

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:

Jana Skubic

Vpliv obremenitve in morfologije jezera na kakovost jezera

Diplomska naloga št.: 53

Mentor:

prof. dr. Boris Kompare

Somentor:

doc. dr. Nataša Atanasova

Ljubljana, 17. 2. 2006

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 504:556.55(043.2)
Avtor: Jana Skubic
Mentor: izr. prof. dr. Boris Kompare
Naslov: Vpliv obremenitve in morfologije jezera na kakovost jezera
Obseg in oprema: 59 str., 9 pregl., 20 sl., 27 en.;
Ključne besede: Blejsko jezero, eutrofnost jezera, Imbodenov model, dopustna obremenitev;

Izvleček

V diplomski nalogi sem uporabila Imbodenov model za napoved dopustnih obremenitev v jezeru. Imbodenov model je poenostavljen konceptualni fosforjev model, ki temelji na bilanci fosforja v jezerski vodi. Osnovna predpostavka modela je ta, da je fosfor edini omejitveni faktor eutrofikacije. Model ločeno obravnava dogajanje v epilimnijski in hipolimnijski plasti vode v jezeru. Na dopustno obremenitev jezera močno vpliva morfologija jezera, dotok v jezero in način iztoka iz jezera. Z Imbodenovim modelom sem izračunala serijo različnih obremenitev za različna jezera. Izhajala sem iz morfoloških in obremenitvenih lastnosti Blejskega jezera, ki je naše najbolj znano jezero. Ugotovila sem, da večje globine jezer dopuščajo večje obremenitve s hranili, da je odvod vode iz dna jezera učinkovitejši od površinskega iztoka iz jezera, saj tako odvedemo hipolimnijsko plast vode, ki je bogata s hranili in je dostikrat pri dnu tudi brez kisika. Nadalje ugotovim še prednosti odvoda hipolimnijske vode pri manjšem dotoku vode v jezero in pri večji generaciji fosforja iz usedlin jezera. Zaradi negativnih vrednosti R_p (delež zadržanega fosforja v usedlini jezera), ki pomenijo, da je večji odtok fosforja iz jezera kot pritok, gre sklepati, da bo splakovanje preko natege hitreje prispevalo k zmanjšanju hranil v pridnenih slojih jezera in s tem k hitrejši sanaciji jezera. Imbodenov model se pokaže kot učinkovit model za napoved dopustnih obremenitev za različna jezera, katerim lahko spreminjamo obremenitev.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 504:556.55(043.2)
Author: Jana Skubic
Supervisor: assoc.prof. Boris Kompare
Title: The influence of load and lake morfology on lake water quality
Notes: 59 p., 9 tab., 20 fig., 27 eq.;
Key words: Lake Bled, lake eutrophication, Imboden's model, limiting concentration of nutrients

Abstract

In this graduation thesis, the Imboden model is used as a basis for the prediction of the limiting nutrient concentrations in the lake. The Imboden model is a simplified phosphorous model, based on the phosphorus balance in a lake, presuming phosphorous is the only limiting factor of lake eutrophication. The model separately describes the processes in the epilimnion and in the hypolimnion. The limiting nutrient concentrations in the lake are strongly influenced by lake morphology and water inflow. Using an Imboden model, a series of limiting concentrations was calculated for different lakes. The basis for the calculations are morphologic and limiting values of the Bled lake, the most famous Slovene lake. It has been ascertained that deeper lakes allow higher nutrient concentration, the bottom water outflow is more efficient than the surface water outflow because of the hypolimnion water, rich in nutrients and poor with oxygen, which is being transferred. When the water inflow is smaller and the phosphorous generation at their bottom is higher a positive effect of hypolimnion water transfer has been established. The negative values of R_p (percentage of phosphorus in the sediment) mean that the outflow of phosphorous is higher than its inflow to the lake, therefore the flushing through a siphon should contribute to the decrease of nutrition load in the hypolimnion and thereby to a faster lake sanitation. The Imboden model has proved an effective mean for the prediction of the limiting nutrient concentrations in lakes where morphology and nutrient load can be modified.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Borisu Komparetu in somentorici dr. Nataši Atanasovi za strokovno pomoč pri nastajanju pričujoče diplomske naloge.

Ker z diplomsko nalogo zaključujem študij, se zato zahvaljujem predvsem staršema, bratoma Jerneju in Janezu ter Marjanu za vsakršno pomoč in podporo v študijskih letih.

Zahvaljujem se tudi vsem profesorjem, asistentom in drugim sodelavcem fakultete za korekten odnos v študijskih letih.

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Trofično stanje jezera glede na totalni fosfor in dušik po Vollenweiderju 1968 (Krajnc, 1994; po Harper 1992)	18
Preglednica 2: Trofično stanje jezer po klasifikaciji OECD (Krajnc, 1994; po Vollenweider, 1982).....	18
Preglednica 3: Uvrstitev Blejskega jezera v trofično kategorijo po OECD kriterijih (ARSO, 2000).....	34
Preglednica 4: Povprečne vrednosti izbranih parametrov v pritokih in iztokih iz Blejskega jezera ter Savi Bohinjki pred in za dotokom natege in kanalizacije v letih 1999 in 2000 (ARSO, 2000).....	34
Preglednica 5: Oceana bilance hranilnih snovi v Blejskem jezeru v letu 2000 (ARSO, 2000)	35
Preglednica 6: Zunanji parametri modela	39
Preglednica 7: Notranji parametri modela.....	39
Preglednica 8: Kombinacije vhodnih podatkov potrebnih za izračune Imbodnovega modela v Matlabu.....	45
Preglednica 9: Primerjava učinkovitosti odvoda vode preko natege z odvodom iz površine pri spremenljivem parametru "S"	51

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Dopustna obremenitev za $S=0$ pri iztoku iz površine ali preko natege.....	47
Grafikon 2: Padec porabe kisika v hipolimniju.....	48
Grafikon 3: Delež zadržanega fosforja v usedlini.....	49
Grafikon 4: Primerjava dopustne obremenitve glede na vrednost "S" in glede na izpust preko natege ali površine.....	50
Grafikon 5: Dopustna obremenitev pri $S=10$ in iztoku iz površine, pri čemer je $q_{d0} = 47880$ m ³ /dan.....	52
Grafikon 6: Dopustna obremenitev pri $S=10$ in iztoku preko natege, pri čemer je $q_{d0}=47880$ m ³ /dan.....	52
Grafikon 7: Primerjava dopustne obremenitve glede na iztok ter glede na količino dotoka pri $S=10$	53
Grafikon 8: Padec porabe kisika v hipolimniju pri iztoku iz natege.....	54

KAZALO SLIK

Slika 1: Sukcesija jezerskega ekosistema (Tarman, 1992).....	3
Slika 2: Razmerja N/P v Blejskem jezeru po analizah (Rismal, 2005; po ARSO 1999)	4
Slika 3: Geokemijsko pretvarjanje fosforja in železa v anaerobnem delu zgornje plasti jezerske usedline, na stiku voda – blato (Tarman, 1992)	6
Slika 4: Ekološka delitev jezera po globini z značilnimi rastlinami in živalmi (Tarman, 1997)	9
Slika 5: Termična stratifikacija v jezeru (Tarman, 1992)	11
Slika 6: Poletno stanje temperaturne slojevitosti v jezeru. V levem grafu so vrisane ustrezne krivulje za kisik in temperature poleti, v desnem pa v zimskem obdobju. (Tarman, 1997)	12
Slika 7: Z onesnaženjem jezerske vode nastane v globini monimolimnijski sloj. Jesensko in spomladansko kroženje vode ne seže do dna. (Tarman, 1997).....	14
Slika 8: Koncentracija kisika in temperaturne razmere v jezeru (Tarman 1992).....	15
Slika 9: Pretvarjanje CO ₂ in karbonatov v jezeru. Razmerje CO ₂ : HCO ₃ : CO ₃ določa pH jezerke vode. Tarman, 1992	16
Slika 10: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na povprečno letno vidnost Secchi diska (Sedej, 2003 po OECD, 1982).....	19
Slika 11: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na totalni fosfor (Sedej, 2003 po OECD, 1982).....	20
Slika 12: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na povprečni letni klorofil-a (Sedej, 2003 po OECD, 1982).....	20
Slika 13: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na maksimalni klorofil (Sedej, 2003 po OECD, 1982).....	21
Slika 14: Prikaz geografske lege Blejskega jezera (Atlas Slovenije, 1986).....	22
Slika 15: Prikaz Blejskega jezera z vrisanimi izobatami (Sketelj, 1958).....	23
Slika 16: Blejsko jezero s pritoki (Remec Rekar, 2004).....	25
Slika 17: Prikaz natege v Blejskem jezeru (Rismal, 2005).....	30
Slika 18: Merilna mesta na jezeru in pritokih ter iztokih.....	32
Slika 19: Osnovna shema modela za iztok iz površine (Rismal, 1980)	38
Slika 20: Imbodnov model za iztok iz hipolimnija (Rismal, 1980)	42

KAZALO PRILOG

A – Vhodna datoteka v Matlabu

B – Izračuni Imbodenovega modela

C – Primer izhodne datoteke Matlaba

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	EVTROFIKACIJA	2
2.1	Definicija evtrofikacije in opis pojava	2
2.2	Opredelitev omejitvenega faktorja evtrofikacije Blejskega jezera.....	4
2.3	Hranila.....	5
2.3.1	Fosfor – omejitveni faktor evtrofikacije.....	5
2.3.2	Dušik	7
2.4	Ostali pomembni dejavniki za rast	8
2.4.1	Svetloba	8
2.4.2	Temperatura in toplotne razmere v jezerih.....	10
2.4.3	Kisik	14
2.4.4	Ogljikov dioksid in kalcijevi karbonati	16
2.5	Kategorizacija stoječih voda glede na trofični nivo	17
2.5.1	Določanje stopnje trofičnosti v jezerih po Vollenweider-ju (OECD ²).....	17
3	PREDSTAVITEV BLEJSKEGA JEZERA.....	22
3.1	Morfološke značilnosti jezera	22
3.2	Hidrološke značilnosti jezera	23
3.3	Dosedanje raziskave	26
3.4	Monitoring jezera v letu 2000.....	32
3.4.1	Rezultati analiz.....	32
3.5	<i>Oscillatoria rubescens</i>	36
4	IMBODEN-OV MODEL	37
4.1	Površinski odtok iz jezera	37
4.2	Odtok iz hipolimnija	42
4.3	Vhodni podatki	44
5	INTERPRETACIJA REZULTATOV IN DISKUSIJA.....	47
6	ZAKLJUČEK	55
7	VIRI	57

1 UVOD

Namen diplomske naloge je bil uporabiti Imbodenov model za napoved dopustnih obremenitev v jezeru. Imbodenov model je poenostavljen konceptualni fosforjev model, ki temelji na bilanci fosforja v jezerski vodi. Osnovna predpostavka modela je ta, da je fosfor edini omejitveni faktor evtrofikacije. Model ločeno obravnava dogajanje v epilimnijski in hipolimnijski plasti vode v jezeru.

Na dopustno obremenitev jezera vplivata morfologija jezera in dotok v jezero. S pomočjo Imbodenovega modela je izračunana serija različnih obremenitev za različna jezera. Izhajam iz morfoloških in obremenitvenih lastnosti Blejskega jezera, ki je naše najbolj znano turistično in evtrofikacijsko jezero. Podatki o obremenitvi za leto 2000 so vzeti s spletne strani ARSO, iz dokumenta z naslovom »Monitoring kakovosti jezer v letu 2000« .

V prvem delu naloge je povzetek teoretične osnove evtrofikacije, omejitvenega faktorja evtrofikacije, hranil ter svetlobnih in temperaturnih dogajanj v jezeru. V nadaljevanju so opisane morfološke in hidrološke značilnosti Blejskega jezera, določeni so vhodni podatki za izračune v Imbodenovem modelu, nato pa so podrobno opisane dosedanje raziskave na Blejskem jezeru. V osrednjem delu naloge je opisan Imbodenov model posebej za primer, ko je izpust iz jezera površinski, in posebej za primer, ko je iztok iz jezera preko natege kot v primeru Blejskega jezera. (Ta inženirski poseg se je namreč v dolgoletnih raziskavah izkazal kot edini zadovoljivi ukrep proti staranju jezera.) V poglavju »Interpretacija rezultatov in diskusija« so dobljeni rezultati prikazani grafično in so tudi komentirani.

2 EVTROFIKACIJA

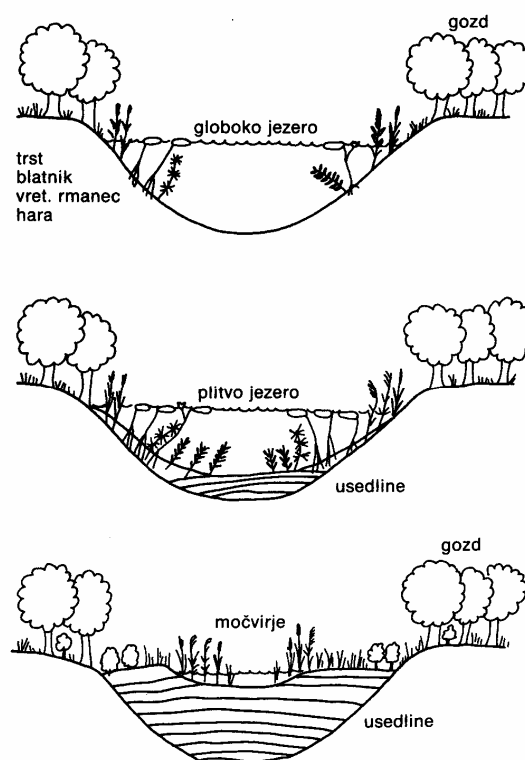
2.1 Definicija evtrofikacije in opis pojava

Evtrofikacija: obogatitev hranil v površinski vodi, ki pospešuje rast alg in višjih rastlin.

Evtrofikacijo imenujemo tako visoko koncentracijo hranil za vodne rastline kot tudi visoko bioprodukcijo (primarno produkcijo) zaradi ugodnih pogojev za rast. Je oblika intenzivne primarne produkcije v vodi. Pokazatelji evtrofikacije so torej visok prirast vodnih rastlin in s tem naraščanje organske biomase, ki je podvržena gnitju. (Krajnc, 1994)

Pojav evtrofikacije je prisoten v vseh vodnih telesih, tako v morjih kot v sladkih vodah.

Običajno obravnavamo evtrofikacijo kot sodoben pojav, katerega vzrok je onesnaževanje voda. V tem primeru govorimo o *umetni evtrofikaciji*. Evtrofikacija predvsem stoječih voda pa se je dogajala že veliko prej, preden je človek začel odločilno posegati v ekosisteme, kar imenujemo *naravna evtrofikacija*. V nasprotju z naravno evtrofikacijo umetna poteka zelo hitro. Vrstni sestav vseh življenjskih združb se s časom spreminja, kar imenujemo *ekološka sukcesija*. Vse stoječe vode so takoj po nastanku podvržene procesom sukcesije torej staranju. S staranjem postajajo jezera, umetna jezera in ribniki plitvejši, spreminjajo se v močvirja in se nazadnje povsem posušijo. Pojav staranja jezera prikazuje slika 1. Na hitrost staranja pa odločilno vpliva evtrofikacija.

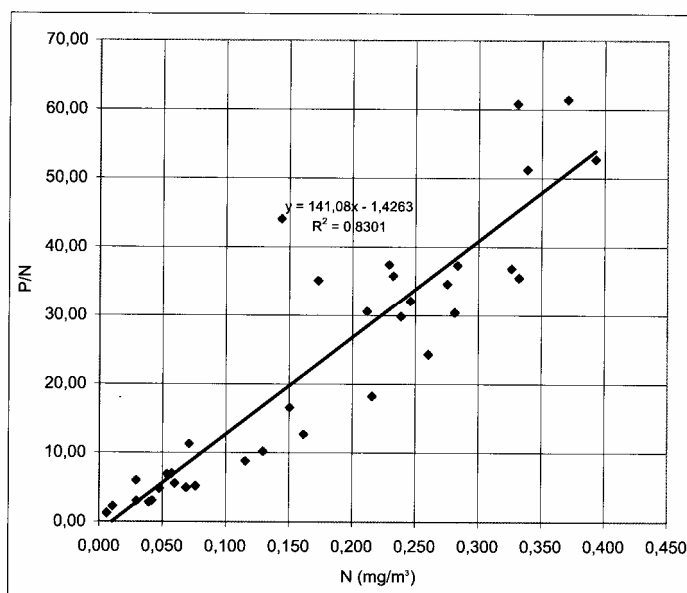


Slika 1: Sukcesija jezerskega ekosistema (Tarman, 1992)

Obstajajo povsem naravni vzroki, ki nekako določajo pot jezerskemu koncu. Za alpska jezera, kot je Blejsko jezero, je možno dvoje: ali da jih zasuje prod močnejših pritokov, ali pa alpska jezera čaka staranje z vedno izrazitejšo eutrofikacijo. Za Blejsko jezero velja slednji vzrok. Seveda pa ima vsako jezero še svoje specifične pogoje, ki lahko še pospešujejo ali zavirajo staranje jezera. Neugodno razmerje padavinskega območja k površini jezera, slab pretok oz. majhna izmenjava vode, zatišna lega, neugodno razmerje epilimnija in metalimnija k hipolimniju pa so specifične Blejskega jezera, katere še hitreje povzročajo staranje jezera. Seveda k hitrejšemu staranju jezera pripomore še človekova dejavnost. (Sketelj, 1958)

2.2 Opredelitev omejitvenega faktorja eutrofikacije Blejskega jezera

Omejitveni faktor eutrofikacije je hranilo, ki pospešuje primarno proizvodnjo v jezeru, njegovo pomanjkanje pa jo omejuje. Bistvena elementa primarne produkcije sta dušik N in fosfor P. Alge imajo približno naslednjo kemično sestavo: $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P_1$, v razmerju ogljik, dušik, fosfor: $\sim C : N : P = 40 : 7,2 : 1$. Iz spodnjega diagrama se vidi, da se v Blejskem jezeru prisotne zaloge fosforja (PO_4^{3-}) porabijo prej kot v jezeru mnogo večje zaloge dušika (NO_3^-), kar pomeni, da je tudi pri Blejskem jezeru, enako kot v večini alpskih jezer, omejitveni faktor fotosinteze (eutrofikacije) **fosfor!** (Rismal, 2005)



Slika 2: Razmerja N/P v Blejskem jezeru po analizah (Rismal, 2005; po ARSO 1999)

Za uspešno zdravljenje jezera moramo torej najprej poznati naslednje:

- količine oz. koncentracijo fosforja v vodi, ki povzroča eutrofikacijo
- količino fosforja, ki prihaja v jezero s pritoki in iz zalednih površin jezera
- količino fosforja, ki pri padavinah iz razbremenilnikov mešane kanalizacije, skupaj z v jezero prelitim padavinskim odtokom, onesnažuje jezero
- kje in koliko je potrebno zmanjšati onesnaževanje jezera s fosforjem, da bi vzpostavili jezero v stabilno mezotrofno ali celo oligotrofno stanje.

Iz preglednice 2 poglavja 2.5.1. je razvidno, da je evtrofnost odvisna od zelo nizkih koncentracij fosforja v jezerski vodi.

2.3 Hranila

2.3.1 Fosfor – omejitveni faktor evtrofikacije

Fosfor je sestavni del molekule ATP in je zato med pomembnejšimi snovmi za življenje organizmov. V biosferi se fosfor nahaja v obliki fosfatov. Kovinske soli fosforjeve kisline so v vodi slabo topne, zato je fosfor večinoma vezan v kameninah, tleh in sedimentih in je zato dokaj enakomerno razprostranjen po svetu.

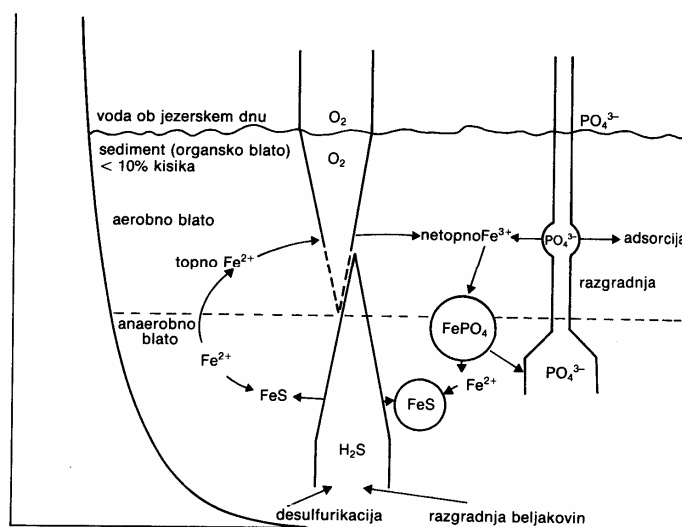
Rastline sprejemajo fosfor iz tal v obliki fosfatnih ionov. Ker so fosfati v vodi slabo topni, je njihovih ionov v vodi, katero rastlina črpa iz tal, malo. Dostopnost fosforja za rastlino je odvisna od pH zemlje in od oblike, v kateri je fosfor v prsti. Ko rastlina odmre, se organska snov vrne nazaj v zemljo. Pri tem se del organsko vezanega fosforja vgradi v celično snov mikroorganizmov, del pa se sprosti v okolje. Če pa rastlino poje žival, se fosfor vgradi v celično snov živali (ki se sprosti, ko žival umre), del pa ga žival izloči z iztrebki. Tako je fosforjev krog zaključen. Sicer pa fosfor najdemo tudi v aerosolih, sprošča pa se tudi s prepevanjem kamnin, ki vsebujejo fosfate. (Krajnc, 1994)

V jezeru obstaja fosfor v dveh oblikah: *partikularni* in *raztopljeni*. Partikularni je vezan v mikrobih, algah, drugih rastlinah in živalih, raztopljeni pa se nahaja v anorganski ali organski obliki. Anorganskega je zelo malo, predstavlja le 10 % glede na celotno vsebnost fosforja v jezeru. Nastane s prepevanjem kamnin, kot je apatit. Prekomerno zvišan dotok fosforja kot posledica človekove dejavnosti (erozija, gnojenje, pralna sredstva, odplake) povzroča prekomerno primarno produkcijo alg, njihovo razkrojevanje pa sekundarno polucijo. (Tarman, 1992)

Kroženje fosforja v jezeru obsega biološke in geokemične procese. Anorganski fosfor vežejo rastline v organske proizvode, te pa so hrana živalim. Podvodne rastline dobijo fosfor iz

podlage in sedimentov. Vračanje fosforja pri odmrlih organizmih je hitro, tega pa druge rastline znova vgradijo v svoja telesa. Tako se fosfor obrne v enem letu od 10 do 40 krat. (Tarman, 1992)

Geokemijsko kroženje fosforja je tesno povezano s presnovo železa in poteka v jezerskem blatu (Slika 3).



Slika 3: Geokemijsko pretvarjanje fosforja in železa v anaerobnem delu zgornje plasti jezerske usedline, na stiku voda – blato (Tarman, 1992)

Ob stiku voda – blato je prisoten kisik, v globljih plasteh jezerskega blata pa kisika zmanjka. V aerobnem delu se topna oblika železa Fe^{2+} oksidira v netopno obliko ali Fe^{3+} . S strjevanjem teh sedimentov nastaja železova ruda. PO_4^{3-} se veže s Fe^{3+} v FePO_4 ali pa adsorbira na $\text{Fe}(\text{OH})_3$, na CaCO_3 ali druge minerale. Če pade kisikova nasičenost pod 10%, se znova sprošča fosfat in prehaja v vodo. V anaerobnem sloju blata sta železo Fe^{2+} in fosfat raztopljena in železo tvori z navzočim vodikovim sulfidom (H_2S) črn železov sulfid (FeS). (Tarman, 1992)

Kroženje in geokemijsko pretvarjanje fosforja in železa na jezerskem dnu ob stiku voda-sediment je močno odvisno od termike jezera. Ko vladajo med poletno stagnacijo v hipolimnijskem sloju eutrofnih jezer anaerobne razmere, sta Fe^{2+} in PO_4^{3-} raztopljena in v epilimniju fosforja ni več, saj so ga porabili tamkajšnji primarni producenti. Vračanje fosforja

iz globine pa je onemogočeno zaradi zaporne plasti. Samo zelo močne nevihte in vetrovi lahko prodro termoklino in dvignejo hipolimnijsko vodo s fosfatom na površino. V tem primeru se primarna produkcija znova dvigne. Vsi ti pojavi so povezani z globino jezera, in čim globlje je jezero, tem težje je tako mešanje hranilnih snovi. Z jesenskim jezerskim popolnim mešanjem vode (glej poglavje 2.4.2), ko se obnove kisikove zaloge, pride do obarjanja železa in vezanja fosfata. Ta proces velja predvsem za oligotrofna jezera. V oligotrofnih jezerih z močnim prilivom organskih odpadkov zaradi gnitja zmanjkuje ob dnu kisika, s čimer se poveča topnost fosfata kar povzroča evtrofijo jezera.

2.3.2 Dušik

Dušik prihaja v jezero na različne načine. Z difuzijo vstopajoči plinasti dušik vežejo posebne bakterije ter modro zelene alge v organske spojine. Količine tako vezanega dušika so velike in za prehrano rastlin izjemnega pomemena. Dušikove soli vstopajo v jezero tudi s pritoki, organskim onesnaževanjem, deževnico, ki privzema dušikove okside iz zraka, izstopajo pa z odtoki iz jezera. Dušik se porabi še v procesu denitrifikacije, odnašanjem rib s ptiči in ribolovom ter usedanjem organskih ostankov v sediment. Kroženje dušika je v epilimničnem delu jezera zelo intenzivno, saj se v enem letu isti atom dušika veže in sprosti od 10 do 40-krat.

Jezerske rastline za svojo rast potrebujejo nitrate in amonijeve soli. Vmesni produkt bakterijske presnove je nitrit, ki je zaradi strupenosti nevaren za organizme v jezeru. Organsko vezan dušik izkoriščajo neposredno praživali.

(Tarman, 1992)

2.4 Ostali pomembni dejavniki za rast

2.4.1 Svetloba

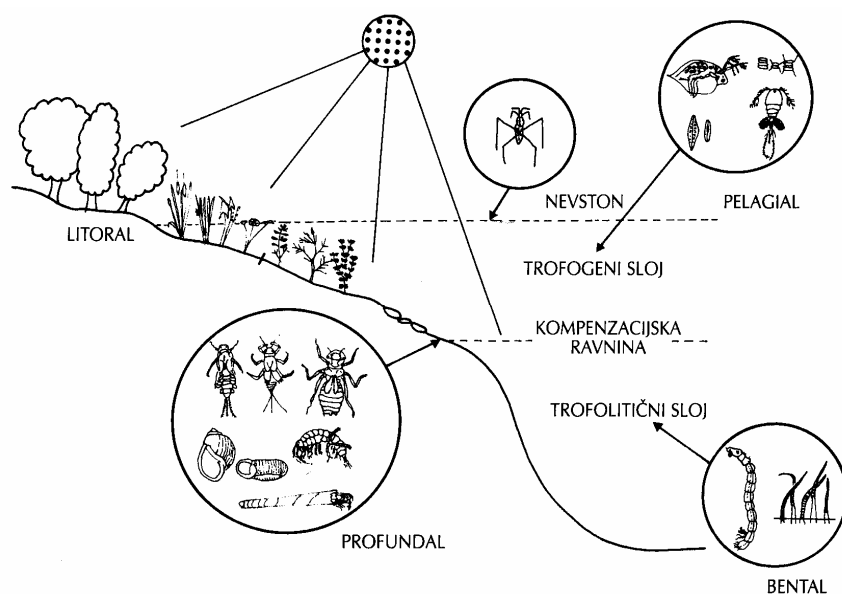
Celotna energija, ki napaja metabolizem jezer, izvira neposredno iz sončne radiacije in določa svetlobne in toplotne značilnosti, ki v jezerih povzročajo *vertikalno plastovitost* oz. *stratifikacijo*. (Toman, 2001)

Ekološko najpomembnejši vir svetlobe je Sonce, posebno vidni del svetlobnega sevanja, ki omogoča fotosintezo oz. primarno produkcijo.

Učinek svetlobe se najbolje odraža na fotosintezi zelenih rastlin. Količina in kvaliteta svetlobe v vodnem okolju je odvisna od njene jakosti ob stiku z vodno površino, od vpadnega kota, števila organizmov v vodi in količine anorganskih in organskih delcev. Z globino se intenziteta svetlobe eksponencialno zmanjšuje in v jezerih določa *fotično – svetlobno cono* (=trofogeni sloj), v kateri potekajo procesi fotosinteze in asimilacije organskih snovi (primarna produkcija), in *afotično – temotno cono* (=trofolitični sloj) s procesi razgradnje organskih snovi (dekompozicija) ali sekundarna produkcija. Med fotično in afotično cono je nahaja kompenzacijska ravnina. (Toman, 2001)

Svetloba določa tudi barvo vode, ki je v razponu od temno modre do rjave. Če je v vodi veliko koloidnih delcev kalcijevega karbonata, je barva vode zelenkasta (reka Soča), če so v vodi pogoste huminske snovi, pa je voda rjava (barja in močvirja). (Toman, 2001)

Svetloba narekuje tudi tip poselitve. Po načinu naselitve jezero prostorsko delimo v *bental* in *pelegial* (slika 4). V bental sodijo organizmi, ki se drže podlage, v pelagial pa organizmi, ki prosto plavajo v vodi. Območje bentala pod kompenzacijsko točko je *profundal* in nad to točko je *litoral*. (Toman, 2001)



Slika 4: Ekološka delitev jezera po globini z značilnimi rastlinami in živalmi (Tarman, 1997)

Mejo med litoralom in profundalom dobro označujejo zelene rastline, ki ne rastejo v profundalnem območju, torej v globini pod kompenzacijsko ravnino. Podobno je pelagial pod kompenzacijsko točko *batipelagial* in nad *epipelagial*. Le v epipelagialu uspešno producirajo fotoavtotrofne rastline.

Značilna združba litorala so vodni makrofiti. Značilni združbi pelagiala sta plankton in nekton. Plankton sestavljajo bakterije (bakterioplankton), eno in večcelične alge (fitoplankton), praživali in nevretenčarji (zooplankton). Nekton pa sestavljajo plavajoči organizmi.

Funkcionalno vsebuje jezero fotoavtotrofne producente, ki so omejeni na osvetljeni del jezerskega prostora, ki ga označimo za trofogeno območje. Seveda delujejo tudi kemoavtotrofni organizmi, vendar je njihov prispevek k celotni proizvodnji manj pomemben. V trofogenem območju živijo potrošniki, ki izkoriščajo svežo primarno produkcijo. Živali, ki se prehranjujejo z mrtvo organsko snovjo, so del bentala in deloma tudi pelagiala.

2.4.2 Temperatura in toplotne razmere v jezerih

Toplotni vpliv je najbolj izrazit v jezerih zmernih klimatov, kjer govorimo o *termiki* ali *letnem temperaturnem krogu*. (Toman, 2001)

Toplota se prevaja v nižje plasti s kondukcijo, konvekcijo in turbulentnimi tokovi. Dodatni viri toplote so lahko še pregreto dno, toplejši zrak, kondenzacija vodnih par nad gladino ter dotoki tople vode oz. podvodni topli vreli. Voda se ohlaja s sevanjem iz gladine, kondukcijo v ozračje in dno ter z izparevanjem. (Krajnc, 1994)

Izredne fizikalne lastnosti vode, izjemno visoko vrelišče, visoka specifična toplota in anomalija gostote vode so vzrok, da so temperaturne spremembe v vodnih telesih manj izrazite kot na kopnem. Podnebje je v vodi milejše in se manj spreminja. Kljub temu pa poznamo tudi v vodi dnevna, sezonska in letna nihanja temperature.

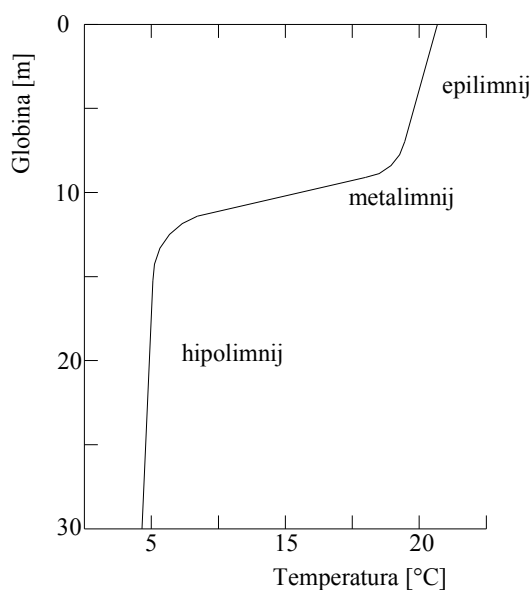
Sprejemanje in oddajanje toplote sta pri jezerih predvsem površinska pojava. Gibanje vodne mase določa spreminjanje toplote po prerezu jezera s površine do dna (Krajnc, 1994)

Temperaturni krog, stratifikacijo ter hidrologijo vodnih teles imenujemo s splošnim izrazom *termika*.

Zaradi ogrevanja s površine v globino se razvije v vodnem telesu značilni temperaturni gradient, ki ga označujemo kot *toplotno ali termično plastovitost (stratifikacija)*, t.j. padec temperature jezera z globino (Slika 5). Gradient temperature po globini zavira mešanje vode oziroma omeji mešanje vode samo na zgornji *epilimnijski* sloj, zato se posamezne plasti vode zaradi razlike v temperaturah vode in s tem tudi v gostotah vode med seboj ne mešajo. V zmernem podnebnem pasu velja groba ocena, da je stratifikacija prisotna pri jezerih, ki so globlja od 10 m.

Pozimi sta pod ledom dve plasti vode, tik pod ledom je tanka plast s temperaturo med 0 in 4 °C, pod njo pa je debelejša plast nekaj toplejše globlje vode s temperaturo do 4 °C. Takrat je *zimsko inverzna plastovitost* (glej sliko 6). Po raztalitvi ledu se površinska voda segreva, dokler se temperatura v celotnem vodnem telesu ne izenači na 4 °C – temu pojavu rečemo *homotermija*. Takrat že šibak veter premeša vso vodo, saj je iste gostote in je zato mešanje

omogočeno. Govorimo o *poletni cirkulaciji*. Ko temperatura zraka preseže 4 °C, se začne zgornji sloj vode ogrevati. Ob povečanju razlik v gostoti vode, veter ne more več premešati celotne vodne mase. Nastanejo trije različni sloji vode, imenovana *poletna plastovitost – poletna stagnacija* (sliki 5 in 6). V zgornjem epilimnijskem sloju je voda topla. Temperaturne razlike med gladino in spodnjim mejnim slojem epilimnija so majhne. Vetrovi in nihanje dnevnih ter nočnih temperatur zagotavljajo enotne razmere v epilimniju. Spodnji sloj *hipolimnij* je hladen, temperatura po globini se malo spreminja, najnižja je ob usedlinah, kjer je temperatura do 4 °C. Mikrotokovi v hipolimniju so šibki. Med epilimnijem in hipolimnijem se nahaja *metalimnijski pas ali termoklina*, zaporna ali preskočna plast, kjer se na razdalji nekaj metrov vrednosti mnogih parametrov bistveno spremenijo, za nekatere dejavnike pa je metalimnij ovira, ki preprečuje transport mase med epilimnijem in hipolimnijem. Pogoj za preskočno plast ali termoklino je padec temperature na en meter globine za več kot 1°C.

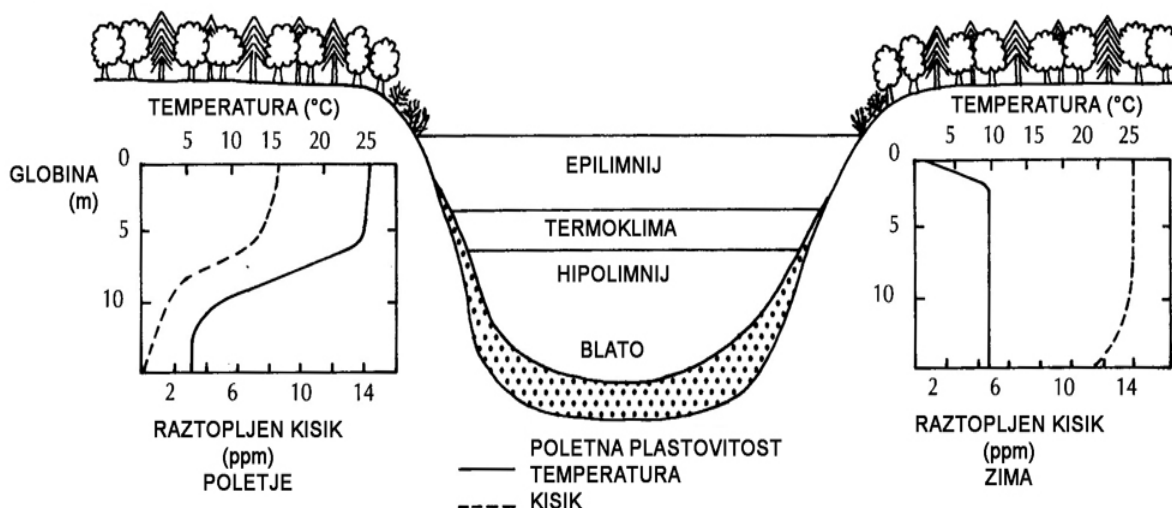


Slika 5: Termična stratifikacija v jezeru (Tarman, 1992)

Dokler traja poletna stojnost ali stagnacija, v jezeru ne poteka izmenjava kisika, ogljikovega dioksida in hranilnih soli med dnom in površino. Ekološke posledice teh pojavov se pokažejo v periodičnosti življenjskih pojavov v jezeru. Mikrobom in živalim na dnu začne primanjkovati kisika. Fitoplanktonskim algam v površinskih plasteh pa zaradi usednja mrtvih

alg in živalskih teles ter živalskih iztrebkov na dno, primanjkujejo nutrienti (fosfor, dušik in drugi elementi oz. soli teh elementov), ki se sproščajo z mikrobim razkrojevanjem mrtvih organskih snovi na dnu. Hranilne snovi se nabirajo v sloju pri dnu in se zaradi opisane stagnacije ne vračajo v površinski sloj, kjer poteka fotosinteza alg in makrofitov.

V jeseni se jezero ohlaja, in ko se zniža temperatura površinske plasti pod temperaturo plasti, ki leži pod njo, ohlajena in specifično težja voda izpodrine toplejšo in specifično lažjo vodo. Zaradi razlik v ogretosti, oz. specifičnih težah vode iz različnih plasti nastajajo vertikalni konvekcijski tokovi. Posledica ohlajanja in konvekcijskih tokov je izravnavanje temperature vode po vsem vodnem stebru od gladine do dna. Z ohlajanjem se vzpostavlja termična izravnava. Ko nastopi *izotermija*, znaša zaradi anomalije vode temperatura vode na katerikoli globini 4°C. V poznem jesenskem obdobju izotermija omogoča, da vzbujajo vetrovi močne turbulenčne tokove. Zaradi termično izzvanih tokov in tokov, povzročenih z vetrom, nastane jesensko vertikalno mešanje vode. Tedaj se obnovijo ob dnu kisikove zaloge in se vrnejo k površini hranilne soli iz dna ter oddajajo viški ogljikovega dioksida. Izmenjavanju snovi med dnom in površino jezera pravimo *dihanje jezera*. Nato se začne zimska inverzna plastovitost in krog je tako zaključen. (Tarman, 1992)

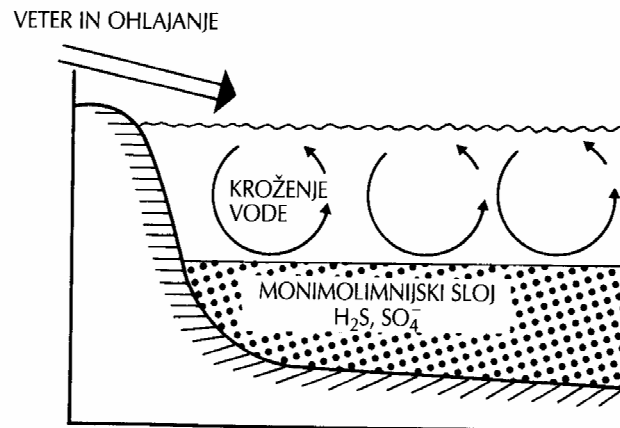


Slika 6: Poletno stanje temperaturne slojevitosti v jezeru. V levem grafu so vrisane ustrezne krivulje za kisik in temperature poleti, v desnem pa v zimskem obdobju. (Tarman, 1997)

Opisana termika velja za jezera v zmernem pasu, za alpska jezera, ki so čista. Drugače se obnašajo tropska in polarna jezera, kje ni izrazitih letnih časov z značilnimi toplotnimi razlikami. Zato lahko na osnovi števila kroženj v enem letu opredelimo več tipov jezer (po Tarman, 1992):

- Amiktično jezero: je večino leta zaledenelo. Taka jezera leže v Anktarktiki in visoko v gorah. Voda v njih se deloma ogreva skozi led in skozi podlage.
- Mrzla monomiktična jezera so globoka jezera, ki se ne ogrejejo nad 4°C. V njih kroži voda samo poleti, ko niso prekrita z ledom. Tako vrsto jezer najdemo na Arktiki in visoko v gorah.
- Dimiktično jezero je zgoraj podrobno opisano kot primer alpskega jezera v zmernem pasu. Takšna so tudi nekatera višje ležeča tropska jezera.
- Topla monomiktična jezera ležijo v geografskem območju, kje se temperature nikoli ne znižajo pod 4 °C. Plastovitost nastopa samo poleti. To so jezera toplih predelov zmernege pasu in gora v subtropskih območjih.
- Oligomiktična jezera so jezera vročih in vlažnih tropskih pokrajin. Kroženje v njih je zelo redko in časovno zelo nepravilno. Temperatura vode je vedno nad 4°C. Čeprav so temperaturne razlike med površinskim in globinskim delom majhne, imajo stojno plastovitost. Kroženje povzročajo le večje ohlaiditve.
- Polimiktično jezero označujejo pogosta in večkratna kroženja v enem letu. Polimiktična jezera ležijo na višjih nadmorskih višinah in v ekvatorialnem območju, kjer so stalni vetrovi in suho ozračje. To so po površini velika in plitva jezera. Čez dan se močno ogrejejo in ponoči ohlaidijo.

Jezera, v katerih poteka popolno kroženje, od dna do površine, so *holomiktična jezera*. V mnogih jezerih pa kroženje ne sega do dna in ostaja globinski del nepremešan. Tovrstnim jezerom pravimo *meromiktična jezera*. Globinski sloj, kjer se voda ne premeša, imenujemo *monimolimnijski sloj* (slika 7), zgornji sloj, kjer se voda meša pa *miksolimnijski sloj*. Zaradi onesnaženja in kopičenja težkih sulfidov in sulfatov v plasti pri dnu jezera, se mnoga alpska jezera speminjajo iz holomiktičnih jezer v meromiktična jezera. Meromiktično jezero je postalo tudi obravnavano Blejsko jezero. (Tarman, 1992)

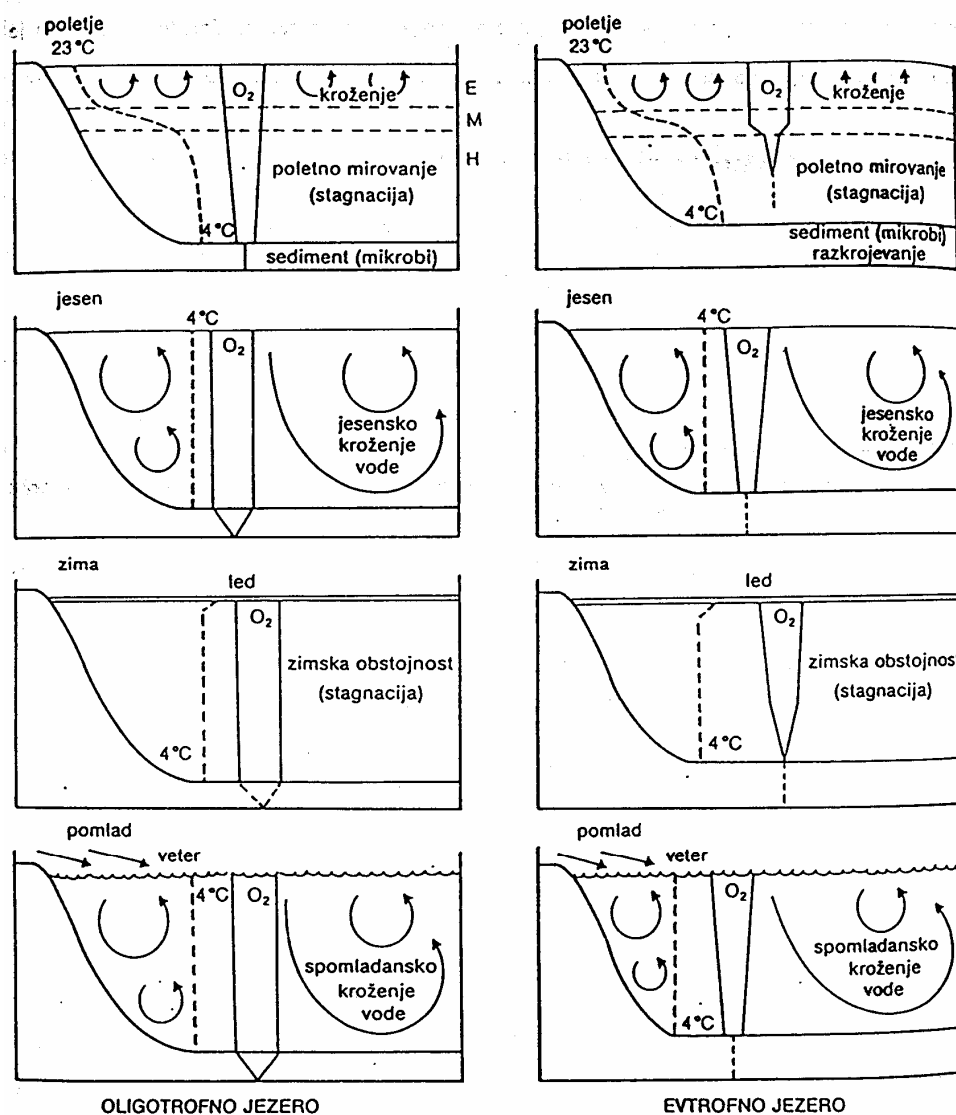


Slika 7: Z onesnaženjem jezerske vode nastane v globini monimolimnijski sloj. Jesensko in spomladansko kroženje vode ne seže do dna. (Tarman, 1997)

2.4.3 Kisik

Raztopljeni kisik omogoča življenje v vodi aerobnim organizmom in močno vpliva na kroženje snovi v jezeru ter na kemične procese.

Vodotopnost kisika je odvisna tako od temperature kot od zračnega tlaka. Z naraščanjem temperature in zniževanjem zračnega tlaka pada vodotopnost kisika. Kisik vstopa v vodo na dva načina: z difuzijo iz zraka ali pa nastaja v vodi pri procesu fotosinteze. Porabljajo pa ga organizmi z dihanjem. Del kisika se potroši tudi v neživih oksidativnih reakcijah. Ker poteka fotosinteza le ob svetlobi, dihanje pa podnevi in ponoči, obstaja izrazito dnevno – nočno nihanje kisika oz. porast kisika čez dan in upadanje ponoči. Porazdelitev kisika med površino in dnom omogočajo fizikalni procesi difuzije, konvekcije in mešanje z vetrovi, ki ustvarjajo turbulentne tokove. Ti pojavi so povezani s termiko oz. letnim temperaturnem krogom v jezeru. Vertikalni obseg porazdelitve kisika je odvisen od trofičnega tipa jezera (glej sliko 8). V oligotrofnih jezerih je vse leto dovolj kisika od površine do dna. Celo ob koncu poletne stagnacije vsebuje hipolimnična voda preko 50% kisikovih zalog. V mnogih evtrofnih jezerih pa prihaja občasno do značilnega pomanjkanja kisika v hipolimnijskem sloju ali pa v monimolimnijskem sloju kisika povsem zmanjka. (Tarman, 1992)



Slika 8: Koncentracija kisika in temperaturne razmere v jezuru (Tarman 1992)

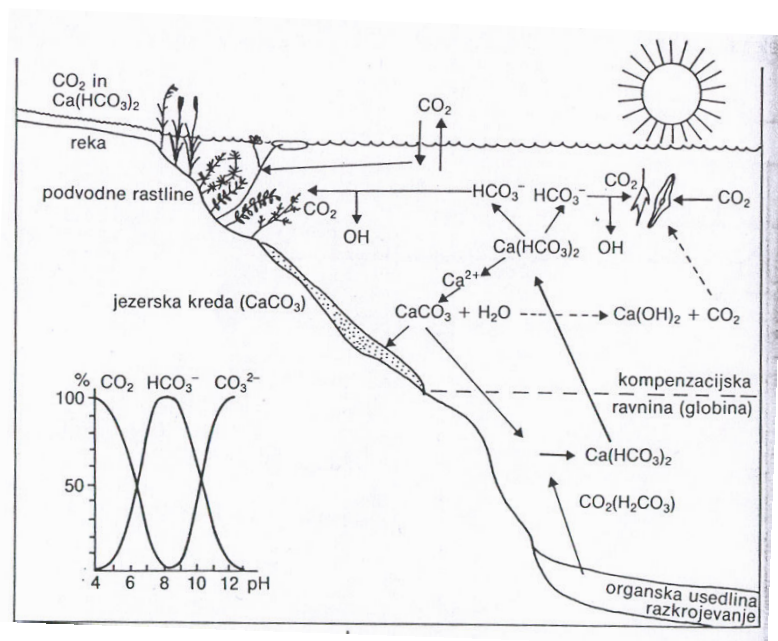
Nasičenost s kisikom je lahko tudi večja od teoretične vrednosti, če v vodi potekajo intenzivni fotosintetski procesi. Taki primeri so značilni za evtrofna jezera v zgornjih epilimnijskih plasteh poleti, ko nasičenost s kisikom lahko preseže 300% in govorimo o *hipersaturaciji in biogenem prezračevanju*.

Kisik v vodnem okolju je pomemben za razgradnjo organskih snovi, ki jo lahko ovrednostimo z biokemijsko potrebo po kisiku (BPK) v določenem času. Visoke vrednosti BPK (mg/l) so indikacija velike vsebnosti organskih snovi in intenzivnih procesov mikrobne aktivnosti, kar

lahko vodi tudi v anoksije. Večina naravnih, neonesnaženih voda ima BPK_5 vrednost pod 1mg/l, onesnaženi vodotoki v Sloveniji pa imajo vrednost višjo tudi od 10mg/l. (Toman, 2001)

2.4.4 Ogljikov dioksid in kalcijevi karbonati

Ogljikov dioksid je v vodi dobro topen. V vodi raztopljen tvori ogljikovo kislino (H_2CO_3), ki reagira s kalcijevimi kationi (Ca^{2+}), da nastanejo karbonati. Ogljikov dioksid pride v jezero z difuzijo iz zraka, pa tudi s pritoki. V samem jezeru pa se sprošča pri dihanju organizmov ter gnitju. Največ se ga porabi pri procesu fotosinteze. CO_2 izhaja iz jezera z difuzijo ali pa se veže v karbonate. Tudi pri ogljikovem dioksidu je opaziti dnevno-nočno nihanje koncentracije, pri čemer so koncentracije CO_2 veliko večje ponoči, ko prevladujejo procesi dihanja. Pretvorbe CO_2 in kalcijevih karbonatov prikazuje slika 9.



Slika 9: Pretvarjanje CO_2 in karbonatov v jezeru. Razmerje $CO_2 : HCO_3^- : CO_3^{2-}$ določa pH jezerke vode. Tarman, 1992

Ogljikov dioksid se v vodi hidratizira v ogljikovo kislino, ki disociira v H^+ in HCO_3^- , pri visokem pH pa disociira ta dalje v H^+ in CO_3^{2-} . Razmerje med CO_2 , HCO_3^- in CO_3^{2-} je odvisno od pH vrednosti. V vodi, ki vsebuje veliko CO_2 , se raztaplja težko topni $CaCO_3$ in nastaja topni kalcijev hidrojeni karbonat ali $Ca(HCO_3)_2$:



Ko se količina CO_2 zmanjša, se začne kalcijev karbonat izločati v obliki »jezerske krede« ali pa se nalaga na rastline. Do tega pride, kadar se ravnotežja spreminjajo zaradi difuzije ogljikovega dioksida iz vode v ozračje ali zaradi fotosintetične porabe CO_2 v procesu fotosinteze. Če primanjkuje raztopljenega CO_2 mnoge rastline izkoriščajo hidrojeni karbonat kot vir ogljikovega dioksida. (Tarman, 1992)

Kalcijev hidrojeni karbonat ima pomembno pufrsko nalogo, saj je regulator pH vrednosti. Ko rastline trošijo CO_2 iz vode, se dviga pH in v vodah, ki vsebuje malo apnenca, se pri intenzivni fotosintezi pH lahko dvigne tudi do 9. (Tarman, 1992)

2.5 Kategorizacija stoječih voda glede na trofični nivo

2.5.1 Določanje stopnje trofičnosti v jezerih po Vollenweider-ju (OECD²)

Rezultati OECD programa

(<http://lakes.chebucto.org/TPMODELS/OECD/oecd.html#preamble>, 12.01.2006) so pokazali, da je v večini primerov fosfor tisti element, ki določa razvoj evtrofikacije.

Tudi če so nitrati limitirajoči faktorji, fosfor še vedno igra pomembno vlogo limitirajočega faktorja. Čeprav je bil OECD program zasnovan za nadzor pretežno negativnih posledic evtrofikacije, pa lahko pri posebnih primerih govorimo tudi o koristni povečani produkciji (npr. Za povečanje populacije določenih vrst rib). Žal pa negativna stran evtrofikacije še vedno prevlada, tudi nad morebitnimi prednostmi tega pojava.

Na splošno je v jezeru limitirajoč fosfor takrat, ko je razmerje totalni N/totalni P >15. Če pa

²OECD = Organization for Economic Co – Operation and Development

je limitirajoč dušik, je razmerje totalni N / totalni P < 7. Za razmerje totalni N / totalni P med 7 in 15, pa sta lahko limitirajoča faktorja fosfor, dušik ali oba. (<http://lakes.chebucto.org/TPMODELS/OECD/oecd.html#preamble>)

Za jezera se pri definiciji trofičnega stanja najpogosteje uporabljajo indikatorji kakovosti jezerske vode (Krajnc, po Vollenweider 1968):

- totalni fosfor P_{tot}
- klorofil-a
- Secchijeva globina
- koncentracija kisika v hipolimniju

Po Vollenweider-ju lahko določimo trofično stanje jezer glede na totalni fosfor in totalni dušik (preglednica 1) ali pa glede na zgoraj našteje indikatorje kakovosti jezerske vode (glej preglednica 2):

Preglednica 1: Trofično stanje jezera glede na totalni fosfor in dušik po Vollenweiderju 1968 (Krajnc, 1994; po Harper 1992)

Stopnja trofičnosti	P_{tot} [$\mu\text{g/l}$]	N_{tot} [$\mu\text{g/l}$]
ultraoligotrofno - oligotrofno	< 5	< 200
oligotrofno – mezotrofno	5 – 10	200 – 400
mezotrofno - evtrofno	10 – 30	300 – 650
evtrofno – politrofno	30 – 100	500 – 1500
politrofno	> 100	> 1500

Preglednica 2: Trofično stanje jezer po klasifikaciji OECD (Krajnc, 1994; po Vollenweider, 1982)

Stopnja trofičnosti	P_{tot}	chl a_{sred}	chl a_{maks}	H_{SEC} sred	H_{SEC} min
	[$\mu\text{g/l}$]			[m]	
ultraoligotrofno	≤ 4	≤ 1	≤ 2.5	≥ 12	≥ 6
oligotrofno	≤ 10	≤ 2.5	≤ 8	≥ 6	≥ 3
mezotrofno	10 – 35	2.5 – 8	8 – 25	6 – 3	3 – 1.5
evtrofno	35 – 100	8 – 25	25 – 75	3 – 1.5	1.5 – 0.7
hipertrofno	≥ 100	≥ 25	≥ 75	≤ 1.5	≤ 0.7

Legenda k preglednici 2:

Ultraoligotrofno: zelo revno s hranili

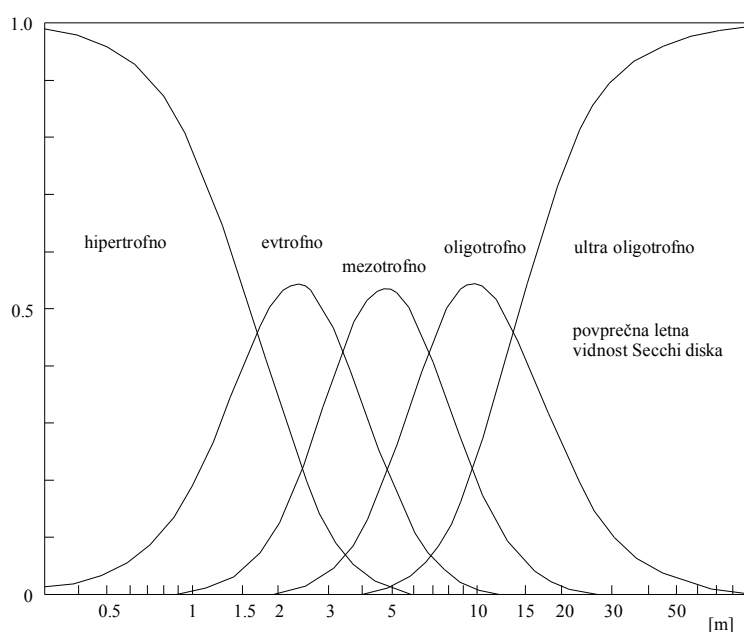
Oligotrofno: revno s hranili

Mezotrofno: zmerno bogato s hranili

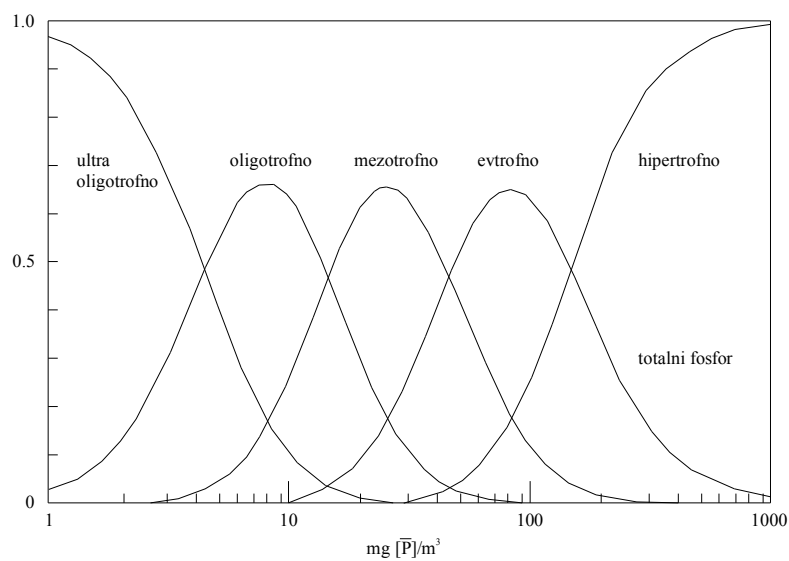
Evtrofno: bogato s hranili

Hiperevtrofno: izredno bogato s hranili

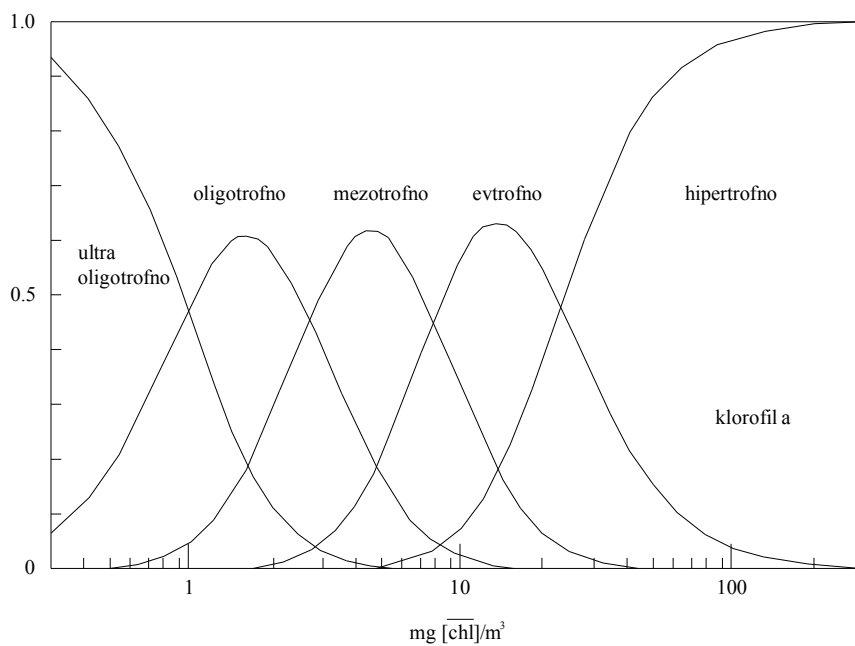
Grafično je Tabela 2 upodobljena na Slikah od 10 do 13:



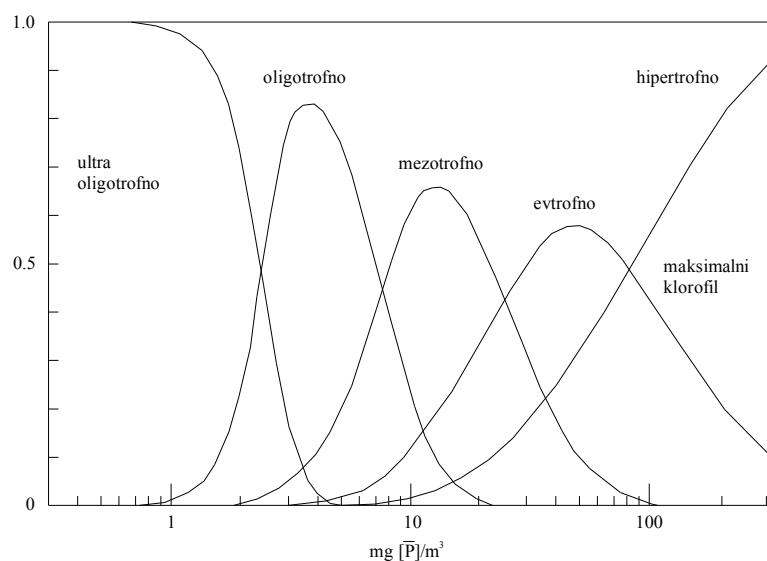
Slika 10: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na povprečno letno vidnost Secchi diska (Sedej, 2003 po OECD, 1982)



Slika 11: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na totalni fosfor (Sedej, 2003 po OECD, 1982)



Slika 12: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na povprečni letni klorofil-a (Sedej, 2003 po OECD, 1982)



Slika 13: Verjetnost uvrstitve v razred trofičnosti glede na maksimalni klorofil (Sedej, 2003 po OECD, 1982)

Vodnega telesa ne moremo točno uvrstiti glede na stanje trofičnosti, saj ni natančne meje med kategorijami. Lahko pa ga v določeno kategorijo uvrstimo glede na indikator kakovosti vode z določeno verjetnostjo.

Primer: razvrstimo vodno telo glede na vrednost totalnega fosforja 10 mg/m^3 . Verjetnost, da bo ultraoligotrofno je 10%, oligotrofno 63%, mezotrofno 26%, evtrofno 1% ter verjetnost, da bo hiperevtrofno, je 0%.

3 PREDSTAVITEV BLEJSKEGA JEZERA

Blejsko jezero je zaradi turistične tradicije in naravnih lepot naše najbolj znano jezero. Sodi med občutljiva območja podvržena eutrofikaciji, kjer se s sanacijskimi ukrepi poskuša odpraviti posledice nenadzorovanega odvajanja odpadkov v preteklosti. (Remec – Rekar, Bat; 2005)

Problematika Blejskega jezera, kot v vseh drugih naravnih ali umetnih jezerih, je akumulacija hranilnih snovi, predvsem fosfatov in nitratov. Njihova koncentracija je v Blejskem jezeru drastično narasla v 70. letih prejšnjega stoletja s povečevanjem intenzivnega kmetijstva, povečanjem turizma in neurejene kanalizacije. To pa se kaže v spremenjenem biološkem ritmu jezera. Pojavile so se nove vrste fitoplanktona, ki pa so ne le karakteristične za stopnjo močne eutrofikacije, so namreč tudi nevarne za okolje. (Vrhovšek, 1979)

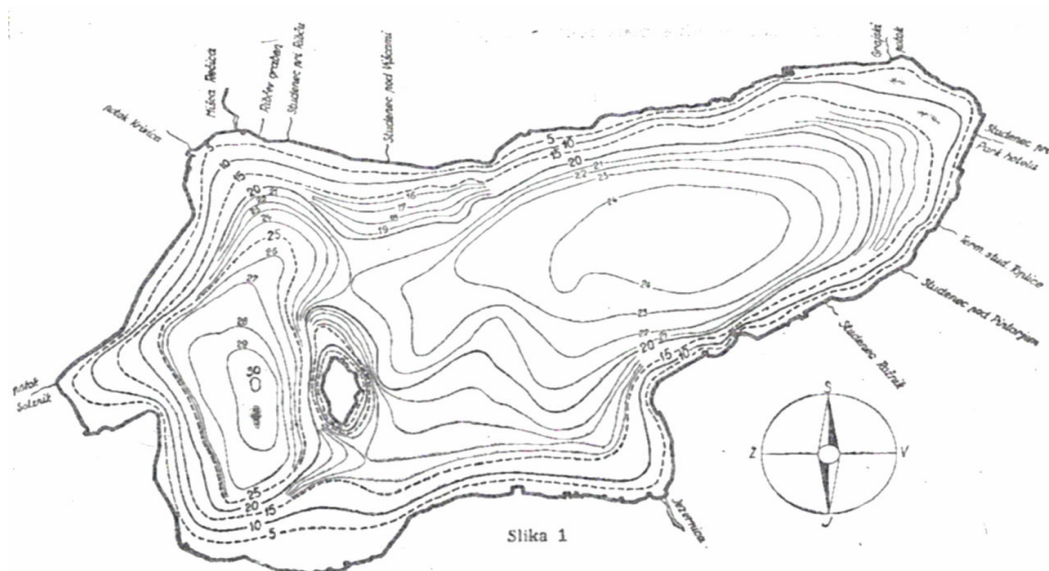
3.1 Morfološke značilnosti jezera

Blejsko jezero leži na nadmorski višini 476 m v osrčju Blejskega kota (Slika 15). Jezero je tipično alpsko z maksimalno globino 30,00 m, povprečno srednjo globino 18,4 m, obsegom 6 km, površino 1,47 km² in prostornino 25,7*10⁶ m³. (Rismal, 1980)



Slika 14: Prikaz geografske lege Blejskega jezera (Atlas Slovenije, 1986)

Jezersko kotanjo sestavljata dve globeli, ločeni s podvodnim grebenom, katerega del je tudi otok (slika 15). Zahodna globel je globlja. Jezero je po nastanku ledeniško. (Remec – Rekar, Bat; 2005)



Slika 15: Prikaz Blejskega jezera z vrisanimi izobatami (Sketelj, 1958)

Morfologijo jezera je v modelu predstavljena s površino, globino in volumnom jezera.

3.2 Hidrološke značilnosti jezera

Blejsko jezero napaja večje število studencev, zato ga uvrščamo med jezera studenčnega tipa. Od skupaj 22 studencev (slika 16), jih v Blejsko jezero priteka le še 12. Ostali so bili zaradi onesnaženosti speljani v kanalizacijo. Njihov povprečni dotok v Blejsko jezero, vključno z umetno speljano Radovno, je leta 2000 znašal $0,545 \text{ m}^3/\text{s}$ (Vir: ARSO, 2000). Iztoka iz jezera pa sta dva: Jezernica in iztok preko natege (sanacijski ukrep).

Usoda večine alpskih jezer je, ali da jih zasuje prod močnejših pritokov, ali pa alpska jezera čaka staranje z vedno izrazitejšo eutrofikacijo. Blejsko jezero se je po naključju izognilo zasipavanju, saj je ostalo zunaj osi velikih prodonosnikov. Radovna, ki ima stalen površinski izvir nad 700 m nadmorske višine, se do inženirskih posegov naravno ni izlivala v Blejsko jezero, čeprav je še v srednjem delu njen tok usmerjen naravnost proti vzhodu in proti jezeru.

Le 2,4 km od jezera se je v naselju Krnica tok Radovne zaradi debelih ledeniških nanosov v Gorjanskem kotu preusmeril proti severovzhodu. Povodje jezera in njegovi vplivi so tako precej manjši kot bi bili, če bi Radovna pritekala v jezero. Tako povodje Blejskega jezera meri samo 9,3 km² in je v primerjavi s površino jezera približno šestkrat večje. Razvodnica večinoma poteka po grebenih okoliških osamelcev. Najbolj se pojezerje širi proti severozahodu v Gorjanski kot. Vode, ki izvirajo v neprepustnih plasteh morenskih skladov pod Zatrato in Zaborštom ter v močvirnem predelu pod Poljšico pred železniško progo Jesenice – Nova Gorica, poniknejo, za tovarno LIP Bled pa združene pritečejo do umetne razvodnice, kjer se voda lahko usmeri proti Savi Dolinki po Rečici ali po Mišci proti Blejskemu jezeru. (Remec – Rekar, 2004)

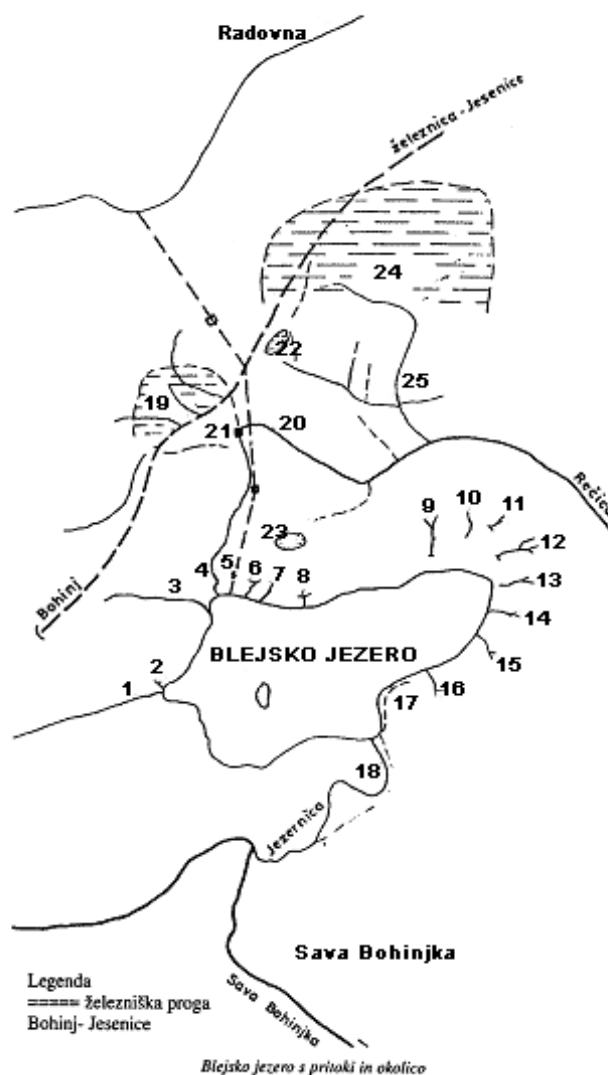
Pred sanacijskimi posegi v dotok in iztok je ocenjen zadrževalni čas vode v Blejskem jezeru skoraj 4 leta, kar je 9 krat več kot v npr. Bohinjskem jezeru. Majhna naravna pretočnost jezera zmanjšuje njegove samočistilne sposobnosti. Zato je jezero ekološko izjemno ranljivo. Ker je lega jezera zatišna, je mirovanje vode še izrazitejše. Da bi se povečala naravna pretočnost jezera je bila leta 1964 v jezero speljana Radovna na globino 18m.

Temperaturna plastovitost je bila zaradi majhne pretočnosti jezera izrazita že v aprilu. Termoklina se je postopno poglobljala do globine 10-12m, ki jo je dosegla v oktobru. Obdobje spomladanske in jesenske homotermije, ko se je temperatura vode po globini izenačila in se je voda premešala, je bilo kratko, od leta do leta pa se sicer spreminja – odvisno od vremenskih razmer. (Remec – Rekar, Bat, 20005)

V povprečju prejme Blejsko jezero le 1600 mm padavin na leto.

Nihanja gladine jezerske vode so bila v letu 2000 kljub umetno povečani pretočnosti še vedno majhna. V zadnjih letih (obdobje 1980-2000) je bila amplituda med najvišjo in najnižjo srednjo mesečno višino le 15 cm, med najvišjo in najnižjo zabeleženo gladino pa 56 cm.

Zatišna lega Blejskega jezera vpliva na razporejanje vodnih mas in večje ter hitrejše segrevanje. Srednja mesečna temperatura površinske vode je v avgustu kar 22.7°C, nad 22 °C ima voda tudi v juliju. Temperature nad 23°C lahko nastopijo od junija do septembra. Povprečna temperatura površinske jezerske vode za obdobje 1922-1987 znaša 12.4°C, in 12.9°C za obdobje 1985-2000. (Remec – Rekar, Bat, 20005)



Ime pritoka	Odtok	Ime pritoka	Odtok
1. Solznik	v jezero	16. Studenec pri Park hotelu	v jezero in kanalizacijo
2. Izvir pri Sončnici	v jezero	17. Ušivec	v jezero in kanalizacijo
3. Krivica	v jezero	18. Toplica	v jezero
4. Mišca	v jezero	19. Pintar	v kanalizacijo
5. Radovna -umetni dotok	v jezero	20. SCT izvir	v jezero
6. Ribčev graben	v jezero	21. Rožnik	v kanalizacijo
7. Ribčev studenec	v jezero	22. Bęli Dvor	v kanalizacijo
8. Izvir pod Višcami	v jezero	23. Jezernica	
9. Vtok pri kopališču	v kanalizacijo	24. Močvirje LIP	
10. Grajski potok	v kanalizacijo	25. Rečica	
11. desni pritok Grajskega potoka	v kanalizacijo	26. bifurkacija	
12. Izvir na parkirišču Jelovica	v kanalizacijo	27. Bajer Turne	
13. Vtok pri čolnarni	v jezero	28. Jezerca	
14. Izvir pri mlekmni	v kanalizacijo	29. V blatih	
15. Ambrožič	v kanalizacijo	30. Jermanka	

Slika 16: Blejsko jezero s pritoki (Remec Rekar, 2004)

3.3 Dosedanje raziskave

Do leta 1954 so bile na Blejskem jezeru opravljene le skromne raziskave. Omejene so bile predvsem na algološke raziskave in kasneje na hidrološke raziskave. (Vrhovšek, 1979)

Zaradi poslabšanja stanja Blejskega jezera, je Uprava za vodno gospodarstvo LR Slovenije imenovala posebno strokovno komisijo za sanacijo Blejskega jezera. Na predlog te komisije je Uprava za vodno gospodarstvo naročila Inštitutu za zdravstveno hidrotehniko Univerze v Ljubljani limnološko preiskavo Blejskega jezera. Ta limnološka preiskava naj bi prikazala obstoječe stanje Blejskega jezera in s tem tudi osnovo za presojo potrebnih ukrepov za sanacijo jezera. Inštitut je to nalogo prevzel kljub pomanjkljivi opreми. To je bila tudi ena prvih širših raziskav Blejskega jezera. V preliminarnem poročilu so podali v kratkem le najbolj značilne izsledke vseh preiskav. Preiskave so izvrševali kot sezonske preiskave v oktobru 1954, v juniju in septembru 1955 ter v marcu, aprilu, maju, juniju in oktobru 1956. (Rejic, Sketelj; 1958)

Na začetku teh raziskav so najprej določili morfološke, hidrološke in meteorološke lastnosti jezera. Natančno so določili največjo globino jezera, povprečno globino jezera, obliko kotanje Blejskega jezera, padavinsko območje ($9,3 \text{ km}^2$), padavinske podatke, dotoke in iztoke iz jezera ter pogostost in jakost vetrov (le ti pomembno vplivajo na mešanje vode v jezeru). Nato so se lotili še preiskav hidrofizičnih lastnosti jezera: določevali so prozornost vode, barvo vode ter vpliv sončnega sevanja, spremembe svetlobe v vodi po jakosti in kakovosti, porazdelitev toplote v vodi, temperaturo vode, gostoto vode. Nadalje so raziskovali kemijsko sestavo vode: ogljikov dioksid, pH, H_2S , raztopljeni kisik, rH (To je negativni logaritem pritiska vodika kot plina. Ta vrednost nam pove, kdaj prevladujejo v vodi oksidacijski procesi in kdaj redukcijski procesi.), dušikove spojine, fosfate. Zadnji del raziskav pa so bile preiskave oz. določevanje sestave blata ter mikrobioloških značilnosti Blejskega jezera. Izsledki teh raziskav pa so naslednji. (Rejic, Sketelj; 1958)

Glede na sestavo blata in na starejše preiskave planktona so ugotovili, da se je staranje jezera, evtrofikacija, začela pojavljati že pred 40 leti, se pravi že leta 1914. Iz plasti svetlosivega in

temnosivega blata je očitno, da so že okrog leta 1914 avtohtone in alohotne organske snovi zapadle v anaerobne procese. Pojavil se je vodikov sulfid, ki je uničil večji del bentonske favne in tako močno spremenil njen vrstni sestav. Dokaz za to je jasno izražena podrobna plastovitost, ki bi v nasprotnem primeru ne mogla nastajati. Preiskava planktona iz leta 1917 nedvoumno pove, da sta takrat še živele dve vrsti planktonskih rakcev, ki pa jih leta 1954 že ni bilo več. Na osnovi teh dognanj je sklepati, da je bil začetek evtrofikacije že pred letom 1914, in da istega leta evtrofija še ni dosegla takega obsega oz. da vodikov sulfid še ni prišel tako visoko, da bi izločil omenjeni vrsti rakcev iz jezerske favne. (Rejic, Sketelj; 1958)

Inženirji so predvideli, da se jezero da ozdraviti in so podali naslednje predloge:

- odstraniti vzroke za pospešeno evtrofikacijo, to pa predvsem pomeni ureditev kanalizacije;
- povečanje dotoka, povečanje izmenjave vode, ki naj zajame vso jezersko kotanjo in sicer s svežo, hladno, čisto in s kisikom nasičeno vodo. Za dotok hladne in s kisikom nasičene vode se je zdela najprimernejša Radovna, ki bi jo dovajali spomladi in jeseni. To ne bi ogrozilo kopalne sezone, saj se površinska voda hitro segreje.
- izboljšanje jezera z odstranitvijo vodikovega sulfida iz monimolimnija. V ta namen bi bilo potrebno vodo črpati iz globinskih plasti, jo nato razpršiti in prezračiti. Namen je oksidiranje vodikovega sulfida. S tem pa ne odstranimo nobenega vzroka za evtrofikacijo. Na ta način bi se sicer res oksidiral vodikov sulfid, pri tem pa se izloči elementarno žveplo, ki se ponovno useda in zaradi prisotnosti žvepljenih bakterij preide v krogotok.
- odstranitev vode iz monimolimnija, ki vsebuje vodikov sulfid, s pomočjo natege, ki bi segala v najgloblji del jezera in bi odvajala vodo v Jezernico oz. Savo Bohinjko. Tudi glede te možnosti so inženirji imeli pomisleke, predvsem zaradi tega, ker z natega ne bi rešili primarnih vzrokov nastanka evtrofikacije.

Komisija je potrdila ukrepa o dovajanju Radovne ter o ureditvi kanalizacije, zavrgla pa je predlog o nategi, saj so menili, da bi hipolimnijska voda močno onesnažila Savo Bohinjko. Tako je uprava za vode SRS zgradila do jezera cca. 2,4 km dolg cevovod za cca. 2,0 m³/s s kisikom bogate vode iz Radovne (leta 1964). Po izgradnji tega cevovoda z izpustom vode na

dno jezera (na globino 18 m), pa se pričakovana kakovost vode ni izboljšala. Jezero je ponovno vzcvetelo. (Rismal, 2005)

Po letu 1954 so pričeli s sistemskimi raziskavami na jezeru. Trinajst let je raziskave vodil Inštitut za zdravstveno hidrotehniko FAGG v Ljubljani, nadaljeval pa Inštitut Boris Kidrič. Rezultati dotedanjih raziskav so bili naslednji: okoliški hribi ne dopuščajo vpliva vetra na mešanje jezera, jezero ima značilno letno plastovitost, ki je odvisna predvsem od vremenskih razmer. Spodnji del hipolimnija, monimolimnij, se nikoli ne premeša predvsem na račun gostejše vode. Prehod iz aerobnega v anaerobno stanje je v najslabšem primeru med 11 in 12 m, v najboljšem pa med 19 in 20 m. Najslabše stanje v jezeru je opaziti pred jesensko homotermijo in najboljše stanje v spomladanskem času, po končani homotermiji. pH vrednosti so slabo alkalne in v večjih globinah slabo kisle. (Vrhovšek, 1979)

Največji doprinos k flori alg na Blejskem jezeru je prispeval Lazar, saj je ugotovil 105 vrst. Še posebej intenzivna so bila njegova raziskovanja v času pred sanacijo jezera. Ugotovil je tudi, da je bila do leta 1956 zelo pogosta vrsta *Cyclotella compta*, ki pa se po letu 1960 ni več pojavila v sestavi fitoplanktona. V tem času sta bili pogosti vrsti *Microcystis aerogina* in *Asterionella formosa*. Obe vrsti kažeta na spremembo v epilimnijski plasti. Le ta naj bi nastopila med 1950 in 1960 letom. (Rejic, 1973)

Do leta 1979 je bilo ugotovljenih 145 različnih vrst alg.

Od leta 1974 dalje se je k raziskovanju Blejskega jezera priključil tudi Inštitut za biologijo, katerega zaključki raziskav do leta 1978 so bili naslednji: Blejsko jezero je specifičen biotop, tako glede abiotskih kot tudi biotskih faktorjev (to se je pokazalo pri raziskavanjih sezonskega pojavljanja fitoplanktona). Pojav je zelo težko primerljiv z ostalimi alpskimi jezери, ekološki pogoji in s tem biološki procesi pa so dodatno zapleteni še z dotokom Radovne. (Vrhovšek, 1979)

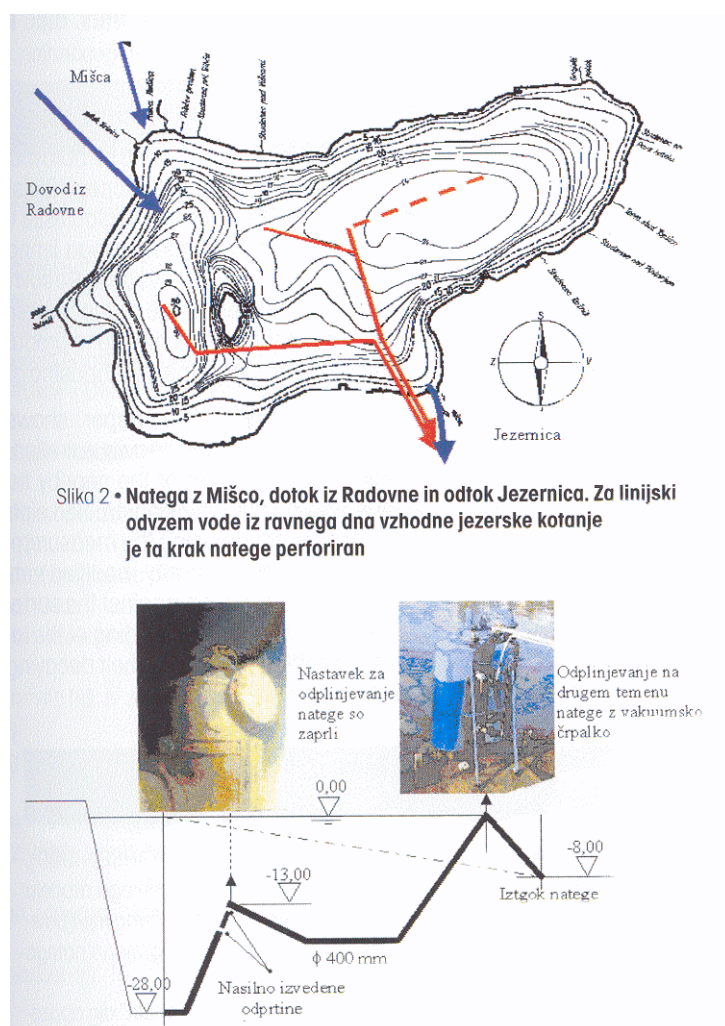
Inštitut za biologijo Univerze v Ljubljani je leta 1979 opravljajal meritve, in rezultete podal v nalogi z naslovom Primarna produkcija evtrofnih ekosistemov. Nosilec naloge je bil Danijel Vrhovšek. Izmerili so fizikalno – kemijske parametre, vzorčili so fitoplankton, določevali primarno produkcijo s C^{14} metodo ter primarno produkcijo fitoplanktona s O_2 metodo. Ocenili

so tudi primarno produkcijo perifitona ter ekstrakcijo klorofila. Posebnost teh raziskav je bila ta, da so inženirji imeli možnost uvajanja Radovne po lastni presoji, oz. na podlagi stanja jezera. Rezultati teh raziskav so naslednji: s stališča biologije se jezero še vedno ne izboljšuje, temveč se celo slabša. Fizikalno kemijski parametri pa kažejo na rahlo izboljšanje kvalitete vode, vendar je to posledica dovajanja Radovne, katera pa nevarnosti ni odstranila, temveč samo začasno imililo. To se je pokazalo kmalu po prenehanju uvajanja večjih količin vode. (Vrhovšek, 1979)

Leta 1980 je Mitja Rismal presodil posamezne metode za sanacijo Blejskega jezera s pomočjo Imbodenovega modela (poglavje 4). Ugotovil je:

- Blejskega jezera ni mogoče sanirati samo z enim od znanih ukrepov.
- Čimpreje je potrebno zmanjšati dotok hranil v jezero, predvsem je treba izločiti največje onesnaževalce: s preusmeritvijo Mišce je obremenitev s fosforjem mogoče zmanjšati za 60% sedanje obremenitve.
- Primerno bi bilo zagotoviti možnost površinskega in globinskega izpiranja jezera (pri tem je treba paziti na morebitno razslojevanje jezera ter na odvodnike, da jih ne bi preveč obremenili z iztekajočo vodo iz dna jezera).
- Globinski odvod vode je učinkovitejši od površinskega izpiranja jezera.

Rezultati te študije so ponovno dokazali, da je natega najučinkovitejši način sanacije Blejskega jezera, ter da je bolj učinkovita od izpiranja jezera z dovajanjem Radovne. Tako je bila leta 1980/81 zgrajena natega – globinski iztok iz jezera (240 l/s).



Slika 17: Prikaz natege v Blejskem jezeru (Rismal, 2005)

Izgradnja natege je odločilno vplivala na izboljšanje kakovosti jezera, saj je prišlo do naglega padca koncentracije fosforja v jezerski vodi. Vendar z izgradnjo natege in uvajanja Radovne zdravljenje jezera v kakovostnem in v ekonomskem smislu še ni bilo končano. Za optimalno zdravljenje bi bila potrebna sinteza tekoče spremljave kakovostnih analiz jezera in rezultatov dinamičnega modeliranja procesov v jezeru. Sanacija jezera namreč ne pomeni samo enkratnega posega v jezero, temveč trajno spremljanje kakovosti vode in procesov v jezeru. Ob začetku obratovanja natege niso uporabili načrtovane zmogljivost natege $0,390 \text{ m}^3/\text{s}$, temveč so nasprotniki natege odtok iz natege zapirali, nato pa onesposobili najgloblji zahodni krak natege (projektanta so odslovili zaradi nesporazumov in uredili stvari na svoj način), ki pa je za sanacijo ključnega pomena. Zato je natega v obratovalnem obdobju delovala največ s polovično močjo $0,195 \text{ m}^3/\text{s}$. Šele okoli leta 2002 so zaradi poslabšanja jezera povzročeno

poškodbo natege odpravili. (Iztok preko natege je v letu 2000 znašal 0,192 m³/s, v letu 2001 0,192 m³/s, leta 2002 0,205 m³/s, leta 2003 pa 0,284 m³/s. Vir: ARSO;) Kakovost jezera se je ponovno hitro izboljšala. Žal pa rešitve študije IZH še vedno niso v celoti izvedene, ali pa so napačno izvedene. (Rismal, 2005)

Seveda pa ima tudi natega slabe strani delovanja. Negativne posledice odvoda hipolimnijske vode iz Blejskega jezera lahko pričakujemo zaradi:

- smradu ob iztoku iz natege, zaradi sproščanja plinov, nabranih na dnu jezera
- strupenosti v globinski vodi jezera akumuliranih snovi za življenje v Savi Bohnjki
- zmanjšane uporabnosti dolvodnih voda Save za druge namene

Tudi kanalizacija je bila v letih od 1982 do 1985 delno popravljena in dograjena. Vnos fekalij se je tako zmanjšal za okoli 80 %. (Remec – Rekar, Bat; 2005)

Pred sanacijskimi posegi je bilo Blejsko jezero uvrščeno med evtrofna jezera, od leta 1983 pa ga lahko ponovno uvrščamo med mezotrofna jezera. Z zmanjšanjem povprečne vsebnosti skupnega fosforja in dušika, ki sta osnovni hranili za rastlinski plankton, se je zmanjšala tudi produktivnost fitoplanktona, ki jo kaže povprečna vsebnost klorofila a. Prilagajanje življenjske združbe na nove razmere je izredno zapleten, kompleksen in v primerjavi z izplavljanjem hranilnih snovi iz jezera, dolgotrajen proces, ki ga je v Blejskem jezeru opaziti šele od leta 1991 dalje. (Remec – Rekar, Bat; 2005)

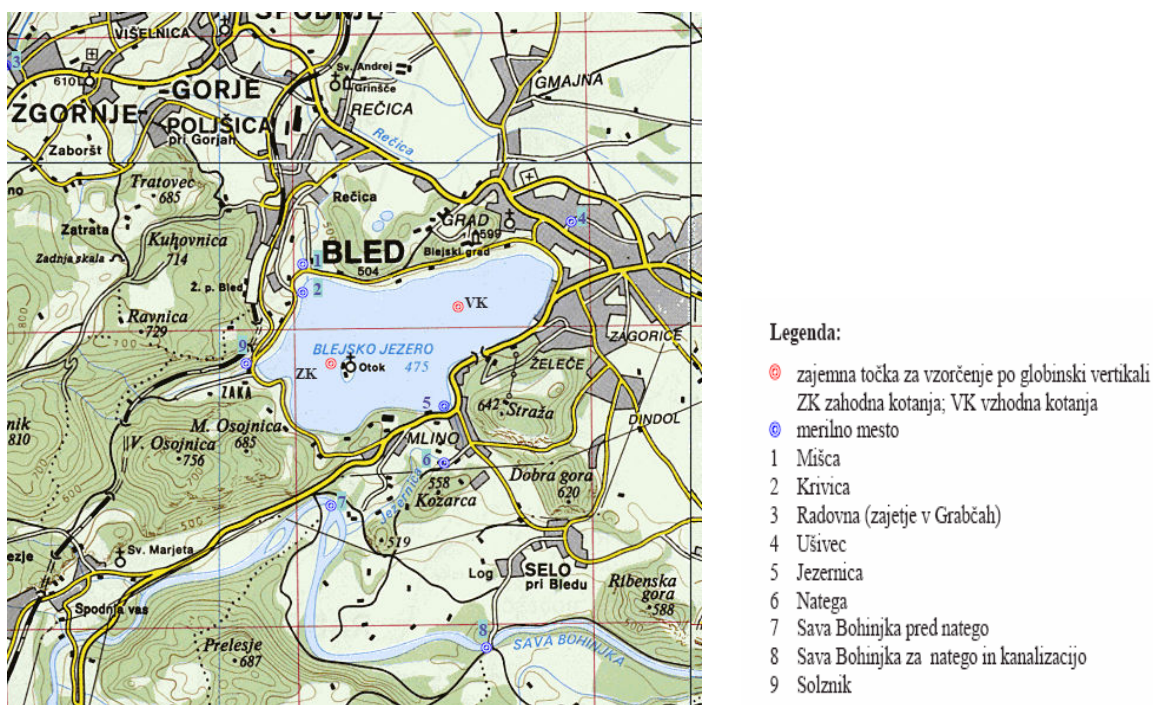
V obdobju 1998-2000 se je povprečna vsebnost klorofila-a v jezeru s 3μg/l ponovno povečala na 8μg/l. Cvetenje različnih vrst fitoplanktona je vplivalo na slabši izgled in manjšo prosojnost jezera. Po letih stalnega upadanja se je ponovno povečal delež cianobakterij v fitoplanktonski združbi. (Remec – Rekar, Bat; 2005)

Občasna cvetenja še vedno opozarjajo, da stanje Blejskega jezera zaradi porušenega biološkega ravnotežja v preteklosti še vedno ni stabilno in je vnos hranilnih snovi iz pojezerja občasno še vedno prevelik. (Remec – Rekar, Bat; 2005)

3.4 Monitoring jezera v letu 2000

Monitoring Blejskega jezera sta v letu 2000 izvajala HMZ RS in Nacionalni inštitut za biologijo Ljubljana. Namen monitoringa je spremljanje procesa eutrofikacije, rezultati pa so osnova za upravljanje s sanacijskimi posegi v jezeru.

Monitoring je vključeval 10 vzorčenj po globinski vertikali na vzhodni in zahodni kotanji. V program monitoringa so bili vključeni vsi večji pritoki jezera in oba odtoka jezera: Mišča, Krivica, Ušivec, Radovna, Jezernica in natega ter Sava Bohinjka pred in za dotokom natega in kanalizacije.



Slika 18: Merilna mesta na jezeru in pritokih ter iztokih

3.4.1 Rezultati analiz

Na stanje Blejskega jezera v letu 2000 je vplivalo dolgotrajno in masovno površinsko »cvetenje« cianobakterije *Oscillatoria rubescens* (glej poglavje 3.5), ki se je začelo že v letu 1999, končalo pa šele sredi marca 2000. V času »cvetenja« je oscilatorija predstavljala preko 90 % skupne biomase fitoplanktona, kar se je odrazilo tako v razporejanju nutrientov, kot tudi

v spremembah življenjske združbe zooplanktona. Zaradi cvetenja je bilo manjše tudi prodiranje svetlobe v globino. Najmanj svetlobe na 10 m globine je bilo izmerjeno v maju, saj je bila prosojnost jezera najmanjša, 2,5 m. Povprečno pa je prosojnost jezera v letu 2000 znašala 5,3 m.

Voda se je najbolj ogrela v juniju in začetku julija, ko je bila temperatura vode na površini 23,7°C.

Vetrovno spomladansko obdobje je ugodno vplivalo na prezračevnost jezera v slojih vode pri dnu jezera, kjer se je v aprilu vsebnost kisika na globini 28 m povečala iz 1,8 mg/l na 5mg/l. Največji vpliv na razporeditev in vsebnost kisika pa je imel fitoplankton. Vsebnost kisika je bila povečana od maja do oktobra na globinah od 6 do 10 m, kar kaže na povečano fotosintetsko aktivnost v teh slojih. Na dnu jezera pa se je vsebnost kisika zmanjšala že v juniju, in je padla pod 1 mg/l. Plast z nizko vsebnostjo kisika se je povečevala in je ob koncu plastovitosti, v decembru, segala od dna do globine 18 m.

Največjo vsebnost fosforja v letu 2000 so izmerili v decembru na dnu vzhodne kotanje in je znašala 0,31 mg PO₄/l (letno povprečje fosforja glej v preglednici 4). (ARSO, 2000)

Leto 2000 je bilo glede na rast različnih vrst fitoplanktonskih združb izjemno aktivno in produktivno leto. Povprečna vrednost klorofila-a je znašala 7,2 µg/l (preglednica 4). V obdobju med 1998 – 2000 je med zooplanktonskimi populacijami prišlo do sprememb, ki se kažejo v številčnem upadanju nekaterih in množičnem pojavljanju drugih vrst. Znano je, da dolgotrajna »cvetenja« cianobakterij vplivajo na spremembe v zooplanktonskih populacijah vodnih bolh in ceponožnih rakov, zato gre sklepati, da je »cvetenje« oscilatorie glavni razlog za spremembe v vrstni sestavi zooplanktona v Blejskem jezeru. (ARSO, 2000)

Preglednica 4 prikazuje, kako se je Blejsko jezero od leta 1995 do vključno leta 2000 uvrščalo v trofične kategorije po OECD kriterijih glede na totalni fosfor, anorganski dušik, prosojnost in klorofil-a.

Preglednica 3: Uvrstitev Blejskega jezera v trofično kategorijo po OECD kriterijih (ARSO, 2000)

Leto	Trofična stopnja	Fosfor	Dušik	Prosojnost		Klorofil a	
		Totalni (µg/l)	Anorganski (µg/l)	Letno (m)	Minimalna (m)	Letno (µg/l)	Maksimum (µg/l)
	ultra	< 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
	evtrofno	35 - 100	500 - 1500	3 - 1,5	1,5 - 0,7	8 - 25	25 - 75
	hiperevtrofno	> 100	> 1500	< 1,5	< 0,7	> 25	> 75
1995	mezotrofno	15.2	477	5.9	2.5	3.4	17.2
1996	mezotrofno	14.5	470	6.5	3.8	2.8	11.2
1997	mezotrofno	12.7	495	8.4	4.1	2.9	13.3
1998	evtrofno	15.5	374	5.8	2.4	7.6	29.1
1999	evtrofno	17.9	312	5.0	1.2	9.3	47.4
2000	evtrofno	14.3	280	5.3	2.5	7.2	25.7

V preglednici 4 je prikazana primerjava izbranih parametrov v pritokih in iztokih iz Blejskega jezera ter Savi Bohinjski pred in za dotokom vode iz natege in kanalizacije. V nobenem od pritokov ni opaziti poslabšanja kakovosti v primerjavi z letom 1999. Kakovost Mišce se je celo izboljšala zaradi zmanjšanja obsega delovanja ribogojnice.

Preglednica 4: Povprečne vrednosti izbranih parametrov v pritokih in iztokih iz Blejskega jezera ter Savi Bohinjski pred in za dotokom natege in kanalizacije v letih 1999 in 2000 (ARSO, 2000)

	P tot. mgPO ₄ /l		NO ₃ Mg/l		NH ₄ Mg/l		KPK mgO ₂ /l		SI	
	1999	2000	1999	2000	1999	2000	1999	2000	1999	2000
Radovna	<0,03	<0,03	2,2	2,1	<0,02	<0,02	1,2	1,2	1,59	1,52
Mišča	0,15	0,09	6,4	6,0	0,16	0,03	1,7	1,6	2,10	1,84
Krivica	0,04	0,04	4,2	4,2	0,02	0,02	1,3	1,5	1,46	1,66
Ušivec	0,07	0,08	13,2	13,7	<0,02	<0,02	1,1	0,8		
Solznik	0,03	0,05	2,3	2,4	0,07	0,03	1,9	6,1		
Jezernica	0,04	0,03	1,1	0,5	0,03	0,03	1,6	1,9	1,84	1,8
Natega	0,18	0,17	0,9	0,5	0,85	0,97	1,8	2,0		
Sava Boh. Pred natega	<0,03	<0,03	2,4	2,7	<0,02	<0,02	1,3	1,3	1,62	1,7
Sava Boh. za natega	0,05	0,08	2,2	2,5	0,09	0,09	1,5	1,4	1,81	1,82

Med poledenitvijo od 8.1. do 15.3.2000 je bil pritok Radovne naravnan na 200 l/s večina leta pa je dotok Radovne znašal 400 l/s. Zaradi sanacije zahodnega kraka natega ni delovala od 7.12 do 22.12.2000. Povprečen pretok natege je v letu 2000 znašal 192 l/s. Vpliv dotoka natege in predvsem kanalizacije na kakovost Save Bohinjke je očiten, in se odraža tako v spremenjeni kemijski sestavi vode, kot tudi v drugačni življenjski združbi na obeh lokacijah.

V preglednici 5 pa so podane ocene bilanc hranilnih snovi za leto 2000. Skupna količina padavin v letu 2000 je na območju Bleda znašala 1703,8 mm, ker je več kot v letu 1999, ko je bilo izmerjenih 1466,7 mm. Ocena bilance za leto 2000 kaže, da so pritoki in padavine prinesle v jezero manj nutrientov, fosforja, dušika, silicija in organskih snovi, kot sta ga iz jezera odplavila Jezernica in natega. Največ fosforja, dušika in silicija je tudi v letu 2000 prinesla Mišca, čeprav se je vnos fosforja glede na leto 1999 zmanjšal skoraj za polovico. V primerjavi z drugimi pritoki, je delež Mišce pri vnosu fosforja znašal 52%, delež Radovne pa 13%. Delež dušika, ki ga prinese v jezero Mišca, je ocenjen na 41%, delež Radovne pa na 30%. Z dušikovimi spojinami je med pritoki še vedno zelo obremenjen Ušivec, vendar je zaradi majhnega pretoka njegov delež vnosa samo 17%. (ARSO, 2000)

Preglednica 5: Oceana bilance hranilnih snovi v Blejskem jezeru v letu 2000 (ARSO, 2000)

2000 Pritoki	Qsr m ³ /s	Mio. m ³ /leto	Fosfor kg P/leto	Dušik t N/leto	Silicij t SiO ₂ /leto	KPK t O ₂ /leto
Radovna	0,335	10,615	36	5	12	5
Mišca	0,148	4,654	138	7	16	3
Krivica	0,020	0,616	9	1	2	1
Ušivec	0,028	0,867	22	3	5	0
Solznik	0,015	0,038	3	0	1	1
padavine	/	2,450	60	1	/	/
skupaj	0,545	19,240	268	17	36	10
Jezernica	0,410	12,924	149	2	10	7
natega	0,192	6,079	336	5	29	4
evaporacija	/	1,436	/	/	/	/
skupaj	0,602	20,439	485	7	39	11

Pri izračunih v Imbodenovem modelu sem uporabila podatke iz te preglednice, ki so označeni zeleno.

3.5 *Oscillatoria rubescens*

Cianobakterija (*Cyanophyta*) vrsta *Oscillatoria rubescens* je dolga leta dominirala med planktonskimi algami v Blejskem jezeru. Redno je povzročala spomladanska površinska »cvetenja«, v poletnem času pa je »cvetela« v metalimniju. Masivno pojavljanje te cianobakterije je povezano z onesnaženostjo z dušičnimi organskimi snovmi, zaradi česar ima status bioindikatorja za organsko onesnaženost jezera. Njena potreba po fosforju je velika, zato se tudi zadržuje v metalimniju in hipolimniju. Tu si ustvari zaloge fosforja v obliki polifosfatnih telesc. S pomočjo fikoeritrina (rdeči kolektorski pigment), se kromatično adaptira na nizke svetlobne intenzitete. V laboratorijskih razmerah je višje temperature ne omejujejo, v naravnem okolju pa se tem višjim temperaturam (nad 12 °C) raje umakne v večje globine. Vseeno jo prištevamo k oligofotičnim organizmom. Ker oscilatorija raste počasi, je od velikosti poletne, metalimnijske populacije ter jesenskih in zimskih vremenskih razmer, ki povzročajo večja ali manjša turbulentna gibanja, odvisna masovnost spomladanske populacije.

Njen delež v Blejskem jezeru je do leta 1990 znašal od 60 – 95 % skupne suhe teže fitoplanktona. V letih od 1990 do 1994 pa se je zastopanost oscilatorije v Blejskem jezeru zmanjšala. Tvori le še 11 do 50 % skupne biomase alg. Zlasti razvoj metalimnijske populacije ni tako intenziven kot pred l. 1990. (Remec – Rekar, 1995)

4 IMBODEN-OV MODEL

Za izračun bilance hranil (fosforja), alg in kisika v jezeru (za določitev “samočistilne” sposobnosti jezera) se uporablja več limnoloških modelov. Od enostavnejših modelov je pogosto omenjen Vollenweiderjev empirični model. Ta obravnava le površinski dotok in odtok vode iz jezera. To je tako imenovan “one-box” model, v katerem je zanemarjena razlika v koncentraciji fosforja po vertikali in zanemarjeno dejstvo, da se na različnih globinah odvijajo različni biološki in kemični procesi. Imbodnov model pa jezero loči na dve popolnoma premešani coni in ločeno obravnava biokemične procese v teh dveh conah. Zato je Imbodenov model t.i. “two-box” model. (Cvikl, 1992)

4.1 Površinski odtok iz jezera

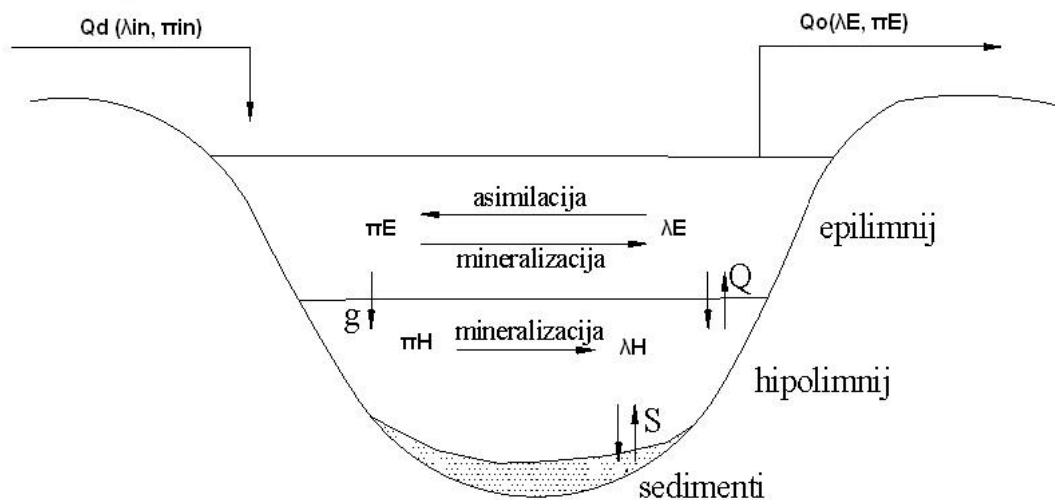
Imbodenov model temelji na bilanci fosforja v jezerski vodi, ter privzame fosfor kot edini omejitveni faktor za rast fitoplanktona. Pri tem pa loči totalno koncentracijo fosforja $[P_t] = \lambda + \pi$ v dve komponenti:

- fosfor v mineralizirani obliki $\lambda \left[\frac{mgP}{m^3} \right]$ (1)

- fosfor v organski substanci – partikularni fosfor $\pi \left[\frac{mgP}{m^3} \right]$ (2)

Model ločeno obravnava biokemične procese v epilimnijski (E) in v hipolimnijski (H) plasti jezera.

Osnovna shema modela je razvidna iz slike 19.



Slika 19: Osnovna shema modela za iztok iz površine (Rismal, 1980)

Oznake:

E	- oznaka za epilimnij
H	- oznaka za hipolimnij
$V_H [m^3]$	- volumen hipolimnija
$V_E [m^3]$	- volumen epilimnija
$V = V_H + V_E$	- volumen jezera; $V = A \cdot z$;
$z = z_E + z_H [m]$	- globina jezera
$\varepsilon = z_H/z_E = V_H/V_E$	- razmerje med prostornino (povprečno globino) epilimnija in hipolimnija
$Q [m^3/dan]$	- dotok, iztok iz jezera
$A [m^2]$	- površina jezera

Pregled parametrov iz zgornjih enačb:

ZUNANJI PARAMETRI MODELA (preglednica 6)

Preglednica 6: Zunanji parametri modela

Parameter	oznaka	enota	vrednost za Bled
hidravlična obremenitev	q_s	m/dan	spreminjam glede na dotok;
povprečna obremenitev 1m^2 površine jezera s fosforjem	$L_t = L_\lambda + L_\pi$	mgP/(m^2 dan)	spreminjam glede na dotok;

NOTRANJI PARAMETRI MODELA (preglednica 7)

Preglednica 7: Notranji parametri modela

Parameter	oznaka	enota	vrednost za Bled
koeficient izmenjave med epi- in hipo-limnijem	$\xi = \frac{Q}{V_E}$	1/dan	0.001
hitrost usedanja	g	m/dan	0.2
hitrost fotosinteze	α	1/dan	1
hitrost mineralizacije v epi- in hipo-limniju	R_E in R_H	1/dan	0.06 in 0.02
sproščanje fosforja iz sedimenta	S	mg P/(m^2 dan)	*

* Dejanski parameter »S« za Blejsko jezero ni znan. Vrednosti tega parametra se gibljejo od 3,57 do 5,71 mg/ m^2 dan (Kim et al, 2006). Pri izračunih sem za »S« uporabila vrednosti 0, 10 in 100. To so nerealno visoke vrednosti za parameter sproščanja fosforja iz sedimenta, a sem jih v modelu uporabila zato, da sem lažje in bolje prikazala dogajanja v jezeru ob spreminjanju »S«.

Hitrost mineralizacije je v modelu definirana z naslednjo enačbo:

$$\frac{d\pi}{dt} = -\frac{d\lambda}{dt} = -R\pi, \quad (3)$$

kjer je R [1/dan] koeficient mineralizacije.

Hitrost fotosinteze je odvisna od koncentracije biološke mase v vodi in koncentracije fosforja kot omejitvenega faktorja in jo prav tako izrazimo z linearno enačbo:

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{d\pi}{dt} = -\alpha\lambda \quad (4)$$

Koeficient hitrosti fotosinteze $\alpha \left[\frac{1}{d} \right]$ je mogoče določiti z eksperimenti, enako kot koeficient mineralizacije R [1/dan].

Na podlagi podane sheme jezera, enačb za mineralizacijo in sintezo ter na podlagi podatkov o obremenitvi jezera s fosforjem in drugimi hidravličnimi spremenljivkami jezera, je mogoče limnološke procese v jezeru opisati v poenostavljeni obliki s štirimi linearnimi diferencialnimi enačbami:

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda_E}{dt} &= -\lambda_E \left(\frac{q_s}{z_E} + \xi + \alpha \right) + \lambda_H \xi + \pi_E R_E + \frac{L_\lambda}{z_E} \\ \frac{d\lambda_H}{dt} &= \lambda_E \left(\frac{\xi}{\varepsilon} \right) - \lambda_H \left(\frac{\xi}{\varepsilon} \right) + \pi_H R_H + \frac{S}{z_H} \\ \frac{d\pi_E}{dt} &= \lambda_E \alpha - \pi_E \left(\frac{q_s}{z_E} + \xi + R_E + \frac{g}{z_E} \right) + \pi_H \xi + \frac{L_\pi}{z_E} \\ \frac{d\pi_H}{dt} &= \pi_E \left(\frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{g}{z_H} \right) - \pi_H \left(\frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{g}{z_H} + R_H \right) \end{aligned} \quad (5)$$

V stacionarnem režimu biokemičnih procesov v jezeru je mogoče zapisati sumarni prirastek partikularnega fosforja v hipolimniju po času z naslednjo enačbo:

$$\frac{d\pi}{dt} = \pi_E \frac{g}{z_H} + (\pi_E - \pi_H) \frac{\xi}{\varepsilon} \quad (6)$$

in iz te enačbe sledi

$$\frac{d\pi_H}{dt} = 0 \rightarrow \pi_H = \frac{\frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{g}{z_H}}{\frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{g}{z_H} + R_H} * \pi_E \quad (7)$$

Porabljen kisik za izračunano količino alg, ki prispe v hipolimniji, določimo iz stehiometrijskega razmerja hranil v algah, ki približno znaša:

$$C : N : P = 40 : 7.2 : 1 \quad (8)$$

Če se za oksidacijo 1 g C porabi 3.5 g O₂, potem velja:

$$3.3 \frac{gO_2}{gC} \cdot 40 \frac{gC}{gP} = -140 \frac{gO_2}{gP} \quad (9)$$

Torej, lahko zapišemo, da je sprememba porabe kisika:

$$\frac{d\pi[O_2]}{dt} = 140 \frac{d\pi}{dt}, \text{ oz.} \quad (10)$$

$$\frac{d[O_2]}{dt} = 140\pi_E \left[\frac{g}{z_H} + \frac{\xi R_H}{\xi + \frac{g}{z_E} + \varepsilon R_H} \right] \quad (11)$$

Ob predpostavki, da je koncentracija alg v epilimniju π_E odvisna od letne obremenitve jezera s fosforjem L_t , uvedemo faktor f , ki podaja razmerje med π_E in L_t :

$$f = \frac{\pi_E}{L_t}. \quad (12)$$

Če predpostavimo čas trajanja stagnacije $T_{st}=180$ dni, lahko izračunamo padec koncentracije kisika na koncu stagnacijske dobe:

$$\Delta[O_2] = 140 T_{st} f L_t \left[\frac{g}{z_H} + \frac{\xi R_H}{\xi + \frac{g}{z_E} + \varepsilon R_H} \right]. \quad (13)$$

Če izberemo povprečni padec koncentracije kisika $\Delta[O_2]$ v hipolimniju, lahko izračunamo

maksimalno dopustno letno obremenitev jezera s fosforjem $L_{t_dop} \left[\frac{mgP_{tot}}{m^2 \cdot leto} \right]$.

Padec kisika v hipolimniju (povprečeno po globini naj ne bi presegal $1g/m^3$, če naj jezero ohranja oligotrofno stanje. S to oceno, oz. s predpisanim padcem kisika v hipolimniju za

dosego nekega trofičnega stanja, lahko izračunamo dopustno zunanjo obremenitev jezera.

Torej:

$$\text{predpišemo: } \Delta O_{2_max} = 1 \frac{g}{m^3} \quad (14)$$

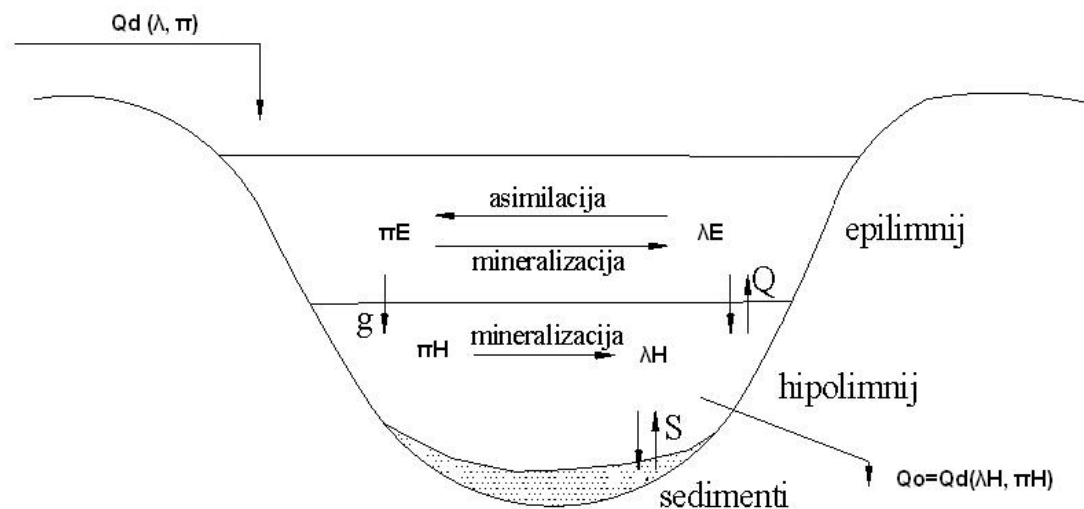
$$\text{in: } L_{t_dop} = \frac{\Delta O_{2_max}}{140 \cdot T_{st} \cdot f \left(\frac{g}{Z_H} + \frac{\xi \cdot R_H}{\xi + \frac{g}{z_e} + R_H \cdot \varepsilon} \right)} \quad (15)$$

Delež zadržanega fosforja v usedlini jezera pa lahko ocenimo z enačbo:

$$R_p = 1 - \frac{q_s (\lambda_E + \pi_E)}{L_t} \quad (16)$$

4.2 Odtok iz hipolimnija

Imbodnov model v jezeru za primer, če poteka odtok iz dna jezera oz. hipolimnija (slika 20).



Slika 20: Imbodnov model za iztok iz hipolimnija (Rismal, 1980)

Analogno kot v prejšnjem poglavju so procesi v jezeru definirani z naslednjimi štirimi diferencialnimi enačbami, le da dodamo še člen q_s/z_H :

$$\begin{aligned}
 \frac{d\lambda_E}{dt} &= -\lambda_E \left(\frac{q_s}{z_E} + \xi + \alpha \right) + \lambda_H \xi + \pi_E R_E + \frac{L_\lambda}{z_E} \\
 \frac{d\lambda_H}{dt} &= \lambda_E \left(\frac{q_s}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} \right) - \lambda_H \left(\frac{q_s}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} \right) + \pi_H R_H + \frac{S}{z_H} \\
 \frac{d\pi_E}{dt} &= \lambda_E \alpha - \pi_E \left(\frac{q_s}{z_E} + \xi + R_E + \frac{g}{z_E} \right) + \pi_H \xi + \frac{L_\pi}{z_E} \\
 \frac{d\pi_H}{dt} &= \pi_E \left(\frac{q_s}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{g}{z_H} \right) - \pi_H \left(\frac{q_s}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{g}{z_H} + R_H \right)
 \end{aligned} \tag{17}$$

Pri stacionarnem režimu metabolizma jezera je intenziteta mineralizacije proporcionalna dotoku organske mase iz epilimnija v hipolimniji:

$$\frac{d\pi}{dt} = \pi_E \left(\frac{q_s}{z_H} + \frac{g}{z_H} \right) + (\pi_E - \pi_H) \frac{\xi}{\varepsilon} - \pi_H \frac{q_s}{z_H} \tag{18}$$

za $\frac{d\pi_H}{dt} = 0$ velja:

$$\tag{19}$$

$$\pi_H = \pi_E \frac{\frac{q_s}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{g}{z_H}}{\frac{q_s}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{g}{z_H} + R_H} \tag{20}$$

Upošteva je gornji dve enačbi lahko zapišemo:

$$\frac{d\pi}{dt} = \pi_E \left[\frac{q_s}{z_H} + \frac{g}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} - \left(\frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{q_s}{z_H} \right) \frac{\frac{q_s}{z_H} + \frac{g}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon}}{\frac{q_s}{z_H} + \frac{g}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} + R_H} \right] \tag{21}$$

Če upoštevamo že omenjeno stehiometrijsko razmerje lahko zapišem enačbo za spremembo porabe kisika:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = 140 \left(\frac{d\pi}{dt} \right) \tag{22}$$

Dobimo oz. izračunamo vrednosti: $f = \frac{\pi_E}{L_t}$ $\tag{23}$

$$\frac{d(O_2)}{dt} = 140 \left(\frac{d\pi}{dt} \right) = 140\pi_E [\dots] \quad (24)$$

in padec koncentracije kisika v hipolimniju v času stagnacije jezera ($T_{st}=180$ dni) ΔO_2 :

$$\Delta O_2 = 140 T_{st} f L_t \left[\frac{\frac{q_s}{z_H} + \frac{g}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} - \left(\frac{\xi}{\varepsilon} + \frac{q_s}{z_H} \right) \frac{\frac{q_s}{z_H} + \frac{g}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon}}{\frac{q_s}{z_H} + \frac{g}{z_H} + \frac{\xi}{\varepsilon} + R_H}} \right] \quad (25)$$

Maksimalno dopustno obremenitev jezera pri izbranem padcu ΔO_2 v hipolimniju jezera je

mogoče izračunati iz enačbe: $L_{t,max} = \frac{\Delta[O_2]_{max}}{140 T_{st} f [\dots]}$ (26)

Delež zadržanega fosforja v usedlini jezera določimo s podobno enačbo kot v prejšnjem poglavju:

$$R_p = 1 - \frac{q_s (\lambda_E + \pi_E)}{L_t} \quad (27)$$

Negativne vrednosti R_p povedo, da je večji odtok fosforja iz jezera kot pritek.

4.3 Vhodni podatki

- Osnovni podatki:

$A_{max} = 1,47 \text{ km}^2$ – površina jezera

$V_{max} = 25,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ – prostornina jezera

$z_{sr} = V_{max}/A_{max} = 17,48 \text{ m}$ – povprečna globina jezera

$z_E = 6 \text{ m}$ – povprečna globina epilimnija

$z_H = 11,48 \text{ m}$ – povprečna globina hipolimnija (Rismal, 1980)

- Obremenitev jezera s fosforjem in dušikom:

Analiza dotoka fosfatov in nitratov v jezero je dala naslednje rezultate (ARSO, 2000)

Dotok v jezero:

Fosfor: $lp_0 = 268 \text{ kgP/leto} = 0,511 \text{ mgP/m}^2\text{dan}$

Dušik: $ln_0 = 17 \text{ tN/leto} = 32,389 \text{ mgN/m}^2\text{dan}$

Dotok vode: $Q_{sr} = 0,545 \text{ m}^3/\text{s} = 47088 \text{ m}^3/\text{dan}$

- Potek izračunov:

Imbodnov model je v Matlab zapisala asist. dr .Nataša Atanasova. Vhodno datoteko prilagam v prilogi A.

Ta model sem nato poganjala za tri različne kombinacije (tabela 7), torej za več različnih jezer in njim pripadajočih parametrov. Izhajala pa sem iz Blejskega jezera (q_{d0} , l_{p0} , l_{n0} , A , V so dejanski parametri Blejskega jezera). Spreminjala sem globino (s tem tudi volumen in površino jezera), nato sem spreminjala dotok vode in nazadnje še dotok hranil. Vsi rezultati izračunov v Matlabu so priloženi v prilogi B. Primer izhodne datoteke Matlaba, iz katere sem dobivala rezultate, ki sem jih kasneje obravnavala, pa se nahaja v prilogi C.

Preglednica 8: Kombinacije vhodnih podatkov potrebnih za izračune Imbodnovega modela v Matlabu

	I. - osnovna	II. – qd se spreminja	III. – lp, ln se spreminjata
A [m²]	V=A*z; A=konst.;	V=A*z; A=konst.;	V=A*z; A=konst.;
V [m³]			
z [m]	10, 18, 20, 30, 50, 70, 100;	10, 20, 30, 50, 70,100;	10, 20, 30, 50, 70,100;
lp [mgP/m²dan]	l_{p0}	l_{p0}	l_{p0} -50%; l_{p0} -25%; l_{p0} +25%; l_{p0} +50%; $2 * l_{p0}$;
ln [mgN/m²dan]	l_{n0}	l_{n0}	l_{n0} -50%; l_{n0} -25%; l_{n0} +25%; l_{n0} +50%; $2 * l_{n0}$;
qd [m³/dan]	q_{d0}	q_{d0} -50%; q_{d0} +50%; $2 * q_{d0}$; $3 * q_{d0}$; $4 * q_{d0}$;	q_{d0}
S [mgP/m²dan]	0, 10, 100	10	10
iztok	površina, natega	površina, natega	površina, natega

I. – osnovna kombinacija

V osnovni kombinaciji sem naredila primerjavo med jezeri spreminjajoče se globine. Dotok v jezero ter dotok hranil je enak dejanskim vrednostim za Blejsko jezero. Naredila sem tudi primerjavo med različnimi vrednostmi generacije fosforja, t.j. izmenjave fosfata na meji med vodo in sedimentom za $S=0$, 10 in 100. Vse izračune pa sem ponovila za obe vrsti iztokov. Tako dobim še primerjavo dopustne obremenitve pri iztoku preko natege in pri iztoku iz površine.

II. – qd se spreminja

V drugem sklopu izračunov sem naredila primerjavo vpliva dotoka vode v jezero glede na ostale nespremenjene parametre. Tako sem v model vnesla 50% manjšo vrednost osnovnega dotoka vode (q_{d0}), 50 % večjo vrednost dotoka vode, ter še 200%, 300% in 400% večja vrednost dotoka vode v jezero. Pri tem sem spreminjala še globino jezera, medtem ko so dotoki hranil ostali enaki dejanskim vrednostim kot za Blejsko jezero. V tem primeru sem za "S" vzela samo vrednost 10. Spreminjala sem še iztok.

III. – l_p , l_n se spreminjata

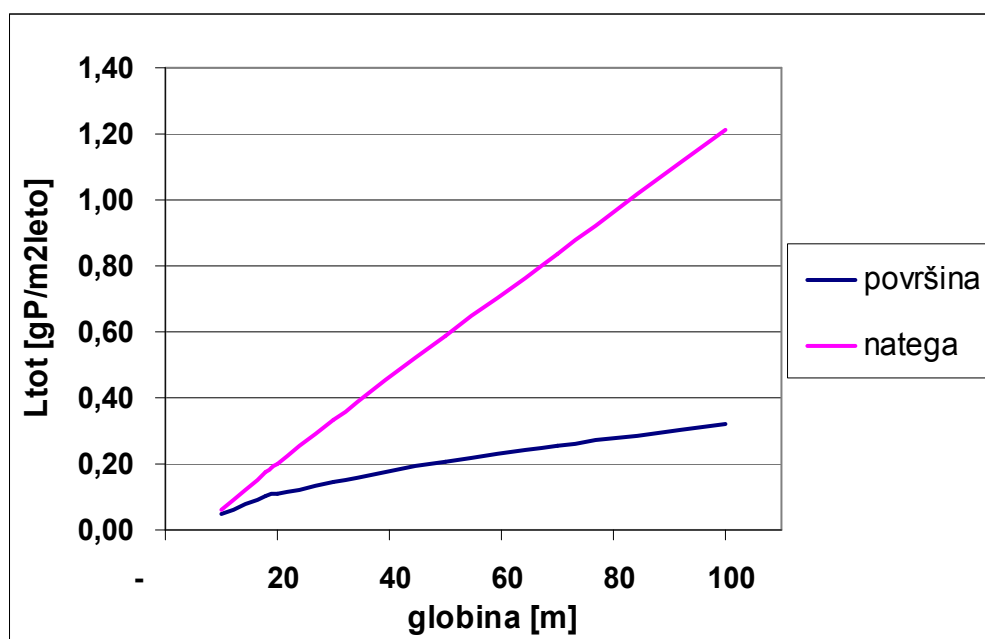
V tretjem sklopu izračunov sem spreminjala dotok hranil v jezero. Dotok fosforja in dušika v jezero sem spreminjala tako, da sem osnovno vrednost l_{p0} (ki je enaka vrednosti za Blejsko jezero za leto 2000) in l_{n0} zmanjšala najprej za 50%, nato za 25%, potem pa povečevala za 25%, 50% in 100%. Tako sem dobila dobro primerjavo med vplivi različnih vrednosti dotokov hranil v jezero. Ob spreminjanju dotokov hranil sem spreminjala tudi globino jezera kot v vseh primerih doslej, kot tudi iztok iz jezera. "S" pa je tudi v tem primeru enak 10. Dotok vode v jezero je enak osnovnemu dotoku za Blejsko jezero, iztoka pa sta tudi tokrat dva.

Iz rezultatov sem izrisala grafe, ki prikazujejo dopustne obremenitve glede na vhodne podatke. Opisujem jih v naslednjem poglavju.

5 INTERPRETACIJA REZULTATOV IN DISKUSIJA

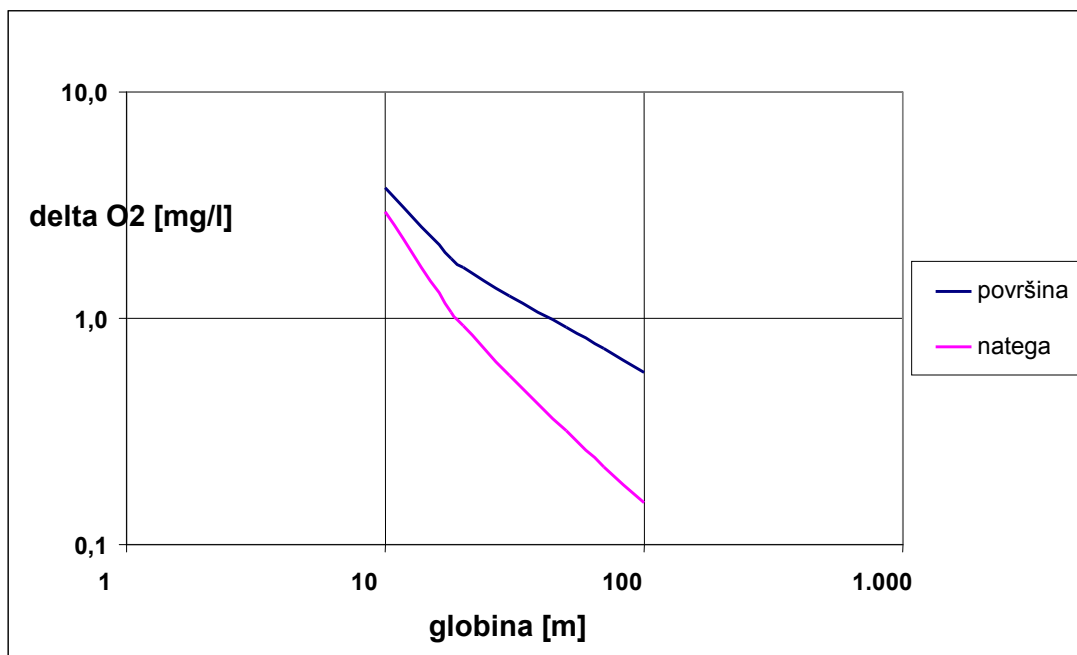
I. – osnovna kombinacija

Iz grafikonov 1, 3, in 4 je razvidno, da se dopustna obremenitev veča z večanjem globine jezera. Prav tako je iz istih grafikonov vidno, da je dopustna obremenitev pri iztoku preko natege vedno večja kot je dopustna obremenitev pri iztoku iz površine, saj preko natege odvajamo hipolimnijsko vodo prekomerno nasičeno s hranili in z velikim pomanjkanjem kisika, s tem pa se dopustna obremenitev veča. Je pa jasno tudi to, da so dopustne obremenitve z večanjem “S – generacija fosforja zaradi anaerobnih razmer na dnu jezera” vedno manjše, saj je tako še več fosforja prisotnega v že tako obremenjenem jezuru.



Grafikon 1: Dopustna obremenitev za $S=0$ pri iztoku iz površine ali preko natege.

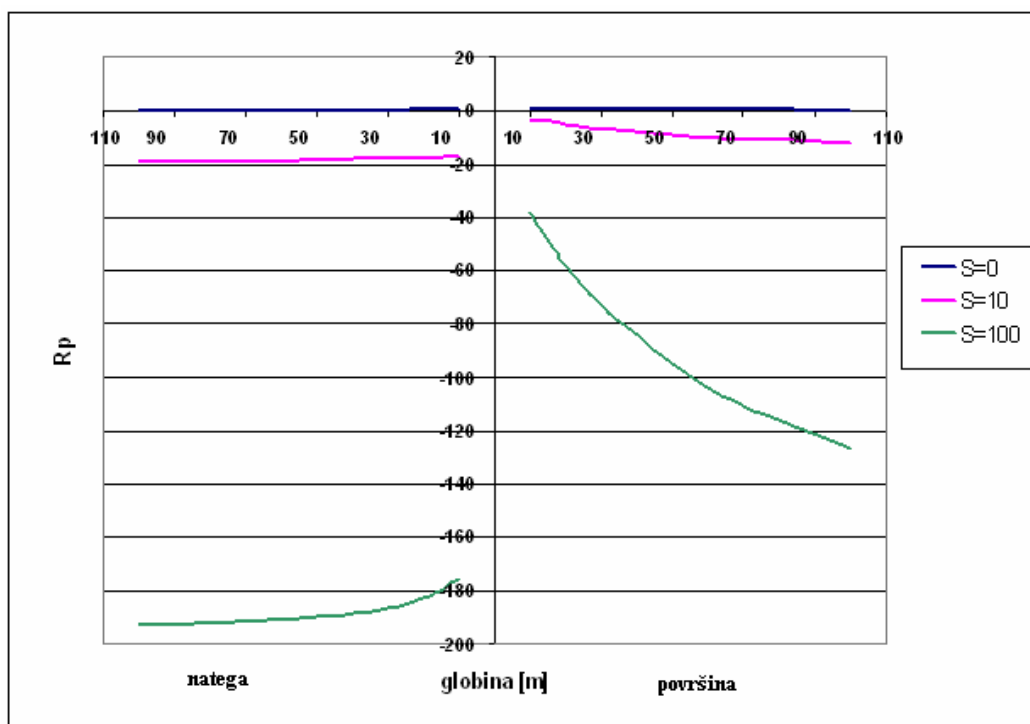
Grafikon 2 prikazuje, kako pada poraba kisika v jezeru z večanjem globine jezera. Na podlagi tega grafikona ugotovim, da globlja jezera porabijo manj kisika na račun razgradnje organskih snovi pri enaki obremenitvi. Poraba kisika pri hipolimnijskem odtoku vode je vedno manjša kot poraba kisika pri površinskem odtoku iz jezera.



Grafikon 2: Padec porabe kisika v hipolimniju.

Prav pri računih padcev kisika v hipolimniju pa Imbodnov model odpove. Izračuna nerealne vrednosti kisika v hipolimniju. Še realna vrednost padca kisika v hipolimniju je do 10 mg/l, kar je več dejansko ni možno.

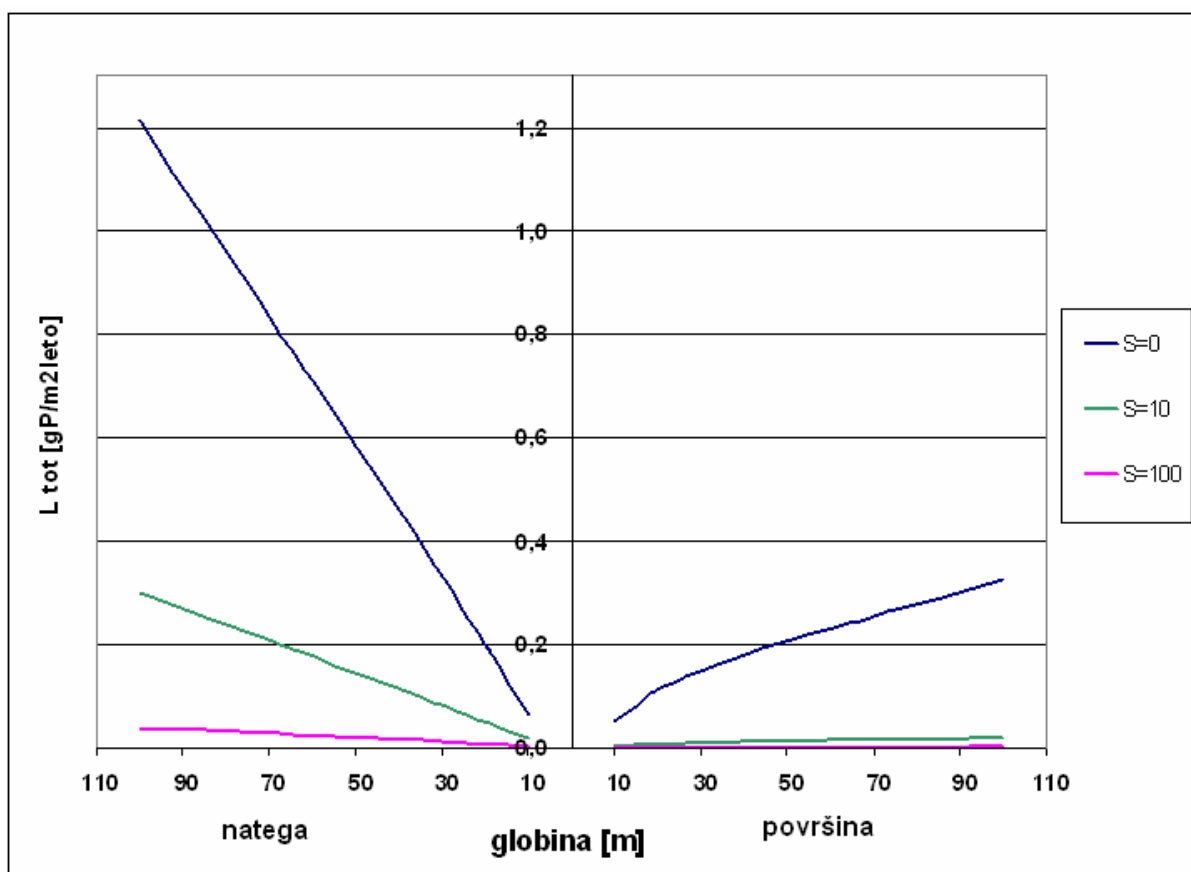
Kolikšen je delež zadržanega fosforja v usedlini pri različno globokih jezerih vidimo na grafikonu 3 (vrednosti so v [%]). Ker je vrednosti iz grafa težko točno določiti, priporočam ogled Priloge B. Negativne vrednosti R_p pomenijo, da je večji odtok fosforja iz jezera kot pa pritok. In ravno zato se manjše vrednosti pojavijo pri izpustu preko natege, saj ko preko natege odvajamo hipolimnijsko vodo je le-ta bogato nasičena s fosforjem, ki se je sprostil iz sedimentov in ga tako veliko odteče. Mogoče bi pričakovali, da bo delež zadržanega fosforja v usedlini pri iztoku iz površine manjši kot je dejansko izračunan, a pri tem ne gre pozabiti, da je v modelu upoštevan koeficient izmenjave med epi- in hipo-limnijem, kar pa pomeni, da se z mešanjem vode veliko sproščenega fosforja iz sedimenta dviga, in ga površinski odtok lahko zajame.



Grafikon 3: Delež zadržanega fosforja v usedlini.

Opaziti je torej, da je bil v letu 2000 večji odtok fosforja iz jezera kot pa pritok. To pa je zelo ugodno za samo sanacijo jezera oziroma za zmanjšanje evtrofikacijskih pojavov.

Spodnji grafikon 4 kaže, kako so z večanjem »S« vedno večje tudi razlike med dopustno obremenitvijo pri iztoku iz natege ali s površine. Kar pa pomeni, da ima parameter »S« pri izračunu dopustnih obremenitev velik pomen in ga ne gre zanemariti. Z večanjem »S« pa je manjša dopustna obremenitev, kar je jasno, saj večji »S« pomeni večjo izmenjavo fosforja iz sedimentov v vodo, s čimer je tako še dodatno povečana vrednost hranil v vodi.



Grafikon 4: Primerjava dopustne obremenitve glede na vrednost "S" in glede na izpust preko natege ali površine.

Pomembna ugotovitev je tudi ta, da večji kot je parameter "S", toliko večje so dopustne obremenitve pri odvodu vode preko natege. Tega se sicer iz grafikonov ne vidi, se pa to razbere iz preglednic priloge B. Če izračunam razmerje med dopustno obremenitvijo iztoka preko natege z iztokom iz površine za S=0, 10, 100, dobim vedno večje vrednosti tega razmerja v prid iztoku preko natege (preglednice 6). To pa pomeni, da kolikor večji je "S",

toliko večje so dopustne obremenitve v primeru iztoka preko natege kot pa v primeru iztoka iz površine.

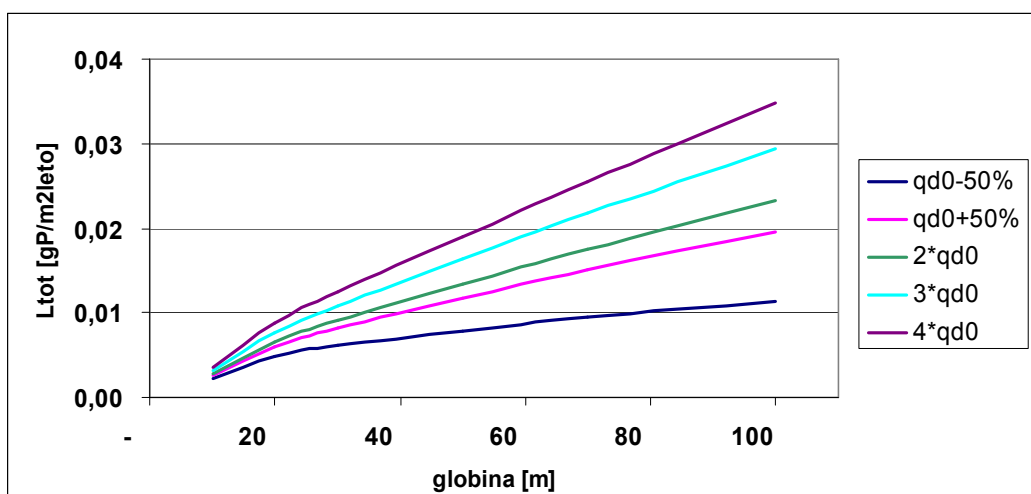
Preglednica 9: Primerjava učinkovitosti odvoda vode preko natege z odvodom iz površine pri spremenljivem parametru "S".

S=0	z=100	Ltot	razmerje 3,74
	površina	0,3239	
	natega	1,2113	
S=10	z=100	Ltot	razmerje 19,11
	površina	0,0157	
	natega	0,3001	
S=100	z=100	Ltot	razmerje 24,13
	površina	0,0016	
	natega	0,0386	

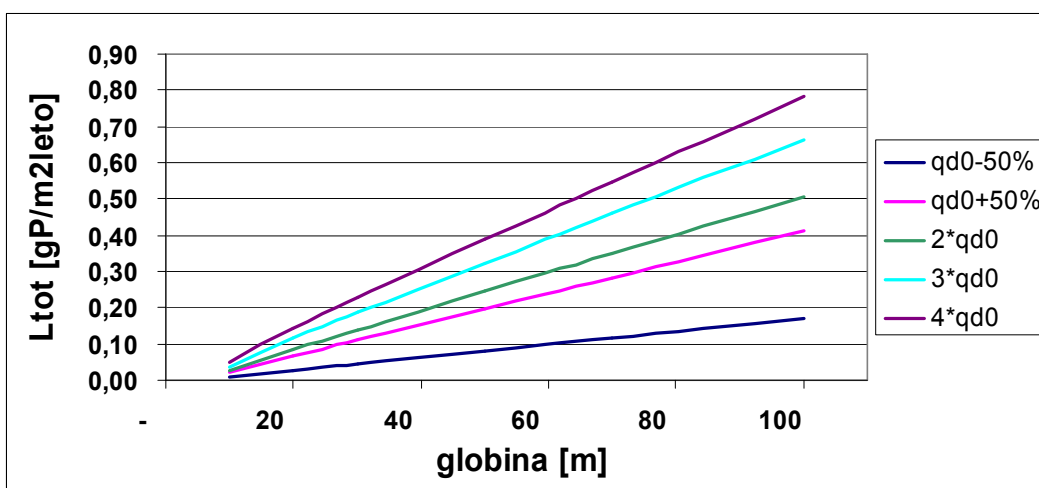
II. – qd se spreminja

V drugem sklopu izračunov sem pri izračunih spreminjala poleg morfologije jezera tudi dotok vode v jezero pri $S = 10$. Kakšno bo dogajanje v jezeru ob spreminjanju "S" lahko sklepam na podlagi rezultatov iz prejšnjega poglavja.

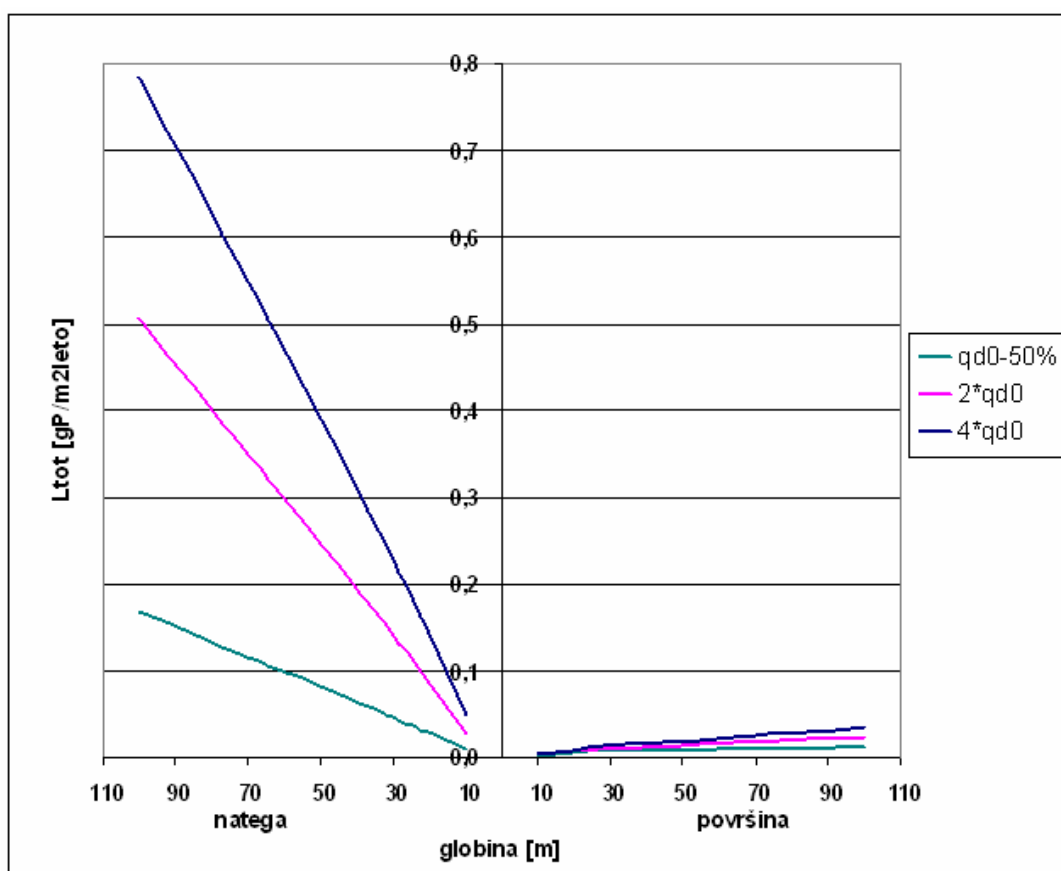
Dopustna obremenitev se z večanjem dotoka vode večja, saj se s tem večja pretočnost jezera. Bistvena razlika pa je tudi v primerjavi iztokov preko natege ali iz površine. Veliko manjše so dopustne obremenitve pri iztoku iz površine (grafikoni 5, 6 in 7).



Grafikon 5: Dopustna obremenitev pri $S=10$ in iztoku iz površine, pri čemer je $qd_0 = 47880$ m^3/dan .



Grafikon 6: Dopustna obremenitev pri $S=10$ in iztoku preko natege, pri čemer je $qd_0=47880$ m^3/dan .

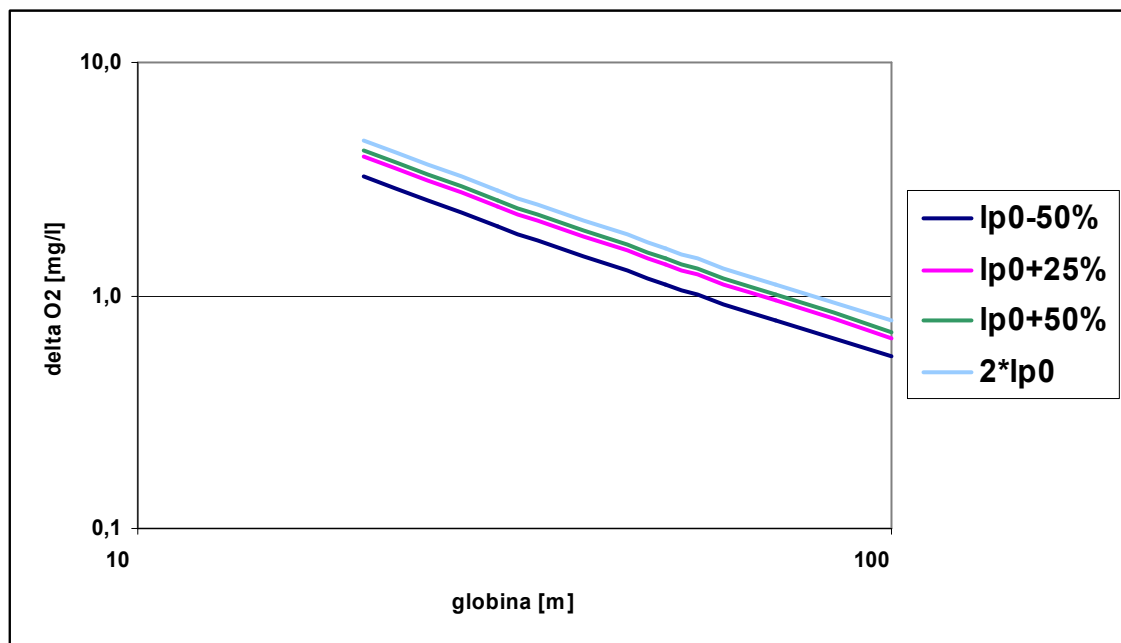


Grafikon 7: Primerjava dopustne obremenitve glede na iztok ter glede na količino dotoka pri $S=10$.

Na grafikonu 7 se zopet potrди dejstvo, da se z večjim dotokom vode večja tudi dopustna obremenitev jezera, ter tudi dejstvo, da so dopustne obremenitve veliko manjše pri površinskem iztoku iz jezera.

III. – l_p, l_n se spreminjata

Odziv jezera na spreminjanje zunanje obremenitve nazorno prikazuje grafikon 8. Povečanje zunanje obremenitve se odraža na porabi kisika, ki je večja pri večji zunanji obremenitvi. Večja kot je globina jezera, manjša je poraba kisika, pri enaki obremenitvi. Če pa zunanjo obremenitev povečujem se s tem poveča tudi poraba kisika.



Grafikon 8: Padeč porabe kisika v hipolimniju pri iztoku iz natege

Kako bi se jezero odzivalo na povečan dotok hranil pri površinskemu iztoku iz jezera ne morem prikazati v obliki grafikonov, saj model izračuna previsoke, nerealne vrednosti za vrednost kisika v hipolimniju. Še realna, zgornja vrednost padca kisika v hipolimniju je do 10 mg/l, kar je več v naravi ni možno.

6 ZAKLJUČEK

Rezultati modela ustrezajo že znanim osnovnim zakonitostim procesov v evtrofnem jezeru. Pri analizi dobljenih rezultatov iz Imbodenovega modela lahko ugotovim naslednje:

- Z večanjem globine jezera se večja dopustna obremenitev jezera.
- Večji dotok vode v jezero in s tem večji pretok jezera zmanjšujeta nevarnost povečane eutrofikacije oziroma dovoljujeta večje obremenitve.
- Iztok vode iz dna jezera je učinkovitejši od površinskega iztoka iz jezera, saj tako odvedemo hipolimnijsko vodo, ki je bogata s hranili in je dostikrat pri dnu tudi brez kisika.
- Prednost odvoda hipolimnijske vode je še izrazitejša pri manjšem dotoku vode v jezero in pri večji generaciji fosforja iz usedlin jezera.
- Z večanjem parametra S (sproščanje vode iz sedimenta) se dopustne obremenitve manjšajo.
- Globlja jezera porabijo manj kisika kot plitvejša jezera pri enaki zunanji obremenitvi, še manjša pa je poraba kisika v primeru iztoka preko natege.
- Kolikor večja je generacija fosforja iz usedlin v sedimentu, toliko bolj učinkovit je odvod vode z dna jezera v primerjavi s površinskim odtokom.
- Zaradi negativnih vrednosti R_p (delež zadržanega fosforja v usedlini jezera), ki pomenijo, da je večji odtok fosforja iz jezera kot pritok, gre sklepati, da bo splakovanje preko natege hitreje prispevalo k zmanjšanju hranil v pridnenih slojih jezera in s tem k hitrejši sanaciji jezera.
- Manjše vrednosti R_p se pojavljajo pri iztoku preko natege.
- Povečanje zunanje obremenitve se odraža na porabi kisika, ki je večja pri večji zunanji obremenitvi. Ob povečevanju zunanje obremenitve se s tem poveča tudi poraba kisika.

Tekom uporabe Imbodenovega modela sem ugotovila, da bi bilo potrebno model deloma dopolniti. Omejiti bi bilo potrebno zgornjo še dopustno vrednost padca koncentracije kisika na 10 mg/l.

Glede na vse izračune lahko sklepam, da je obravnavani model dober za napoved dopustnih obremenitev za različna jezera, kot tudi za napoved dogajanja v jezeru ob povečanem dotoku hranil.

7 VIRI

Tarman, K. 1992. Osnove ekologije in ekologija živali. Ljubljana, Državna založba Slovenije: str. 26-29, 336-507.

Eutrophication of Waters (OECD).

<http://lakes.chebucto.org/TPMODELS/OECD/oecd.html#preamble>

Krajnc, U. 1994. Evtrofikacija voda v luči varstva in gospodarjenja z vodnim bogastvom Slovenije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 2.1.–3.1., 3.15.–3.25., 5.6.-5.12.

Remec – Rekar, Š. 1995. Življenska strategija in absorpcija fosforja pri nekaterih fitoplanktonskih vrstah Bljeskega jezera. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 16 str.

Sedej, A. 2003. Napoved kvalitativnih sprememb v akumulacijah hidroelektrarn na spodnji Savi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Atlas Slovenije, 1986. Mladinska knjiga in geodetski zavod SR Slovenije: 81.

Remec – Rekar, Š. 2004. Vode Blejskega kota. Zbornik. Bled 1000 let. Radovljica, Didakta: 47-56 str.

Monitoring kakovosti jezer v letu 2000. Poročilo. 2001, Ljubljana, Agencija Republike Slovenije za okolje.

http://www.arso.gov.si/podrocje/vode/poročila_in_publikacije/por_internet_00vse.pdf
(12.01.2006)

ARSO 2003. Monitoring kakovosti jezer v letu 2001. Poročilo. Ljubljana, Agencija republike Slovenije za okolje.

http://www.arso.gov.si/podrocje/vode/poročila_in_publikacije/POR_internet_01vse.pdf
(12.01.2006)

ARSO 2003. Monitoringa kakovosti jezer v letu 2002. Poročilo. Ljubljana, Agencija republike Slovenije za okolje.

http://www.arso.gov.si/podrocje/vode/poročila_in_publikacije/jezera_2002.pdf
(12.01.2006)

ARSO 2004. Monitoring kakovosti jezer v letu 2003. Poročilo. Ljubljana, Agencija republike Slovenije za okolje.

http://www.arso.gov.si/podrocje/vode/porocila_in_publicacije/jezera_2003.pdf
(12.01.2006)

Remec – Rekar, Š., Bat, M. 2005. Jezera.

http://www.arso.gov.si/podrocja/vode/porocila_in_publicacije/Vodno_bogastvo_3jezera.pdf
f. (20.09.2005).

Sketelj, J., Rejic, M. 1958/1959. Preliminarno poročilo o preiskavi Blejskega jezera. Gradbeni vestnik, Ljubljana 1958/1959 (št.61-64): 41-59 str.

Rismal, M., 2005. Sanacija Blejskega jezera. Gradbeni vestnik 54: 13-24.

Rismal, M. 1980. Presoja posameznih metod za sanacijo Blejskega jezera. Gradbeni vestnik, Ljubljana 1980 (29) 2-3: 34-46.

Rismal, M. 1981. The problems and the ways of restoration of the lake of Bled. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 1-22.

Tarman, K. 1997. Biologija 6 Ekologija. Ljubljana, Državna založba Slovenije: str. 102-105.

Toman, M. J. 2001. Osnove ekologije celinskih voda. Skripta pri predmetu Osnove vodne mikrobiologije, drugi letnik študija Vodarstva in komunalnega inženirstva. Ljubljana 2001.

Cvikl, M. 1992. Dinamični limnološki model Blejskega jezera. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Kim LH, Choi E., Stenstrom MK. 2006. Sediments characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments.

http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&list_uids=12656229&dopt=Abstract (7.2.2006)

PRILOGA A: VHODNA DATOTEKA V MATLAB-u

```
%podatki o jezeru
v=100660000;
a=1438000;
z=70;
ze=6;
zh=64;
%zunanjji parametri
qd=47088; %dnevni dotok m3/dan
qs= qd/a %hidravlicna obremenitev površine jezera
lp=0.51; % obremenitev s fosforjem 0.3 gP/m2 leto, oz. 0.85 mg/m2 dan
ln=32,39; %obremenitev z dušikom 6.16 gN/m2 leto, oz. 16.88 mg/m2 dan
%notranji parametri
alfa= 1; %fotosinteza 1/dan
g= 0.2; %usedanje m/dan
rh = 0.02; % mineralizacija v hipolimniju 1/dan
re = 3*rh; % mineralizacija v epilimniju 1/dan
ksi = 0.001; % izmenjava med epi in hipo 1/dan
epsilon= zh/ze;

s= 100;% sproščanje iz sedimenta %mgP/m2 dan

A= [-(qs/ze+ksi+alfa) ksi re 0; (ksi/epsilon) -(ksi/epsilon) 0 rh; alfa 0 -(qs/ze+ksi+re+g/ze)
ksi;0 0 (ksi/epsilon+g/zh) -(ksi/epsilon+g/zh+rh)] % površinski odtok (iz epilimnija)
%A= [-(qs/ze+ksi+alfa) ksi re 0; (qs/zh+ksi/epsilon) -(qs/zh+ksi/epsilon) 0 rh; alfa 0 -
(qs/ze+ksi+re+g/ze) ksi;0 0 (qs/zh+ksi/epsilon+g/zh) -(qs/zh+ksi/epsilon+g/zh+rh)] %odtok
preko natege

b=[-lp/ze; -s/zh; 0; 0]

x = A\b
lambda_e=x(1)
lambda_h=x(2)
pi_e=x(3)
pi_h=x(4)

f=pi_e/lp
delta_o2_max= 1 %mg/l
Tst=180 %cas stagnacije [dni]
parametri=(g/zh+qs/zh+ksi/epsilon)*(g/zh+rh)/(qs/zh+ksi/epsilon+g/zh+rh)
delta_o2 = 140*Tst*f*lp*parametri %mg/m3
lt_max=delta_o2_max/(140*Tst*f*parametri)*365 %v [gP/m2 leto]
Rp=1-qs*(lambda_e+pi_e)/lp %delež akumuliranega fosforja v sedimentu [%dovedenega
fosforja v hipolimniju], če je površinski odtok
%Rp=1-qs*(lambda_h+pi_h)/lp %delež akumuliranega fosforja v sedimentu, če je odtok iz
hipolimnija%
```

PRILOGA C: PRIMER IZHODNE DATOTEKE MATLABA

qs =
0.0327

ln =
32

A =
-1.0065 0.0010 0.0600 0
0.0015 -0.0015 0 0.0200
1.0000 0 -0.0998 0.0010
0 0 0.0515 -0.0715

b =
-0.0850
0
0
0

x =
0.2806
27.4843
2.8326
2.0403

lambda_e =
0.2806

lambda_h =
27.4843

pi_e =
2.8326

pi_h =
2.0403

f =
5.5542

delta_o2_max =
1

Tst =
180

parametri =
0.0524

delta_o2 =
3.7426e+003

lt_max =
0.0497

Rp =
0.8001