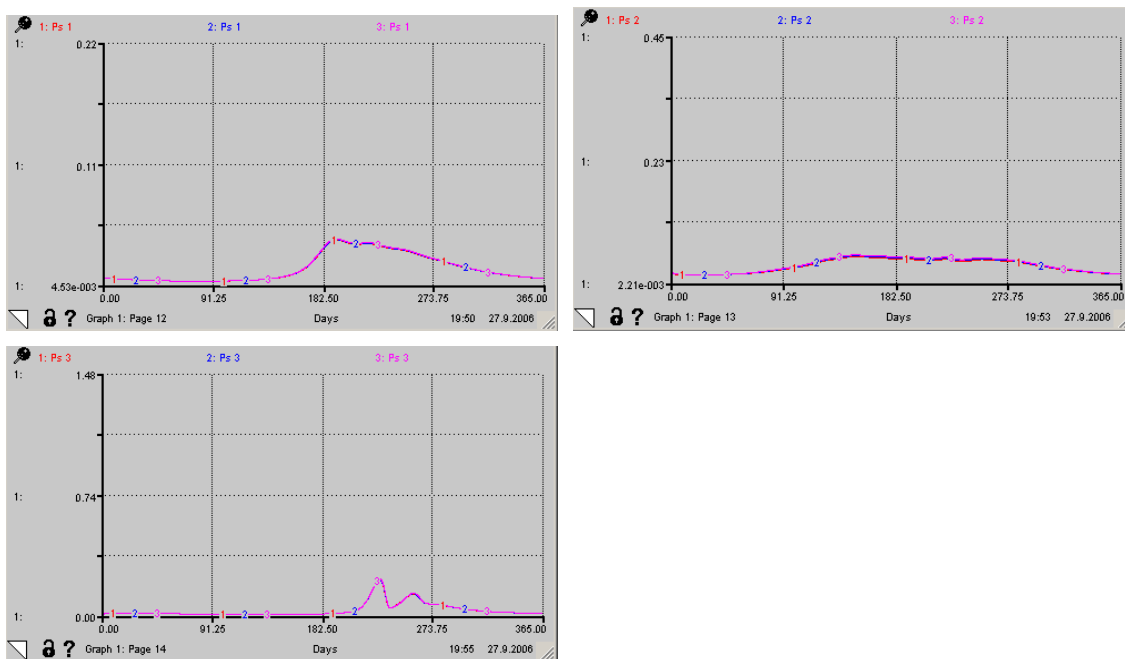
Analiza občutljivosti Ps na $\pm 50\%$ spremembo parametrov v vseh treh ribnikih. Modra krivulja je 0%, Rdeča krivulja = sprememba parametra za -50% ; vijolična krivulja = sprememba parametra za $+50\%$.



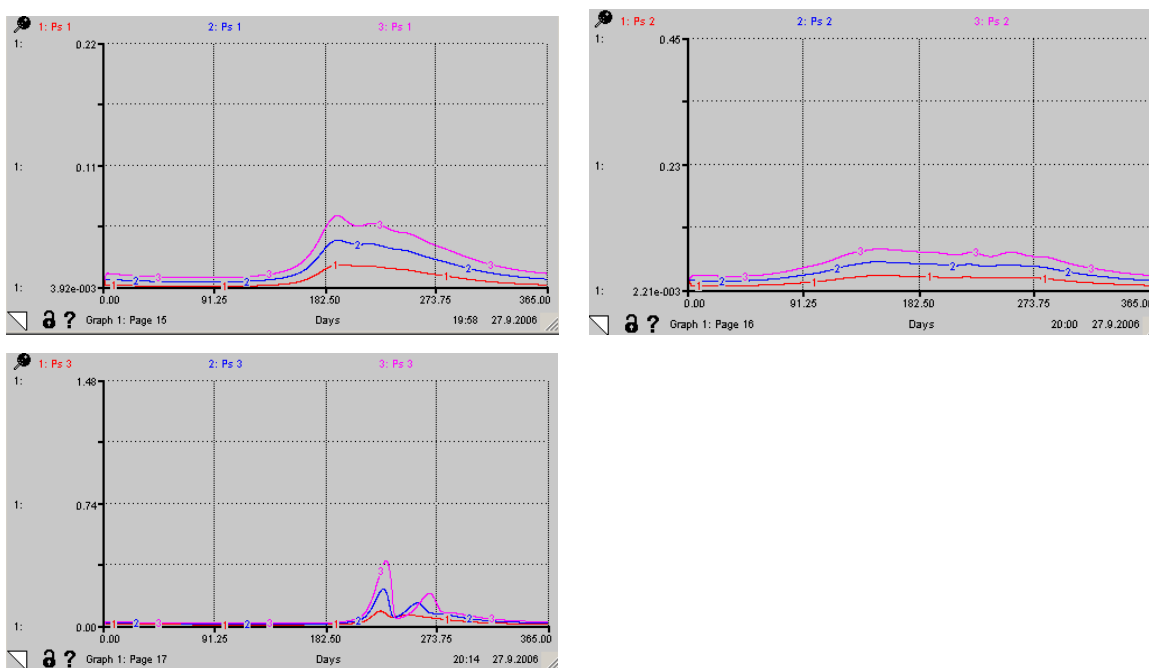
Slika 33: Parameter μ_{max_fito} za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)



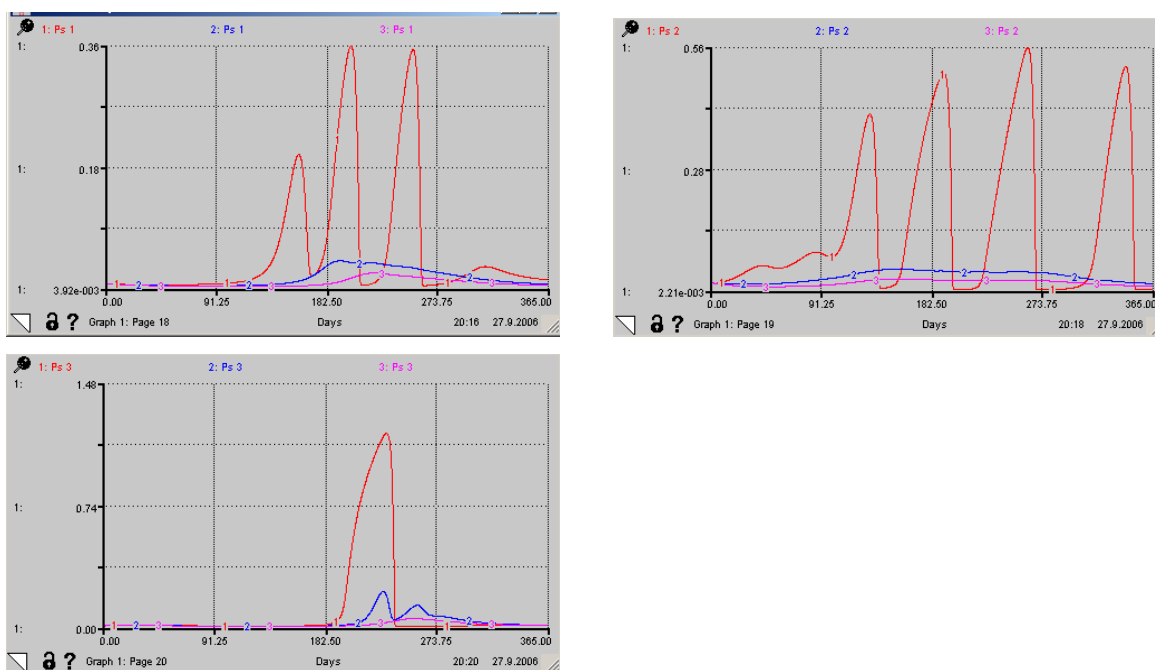
Slika 34: Parameter μ_{max_zoo} za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)



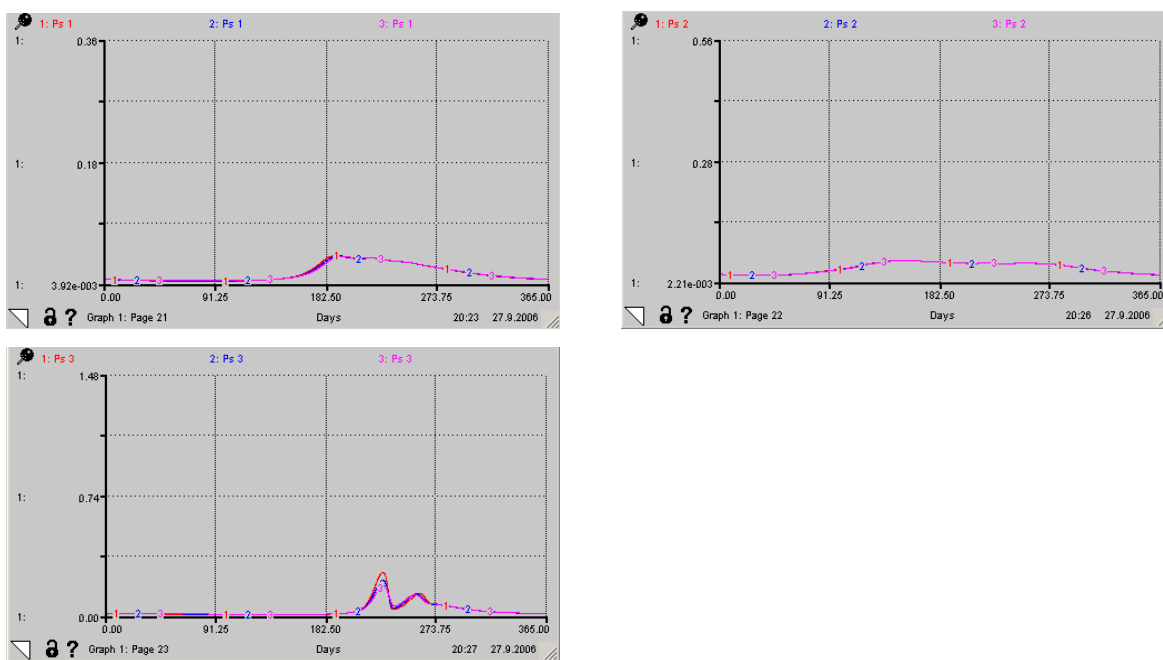
Slika 35: Pramerer krel_det za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)



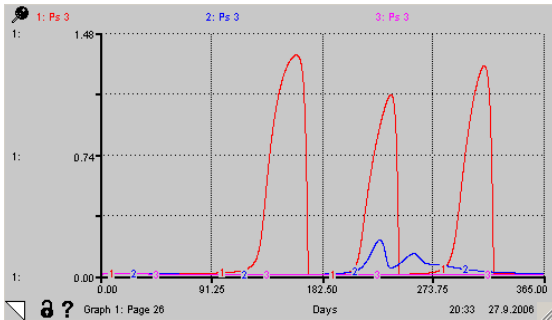
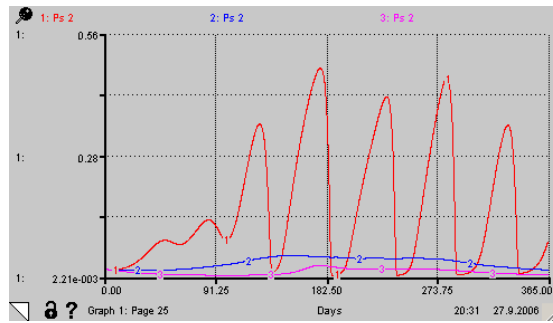
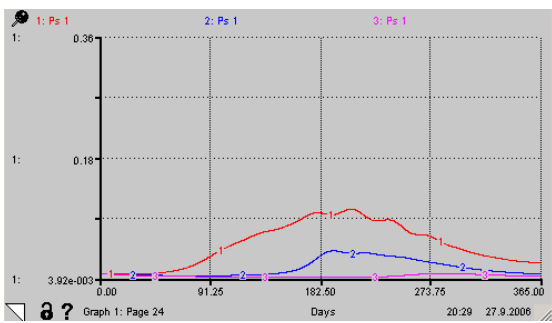
Slika 36: Pramerer ks_fito za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)



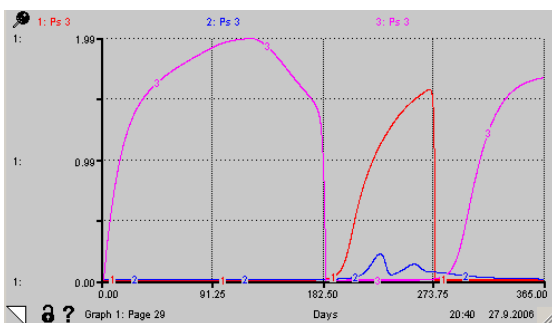
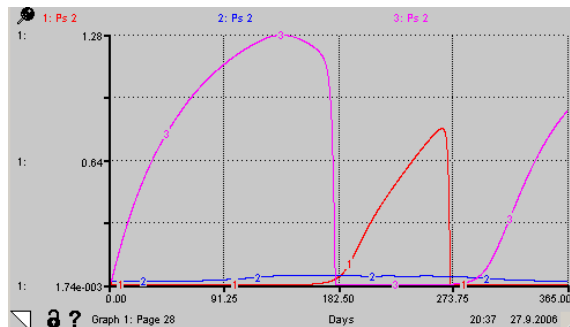
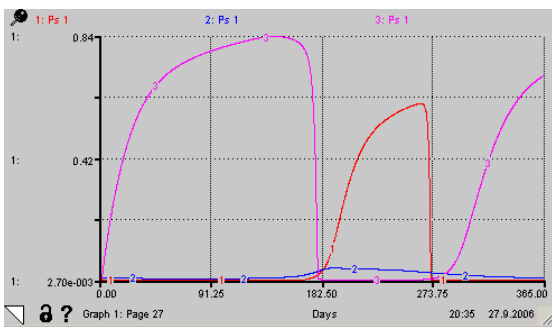
Slika 37: Pramer: ks_zoo za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)



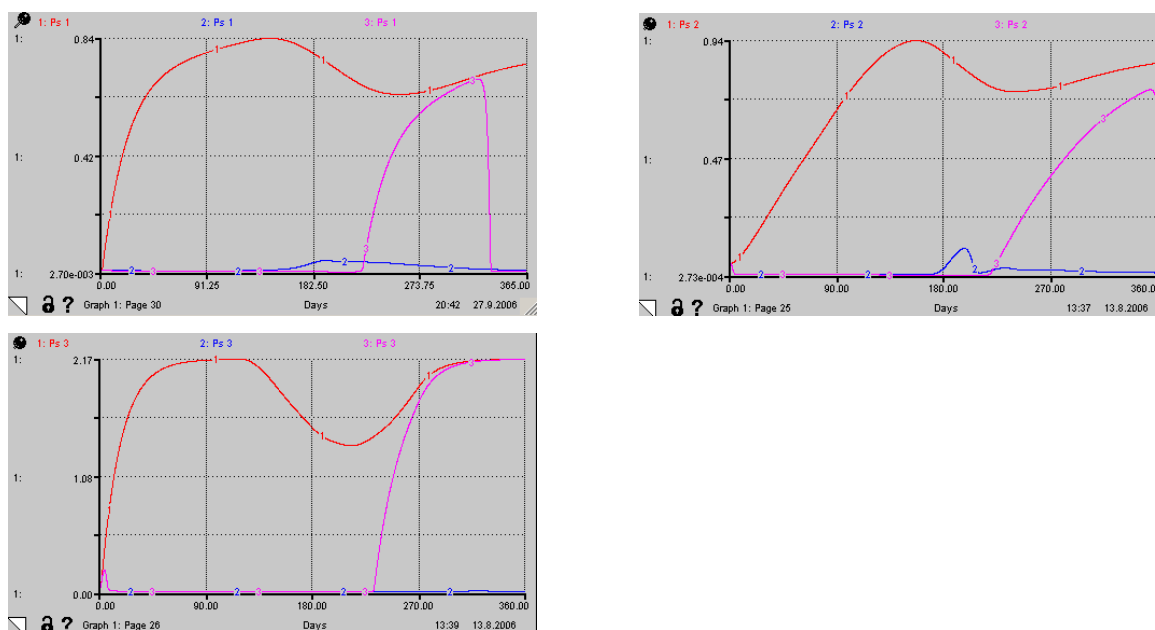
Slika 38: Pramer: m_fito za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)



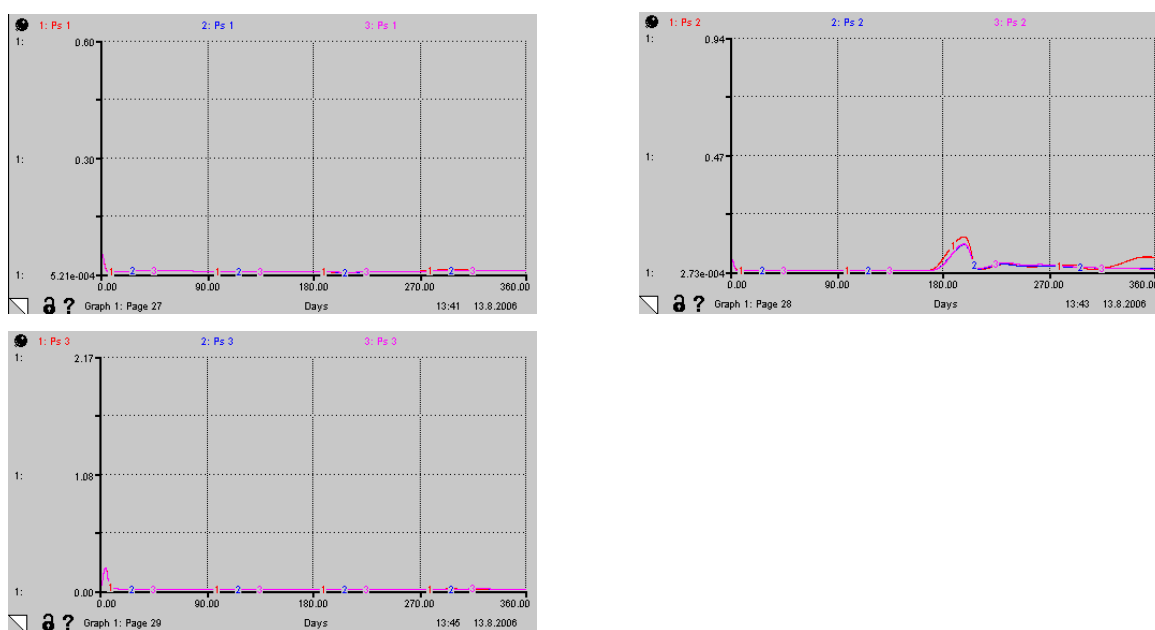
Slika 39: Pramer: m_{zoo} za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)



Slika 40: Pramer: Θ_1 za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)



Slika 41: Prameter: Θ_2 za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)



Slika 42: Prameter: Θ_3 za 1. (levo zg.), 2. (desno zg.) in 3. ribnik (spodaj)