

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

DIPLOMSKO DELO

**UPORABA EKSPERIMENTALNIH ORODIJ VERNIER PRI
DOLOČANJU PRIMARNE PRODUKTIVNOSTI VODNIH
TELES**

ANŽE ZUPANČIČ

VELENJE, 2023

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

DIPLOMSKO DELO

**UPORABA EKSPERIMENTALNIH ORODIJ VERNIER PRI
DOLOČANJU PRIMARNE PRODUKTIVNOSTI VODNIH
TELES**

ANŽE ZUPANČIČ

Varstvo okolja in ekotehnologije

Mentorica: viš. pred. dr. Anja Bubik

VELENJE, 2023

Na podlagi Diplomskega reda izdajam naslednji

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

Študent Fakultete za varstvo okolja **Anže Zupančič** lahko izdela diplomsko delo z naslovom v slovenskem jeziku:

Uporaba eksperimentalnih orodij Vernier pri določanju primarne produktivnosti vodnih teles

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:

Determining the primary productivity of water bodies using Vernier experimental tools

Mentorica: **viš. pred. dr. Anja Bubik**

Diplomsko delo mora biti izdelano v skladu z Diplomskim redom FVO.

Pouk o pravnem sredstvu: zoper ta sklep je dovoljena pritožba na Senat FVO v roku 8 delovnih dni od prejema sklepa.



Prof. dr. Boštjan Pokorny
dekan

Fakulteta za varstvo okolja
Trg mladosti 7 | 3320 Velenje
t: 03 898 64 10 | e: info@fvo.si
www.fvo.si



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Anže Zupančič, vpisna številka 34190062, študent visokošolskega strokovnega programa Varstvo okolja in ekotehnologije, sem avtor diplomskega dela z naslovom Uporaba eksperimentalnih orodij Vernier pri določanju primarne produktivnosti vodnih teles, ki sem ga izdelal pod mentorstvom viš. pred. dr. Anje Bubik.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo moje avtorsko delo, torej rezultat mojega lastnega raziskovalnega dela;
- oddano delo ni bilo predloženo za pridobitev drugih strokovnih nazivov v Sloveniji ali tujini;
- so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženem delu, navedena oz. citirana v skladu z navodili FVO;
- so vsa dela in mnenja drugih avtorjev navedena v seznamu virov, ki je sestavni element predloženega dela in je zapisan v skladu z navodili FVO;
- se zavedam, da je plagiatorstvo kaznivo dejanje;
- se zavedam posledic, ki jih dokazano plagiatorstvo lahko predstavlja za predloženo delo in moj status na FVO;
- je diplomsko delo jezikovno korektno in da ga je lektorirala Mojca Zupančič, univ. dipl. filozofije in sociologije kulture;
- dovoljujem objavo diplomskega dela v elektronski obliki na spletni strani FVO;
- sta tiskana in elektronska verzija oddanega dela identični

Datum: _____

Podpis avtorja: _____

ZAHVALA

Za vso podporo, potrpežljivost, usmeritve, odzivnost in strokovno pomoč pri pisanju diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorici viš. pred. dr. Anji Bubik.

Prav tako se zahvaljujem svoji družini za vso izkazano podporo in neomajno zaupanje.

IZVLEČEK

V diplomskem delu smo preučevali primarno produktivnost vodnih teles. V teoretičnem delu smo obravnavali pomembnosti kisika, fotosinteze in opredelili lastnosti vodnih teles. V ospredje smo postavili proces fotosinteze, ki predstavlja osnovo primarne produktivnosti, primarna produktivnost pa je osnova prehranjevalnih spleto in ekosistemov na Zemlji.

Praktični del diplomskega dela je obsegal terenske in laboratorijske meritve naslednjih vodnih teles: reke Pesnice in reke Pake, Perniškega in Velenjskega jezera ter Hotinjskega ribnika v dveh temperaturnih razponih (23-27 °C, 27-35 °C). Terenski del je zajemal vzorčenje in določanje fizikalno-kemijskih parametrov (pH, temperatura, električna prevodnost in koncentracija raztopljenega kisika), ki so služili za nadaljnjo analizo. Najpomembnejši parameter za našo raziskavo je bil raztopljeni kisik, s katerim smo ocenjevali primarno produktivnost posameznega vodnega telesa. V laboratoriju smo vzorce izpostavili dvema različnima svetlobnima viroma (sončni svetlobi in UV-luči) ter dostopnost posameznega vira omejili z uporabo mrežic z različnimi stopnjami prosojnosti - metoda »svetla/temna steklenica«. Po 24 urah smo v vzorcih izmerili koncentracijo kisika, izračunali stopnjo respiracije ter neto in bruto primarno produktivnost vzorca.

Rezultati diplomskega dela so pokazali, da je uporabljena metoda spremljanja primarne produktivnosti, to je metoda »svetla/temna steklenica« proizvajalca Vernier, primerna za ugotavljanje produktivnosti v jezerih ter uporabna za eksperimentalno izobraževanje študentov. Uporaba izbrane UV-luči se je izkazala kot manj učinkovita v primerjavi z naravnim dnevnim ciklusom svetlobe.

Rezultati so prav tako pokazali, da je največja primarna produktivnost v dveh evtrofnih telesih: Perniško jezero in Hotinjski ribnik. Razlike v primarni produktivnosti smo opazili tudi med izbranimi temperaturnima razponoma in je bila načeloma večja prvi višjih, za fotosintetske organizme ugodnejših temperaturah.

Ključne besede: primarna produktivnost, raztopljeni kisik, fotosinteza, površinske vode

ABSTRACT

In the thesis, we investigated the primary productivity of aquatic bodies. In the theoretical part, we addressed the significance of oxygen, photosynthesis, and defined the characteristics of water bodies. We highlighted the process of photosynthesis, which forms the basis of primary productivity, and primary productivity serves as the foundation for food webs and ecosystems on Earth.

The practical part of the thesis included field and laboratory measurements of the following aquatic bodies: the Pesnica and Paka rivers, the Perniško and Velenjsko lakes, and the Hotinja pond, at two temperature ranges (23-27°C, 27-35°C). The fieldwork involved sampling and determining physicochemical parameters (pH, temperature, electrical conductivity, and dissolved oxygen concentration) for further analysis. The most important parameter for our research was dissolved oxygen, which we used to assess the primary productivity of each water body. In the laboratory, we exposed samples to two different light sources (natural sunlight and UV light) and restricted access to each source using grids with varying levels of transparency – the "light/dark bottle" method. After 24 hours, we measured the oxygen concentration in the samples, calculated the rate of respiration, net, and gross primary productivity of the sample.

The results of the thesis demonstrated that the employed method for monitoring primary productivity, the "light/dark bottle" method by Vernier, is suitable for determining productivity in lakes and is useful for experimental student education. The use of the selected UV light proved to be less effective compared to the natural daily light cycle.

The results also showed that the highest primary productivity occurs in two eutrophic bodies of water: Lake Pernica and the Hotinja Pond. Differences in primary productivity were also observed between the selected temperature ranges, with generally higher productivity at the first higher temperatures, which are more favorable for photosynthetic organisms.

Keywords: primary productivity, dissolved oxygen, photosynthesis, freshwater systems

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	OPREDELITEV PROBLEMATIKE	1
1.2	NAMEN IN CILJI	1
1.3	ZASTAVLJENI HIPOTEZI	2
2	PRIMARNA PRODUKCIJA V VODNIH TELESIH	3
2.1	KROŽENJE KISIKA	3
2.2	KROŽENJE VODE	4
2.2.1	Lastnosti in molekularna struktura vode	5
2.3	CELINSKI VODNI EKOSISTEMI	5
2.3.1	Kisik v vodi	6
2.3.2	Fizikalne razmere v jezerih	7
2.3.3	Temperaturne razmere in koncentracija plinov	7
2.3.4	Kroženje snovi v jezerih	8
2.4	PRETOK ENERGIJE IN TERMODINAMIKA	9
2.5	FOTOSINTEZA	9
2.6	PRIMARNA PRODUKTIVNOST	11
2.7	METODE MERJENJA PRIMARNE PRODUKTIVNOSTI	11
2.7.1	Metoda »svetla/temna steklenica«	12
2.7.2	¹⁴ C metoda	12
2.8	FAKTORJI, KI VPLIVAJO NA PRIMARNO PRODUKTIVNOST	13
2.9	ANTROPOGENI VPLIVI NA PRIMARNO PRODUKCIJO	13
3	MATERIALI IN METODE	15
3.1	TERENSKO DELO	15
3.1.1	Vzorčna mesta	15
3.2	DOLOČITEV PRIMARNE PRODUKCIJE VODNIH TELES	18
3.3	DOLOČANJE FIZIKALNO-KEMIJSKIH PARAMETROV VZORCA	21
3.3.1	Temperatura vode	21
3.3.2	Koncentracija raztopljenega kisika (DO)	21
3.3.3	pH vode	22
3.3.4	Električna prevodnost	22
3.3.5	Spektrofotometrična določitev nitratov in fosfatov	23
3.3.6	BPK5 (Biokemijska potreba po kisiku)	26
3.4	SISTEM VERNIER IN ORODJE LABQUEST	26
3.5	SNOVANJE LABORATORIJSKE IN TERENSKE VAJE	27
4	REZULTATI Z DISKUSIJO	28
4.1	PRIMARNA PRODUKTIVNOST VODNIH TELES	28

4.1.1	Preliminarni eksperiment	28
4.1.2	Temperaturni razpon 22-27 ⁰ C	30
4.1.3	Temperaturni razpon 27-35 ⁰ C	34
4.2	FIZIKALNO-KEMIJSKE LASTNOSTI VODE.....	39
5	SKLEPI	42
6	POVZETEK	45
7	VIRI IN LITERATURA	47
8	PRILOGA	54

Kazalo slik:

Slika 1: Koncentracija atmosferskega kisika skozi evolucijo življenja (vir: Olson, 2012). ...	3
Slika 2:kemijska struktura klorofila	10
Slika 3: Perniško jezero – vzorčno mesto (vir: MapHub)	16
Slika 4: Hotinjski ribnik – vzorčno mesto (vir: MapHub).....	16
Slika 5: Velenjsko jezero – vzorčno mesto (vir: MapHub).....	17
Slika 6: Reka Pesnica - vzorčno mesto	17
Slika 7: Reka Paka - vzorčno mesto (vir: MapHub)	18
Slika 8: Postavitev seta vzorcev pod lučko (vir: lasten)	20
Slika 9: Postavitev seta vzorcev na okensko polico (vir: lasten)	20
Slika 10: Senzor za merjenje raztopljenega kisika DO (desno) in senzor za merjenje pH vrednosti (levo) (vir: lasten).....	22
Slika 11: Senzor za merjenje električne prevodnosti vode (vir: lasten)	23
Slika 12: Priprava vzorcev za kivetni test nitratov in fosfatov (filtrirani, nefiltrirani) (vir: lasten)	24
Slika 13: Kivetni test za nitrate LCK339 v vodnem vzorcu (vir: lasten)	24
Slika 14: Kivetni test za fosfate LCK349 v vodnem vzorcu (vir: lasten)	25
Slika 15: Spektrofotometer Hach Lange DR 3900 (vir: lasten)	25
Slika 16: Meritve BPK v nadzorovanem okolju po navodilih (vir: lasten).....	26
Slika 17: Vernier – orodje LabQuest 3, ki smo ga uporabljali za meritve (vir: lasten).....	27
Slika 18: Koncentracija raztopljenega kisika v Hotinjskem ribniku v prvem eksperimentalnem setu meritev pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi	32
Slika 19: Koncentracija raztopljenega kisika v Perniškem jezeru v prvem eksperimentalnem setu meritev pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi	33
Slika 20: Koncentracija raztopljenega kisika v Hotinjskem ribniku v drugem eksperimentalnem setu meritev pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi	36
Slika 21: Koncentracija raztopljenega kisika v Perniškem jezeru v drugem eksperimentalnem setu meritev pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi	37

Slika 22: Neto primarna produkcija v Perniškem jezeru v drugem temperaturnem razponu v odvisnosti od jakosti svetlobe	39
Slika 23: Primer terenskega lista	56
Slika 24: Primer laboratorijskega lista	58

Kazalo preglednic:

Preglednica 1: Nekaterne razlike med oligotrofnimi in evtrofnimi jezери (povzeto po Winfried in Ulrich, 2008)	6
Preglednica 2: Koncentracije kisika v preliminarnem eksperimentu	29
Preglednica 3: Koncentracije kisika v prvem eksperimentalnem sklopu pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi	31
Preglednica 4: Rezultati stopnje respiracije, NPP in BPP v prvem eksperimentalnem sklopu	34
Preglednica 5: Koncentracije kisika v drugem eksperimentalnem sklopu pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi	35
Preglednica 6: Rezultati stopnje respiracije, NPP in BPP v drugem eksperimentalnem sklopu	38
Preglednica 7: Fizikalno-kemijske lastnosti vzorcev v prvem temperaturnem razponu 22-27 ⁰ C	40
Preglednica 8: Fizikalno-kemijski parametri vzorcev v drugem temperaturnem razponu 27-35 ⁰ C	41
Preglednica 9: BPK5 vrednosti v vseh vzorcih	41
Preglednica 10: Rezultati vrednosti BPP, NPP in stopnje respiracije v obeh temperaturnih razponih	43

1 UVOD

1.1 Opredelitev problematike

Zemlja je edini planet, za katerega vemo, da podpira visoko stopnjo biološke raznovrstnosti in omogoča razvoj naprednih organizmov. Kisik (O_2) je najpogostejši element v Zemljini skorji in drugi najpogostejši element v Zemljini atmosferi. V geološki zgodovini je evolucija atmosferskega nivoja O_2 tesno povezana z nastankom in razširitvijo kompleksnega življenja (Huey in Ward, 2005; Berner in sod., 2007) in je priznana kot glavni gonilnik evolucije živalskega življenja (Nursall, 1959; Reinhard in sod., 2016). V trenutnem zemeljskem sistemu skoraj vse življenje temelji na primarnih proizvajalcih, odgovornih za proizvodnjo in vzdrževanje vsebnosti O_2 v Zemljini atmosferi. Tako je s kisikom bogata atmosfera postala nujna za preživetje velike večine živih organizmov na Zemlji (Huang in sod., 2021).

Proces fotosinteze predstavlja osnovo primarne produktivnosti, primarna produktivnost pa je osnova prehranjevalnih spletov in ekosistemov na Zemlji, zato je razumevanje stopenj, trendov in gonil primarne proizvodnje avtotrofnih organizmov temeljni cilj ekologije (Smale in sod., 2020). Za proces primarne produkcije so potrebni avtotrofni organizmi, ki s pomočjo sočne svetlobe akumulirajo energetske bogato tkivo z asimilacijo ogljika. Gre za rastline in določene vrste bakterij.

V sladkovodnih telesih obstajata dve veliki vrsti primarnih producentov. Prvo vrsto tvorijo alge in druge preproste mikroskopske rastline, ki prosto lebdi v vodi (fitoplankton). Druga vrsta (fitobentos) so vsi organizmi, pritrjeni na substrat, med njimi tudi večje vodne rastline (makrofiti) (Dickinson in Murphy, 2007).

Spremljanje primarne produktivnosti v vodnih okoljih je ključno iz več razlogov. Pomembno je, ker nam omogoča razumevanje raznolikosti in obilja življenja v ekosistemih. Višja produktivnost ponavadi pomeni večjo biotsko raznovrstnost in obilje organizmov. Visoka ali nizka produktivnost lahko služi kot indikator okoljskih sprememb ali onesnaženja. Prekomerno povečana primarna produktivnost lahko kaže na presežek hranil, kot sta dušik in fosfor, ki pogosto izvirata iz kmetijstva in urbanih območij. To lahko privede do eutrofikacije in posledično do zmanjšane kakovosti vode.

1.2 Namen in cilji

Namen diplomskega dela je bilo spremljanje primarne produktivnosti štirih vodnih teles: reke Pake in reke Pesnice, Velenjskega in Perniškega jezera ter Hotinjskega ribnika, v izbranem obdobju pomlad-poletje, ko primarna produktivnost doseže vrhunec. Višje temperature, daljši dnevi in večja intenziteta sončnega sevanja spodbujajo fotosintezo in posledično rast fotosintetskih organizmov. Izbiro specifičnih vodnih teles lahko pojasnimo s tem, da sta reka Pesnica in Perniško jezero precej okoljsko oporečna in da je posledično tudi biološka produktivnost drugačna v primerjavi z reko Pako in Velenjskim jezerom, za katera velja, da je njuno ekološko stanje precej boljše.

Glavni cilji diplomske naloge so bili z merjenjem koncentracije raztopljenega kisika določiti in spremljati primarno produktivnost v štirih izbranih vodnih telesih, dveh z dobrim in dveh s slabim ekološkim stanjem v preteklosti.

Specifični cilji diplomske naloge pa so bili:

- z vzorčenjem vodnih teles pri dveh različnih temperaturah ozračja (22-27°C in 27-35°C) opazovati biološko primarno produktivnost vsakega od štirih izbranih vodnih teles;
- z uporabo sistema Vernier (principa »svetla/temna steklenica« in optično sondo za merjenje koncentracije raztopljenega kisika) v laboratoriju kvantitativno določiti primarno produktivnost štirih izbranih vodnih teles;
- z merjenjem osnovnih fizikalno-kemijskih parametrov (pH, T, prevodnost, vsebnost nitratov) še dodatno opredeliti lastnosti vzorčnih mest v času meritev;
- določiti bruto, neto vrednosti primarne produkcije ter stopnjo respiracije za posamezni vzorec;
- analizirati, primerjati in predstaviti rezultate; ter
- izdelati predlog terensko-eksperimentalne vaje za študente.

1.3 Zastavljeni hipotezi

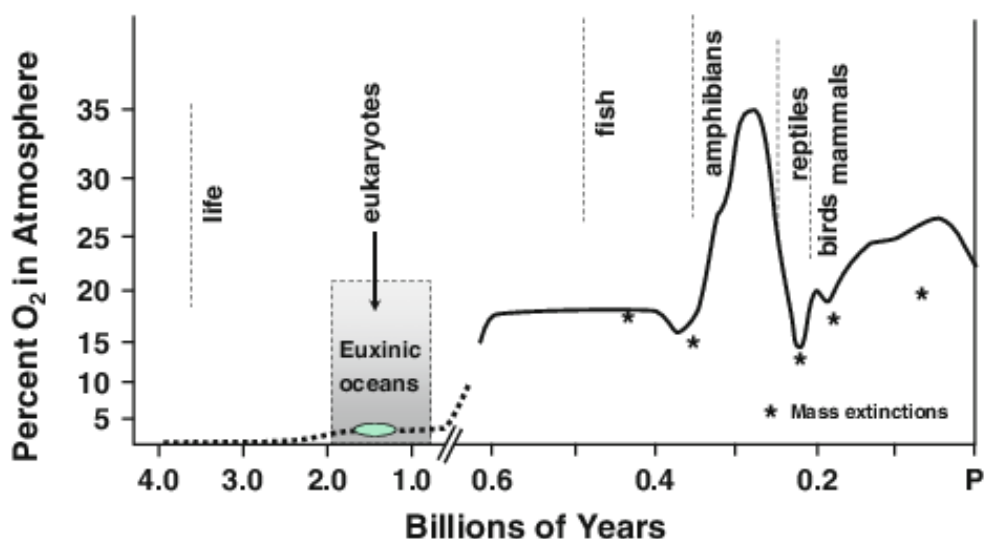
Hipoteza 1: Največjo primarno produktivnost bomo v vseh izbranih vodnih telesih izmerili v višjem temperaturnem razponu med 27-35°C.

Hipoteza 2: Primarna produktivnost v Perniškem jezeru je večja kot v Velenjskem jezeru, prav tako je večja v reki Pesnici v primerjavi z reko Pako.

2 PRIMARNA PRODUKCIJA V VODNIH TELESIH

2.1 Kroženje kisika

Kisik ima edinstveno in pomembno mesto v sestavi tako živega kot neživega sveta. Je edini element, ki je prisoten v visokih koncentracijah v skorji, atmosferi, hidrosferi in biosferi Zemlje. V geološki zgodovini je evolucija atmosferskega nivoja O_2 tesno povezana z nastankom in razširitvijo kompleksnega življenja in je znanstveno vsesplošno priznana kot glavni gonilnik evolucije živalskega življenja (Huang in sod., 2021). Molekularni kisik (O_2) je daleč najbolj reaktiven izmed razširjenih končnih oksidantov, ki se uporabljajo v biološkem metabolizmu. Ko to energetsko zmogljivost izkoristijo mitohondriji v evkariontskih celicah, se energijski tok, ki podpira določeno velikost genoma, poveča, kar lahko utira pot povečani kompleksnosti na celični ravni (Reinhard in sod., 2016).



Slika 1: Koncentracija atmosferskega kisika skozi evolucijo življenja (vir: Olson, 2012).

Zgornja slika (Slika 1) prikazuje koncentracije atmosferskega kisika med razvojem življenja na Zemlji. Raven kisika se je začela povečevati pred približno 2,5 milijardami let in je znašala približno 2 %, ko so se pojavili prvi evkarionti. Naslednjih 500 milijonov let se koncentracija atmosferskega kisika ni veliko spreminjala. Kasneje se je vrednost nekoliko povečala in koncentracija je bila le nekoliko nižja kot v trenutnem sistemu (Olson, 2012).

Večina kisika v ozračju je nastala s fotosintezo. Poleg tega pa majhna količina kisika nastane tudi z delovanjem UV-svetlobe na vodne molekule v višjih predelih atmosfere. Ta reakcija se imenuje fotodisociacija in je reakcija, v kateri kot produkt nastane tudi vodik, ki pa uhaja v vesolje (O'Neill, 1998).

UV sevanje sodeluje tudi pri pretvorbi dvoatomnega kisika v triatomno molekulo ozon O_3 . Ta reakcija se imenuje fotoliza in je še posebej pomembna zaradi sposobnosti ozona, da absorbira UV sevanje. Ta absorpcija prepreči, da bi večina visoko energijskega UV-sevanja, ki je smrtonosno za večino življenjskih oblik, dosegla Zemljo (O'Neill, 1998).

Kroženje kisika poteka skozi številne redoks reakcije (Kasting in Canfield, 2012). Ker je kisik v 6. skupini periodnega sistema, ima šest elektronov na svoji zunanji lupini. Zato si za

zagotovitev stabilnega stanja v najbolj oddaljeni lupini sposoja elektrone od kateregakoli drugega elementa ali spojine. Zaradi visoke elektronegativnosti je v primerjavi z večino drugih elementov močan in najpomembnejši oksidant. Kisik je tesno povezan z drugimi biogeokemičnimi cikli v zemeljskem sistemu in vključuje zapletene interakcije med biosfero, ozračjem, hidrosfero in litosfero (Huang in sod., 2021).

Pri povezavi med kroženjem kisika in drugimi biogeokemijskimi kroženji je prav povezava z globalnim ogljikovim kroženjem najpomembnejša, saj je ključni dejavnik zemeljskega podnebne in biotskega sistema (Huang in sod., 2021). V procesu dihanja (respiracije) živi organizmi porabljajo kisik, ki se skupaj z ogljikom sprošča v ozračje v obliki ogljikovega dioksida (CO_2). Ogljikov dioksid vstopa v kroženje ogljika ali pa ga rastline absorbirajo za fotosintezo. Pri fotosintezi se s kemično cepitvijo vode razvije kisik, ki se potem vrne v atmosfero (Martin in Hine, 2008). V procesu fotosinteze so nastale vse organske snovi na Zemlji, s tem pa je bil zagotovljen tudi vir energije za mnoge heterotrofne organizme. Hkrati se je zaradi fotosinteze spreminjala tudi sestava ozračja.

2.2 Kroženje vode

V primerjavi z drugimi planeti je Zemljin sistem edinstven v tem, da voda v njem obstaja v vseh treh agregatnih stanjih: tekočem, plinastem (vodna para) in trdnem (led). Čeprav je količina vodne pare sorazmerno majhna, se med fazno spremembo v tekočo vodo sprostito velike količine latentne toplote. Vodni krog je tesno povezan z zemeljskimi biogeokemičnimi cikli, zlasti ogljika in dušika. Voda je ključ, ki drži in povezuje te medsebojno zelo tesno povezane cikle. Voda vpliva tudi na topografijo in prenaša usedline do oceanov (Oki in sod., 2004).

Litosfera, oceani in atmosfera tvorijo največje rezervoarje vode na Zemlji. Glavna povezava med temi rezervoarji je hidrološki cikel, ki zagotavlja pitno vodo za ljudi in živali, omogoča funkcionalnost celinskega ekosistema, nadzoruje vremenske vplive in zagotavlja transport usedlin. Prav tako je hidrološki cikel soodgovoren za temperaturno ravnovesje na planetu. Gonilna sila vodnega kroga je sončno sevanje, ki k izparevanju vode v povprečju prispeva 10^{24} J/leto (Seiler in Gat, 2007).

Celotna prostornina vode na Zemljini površini ali blizu nje je ocenjena na približno $1,4 \times 10^{18}$ m³, kar ustreza masi $1,4 \times 10^{21}$ kg. V primerjavi s skupno maso Zemlje ($5,974 \times 10^{24}$ kg) voda predstavlja le 0,02 % mase celotnega planeta, vendar je ključnega pomena za preživetje življenja na njej, zato lahko Zemljo upravičeno poimenujemo "modri planet". Približno 70% njegove površine je prekrivane s slano vodo oceanov. Čeprav je vsebnost vode v atmosferi sorazmerno majhna (približno 0,3 % mase in 0,5 % prostornine atmosfere), je približno 60% Zemlje vedno pokrito z oblaki (Oki in sod., 2004).

Hidrosfera zagotavlja drugo vitalno sestavino za življenje: vodo. Čeprav je voda precej običajna in samoumevna za naše življenje, so njene kemične lastnosti zelo nenavadne. Te kemične lastnosti so zelo pomembne tako za življenje kot za njegovo abiotsko okolje. Avtotrofni organizmi uporabljajo vodo na različne načine. Voda predstavlja osnovni pogoj za fotosintezo. Je ključnega pomena za zaužitje hranilnih elementov in za gibanje ali premeščanje materialov v rastlini. Za kopenske rastline igra voda ključno vlogo ne samo na vmesniku med tlemi in rastlinami, iz katerega se črpa celotna oskrba z vodo, temveč tudi kot edini vir rastlinskih hranil za vse, razen za majhno peščico. Nahaja se v »bazenih« ali rezervoarjih, ki so zelo različne velikosti. Med seboj so povezani s tokovi vode, kot so izhlapevanje, transpiracija, percipitacija in s kopenskim tokom. Nekateri od teh tokov vključujejo tudi spremembe agregatnega stanja. Vse povezave se napajajo s toplotno energijo, pridobljeno iz sončnega sevanja, ta sistem se imenuje hidrološki cikel. Daleč največje skladišče vode so svetovni oceani, ki vsebujejo približno 97 % celotne količine vode v hidrosferi. Vode v kopenskih okoljih je veliko manj,

razpoložljivost vode pa je pogosto najpomembnejši okoljski pogoj, ki vpliva na rast rastlin in s tem na delovanje vseh ekosistemov v kopenskih okoljih (Dickinson in Murphy, 2007). Na celini najdemo vodo v mnogih oblikah (podzemna voda, reke in jezera), vendar je kopenskim rastlinam na voljo le voda v prsti, saj velika večina teh rastlin črpa vodo skozi koreninski sistem (Dickinson in Murphy, 2007).

Vsa voda na Zemlji je med seboj povezana z globalnim kroženjem vode preko ozračja. S površin morij, rek, jezer, močvirij in mokrih tal izpareva voda v ozračje. K vsebnosti vodne pare v ozračju pomembno prispevajo tudi rastline (evopotranspiracija). Vodna para se dviguje in zaradi ohlavitve kondenzira v oblake. Oblaki oddajo vodo v obliki dežja, snega ali toče. Padavinska voda se priključi neposredno vodnim ekosistemom, če pada vanje ali pa steče vanje po potokih in rekah – v tem primeru govorimo o površinskem delu kroženju vode. Padavinska voda lahko ponika v tla in se izliva v vodne ekosisteme skozi izvire, v tem primeru pa govorimo o podzemeljskem delu kroženju vode. Celotni hidrološki cikel ima velik čistilni potencial. Izparevanje in kondenzacija vode je naraven destilacijski proces, pri katerem se voda znebi vseh raztopljenih snovi. Tako nastaja iz morske vode na celinah znova sladka voda (Smolar-Žvanut, 2015).

2.2.1 Lastnosti in molekularna struktura vode

Edinstvena molekularna struktura vode je podlaga za številne značilnosti vodnih habitatov. Atomi vodika tvorijo vezi pod kotom približno 105 stopinj, zaradi česar je molekula vode močno polarna. Ta polarnost je odgovorna za težnjo molekul vode, da se medsebojno povezujejo in raztapljajo druge snovi, ter za različne biokemične procese. Polarnost omogoča, da tvori vodikove vezi z drugimi polarnimi molekulami in ioni. Ko je snov raztopljena v vodi, polarne molekule vode obkrožijo delce topljenca in medsebojno delujejo z njimi, kar olajša njihovo ločevanje in disperzijo (Winfried in Ulrich, 2008).

Voda ima edinstvene lastnosti, ki izhajajo tudi iz razporeditve in vezave vodnih molekul. Najbolj gosta je pri 4°C. Površinska napetost čiste vode je višja kot pri kateri koli drugi tekočini (razen živega srebra), kar omogoča organizmom, vključno z algami in žuželkami, da živijo na, znotraj ali pod vodno gladino. Visoka viskoznost vode je pomembna za gibanje organizmov. Edinstveno visoke so tudi njena specifična toplota, latentna talilna toplota, toplota uparjanja in njeno vrelišče. Voda bi imela brez te povezave molekul vrelišče pri približno -80 °C; na Zemlji ne bi bilo tekoče vode, samo voda v plinskem agregatnem stanju (Winfried in Ulrich, 2008).

2.3 Celinski vodni ekosistemi

Po vsem površju Zemlje obstajajo morski (slani) in celinski vodni sistemi (sladkovodna telesa, kot so jezera, reke, izviri in potoki). Čeprav obstajajo razlike v vrstni sestavi in biotski raznovrstnosti, povezani s podnebnimi razmerami in kemijo vode znotraj posameznega vodnega telesa, obstajajo skupni funkcionalni elementi v ekologiji sladkovodnih teles, ki omogočajo splošno analizo teh ekosistemov na globalni ravni. Tako lahko celinske vode in ekosisteme obravnavamo kot biom z razširjeno, a nekontinuirano prostorsko porazdelitvijo (Dickinson in Murphy, 2007).

Celinske vode predstavljajo le 0,01 % celotne zaloge vode na Zemlji, vendar spadajo med eno izmed najbolj produktivnih območij planeta. Ta območja so znana po veliki biodiverziteti, saj nudijo habitatne pogoje mnogim rastlinskim in živalskim vrstam. Vodni ekosistemi so izhodiščna točka prehranjevalne verige in služijo tudi kot sistemi za recikliranje hranil. Celinski

vodni sistemi so prostorsko-časovno dinamični ekosistemi, ki vključujejo zelo velika jezera in reke, poplavne ravnice, šotišča, barja in močvirja, mokrišča, majhne potoke, ribnike, izvire, jamske vode in celo zelo majhne bazene vode v drevesnih luknjah in drugih votlinah v rastlinah (Gururaja in Aravind, 2006). V preglednici 1 najdemo nekatere ključne razlike med evtrofnimi in oligotrofnimi vodnimi teles.

Preglednica 1: Nekateri razlike med oligotrofnimi in evtrofnimi jezери (povzeto po Winfried in Ulrich, 2008)

	Oligotrofna jezera	Evtrofna jezera
Primarna produktivnost	Majhna ($50-300 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	Visoka ($>1000 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
Biomasa alg	Majhna ($0.02-0.1 \text{ mg C l}^{-1}$)	Velika ($> 0.3 \text{ mg C l}^{-1}$)
Hranila	Redki	Obilna količina
Razvoj cianobakterij	Odsotno	Prisotno
O ₂ primanjkljaj v hipolimniju	Majhen, $<50\%$	Velik, možnost anoksičnih pogojev
Globinski zoobentos	Raznolik, potrebuje O ₂	Slabo prisoten, lahko preživi ob nižjih koncentracijah O ₂

2.3.1 Kisik v vodi

Kisik vstopa v vodo z difuzijo iz zraka in nastaja v vodnem okolju pri fotosintezi. Kisik porabljajo organizmi z dihanjem, del pa se ga potroši tudi v neživih oksidativnih reakcijah. V primeru zelo intenzivne fotosinteze, ko prihaja do kisikove prenasičenosti v vodi, prehaja ta plin iz vode v ozračje. Ker poteka fotosinteza le ob svetlobi, dihanje pa podnevi in ponoči, obstaja dnevno-nočno nihanje kisika oz. porast kisika čez dan in upadanje ponoči. Nihanja so posebno izrazita v jezerih z močno rastlinsko zarastjo ali v jezerih, kjer se razkrajajo veliko mrtve organske snovi. Vodotopnost kisika je odvisna od temperature in atmosferskega tlaka. Z naraščanjem temperature in zniževanjem zračnega tlaka pada vodotopnost kisika in drugih v vodi raztopljenih plinov (ogljikov dioksid, dušik) (Smolar-Žvanut, 2015).

Raztopljeni kisik (DO) je eden najpomembnejših dejavnikov za vodne organizme, še posebej za tiste, ki iz vode črpajo raztopljeni kisik. Ravni DO kažejo na kakovost vode. Na koncentracijo DO lahko vpliva veliko biotskih in abiotskih dejavnikov, kot so: mešanje različnih vodnih teles, dviganje, atmosferska izmenjava, dihanje, fotosinteza, ledeni pokrov, onesnaženje in nekateri fizični dejavniki, kot so slanost in temperatura (Ali in Mishra, 2022).

Neenakomerna porazdelitev kisika je pogost pojav v vodnem okolju. Pomanjkanje kisika in celo anoksične razmere najdemo tako v globokih vodah evtrofnih jezer kot tudi v organsko onesnaženih potokih. Prenasičenost s kisikom lahko povzroči visoka stopnja fotosinteze čez dan v vodah, bogatih s hranili – tudi 200 % ali več v sončnih dneh in brezvetrnih dnevih. Seveda so težave s pomanjkanjem koncentracije kisika v vodnih telesih veliko večji problem kot prenasičenost. Z izjemo nekaj vrst specializiranih mikroorganizmov potrebujejo heterotrofni organizmi vsaj nekaj izpostavljenosti kisiku, da zagotovijo sprejemnike elektronov za dihanje. Vodni organizmi imajo veliko morfoloških, biokemičnih in vedenjskih prilagoditev za reševanje težav z omejenimi ali spremenjenimi koncentracijami kisika (Winfried in Ulrich, 2008).

2.3.2 Fizikalne razmere v jezerih

Fizikalne razmere v jezerih so odvisne od vodnih lastnosti, predvsem od spreminjanja gostote oz. specifične teže vode. Gostota vode je odvisna od temperature, zračnega tlaka in koncentracije raztopljenih snovi. Če se koncentracija soli, ki so njej raztopljene, poveča (v litru vode vsebujejo celinske vode običajno 1g raztopljenih soli), se poveča tudi gostota vode. Pomembnejše so razlike gostote, ki jih povzročajo spremembe temperature. Različne gostote vode povzročajo spremembo specifičnega volumna vode. Pri normalnih pogojih ima voda maksimalno gostoto pri 3,94⁰C, torej nad lediščem. Nad in pod to temperaturo gostota vode pada. Med 24 in 25⁰C je razlika v gostoti vode 30-krat večja kot med 4 in 5⁰C. To vodno lastnost razlagamo z nesimetrično zgradbo vodne molekule, v kateri dva pozitivno nabita vodikova atoma ne oklepata kisikovih atomov pod kotom 180⁰, ampak pod kotom 104.5⁰. Vodna molekula ima zato močan električni dipol. Močne dipolne sile vodnih molekul povzročajo tvorbo molekularnih skupkov, zaradi česar je potrebno veliko toplote za povečevanje molekularnega gibanja v vodi (Kolar in sod., 1992).

Toplota jezera je odvisna od sprejemanja, porazdelitve in oddajanja toplote, ki jo jezero pridobiva predvsem z absorpcijo sočnih žarkov z dolgo valovno dolžino. Absorbirano toploto izgublja z izsevanjem toplote, izhlapevanjem in odtekanjem površinske vode v okolje. Toploto seveda prenaša tudi v globlje vodne sloje, kar pa je možno le s premikanjem ogrete vode (slaba toplotna prevodnost vode). Sila, ki premika to vodo, je veter. Ta povzroča površinske tokove, ki se na obali uklonijo navzdol, razsežnost globinskega toka pa je odvisna od hitrosti in smeri vetra ter od temperature površinske vode. Čim večja je temperatura, tem manjša je moč strujanja. Zato se porazdelitev toplote v jezerih periodično spreminja, odvisno od letnega časa. Poleti se zaradi visokih temperatur izoblikujejo stabilni termični sloji. Zaradi anomalije gostote vode je enako tudi pozimi. V pomladanskem in jesenskem času pa začne zaradi ohlajevanja oz. segrevanja vode celotna vodna masa krožiti – letna in zimska stagnacija ter pomladanska in jesenska cirkulacija (Kolar in sod., 1992).

2.3.3 Temperaturne razmere in koncentracija plinov

Glavna plina, raztopljena v rečni vodi in jezerih, sta kisik in ogljikov dioksid. Prostorska porazdelitev v vodi raztopljenih plinov je odvisna od termičnega, z vetrom povzročene vodnega gibanja, in nekoliko manj od vodnega toka in vrtinčenja. Topnost plinov v vodi je odvisna od atmosferskega tlaka in temperature. Kisik, katerega vsebnost v vodi z naraščanjem temperature upada, preide v vodo delno iz ozračja (difuzija), delno pa je produkt fotosinteze vodnih avtotrofov. Ta kisik delno ali popolnoma porabijo organizmi pri celičnem dihanju, porablja se tudi pri razkroju organskih snovi, delno uhaja zaradi segrevanja vode v ozračje. V jezerih, kjer je intenzivna cirkulacija vode, je koncentracija kisika v celotni vodni masi dokaj

enaka. V času stagnacije pa pride v koncentraciji kisika do velikih vertikalnih koncentracijskih razlik (Kolar in sod., 1992).

Ogljikov dioksid se dobro raztaplja v vodi, saj z njo reagira in tvori ogljikovo kislino, ki s kationi tvori karbonate. Ogljikov dioksid prihaja v vodo iz ozračja, delno tudi s padavinami in podtalnico. Veliko CO₂ pride v površinske vode kot posledica živalskega metabolizma in zaradi reducirajočih bakterij. Vsebnost se zmanjšuje zaradi segrevanja vodi in zaradi fotosinteze. V spodnjih vodnih slojih se nabira CO₂, saj je tam močna aktivnost reducirajočih bakterij (Kolar in sod., 1992).

2.3.4 Kroženje snovi v jezerih

Prenos energije v ekosistemu je vedno povezan s prenosom snovi. Obstaja pa nekaj pomembnih razlik med tema dvema procesoma, med njimi je najpomembnejša ta, da snov lahko kroži v ekosistemu, medtem ko lahko energija samo teče skozenj. V nasprotju s splošnim prepričanjem o ravnovesju narave naravni ekosistemi nikakor niso popolnoma zaprti. Snov se nenehno odstranjuje iz vsakega ekosistema s fizičnimi transportnimi procesi, kot so odtok, erozija in evolucija raztopljenih plinov (Winfried in Ulrich, 2008).

Vodotopnost ogljikovega dioksida je v vodi precej velika. Raztopljen tvori ogljikovo kislino H₂CO₃, ki reagira s kalcijevimi kationi Ca²⁺, da nastanejo karbonati. V vodo vstopa ta plin z difuzijo iz zraka in se sprošča pri dihanju organizmov ter pri razkrojevanju. Troši pa se predvsem v avtotrofnih sintezah organske snovi in pri fotosintezi. CO₂ lahko izhaja iz jezera z difuzijo ali pa se veže v karbonate. Ogljikov dioksid se v vodi hidratizira v ogljikovo kislino, ki disociira v H⁺ in HCO₃⁻, pri visokim pH pa disociira ta dalje v H⁺ in CO₃⁻. Razmerje med CO₂, HCO₃⁻ in CO₃²⁻ je odvisno od vrednosti pH. V vodi, ki vsebuje mnogo CO₂, se raztaplja težko topni CaCO₃ in nastaja hidrojeni karbonat Ca(HCO₃)₂ (Smolar-Žvanut, 2015).

Kalcijev hidrojeni karbonat opravlja pomembno pufersko nalogo, saj je regulator pH vrednosti. Ko rastline porabljajo CO₂ iz vode, se dviga pH, in v vodah, ki vsebujejo malo apnenca, se ob močni fotosintezi pH dvigne tudi do 9. Če pa je v vodi dovolj apnenca, se poraba ogljikovega dioksida nadomešča s sproščanjem le-tega iz kalcijevega hidrogenega karbonata in zato pH zraste največ do 8 (Smolar-Žvanut, 2015).

Najbolj zastopana komponenta dušika v jezerih je raztopljeni elementarni dušik N₂. Vendar lahko relativno malo organizmov izkorišča dušik v tej obliki. Za fiksacijo dušika je potreben encim nitrogenaza, ki ga najdemo le pri prokariotih. Z difuzijo vstopajoči plinasti dušik vežejo posebne bakterije (Azobacter, Clostridium, Desulfovibrio in druge) ter modrozelenke alge (Aphanizomenon, Anabaena) v organske spojine (Smolar-Žvanut, 2015). Za avtotrofne organizme, ki ne proizvajajo nitrogenaze, so raztopljeni nitrat, nitrit in amonij najpomembnejše anorganske oblike dušika. Te oblike anorganskega dušika se prenašajo v jezera s površinsko vodo, podtalnico in padavinami. Vse tri dušikove spojine lahko izkoristijo avtotrofni organizmi (Winfried in Ulrich, 2008).

V nasprotju z dušikom se fosfor v ekosistemu pojavlja samo v eni obliki: PO₄ (ortofosfat). Vezan je na organske spojine z estrskimi vezmi med derivati fosforne kisline in ogljikovimi verigami (Winfried, L. in Ulrich, S., 2008). Fosfor obstaja v jezerih kot partikularni in raztopljeni fosfat. Prvi je vezan v mikrobih, algah in drugih rastlinah in živalih, organskem detritu, absorbiran na glinene delce ali na železove hidrokside. Drugi se nahaja v raztopini - bodisi v anorganski PO₄-P ali organski obliki. Anorgansko vezanega vežejo rastline v organske proizvode, ki so hrana živalim, podvodne rastline, ki koreninijo na dnu, pa sprejemajo fosfor iz sedimentov. Zaradi avtolitskih procesov, ki se začnejo takoj po smrti organizmov, je vračanje fosforja iz mrtvih teles hitro in v veliki meri opravljeno že v epilimničnem delu. Že v nekaj urah se sprostijo 50%

organsko vezanega fosforja, ki ga organizmi znova vgradijo v svoja telesa (Smolar-Žvanut, 2015).

2.4 Pretok energije in termodinamika

Na življenje lahko gledamo kot na nenehen tok energije, kjer se odvijajo kemične reakcije, potrebne za rast, vzdrževanje in razmnoževanje njegovih oblik. Vsoto vseh teh kemičnih reakcij imenujemo metabolizem. Zakoni termodinamike urejajo oz. omejujejo celotno preoblikovanje energije. Že prvi zakon termodinamike nam narekuje, da energije ni moč ustvariti ali uničiti, le pretvoriti iz ene oblike v drugo. Če poenostavimo drugi zakon, izvemo, da se ob vsaki pretvorbi energije iz ene oblike v drugo nekaj energije izgubi v obliki toplote. Torej, čeprav se skupna količina energije v zaprtem sistemu ne spremeni, količina uporabne energije upada, ko se postopoma več energije med reakcijami razgradi v toploto. Ker je na srečo biosfera v primerjavi z vesoljem odprti sistem, nenehno prejema sončno energijo, da nadoknadi izgube, ki se pojavljajo ob življenjskih procesih. Tukaj nastopi pomembna vloga procesa fotosinteze (Jones, 1997).

Vsak organizem potrebuje stalen dotok snovi in energije, da z njima uravnava presnovne izgube, rast in razmnoževanje. Avtotrofni način sprejemanja energije imajo zelene rastline, ki s procesom fotosinteze izkoriščajo sončno svetlobo, da iz anorganskih spojin izdelajo kompleksne organske snovi. Fotosintetsko delujejo tudi nekatere avtotrofne bakterije, toda ker je količina njihovih proizvodov majhna, jih v celotni proizvodnji ekosistema navadno ne upoštevamo. Avtotrofne so tudi kemosintetske bakterije. Njihov vir energije je oksidacija kemičnih spojin, kot so sulfidi, amonijak, nitriti, metan. S pridobljeno energije vežejo CO₂ v organske spojine (Smolar-Žvanut, 2015).

Sončna energija je gonilna sila za operativno delovanje skoraj vseh ekosistemov. Sončna energija je, ko vstopi v biosfero, v kateremkoli obsegu, primernem za žive organizme, neomejena v ponudbi. Približno 45 % sončne energije, ki pride na Zemljo, zagotavlja toploto v infrardečih valovnih dolžinah >700 nm. Del te energije gre za gorivo atmosferskih procesov, kot je vremenski stroj, del pa poganja nekatere ciklične procese znotraj materialnega podsistema (hidrološki cikel). Velik del preostanka preprosto segreva zemljo, kar zagotavlja, da večina biosfere leži v precej ozkem temperaturnem območju (1-30°C), kar je izrednega pomena za vse avtotrofe (Dickinson in Murphy, 2007).

Pretok energije je gibanje energije skozi sistem od zunanjega vira skozi vrsto organizmov nazaj v okolje na vsaki stopnji (trofični ravni) znotraj sistema; le majhen del razpoložljive energije se porabi za proizvodnjo novega tkiva (rast, razmnoževanje), večina se uporablja za dihanje in vzdrževanje telesa. Ko vzamemo v obzir pomen pretoka energije, lažje razumemo pomen energetske učinkovitosti in učinkovitosti prenosa. Energetska učinkovitost je količina koristnega dela, pridobljenega iz enote količine razpoložljive energije in je pomemben dejavnik pri upravljanju in ohranjanju kateregakoli biološkega vira. Običajno ekološko merilo učinkovitosti je učinkovitost trofične ravni, to je razmerje med proizvodnjo na eni trofični ravni in tisto na naslednji nižji trofični ravni. Ta ni nikoli zelo visoka in redko presega 10 %, bolj tipične vrednosti so 1-3 % (Jones, 1997).

2.5 Fotosinteza

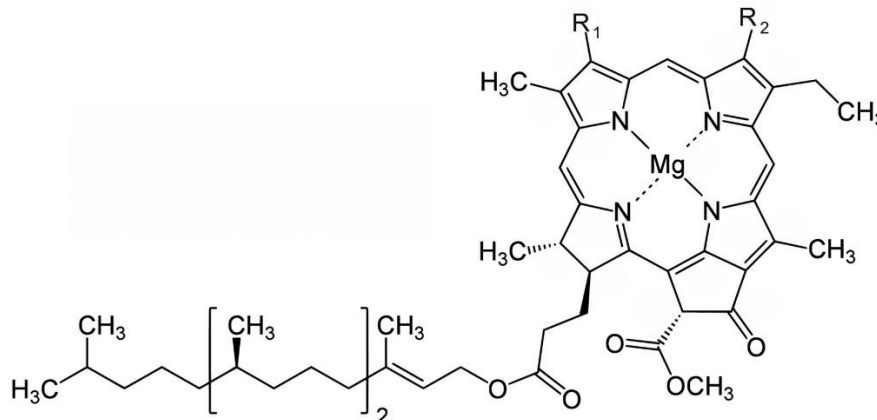
Preden so prokariotski organizmi na mladem planetu izrabljali sončno sevanje, so oksidirali organske in anorganske materiale, kot so H₂S, S ali Fe, da bi pridobili energijo za svoj metabolizem in gibljivost. To obliko kemosinteze še vedno uporabljajo nitaste bakterije, kot je

Beggiatoa, ki jih je v izobilju blizu hidrotermalnih vrelic. Te oksidirajo sulfid v žveplo, ki se akumulira v kapljicah znotraj celic. Zaradi nizkega izkoristka energije pri kemiosintezi morajo celice porabiti velike količine materiala, da pridobijo dovolj energije za svoj metabolizem. Kasneje so prokariotske bakterije začele pridobivati sončno energijo z uporabo več bakterioklorofilov (Häder, 2022).

Prvi organizmi, ki so zaporedoma uporabljali dva fotosistema, so bile prokariotske cianobakterije. Razvile so obliko fotosinteze, ki je precej podobna tisti pri rastlinah in algah. Oba fotosistema, ki poganjata linearni transport elektronov, temeljita na klorofilu a. Organizmi sprejmejo CO₂, ki ga NADPH+H⁺ zmanjša z uporabo energije, v obliki ATP za proizvodnjo sladkorja, ki se pretvori v druge oblike organskega materiala, kot sta škrob in celuloza. Kisik pri tem nastaja kot stranski produkt. V zgodnjem razvoju cianobakterij je oddani kisik služil za oksidacijo železa, ki ga je bilo v vodi veliko. Šele kasneje se je začel kisik počasi kopičiti v atmosferi do sedanje koncentracije, ki znaša približno 20 % (Häder, 2022).

Vitalna snov v fotosintezi je zeleni pigment, klorofil, ki zajame sončno svetlobo in jo pretvori v kemično energijo. Obstaja več različic klorofila, vendar je najbolj razširjen klorofil a. Vendar pa klorofil a ne more zajeti vseh valovnih dolžin svetlobe. Spekter delovanja razkriva, da druge oblike klorofila in nekateri karotenoidi pomagajo pri širjenju spektra fotosintetsko aktivnega sevanja. To pa ostaja pretežno v rdečem območju vidnega spektra. Pigmenti so običajno vsebovani v posebnem celičnem organelu, kloroplastu, z membrano omejenim organelom z lastnim genskim materialom (Jones, 1997).

V evkariotskih organizmih se fotosintetski pigmenti nahajajo v kloroplastih. Pri rastlinah imajo kloroplasti enotno morfologijo v obliki leče s premerom 2-8 μm, ki so z dvojno membrano ločeni od okoliške citoplazme. Pri algah imajo lahko kloroplasti različne oblike, kot so spirale (*Spirogyra*), trakovi (*Ulothrix*) ali zvezde (*Zygonema*) (Häder, 2022).



Slika 2: Kemijska struktura klorofila

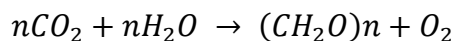
Vir: (<https://ar.iijournals.org/content/42/10/5035>) 12.7.2023

V procesu fotosinteze so nastale tako rekoč vse organske snovi na Zemlji, s tem pa je bil zagotovljen tudi vir energije za mnoge heterotrofne organizme. Hkrati se je zaradi fotosinteze spreminjala tudi sestava ozračja. Zelo poenostavljeno bi lahko fotosintezo opisali takole: iz ogljikovega dioksida, ki vstopa v rastlino z zrakom skozi listne reže, in vode, ki jo rastlina črpa s koreninami, nastaja s pomočjo sončne energije in klorofila glukoza. Kisik, ki nastane kot stranski produkt v tem procesu, se sprosti v atmosfero (Kolar in sod. 1992).

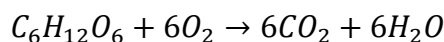
2.6 Primarna produktivnost

Proces fotosinteze predstavlja osnovo primarne produktivnosti, primarna produktivnost pa je osnova prehranjevalnih spletov in ekosistemov na Zemlji, zato je razumevanje stopenj, trendov in gonil primarne proizvodnje avtotrofnih organizmov temeljni cilj ekologije (Smale in sod., 2020). Za proces primarne produkcije so potrebni avtotrofni organizmi, ki s pomočjo sončne svetlobe akumulirajo energetsko bogato tkivo z asimilacijo ogljika. Gre za rastline in določene vrste bakterij (vse zelene rastline, alge, cianobakterije,...). Alge, briofiti, lišaji, praproti in sorodne rastline, ki nosijo semena, pridobivajo energijo za asimilacijo anorganskega ogljika (običajno CO_2 , včasih bikarbonatnih ionov HCO_3^- v nekaterih sladkovodnih rastlinah) v organske spojine (sladkorje) z zajemanjem in uporabo svetlobne energije. Tako izkoriščajo svetlobo kot vir energije in oksidirajo vodo, da fiksirajo anorganski ogljik v glukozo (Dickinson in Murphy, 2007).

Enačba 1: Fotosinteza



Enačba 2: Aerobna respiracija



Glede na enačbo je fotosinteza videti razmeroma preprosta. Vendar so poglobljene biokemijske raziskave v zadnjih desetletjih pokazale, da je celoten proces fotosinteze razdeljen na veliko število ločenih reakcij, ki so med seboj zelo kompleksno povezane in usklajene (Kolar in sod., 1992).

Hitrost, s katero deluje primarna produkcija (hitrost, pri kateri se s pomočjo sončne svetlobe anorganski ogljik preoblikuje v organske spojine), je označena kot celotna primarna produktivnost določenega ekosistema. Bruto primarno produkcijo definiramo kot vso producirano količino organskih snovi v določenem časovnem okvirju (ura, dan, mesec, leto), medtem ko je neto primarna produkcija definirana kot odbitek med bruto vrednostjo in respiratornimi izgubami organske snovi primarnih producentov. Le-ta predstavlja vrednost celotnih organskih snovi, ki so na voljo v začetku prehranjevalne verige ekosistema (Dickinson in Murphy, 2007).

2.7 Metode merjenja primarne produktivnosti

Merjenje primarne produktivnosti je precej kompleksna naloga, o kateri je bilo napisanih že veliko člankov, vendar je njena pomembnost pri razumevanju ekosistemskega delovanja in upravljanja neizpodbitna. Vse meritve produkcije slonijo na spodnji enačbi:

Enačba 3: Enačba poteka fotosinteze



Enačba nakazuje, da je primarna produkcija neločljivo povezana s fotosintezo, pri čemer se lahko za merjenje le-te uporabi količina ogljika, pretvorjenega v organske spojine ali količina sproščenega kisika (Jones, 1997).

Metode za merjenje primarne proizvodnje bentoških makroalg in vaskularnih rastlin v vodnih ekosistemih imajo pogosto več skupnega z metodami, ki se uporabljajo za merjenje proizvodnje v kopenskih ekosistemih. Bruto primarna proizvodnja (BPP) je opredeljena kot

skupna stopnja proizvodnje nove organske snovi s strani avtrofičnih organizmov s fotosintezo. Neto primarna proizvodnja (NPP) je BPP minus organska snov in predstavlja stopnjo kopičenja nove biomase fitoplanktona. NPP je izjemno pomemben faktor, saj pove, koliko energije se lahko prenaša po trofičnih slojih naprej. Neto produkcija ekosistema je razlika med NPP in dihanjem vseh heterotrofnih organizmov v ekosistemu. Vse tri stopnje so izjemnega ekološkega pomena (Howarth in Michaels, 2000).

V kopenskih ekosistemih se primarna proizvodnja pogosto ocenjuje na podlagi sprememb v stalni zalogi rastlinske biomase, v stopnjah spremembe organskega ogljika. Drugače je pri planktonskih sistemih, kjer primarne proizvajalce pogosto hitro zaužijejo živali. Obrat fitoplanktonske skupnosti je zato lahko izjemno hiter, zgodi se lahko že v enem samem dnevu. Primarne proizvodnje zato brez natančnega merjenja umrljivosti in obrata v planktonskih sistemih ni mogoče oceniti na podlagi spremembe organskega ogljika v primarnih proizvajalcih (Howarth in Michaels, 2000).

2.7.1 Metoda »svetla/temna steklenica«

Tehnika merjenja raztopljenega kisika v svetli in temni steklenici je bila prva metoda, uporabljena za merjenje primarne proizvodnje v vodnih ekosistemih in se pogosto uporablja še danes. Ta metoda primerja stopnjo spremembe kisika v steklenicah, ki jih hranimo na svetlobi (kar vključuje neto učinek proizvodnje in dihanja), s tistimi, ki jih hranimo v temi (samo respiracija), da izračunamo primarno stopnjo proizvodnje na osnovi razlike med zgornjima količinama (Howarth in Michaels, 2000).

Vzorci vode, ki vsebujejo populacije planktona v okolici, damo v kompletne inkubacijskih steklenic ali drugih posod, pri čemer so nekatere steklenice prozorne, druge pa neprozorne. Na koncu inkubacijske dobe se koncentracija kisika izmeri tako v svetlih (prozornih) steklenicah kot v temnih (neprozornih) steklenicah in primerja s koncentracijo kisika v času, ko so bile steklenice napolnjene. Sprememba kisika v steklenici s časom je kombinacija GPP (Gross Primary Productivity) in dihanja vseh organizmov v steklenici (fitoplanktona, pa tudi heterotrofnih bakterij in zooplanktona). Zmanjšanje kisika v temni steklenici je merilo te stopnje dihanja. Torej lahko GPP izračunamo tako, da odštejemo hitrost spremembe kisika v temni steklenici od hitrosti spremembe kisika v svetli steklenici (Howarth in Michaels, 2000).

Včasih lahko pride do neveljavnosti dveh predpostavk. Prva je, da je stopnja dihanja heterotrofnih organizmov, ki so nehote zaprti v steklenici, zanemarljiva. Druga je, da je stopnja dihanja v svetlih in temnih steklenicah enaka. Zadnja predpostavka ne velja pri visokih jakosti svetlobe, kjer fotorespiracija, odvisna od svetlobe, povzroči višje stopnje respiracije kot v temni steklenici. Največja omejitev kisikove metode je njena nizka občutljivost, ki je odvisna od ločljivosti običajnih metod merjenja raztopljenega kisika. Metoda je torej najbolj uporabna za hranilno bogata jezera z visoko primarno proizvodnjo (Winfried in Ulrich, 2008).

2.7.2 ^{14}C metoda

Ta metoda vključuje dodatek čim manjše količine radioaktivnega $^{14}\text{CO}_2$ k naravnemu CO_2 , ki je na voljo organizmom, nato se izmeri vključitev radioaktivnosti v biomaso (operativno definirana kot filtrirni merilnik delcev). Količine ^{14}C v sledovih (običajno kot bikarbonat) dodamo v svetle in temne steklenice, ki jih nato inkubiramo 2-4 ure. Po inkubaciji se izmeri radioaktivnost delcev, ki ostanejo na membranskem filtru. Organizmi fotosintezirajo radioaktivni ^{14}C nekoliko počasneje kot ^{12}C . Temne stekleničke, uporabljene tukaj, ne merijo dihanja, temveč zagotavljajo vrednost ozadja za fizično adsorpcijo in fiksacijo ^{14}C . Količino

razpoložljivega ^{12}C je treba določiti kemično (običajno iz alkalnosti in pH) (Winfried in Ulrich, 2008).

Vključitev radioizotopa ^{14}C meri neto vrednosti fotosinteze šele, ko je vzpostavljeno izotopsko ravnovesje. Pri običajnih uporabljenih časovnih intervalih inkubacije se izmeri neka nedefinirana vrednost med bruto in neto fotosintezo. Druga pomembna omejitev je, da metoda ne more izmeriti negativnih stopenj fotosinteze v popolni temi (dihanje). Kljub svojim omejitvam se metoda ^{14}C uporablja veliko bolj kot metoda s kisikom, saj je občutljivost mogoče znatno povečati preprosto s povečanjem količine radioaktivnosti (Winfried in Ulrich, 2008).

2.8 Faktorji, ki vplivajo na primarno produktivnost

Omejitve primarne produktivnosti v celinskih vodah povzročata dostopnost, jakost ter intenziteta svetlobnega valovanja. Zato opazujemo dnevno-nočno in sezonsko periodičnost primarne produktivnosti. Izjemnega pomena ostajajo koncentracije hranilnih snovi. Nutrienti se v vodnem okolju sproščajo pri dnu z razkrojevanjem mrtve organske snovi v usedlinah, medtem ko se primarna produktivnost izvaja v površinskem delu, kjer je velika dostopnost svetlobe. V vodnem ekosistemu so nutrienti prostorsko precej ločeni od delov, kjer se uporabljajo. Ravno nasprotno je na kopnem, kjer rastline neposredno koreninijo v tleh in je tako zveza med slojem, kjer se dogaja primarna produktivnost, in slojem z zalogami nutrientov bližja. Za produkcijo so pomembne zadostne koncentracije makronutrientov in mikronutrientov (Smolar-Žvanut, 2015).

Temperatura vode vpliva na primarno proizvodnjo, vendar je na splošno veliko manj pomembna kot zadostna koncentracija hranil. Razpoložljivost svetlobe vpliva na primarno proizvodnjo skozi zemljepisno širino in sezono v zelo omejenem obsegu. Veliko bolj pomembna je motnost oziroma prosojnost vode, ki je povezana z vsebnostjo sedimenta in ima veliko močnejši učinek – v zelo motni vodi fotosinteza ni možna več kot nekaj deset centimetrov pod gladino. Višje trofične ravni v sladki vodi, vključno z bentoškimi nevretenčarji in bakterijami ter drugo mikrobioto v usedlinah, pa tudi ribe, zooplankton in ličinke žuželk, igrajo pomembno vlogo pri kroženju hranil v teh sistemih (Dickinson in Murphy, 2007).

Prevladujoči dejavnik, ki nadzoruje stopnjo produktivnosti, je razpoložljivost hranil v vodi. Na splošno so celinske vode precej revne s hranili. Pri večjih zemljepisnih širinah je voda pogosto zelo revna s hranili ali oligotrofna, v medtropskem pasu, kjer se stopnje kemičnega delovanja povečajo zaradi višjih temperatur okolja, je lahko hranil več. Substrat, po katerem voda teče v vodno telo ali reko, je pomemben dejavnik, ki vpliva na vsebnost hranil v vodi. Hranila potonejo na dno vodnega telesa in niso na voljo primarnim proizvajalcem v fotični coni (Dickinson in Murphy, 2007).

2.9 Antropogeni vplivi na primarno produkcijo

Evtrofikacija se je izkazala za eno najbolj razširjenih in resnih antropogenih motenj v vodnih ekosistemih (Winfried, L. in Ulrich, S., 2008). Evtrofikacija vpliva na vodne ekosisteme, zaradi fizične mobilnosti vodnih sistemov pa se vzrok in posledica problema hitro razširita. Povzročata povečanje primarne produktivnosti, ki je posledica povečane oskrbe s hranili v vodnih telesih. Najbolj dramatične učinke ima na sladkovodna telesa, v katerih lahko razmeroma majhno povečanje vnosa hranil močno poveča primarno produktivnost (Dickinson in Murphy, 2007).

V mnogih sladkovodnih telesih je fosfor omejevalni dejavnik. Raven fosforja se lahko poveča iz dveh glavnih razlogov: sintetična gnojila so na splošno bogata s fosforjem, ki je rastlinam na voljo le v anionski obliki fosfatnih ionov, zato se ne more oprijeti koloidov v tleh, ki imajo prav

tako negativen naboj. Sintetična gnojila se tako posledično zlahka izpirajo iz zemlje z drenažno vodo. Drugi vir fosfatov so domače kanalizacije in izpusti odpadnih voda – ta material je še posebej bogat s fosfati, njihov glavni vir so večinoma gospodinjski detergenti. Razlika med tema dvema viroma je v tem, da je kmetijstvo razpršen vir z vnosom onesnaževala z obsežnega območja, medtem ko je domače onesnaženje točkovni vir, ki prihaja z določljive in specifične lokacije (Dickinson in Murphy, 2007).

V najslabšem primeru lahko eutrofikacija povzroči skoraj popolno izgubo življenja v vodi, saj posledično cvetenje alg deoksigenira vodo. Rezultat je resna škoda tako vodnim ekosistemom kot vodnim virom (Dickinson in Murphy, 2007).

3 MATERIALI IN METODE

Glavnina diplomskega dela je predstavljala ugotavljanje primarne produkcije in ekološkega stanja površinskih vodnih teles. Izbrali smo tri jezera (Velenjsko, Perniško in Hotinjsko) in dve reki (Pesnica in Paka). Odvzem vzorca in laboratorijsko delo smo ponovili v dveh različnih temperaturnih razponih ozračja (prvi sklop: 22-27⁰C, drugi sklop: 27-35⁰C) in tako primerjali rezultate med dvema letnima časoma in med različnimi vodnimi telesi.

Praktični del diplomskega dela smo razdelili na dva večja dela. V prvem delu smo opisali potek terenskega dela, uporabljenih orodij in izvedenih meritev, v drugem delu pa uporabljene metode in fizikalno-kemijske analize v laboratoriju. V okviru laboratorijskega dela smo predstavili postopek merjenja primarne produktivnosti izbranih vodnih teles z metodo »svetla/temna steklenica«.

Ker smo po preliminarnem delu poskusa ugotovili, da sta reki Pesnica in Paka neprimerni za naš eksperiment, smo ju izločili iz nadaljnjih meritev. Prav tako smo se zaradi specifične evtrofne narave Hotinjskega ribnika odločili, da ga vključimo v izvedbo eksperimenta. S tem smo skušali ugotoviti primernost metode »svetla/temna« steklenice za naše vzorce.

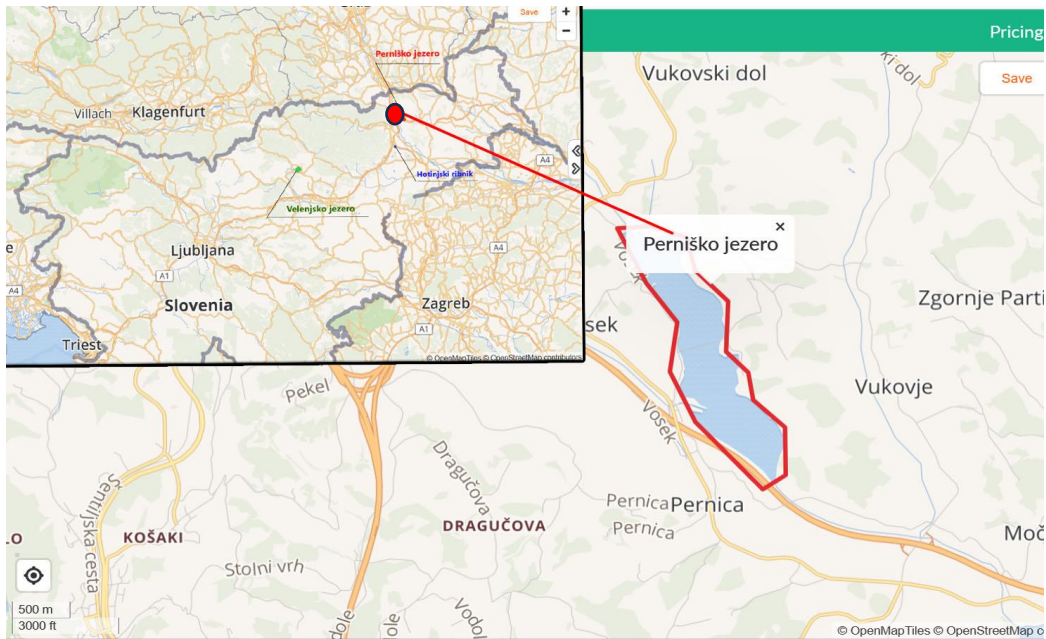
Pri odvzemu vzorcev Perniškega in Velenjskega jezera ter Hotinjskega ribnika smo se omejili na vrhnjo, manj gosto plast – epilimniji.

3.1 Terensko delo

V okviru terenskega dela smo vzorčili pet vodnih teles v dveh različnih temperaturnih razponih: med 22-27⁰C ter 27-35⁰C. Pri spremljanju temperatur ozračja smo si pomagali z ARSO samodejnimi meteorološkimi postajami za mesti Maribor in Velenje. Preko portala smo lažje določili primerne dneve za vzorčenje v zastavljenih temperaturnih razponih. Vsi vzorci so bili odvzeti ob enaki uri v dnevu, ob 10:00 dopoldan. Vzorce posamičnega vodnega telesa smo zajeli s fitoplanktonsko mrežico in jih transportirali v laboratorij na Fakulteti za varstvo okolja, kjer smo nadaljevali z meritvami in pripravili vzorce za poglobitni del eksperimenta. Na terenu smo izmerili osnovne fizikalno-kemijske parametre odvzetega vzorca: temperaturo vode, pH, električno prevodnost in koncentracijo raztopljenega kisika. Parametre smo določili z uporabo prenosnega merilnega sistema Vernier LabQuest 3 in ustreznimi sondami.

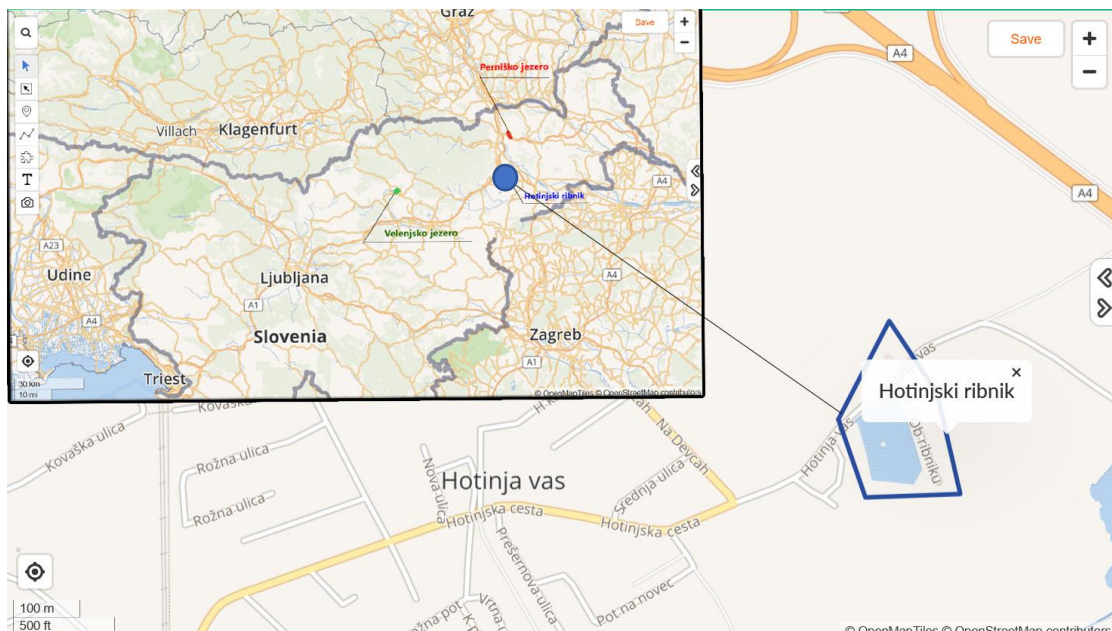
3.1.1 Vzorčna mesta

Z vzorčenjem smo pričeli v SV delu Slovenije, in sicer na Perniškem jezeru ob 10. uri dopoldan (Slika 3). Najbolj primerno mesto za odvzem vzorca se nahaja za prehodom čez zgornji in spodnji del jezera, kjer najdemo stopnice in varen dostop do jezera.



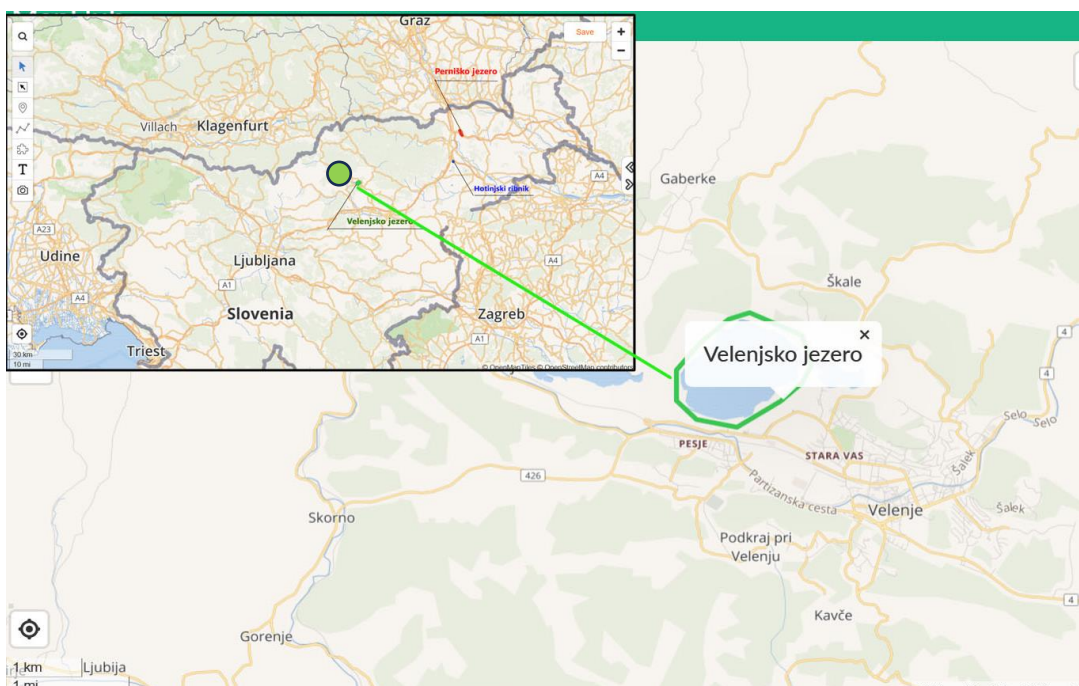
Slika 3: Perniško jezero – vzorčno mesto (vir: MapHub)

Terensko delo smo nadaljevali v Hotinji vasi pri kraju Hoče v Mariboru (smer JV od Perniškega jezera), kjer je lociran Hotinjski ribnik, ki ga obkroža park (Slika 4). Vožnja od Perniškega jezera do Hotinjske vasi traja približno 20 minut, kar pomeni, da smo vzorčenje ribnika opravili ob 10:20 dopoldan. Nato smo vzorce zapeljali v laboratorij na Fakulteto za varstvo okolja in pripravili vse potrebno za izvedbo laboratorijskega dela.

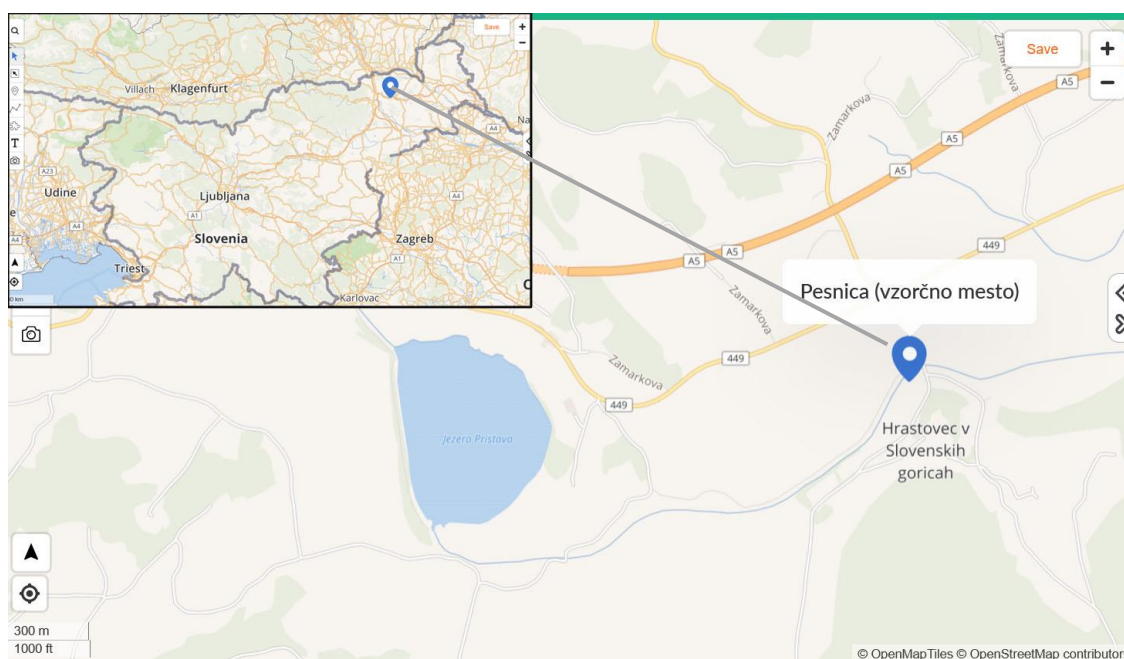


Slika 4: Hotinjski ribnik – vzorčno mesto (vir: MapHub)

Naslednji dan je sledilo vzorčenje Velenjskega jezera (ob 10:00 uri) (Slika 5). Ob zajetju vzorca smo izvedli meritev fizikalno-kemijskih parametrov in se napatili v laboratorij na fakulteti, kjer smo pripravili vzorce za laboratorijsko analizo.

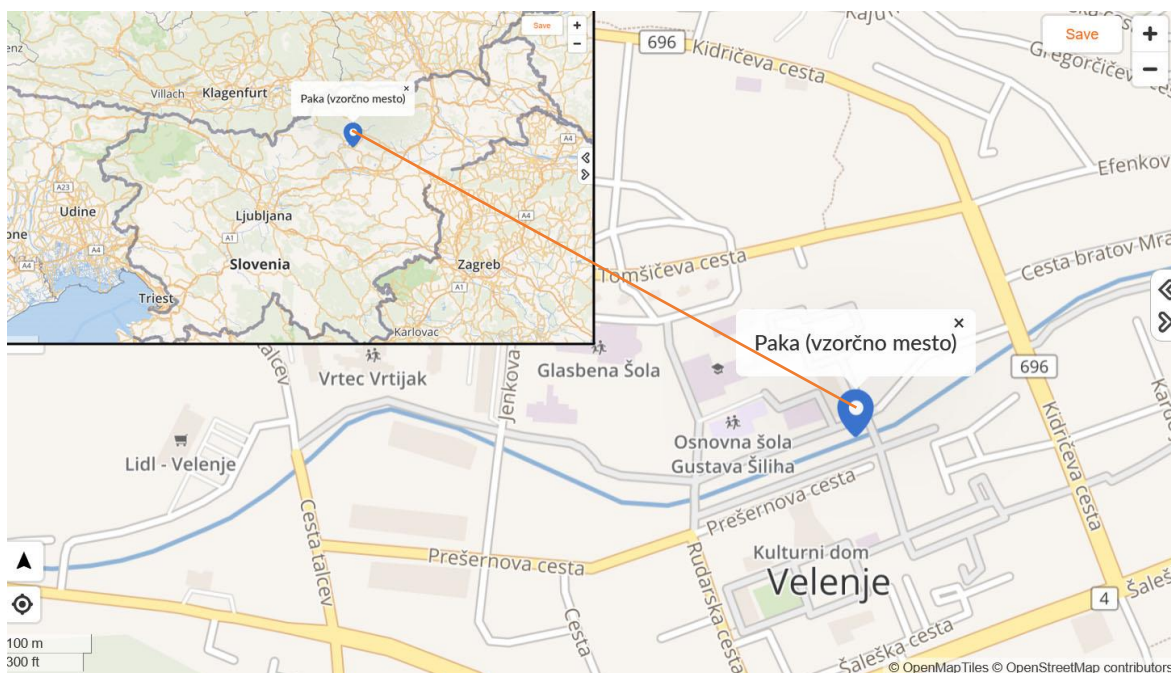


Slika 5: Velenjsko jezero – vzorčno mesto (vir: MapHub)



Slika 6: Reka Pesnica - vzorčno mesto

Reko Pesnico smo vzorčili le enkrat (preliminarni del). Vzorčno mesto je bilo v kraju Hrastovec pred Lenartom v Slovenskih Goricah. Dostopnost do vodnega telesa je bil nekoliko otežena (Slika 6).



Slika 7: Reka Paka - vzorčno mesto (vir: MapHub)

Reko Pako smo vzorčili le enkrat (preliminarni del). Vzorčenje je potekalo v Velenju, Trg mladosti, kjer nismo imeli težav z dostopnostjo do vodnega telesa (Slika 7).

3.2 Določitev primarne produkcije vodnih teles

Laboratorijsko delo je zajemalo spremljanje produktivnosti vodnih teles s pomočjo seta za merjenje primarne produkcije Vernier in merjenja koncentracije raztopljenega kisika vzorcev z merilnim sistemom Vernier LabQuest3. Meritve in izračun primarne produktivnosti smo izvedli z uporabo metode »svetla/temna steklenica«. Metoda temelji na principu omejevanja dostopa svetlobe vzorcu s pomočjo posebne mrežice ter merjenjem koncentracije raztopljenega kisika na začetku eksperimenta ter po 24 urah.

Ker smo metodologijo preizkušali prvič, smo najprej sledili navodilom proizvajalca in ugotavljali optimalne pogoje izvedbe eksperimenta – preliminarni eksperiment. Izvedli smo ga na 4 vzorcih – dveh rekah (Paka in Pesnica) in dveh jezerih (Velenjsko in Perniško jezero). Proizvajalec priporoča izvedbo eksperimenta pod stalnim (24-urnim) virom svetlobe, zato smo uporabili UV-luč proizvajalca Sera, LED Plantcolor sunrise 520, ki je sposobna oddajati svetlobno valovanje v spektru 425 do 700 nm. Hkrati smo iskali najboljšo lego plastenek pod lučjo (navpična vs. vodoravna).

Ker smo v prvih preliminarnih meritvah ugotovili višje koncentracije kisika v plastenkah na naravni svetlobi kot v plastenkah pod UV-lučjo, smo se v nadaljevanju odločili za spremembo metode dela. Prav tako smo ugotovili, da so za ugotavljanje biološke produktivnosti vodnega ekosistema najprimernejše stoječe vode – jezera.

Dva glavna eksperimenta smo nato izvedli le še na treh stoječih vodnih telesih – Perniškemu in Velenjskemu jezeru smo dodali še Hotinjski ribnik. Meritve smo izvedli vzporedno z uporabo dveh različnih svetlobnih virov – UV-luči valovne dolžine od 425 do 700 nm (Slika 8) ter naravnega dnevnega (12-urnega) dostopa sončne svetlobe (Slika 9). Za vsako meritev smo uporabili 7 plastenek – štiri so bile ovite v mreže z različnimi stopnjami prosojnosti (Sliki 8 in 9),

eno smo zavili v neprosojno folijo in umaknili z virov svetlobe, zadnji dve prosojni platenki pa pustili kot kontrolni platenki. Platenke, zavite v mrežice, blokirajo jakost svetlobnega valovanja in smo jih v naslednjih poglavjih označili kot M1, M3, M5 in M8. Mrežice blokirajo dostop različnih deležev svetlobe:

- M1 2%,
- M3 10%,
- M5 25% in
- M8 65% svetlobe.

Po 24 urah smo nato ponovno izmerili koncentracije raztopljenega kisika v vseh vzorcih in izračunali stopnjo respiracije (SR), bruto (BPP) in neto (NPP) vrednosti primarne produkcije po spodnjih formulah, kjer svetla platenka pomeni kontrolno platenko, temna pa eno izmed tistih z omejenim dostopom svetlobe (oznake 1, 3, 5, 8 na Slikah 8 in 9). Vrednosti SR, BPP in NPP smo podali v enotah mg raztopljenega kisika /L vzorca /h:

Enačba 4: Enačba za izračun bruto primarne produktivnosti (BPP)

$$1) BPP = \frac{DO(\text{svetla steklenica}) - DO(\text{temna steklenica})}{\text{čas}} \text{ [mg/L/h]}$$

Enačba 5: Enačba za izračun neto primarne produktivnosti (NPP)

$$2) NPP = \frac{DO(\text{svetla steklenica}) - DO(\text{začetna vrednost})}{\text{čas}} \text{ [mg/L/h]}$$

Enačba 6: Enačba za izračun stopnje respiracije (SR)

$$3) SR = \frac{DO(\text{temna steklenica}) - DO(\text{začetna vrednost})}{\text{čas}} \text{ [mg/L/h]}$$



Slika 8: Postavitev seta vzorcev pod lučko (vir: lasten)



Slika 9: Postavitev seta vzorcev na okensko polico (vir: lasten)

Vzporedno smo vzorcem v laboratoriju izmerili izbrane osnovne fizikalno-kemijske parametre (poglavja 3.3.1. - 3.3.4.), določili vsebnosti nitratov in fosfatov (poglavje 3.3.5.) ter biokemijsko potrebo po kisiku 5 - BPK5 (poglavje 3.3.6.).

3.3 Določanje fizikalno-kemijskih parametrov vzorca

3.3.1 Temperatura vode

Temperatura vode vpliva na nekatere njene pomembne fizikalne lastnosti, kot so toplotna kapaciteta, gostota, specifična teža, viskoznost, površinska napetost, specifična prevodnost, slanost in topnost raztopljenih plinov, itd. Hitrosti kemijskih in bioloških reakcij se povečujejo z naraščajočo temperaturo (Shah, 2017). Koncentracija raztopljenega kisika se z višjo temperaturo vode znižuje.

Metoda merjenja temperature vode: merili smo jo z vmesnikom Labquest 3 in ustreznim senzorjem za merjenje koncentracije kisika (GoDirect Optical Dissolved Oxygen probe), ki sočasno omogoča tudi merjenje T vzorca (Slika 10, desno).

3.3.2 Koncentracija raztopljenega kisika (DO)

Raztopljeni kisik (*angl. dissolved oxygen*, DO) velja za enega najpomembnejših parametrov kakovosti vode v potokih, rekah in jezerih ter predstavlja ključni test za ugotavljanje onesnaženosti vodnega telesa. Višja kot je koncentracija raztopljenega kisika, boljša je kakovost vode. Za merjenje koncentracije raztopljenega kisika se uporabljajo tri glavne metode: kolorimetrična metoda, Winklerjeva titracija in elektrometrična metoda (Hassan, 2020).

Metoda merjenja koncentracij raztopljenega kisika: merili smo jo z vmesnikom Labquest in ustreznim senzorjem (Slika 10, desno). Merjenje raztopljenega kisika smo opravljali v časovnem obdobju petih minut po navodilih proizvajalca.



Slika 10: Senzor za merjenje raztopljenega kisika DO (desno) in senzor za merjenje pH vrednosti (levo) (vir: lasten)

3.3.3 pH vode

pH velja za splošno merilo kislosti ali alkalnosti vode (Balasubramanian, 2011). Vrednost pH je merilo, kako kislina ali bazična (alkalna) je voda. Opredeljena je kot negativni logaritem koncentracije vodikovih ionov. Spremembe pH lahko spremenijo koncentracije drugih snovi v vodi v bolj strupeno obliko. Toksičnost amonijaka, učinkovitost dezinfekcije s klorom in topnost kovin so odvisni od sprememb pH vrednosti (Arora, 2017). Razpon je od 0 do 14, merimo jo s pH metri. Za vodo pravimo, da je kislina, ko je pH nižji od 7, in alkalna, ko je pH nad 7, odvisno od relativne koncentracije vodikovih ionov od nevtralne vrednosti, ki je 7.

Metoda merjenja pH vrednosti: merili smo jo z vmesnikom LabQuest 3 in ustreznim senzorjem (Slika 10, levo). Vrednost pH smo merili na terenu in v laboratoriju.

3.3.4 Električna prevodnost

Električna prevodnost (EC) vode je merilo sposobnosti raztopine prenašati ali prevajati električni tok. Vsebnost ionov je odvisna od koncentracije raztopljenih soli. Več kot jih je, večja je prevodnost. Glavni pozitivno nabiti ioni v vodi so natrij (Na^+), kalcij (Ca^{+2}), kalij (K^+) in magnezij (Mg^{+2}). Glavni negativno nabiti ioni so klorid (Cl^-), sulfat (SO_4^{-2}), karbonat (CO_3^{-2}) in bikarbonat (HCO_3^-). Nitrati (NO_3^{-2}) in fosfati (PO_4^{-3}) so manj pomembni glede prispevka k prevodnosti vode, čeprav so biološko zelo pomembni (Arora, 2017).



Slika 11: Senzor za merjenje električne prevodnosti vode (vir: lasten)

Metoda merjenja električne prevodnosti: merili smo jo z vmesnikom LabQuest in ustreznim senzorjem (Slika 11). Meritve smo izvedli tako na terenu kot tudi v laboratoriju. Električno prevodnost smo podali v enotah $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.3.5 Spektrofotometrična določitev nitratov in fosfatov

Vzorci smo preko filtrirne brizge (5 μm velikost por) prefiltrirali v čaše (Slika 12) in nato po navodilih proizvajalca izvedli meritve fosfatov in nitratov filtriranega in nefiltriranega vodnega vzorca.

V naši raziskavi smo vsebnost nitratov in fosfatov v vzorcih vode določili spektrofotometrično, z uporabo hitrih kivetnih testov proizvajalca Hach Lange. Koncentracijo nitratov smo preverjali s testom LCK339 (Slika 13), ki omogoča zaznavanje nitratov v koncentracijskem območju od 1,00–60 mg/L. Po navodilih smo s pipeto dodali 2 ml vodnega vzorca in 1 ml reagenta 1, dva- do trikrat obrnili kivetni test in počakali 15 minut pred začetkom merjenja. V nadaljevanju smo za analizo ortofosfatov uporabili kivetni test LCK349, ki omogoča zaznavanje ortofosfatov v koncentracijskem območju 0,150–4,5 mg/L. Po navodilih kivetnega testa smo zamenjali pokrovčke, zajeli 2 ml vodnega vzorca in dodali 0,2 ml reagenta (Slika 14). Kivetni test smo zaprli z novimi pokrovčki in dva- do trikrat zavrteli, da je stekla reakcija. Test smo nato pustili v mirovanju naslednjih 10 minut. Meritve smo izvedli s spektrofotometrom Hach Lange DR3900 (Slika 15).



Slika 12: Priprava vzorcev za kivetni test nitratov in fosfatov (filtrirani, nefiltrirani) (vir: lasten)



Slika 13: Kivetni test za nitrate LCK339 v vodnem vzorcu (vir: lasten)



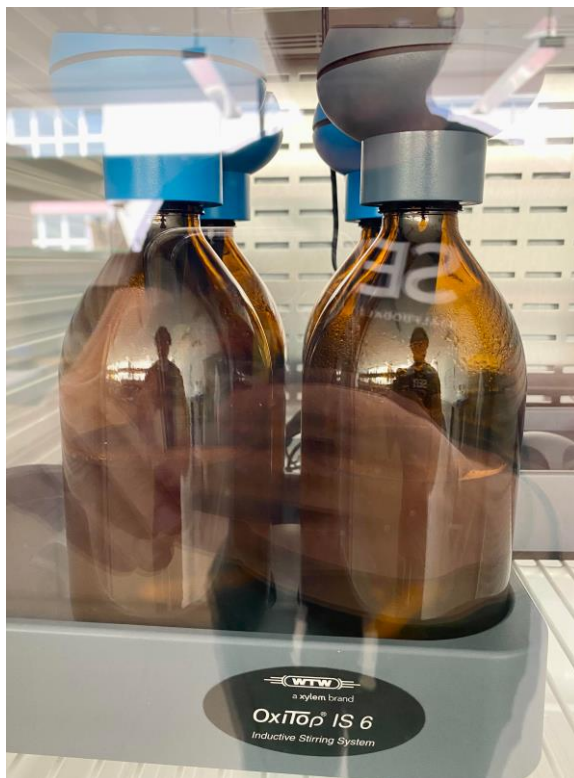
Slika 14: Kivetni test za fosfate LCK349 v vodnem vzorcu (vir: lasten)



Slika 15: Spektrofotometer Hach Lange DR 3900 (vir: lasten)

3.3.6 BPK5 (Biokemijska potreba po kisiku)

Biokemijska potreba po kisiku je količina raztopljenega kisika, ki jo potrebujejo aerobni organizmi za razgradnjo organskega materiala, ki je prisoten v vodnem telesu, pri določeni temperaturi in v določenem časovnem obdobju (Slika 16). Najpogosteje se izraža v miligramih porabljenega kisika na liter vzorca v 5 dneh (BPK5) v inkubacije pri 20°C (Arora, 2017).



Slika 16: Meritve BPK v nadzorovanem okolju po navodilih (vir: lasten)

Merjenje BPK je potekalo manometrično (merjenje spremembe tlaka) v zaprtem sistemu OxiTop. Sistem deluje na podlagi merjenja podtlaka, ki nastane v merilni steklenici in se zazna z OxiTop merilno glavo, ki je zelo občutljiv tlačni senzor. Izmerjeni tlak se nato pretvori v končni rezultat, ki se izpiše v enoti mg /L.

V merilno steklenico smo dali paličasti magnet in vanjo nalili dobro premešan vzorec z uporabo »overflow« bučke izbranega volumna. Oksidacijo amonija smo pri meritvi inhibirali z dodatkom NTH 600 nitrifikacijskega inhibitorja. V črn gumijasti zamašek smo dodali 2 granuli NaOH in zamašek vstavi v steklenico. Na koncu smo preverili nastavitve OxiTop glave, steklenico postavili na magnetno stojalo v termostatisirano omaro na 20°C ter pričeli z merjenjem (Slika 16) (Navodila za uporabo OxiTop, 2023).

3.4 Sistem Vernier in orodje LabQuest

Pri meritvah koncentracije raztopljenega kisika, vrednosti pH in električne prevodnosti smo si pomagali z orodjem LabQuest 3 in ustreznimi senzorji. Orodje izdeluje Vernier, ki velja za eno izmed vodilnih podjetij pri izdelovanju učnih pripomočkov za spoznavanje z znanostjo.



Slika 17: Vernier – orodje LabQuest 3, ki smo ga uporabljali za meritve (vir: lasten)

Namen sistema Vernier je spodbujati praktično učenje, ki temelji na raziskovanju, tako da študentom nudi priložnost, da se vključijo v pristne znanstvene prakse. Z uporabo senzorjev Vernier lahko študenti ali raziskovalci zbirajo podatke z večjo točnostjo in natančnostjo, kar jim pomaga učinkoviteje razumeti znanstvene koncepte in sklepati na podlagi dokazov (Slika 17).

3.5 Snovanje laboratorijske in terenske vaje

Ob koncu eksperimentalnega dela smo na osnovi pridobljenih izkušenj in meritev pripravili predlog terenske in laboratorijske vaje za študente, ki se jo lahko izvede v okviru predmeta Človek in okolje na Fakulteti za varstvo okolja.

4 REZULTATI Z DISKUSIJO

4.1 Primarna produktivnost vodnih teles

4.1.1 Preliminarni eksperiment

V sklopu preliminarnih meritev smo pod UV-lučjo nastavili po dve paralelki vsakega vodnega telesa. Prvo paralelko plastenk smo postavili v ležeč (vodoravni) položaj, drugo pa v navpični. Po 24 urah eksperimenta smo opazili, da se koncentracije kisika v Pesnici in Perniškem jezeru v prosojni plastenki pod UV-lučjo niso povišale (Preglednica 2). Prav tako na produktivnost ni vplivala lega plastenke (Slika 8). Največje odstopanje smo opazili v plastenki, ki smo jo pustili na okenski polici – ta je bila izpostavljena svetlobi v 12-urnem naravnemu ciklusu (Preglednica 2, krepko). Zaradi teh ugotovitev smo se odločili, da metodo eksperimenta nekoliko spremenimo. Namesto da bi postavili obe paralelki vzorca pod lučko, smo eno od paralelk postavili na okensko polico in ocenjevali primernost oddanega svetlobnega valovanja UV-luči za izvajanje eksperimenta v primerjavi z naravnim dnevnim ciklusom sončnega sevanja.

Preglednica 2: Koncentracije kisika v preliminarnem eksperimentu

	PAKA	VELENJSKO JEZERO	PESNICA	PERNIŠKO JEZERO
Temp. vode [°C]	16	22,4	19,5	24,8
O ₂ [mg/L]	10,1	8,36	6,95	10,81
Po 24 URAH				
UV-LUČ - VODORAVNO				
svetla platenka	7,69	7,07	1,96	7,02
M1	7,73	6,94	2,09	7,57
M3	7,56	6,78	2,82	6,21
M5	7,64	6,76	1,45	5,8
M8	7,81	6,24	3,27	6,22
temna platenka	7,49	6,4	1,22	5,38
sobna svetloba	<u>7,98</u>	<u>6,65</u>	<u>3,72</u>	<u>14,23</u>
UV-LUČ - NAVPIČNO				
svetla platenka	7,78	7,22	2,34	8,17
M1	7,75	6,87	3,72	6,15
M3	7,43	6,32	2,43	5,76
M5	7,68	6,27	1,02	4,08
M8	7,58	6,44	1,35	4,21
temna platenka	7,53	6,71	0,94	6,44
sobna svetloba	<u>8,89</u>	<u>6,93</u>	<u>3,67</u>	<u>13,77</u>
UV-LUČ (povprečno)				
svetla platenka	7,74	7,15	2,15	7,60
M1	7,74	6,91	2,91	6,86
M3	7,50	6,55	2,63	5,99
M5	7,66	6,52	1,24	4,94
M8	7,70	6,34	2,31	5,22
temna platenka	7,51	6,56	1,08	5,91
sobna svetloba	8,44	6,79	3,70	14,00

V Preglednici 2 so prikazane koncentracije kisika v vodoravni in navpični postavitvi platenk prvega sklopa meritev. Če pogledamo vzorec Perniškega jezera, se koncentracije kisika pod lučko med paralelkama ne razlikujejo veliko (prosojna platenka (vodoravno) – 8,17 mg/L; prosojna platenka (navpično) – 7,02 mg/L). Največje odstopanje opazimo v platenkah, izpostavljenim dnevni svetlobi (prosojna platenka (sobna svetloba) – 14,23 mg/L). Prvi set meritev nam je tako dal nekaj pomembnih informacij za nadaljevanje eksperimentov – da produktivnost pod našo UV-lučjo ni optimalna in je slabša kot na dnevni naravni svetlobi ter da lega platenk ne vpliva ne meritve.

Kmalu po opravljenih preliminarnih meritvah smo ugotovili tudi, da reki Paka in Pesnica nista primerni za izvedbo našega eksperimenta. Kljub izpostavitvi vzorcev dnevni svetlobi, koncentracije raztopljenega kisika po 24 urah (Pesnica – 3,67 mg/L; Paka – 8,89 mg/L) niso presegle vrednosti koncentracij začetnih meritev na terenu (Pesnica – 6,95 mg/L; Paka – 10,10 mg /L), kar rezultira v negativni vrednosti neto primarne produktivnosti. Nekoliko večjo razliko med koncentracijo začetnega O₂ in koncentracijo O₂ po 24 urah na dnevni svetlobi v reki Pesnici bi lahko pojasnili s tem, da je v vzorcu prisotnih več organizmov, ki pridobivajo energijo iz celičnega dihanja kot avtotrofnih organizmov. Izkazalo se je, da ima Velenjsko jezero oligotrofne značilnosti, vendar smo ga kljub temu obdržali v sklopu drugega dela meritev kot kontrolno vrednost.

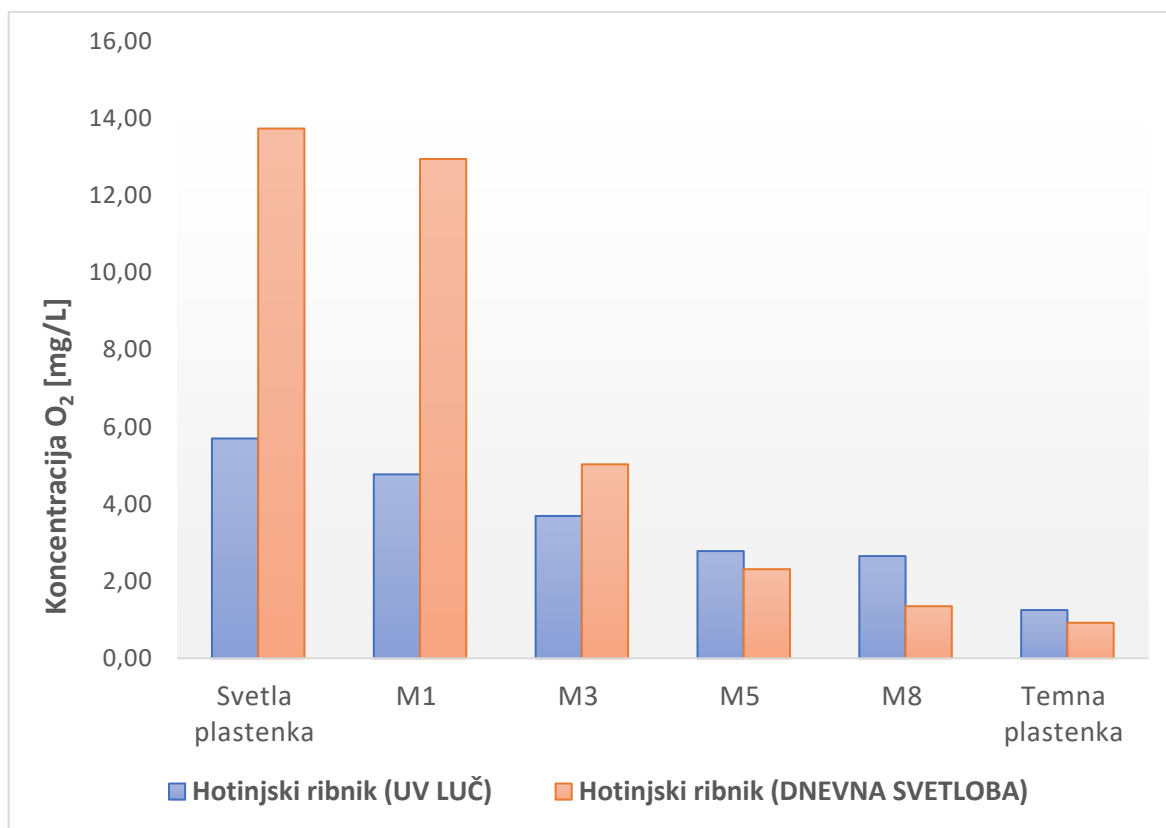
4.1.2 Temperaturni razpon 22-27°C

Meritve v preliminarnem eksperimentu so prikazale precej nenavadne rezultate pri koncentraciji kisika v svetlobno prepustnih plastenkah pod UV-lučjo, zato smo se odločili, da eno izmed paralelk postavimo na okensko polico in drugo pustimo pod UV-lučjo. K vzorcema Velenjskega in Perniškega jezera smo dodali še vzorec Hotinjskega ribnika. Meritve v evtrofnih vodnih telesih na sobni svetlobi so postale precej bolj smiselne in lahko smo ocenili, da bo eksperiment po navodilih proizvajalca učinkovit.

Preglednica 3: Koncentracije kisika v prvem eksperimentalnem sklopu pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi

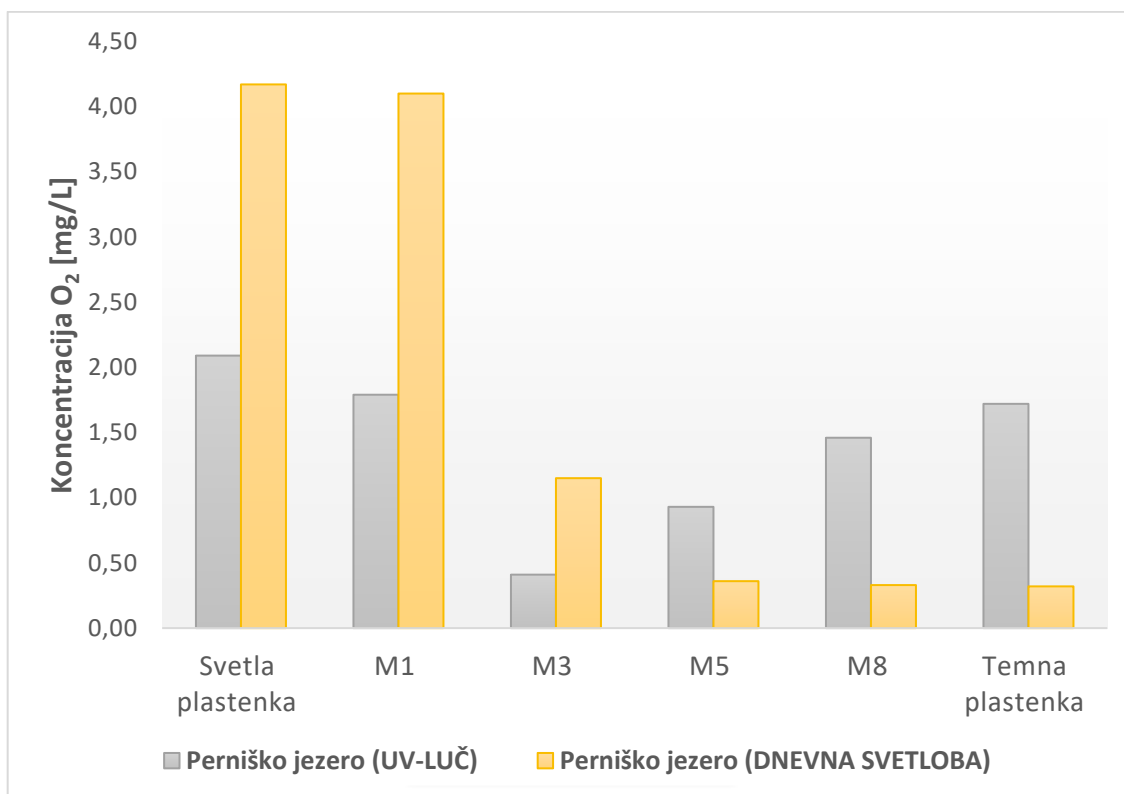
	VELENJSKO JEZERO	PERNIŠKO JEZERO	HOTINJSKI RIBNIK
	T = 22 - 27 °C		
Temp. vode [°C]	25,3	26,8	26,8
O₂ [mg/L]	8,36	9,13	10,98
Po 24 URAH			
UV-LUČ			
svetla plastenka	7,09	2,14	6,83
svetla plastenka	7,18	2,09	7,02
M1	6,94	1,79	6,19
M3	6,78	0,41	3,26
M5	6,76	0,93	1,83
M8	6,62	1,46	2,03
temna plastenka	6,4	1,72	0,75
DNEVNA SVETLOBA			
svetla plastenka	7,13	4,33	13,95
svetla plastenka	7,22	4,17	13,74
M1	7,01	4,1	12,95
M3	6,89	1,15	5,03
M5	6,73	0,36	2,31
M8	6,89	0,33	1,35
temna plastenka	6,32	0,32	0,92

Na podlagi Preglednice 3 lahko razberemo, da je po 24-urnem eksperimentu najvišja koncentracija raztopljenega kisika v vzorcih Hotinjskega ribnika: 13,95 mg/L (plastenka na dnevni svetlobi). Opazimo lahko, da je koncentracija raztopljenega kisika nizka v Perniškem jezeru (4,33 mg/L) v primerjavi z vzorci odvzetimi v preliminarnem eksperimentu (Preglednica 2 – sobna svetloba).



Slika 18: Koncentracija raztopljenega kisika v Hotinjskem ribniku v prvem eksperimentalnem setu meritev pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi

Slika 18 nam prikazuje razlike med koncentracijami raztopljenega kisika v Hotinjskem ribniku v prvem temperaturnem razponu v vzorcih pod UV-lučjo in vzorcih na sobni svetlobi. Razlike med vzorci pod UV-lučjo in sobno svetlobo so veliki. Razlika je najbolj očitna v svetlih plastenkah pod UV-lučjo in plastenkah na dnevni svetlobi. Koncentracija kisika v svetli plastenki na dnevni svetlobi znaša 13,95 mg/L, medtem ko je vrednost kisika v svetli plastenki pod UV-lučjo 7,02 mg/L. Opazimo lahko, da se koncentracija v svetli plastenki na dnevni svetlobi strmo spusti, ko zmanjšamo dostopnost svetlobe le za 10% (M3): 5,03 mg/L.



Slika 19: Koncentracija raztopljenega kisika v Perniškem jezeru v prvem eksperimentalnem setu meritev pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi

Slika 19 prikazuje koncentracije raztopljenega kisika v Perniškem jezeru v prvem temperaturnem razponu. Razlike med vzorci pod UV-lučjo in sobno svetlobo so velike. Razlika je najbolj očitna v svetlih plastenkah pod UV-lučjo in plastenkah na dnevni svetlobi. Koncentracija kisika v svetli plastenki na dnevni svetlobi znaša 4,33 mg/L, medtem ko je vrednost kisika v svetli plastenki pod UV-lučjo 2,14 mg/L. Opazimo lahko, da se koncentracija v svetli plastenki na dnevni svetlobi strmo spusti, ko zmanjšamo dostopnost svetlobe le za 10% (M3) : 1,15mg/L.

Po izmerjenih koncentracijah kisika smo izračunali stopnjo respiracije, NPP in BPP po ustreznih enačbah 4, 5 in 6 (poglavje 3.2.).

Preglednica 4: Rezultati stopnje respiracije, NPP in BPP v prvem eksperimentalnem sklopu

Vodno telo	Stopnja respiracije [mg/L/h]	Bruto primarna produktivnost (BPP) [mg/L/h]	Neto primarna produktivnost (NPP) [mg/L/h]
T = 22 - 27 °C			
UV-LUČ			
VELENJSKO JEZERO	0,082	0,029	-0,053
PERNIŠKO JEZERO	0,182	0,073	-0,109
HOTINJSKI RIBNIK	0,405	0,185	-0,22
DNEVNA SVETLOBA			
VELENJSKO JEZERO	0,069	0,021	-0,048
PERNIŠKO JEZERO	0,367	0,16	-0,207
HOTINJSKI RIBNIK	0,419	0,534	0,115

Opazimo lahko, da je neto primarna produktivnost v Perniškem jezeru prikazana z negativnim predznakom: -0,207 mg/L/h (Preglednica 4). Vrednost začetne koncentracije izmerjenega kisika je bila večja (9,13 mg/L/h) kot koncentracija kisika po 24 urah (v prosojni plastenki) – 4,33mg/L/h, kar po enačbi za izračun neto primarne produkcije rezultira v negativnem predznaku. Če pogledamo vrednosti BPK (Poglavje 4.2.), opazimo, da je bila v tem času količina kisika, potrebna za razgradnjo organskih snovi v vodnem telesu, precej visoka (50,2 mg/L). Najvišjo vrednost neto primarne produktivnosti v prvem temperaturnem razponu smo zabeležili v Hotinjskem ribniku (0,115 mg/L/h).

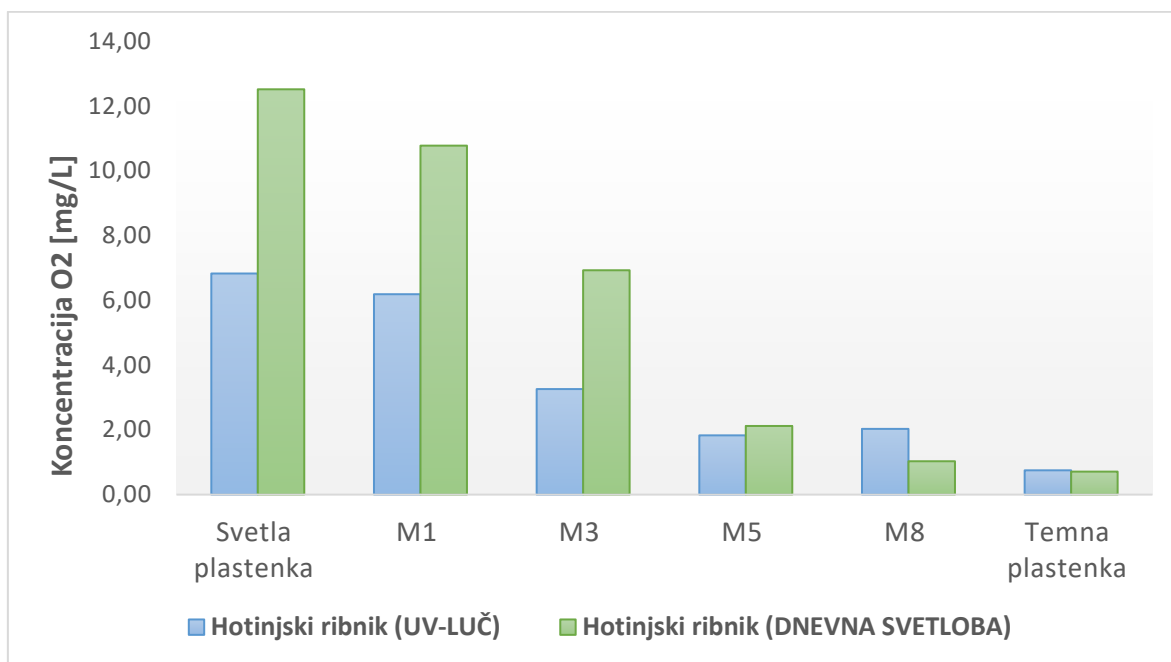
4.1.3 Temperaturni razpon 27-35°C

V drugem temperaturnem razponu (Preglednica 5) se je izkazalo, da so največje koncentracije kisika po 24 urah v Perniškem jezeru (17,34 mg/L), sledi pa Hotinjski ribnik (12,52 mg/L). Upoštevali smo koncentracije merjenja v plastenkah, izpostavljenih dnevni svetlobi.

Preglednica 5: Koncentracije kisika v drugem eksperimentalnem sklopu pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi

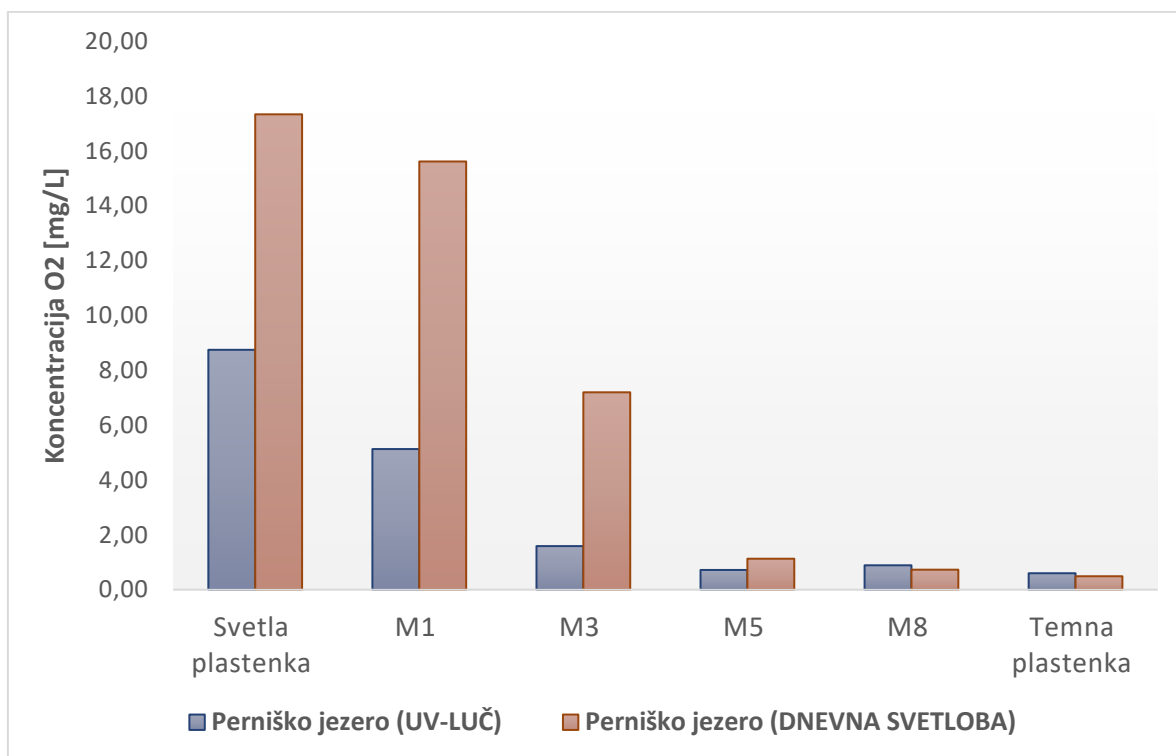
	VELENJSKO JEZERO	PERNIŠKO JEZERO	HOTINJSKI RIBNIK
T = 27 - 35 °C			
Temp. vode [°C]	24,3	24,5	24,8
O₂ [mg/L]	7,81	5,34	9,43
Po 24 URAH			
UV-LUČ			
svetla plastenka	6,89	8,58	6,61
svetla plastenka	7,01	8,75	6,83
M1	6,72	5,13	6,19
M3	6,3	1,59	3,26
M5	6,55	0,72	1,83
M8	6,43	0,89	2,03
temna plastenka	6,29	0,6	0,75
DNEVNA SVETLOBA			
svetla plastenka	6,38	17,13	12,39
svetla plastenka	6,29	17,34	12,52
M1	6	15,62	10,78
M3	6,41	7,2	6,93
M5	6,48	1,13	2,12
M8	6,33	0,73	1,03
temna plastenka	6,34	0,49	0,71

Tudi v tem eksperimentu se je pokazalo, da izbrana UV-lučka ni povsem neučinkovita, saj je bila koncentracija v primeru Perniškega jezera (svetla plastenka pod UV-lučjo) višja kot začetna vrednost (Preglednica 5). Upoštevati pa moramo dejstvo, da je bila začetna vrednost kisika v jezeru dokaj nizka. V primerjavi s plastenko na sobni svetlobi je koncentracija kisika v plastenki pod UV-lučjo še vedno nižja za 49,53%.



Slika 20: Koncentracija raztopljenega kisika v Hotinjskem ribniku v drugem eksperimentalnem setu meritev pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi

Slika 20 prikazuje koncentracije raztopljenega kisika v Hotinjskem ribniku v drugem temperaturnem razponu. Razlike med vzorci pod UV-lučjo in sobno svetlobo so veliki. Razlika je najbolj očitna v svetlih plastenkah pod UV-lučjo in svetlih plastenkah na dnevni svetlobi. Koncentracija kisika v svetli plastenki na dnevni svetlobi znaša 12,39 mg/L, medtem ko je vrednost kisika v svetli plastenki pod UV-lučjo 6,83 mg/L. Opazimo lahko, da se koncentracija v svetli plastenki na dnevni svetlobi strmo spusti, ko zmanjšamo dostopnost svetlobe le za 10% (M3): 6,93 mg/L).



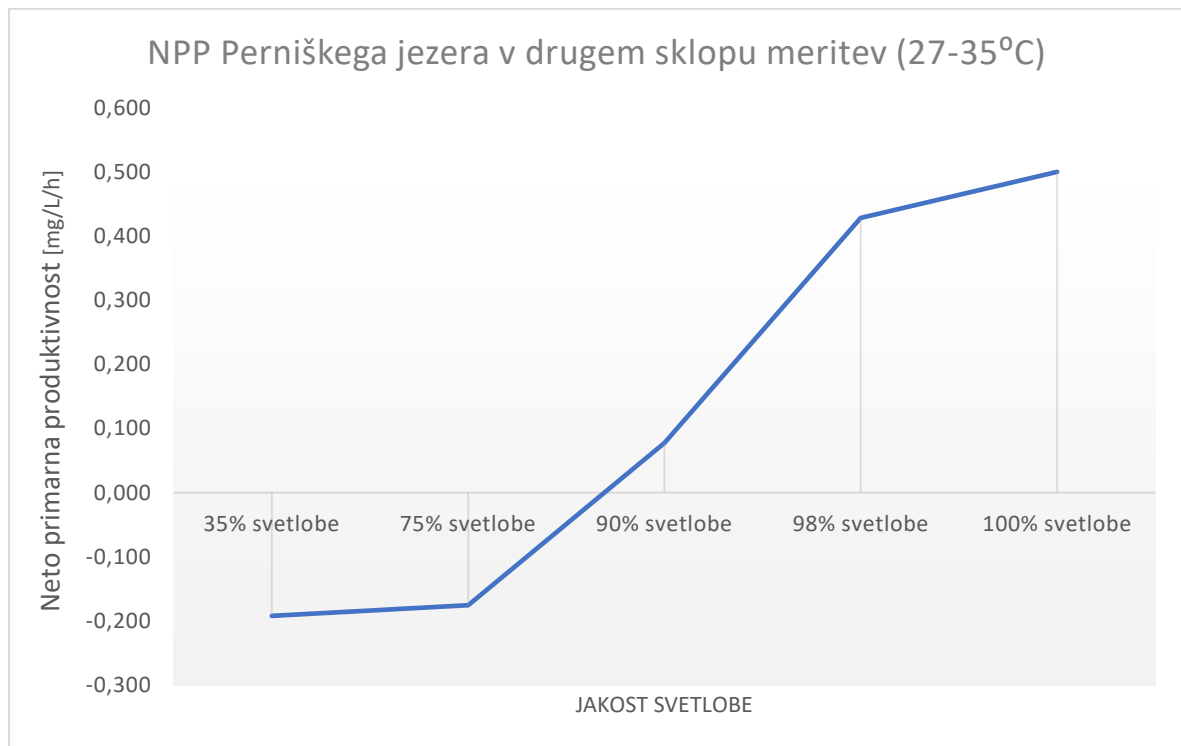
Slika 21: Koncentracija raztopljenega kisika v Perniškem jezeru v drugem eksperimentalnem setu meritev pod UV-lučjo in na dnevni svetlobi

Slika 21 prikazuje koncentracije raztopljenega kisika v Perniškem jezeru v drugem temperaturnem razponu. Razlike med vzorci pod UV-lučjo in sobno svetlobo so veliki. Razlika je najbolj očitna v svetlih platenkah pod UV-lučjo in svetlih platenkah na dnevni svetlobi. Koncentracija kisika v svetli platenki na dnevni svetlobi znaša 17,13 mg/L, medtem ko je vrednost kisika v svetli platenki pod UV-lučjo 8,75 mg/L. Opazimo lahko, da se koncentracija v svetli platenki na dnevni svetlobi strmo spusti, ko zmanjšamo dostopnost svetlobe le za 10% (M3): 7,20 mg/L.

Preglednica 6: Rezultati stopnje respiracije, NPP in BPP v drugem eksperimentalnem sklopu

Vodno telo	Stopnja respiracije [mg/L/h]	Bruto primarna produktivnost (BPP) [mg/L/h]	Neto primarna produktivnost (NPP) [mg/L/h]
T = 27 - 35 °C			
UV-LUČ			
VELENJSKO JEZERO	0,063	0,03	-0,033
PERNIŠKO JEZERO	-0,198	0,34	0,142
HOTINJSKI RIBNIK	0,362	0,253	-0,108
DNEVNA SVETLOBA			
VELENJSKO JEZERO	0,061	-0,002	-0,063
PERNIŠKO JEZERO	-0,202	0,702	0,500
HOTINJSKI RIBNIK	0,363	0,492	0,129

Perniško jezero in Hotinjski ribnik imata evτροφne značilnosti in sta se tako izkazala za najprimernejša pri raziskovanju primarne produktivnosti vodnih teles v našem primeru (Preglednica 6). V drugem temperaturnem razponu znaša neto primarna produktivnost Perniškega jezera 0,500 mg/L/h. Neto primarna produktivnost Hotinjskega ribnika znaša 0,129 mg/L/h. Dostopnost hranil omogoča rast in razmnoževanje avtotrofnih organizmov, ti pa nudijo potrebno energijo za ostale trofične sloje.



Slika 22: Neto primarna produkcija v Perniškem jezeru v drugem temperaturnem razponu v odvisnosti od jakosti svetlobe

Kot je razvidno iz zgornjega grafa (Slika 22), jakost svetlobe neizpodbitno vpliva na fotosintetsko sposobnost avtotrofonih organizmov v Perniškem jezeru. Že pri 10% zmanjšanju jakosti svetlobnega valovanja se neto primarna produkcija zmanjša za natanko 84,4%. Ko smo svetlobno valovanje zmanjšali za 25%, prirastek biomase izgine. Porabi se več energije za respiracijo in razgradnjo, kot se je proizvede s fotosintezo.

Največji prirastek biomase oz. najvišjo vrednost neto primarne produktivnosti v drugem temperaturnem razponu smo zasledili v Perniškem jezeru. V Hotinjskem ribniku je neto primarna produktivnost manjša za 74,2%.

4.2 Fizikalno-kemijske lastnosti vode

Poleg meritev raztopljenega kisika, ki nas je v raziskovanju najbolj zanimal, smo izmerili tudi druge fizikalno-kemijske lastnosti vodnih teles, da bi dobili širši vpogled v lastnosti posameznega vodnega telesa. Preglednica 7 prikazuje meritve teh lastnosti v prvem temperaturnem razponu (22–27°C), Preglednica 8 pa meritve v drugem temperaturnem razponu (27–35°C).

Preglednica 7: Fizikalno-kemijske lastnosti vzorcev v prvem temperaturnem razponu 22-27 °C

	PESNICA	PERNIŠKO JEZERO	VELENJSKO JEZERO	PAKA	PERNIŠKO JEZERO	HOTINJSKI RIBNIK
Temp.razpon [°C]	22-27	22-27	22-27	22-27	22-27	22-27
Temp.vode [°C]	19,5	24,4	22,4	19,5	27,5	26,7
pH	8,07	8,35	8,43	8,60	8,33	8,87
El.prevodnost [μ S/cm]	286,8	260,5	279,4	279,6	248,6	243,2
Nitrati [mg/L]	5,01	0,678 (PMO)	0,632 (PMO)	4,37	0,811 (PMO)	2,11
Fosfati [mg/L]	0,091 (PMO)	0,038 (PMO)	0,019 (PMO)	0,035 (PMO)	0,095 (PMO)	2,33

* PMO – pod merilnim območjem

V tem poglavju bomo nekoliko izpostavili vsebnosti nitratov in fosfatov v obravnavanih vzorcih. V prvem sklopu meritev lahko opazimo, da so vrednosti nitratov višje v obeh rekah, Pesnici (5,01mg/L), Paki (4,37mg/L) in v Hotinjskem ribniku (2,11mg/L). V Hotinjskem ribniku smo prav tako zaznali povišane koncentracije fosfatov (2,33mg/L) (Preglednica 7).

Presenetljivo je, da so bile koncentracije nitratov in fosfatov v Perniškem jezeru zelo nizke (PMO – pod merilnim območjem). Vrednosti se tudi v drugem sklopu meritev pri Perniškem jezeru niso spremenile (Preglednica 8).

Preglednica 8: Fizikalno-kemijski parametri vzorcev v drugem temperaturnem razponu 27-35 °C

	PERNIŠKO JEZERO	HOTINJSKI RIBNIK	VELENJSKO JEZERO
Datum	19.7	19.7	20.7
Temp. razpon [°C]	27-35	27-35	27-35
Temp. vode [°C]	25,5	26,3	26,4
pH	7,81	9,30	8,18
El. prevodnost [μS/cm]	246,6	232,2	261,3
Nitrati [mg/L]	0,978 (PMO)	0,998 (PMO)	0,441 (PMO)
Fosfati [mg/L]	0,098 (PMO)	0,097 (PMO)	0,013 (PMO)

Preglednica 9 prikazuje izmerjene vrednosti BPK5 v vseh obravnavanih vodnih telesih. Končni rezultat predstavlja povprečje dveh paralelnih meritev. Kot je razvidno iz preglednice 9, je v okviru prvega sklopa meritev (20.6.) nekoliko višja vrednost pri Perniškem jezeru (50,2 mg/L) in Hotinjskem ribniku (35,35 mg/L). V drugem sklopu meritev je BPK v Hotinjskem ribniku (32,5 mg/L) večja kot v Perniškem jezeru (16,6 mg/L).

Preglednica 9: BPK5 vrednosti v vseh vzorcih

Vodno telo	Datum	Količina vzorca [ml]	BPK5 [mg/L]	Povprečje BPK5 [mg/L]
Pesnica	13.6.	432	6,7 7,5	7,1
Perniško jezero	13.6.	432	12,4 13,3	12,85
Velenjsko jezero	14.6	432	2,0 1,1	1,55
Paka	14.6	432	0,8 0,4	0,6
Perniško jezero	20.6	250	55,4 45	50,2
Hotinjsko jezero	20.6	250	35 35,7	35,35
Perniško jezero	19.7	365	16,3 16,9	16,6
Hotinjsko jezero	19.7	365	31 34	32,5

5 SKLEPI

Medtem ko primarna produktivnost prispeva k proizvodnji kisika podnevi, lahko ponoči in na lokacijah s prekomerno razgradnjo organske snovi povzroči pomanjkanje kisika. Mikroorganizmi razgrajujejo organske snovi in pri tem porabljajo kisik. Posledica tega so lahko nizke ravni kisika, ki so škodljive za številne vodne vrste, kar lahko povzroči pogin rib in druga ekološka neravnovesja.

V okviru diplomskega dela smo spremljali primarno produktivnost različnih vodnih teles v izbranem obdobju pomlad-poletje, ki smo ga razdelili na dva temperaturna razpona – 22-27 °C in 27-35 °C. Ugotavljali smo ustreznosti metode »temna-svetla steklenica« proizvajalca Vernier in iskali optimalne pogoje za izvedbo eksperimenta. Le-ti so bili podlaga za pripravo predloga terensko-laboratorijske vaje za študente (Priloga 1).

Rezultati so zbrani v preglednici 10.

Preglednica 10: Rezultati vrednosti BPP, NPP in stopnje respiracije v obeh temperaturnih razponih

Vodno telo	Temp. območje [°C]	Stopnja respiracije [mg/L/h]	Bruto primarna produktivnost (BPP) [mg/L/h]	Neto primarna produktivnost (NPP) [mg/L/h]
UV-LUČ				
VELENJSKO JEZERO	22-27	0,082	0,029	-0,053
PERNIŠKO JEZERO	22-27	0,182	0,073	-0,109
HOTINJSKI RIBNIK	22-27	0,405	0,185	-0,22
VELENJSKO JEZERO	27-35	0,063	0,03	-0,033
PERNIŠKO JEZERO	27-35	-0,198	0,34	0,142
HOTINJSKI RIBNIK	27-35	0,362	0,253	-0,108
DNEVNA SVETLOBA				
VELENJSKO JEZERO	22-27	0,069	0,021	-0,048
PERNIŠKO JEZERO	22-27	0,367	0,16	-0,207
HOTINJSKI RIBNIK	22-27	0,419	0,534	0,115
VELENJSKO JEZERO	27-35	0,061	-0,002	-0,063
PERNIŠKO JEZERO	27-35	-0,202	0,702	0,500
HOTINJSKI RIBNIK	27-35	0,363	0,492	0,129

Pri našem delu smo na podlagi prvega sklopa meritev ugotovili, da je kontrast oz. izrazita razlika koncentracije kisika med svetlobno prepustno plastenko, ki je bila pod lučko, in svetlobno prepustno plastenko na dnevni svetlobi, precej velik. Pod UV-lučjo, ki zagotavlja 24-urno svetlobo smo pričakovali znatno večjo koncentracijo kisika kot v vzorcih na dnevnih svetlobi (približno 10 ur dnevne svetlobe), vendar temu ni bilo tako. Iz tega razloga smo se odločili, da bomo poskus izvedli nekoliko spremenjeno, kot smo si zamislili na začetku. Na podlagi te spremenjene metode smo ugotovili, da UV-luč, ki spodbuja fotosintezo, ni primerna za izvajanje eksperimenta (ker ne posnema jakosti dnevne svetlobe). Na podlagi vseh meritev primarne produkcije skozi oba temperaturna razpona (Preglednica 10) bomo lažje interpretirali rezultate.

Opravljeno raziskovalno delo nam torej omogoča sledečo interpretacijo naših izhodiščnih hipotez:

HIPOTEZA 1 (*Največjo primarno produktivnost bomo v vseh izbranih vodnih telesih izmerili v višjem temperaturnem razponu med 27-35°C*) se je izkazala za pravilno in jo lahko potrdimo, saj je po meritvah razvidno, da je neto primarna produktivnost večja v drugem temperaturnem razponu (27-35°C). Dobljen rezultat je logičen, saj dostop svetlobe, torej ugodne temperaturne razmere, vzpodbujajo rast fotosintetskih organizmov. Neto primarna produktivnost je v Perniškem jezeru v drugem temperaturnem razponu (0,500 mg/L/h) večja kot v prvem temperaturnem razponu (-0,207mg/L/h). Enako velja za Hotinjski ribnik, kjer znaša NPP v drugem temperaturnem razponu 0,129 mg/L/h, v prvem pa 0,115 mg/L/h.

HIPOTEZO 2 (*Primarna produktivnost v Perniškem jezeru je večja kot v Velenjskem jezeru, prav tako je večja v reki Pesnici v primerjavi z reko Pako*) lahko glede na meritve in rezultate razdelimo na dva dela. V prvem delu lahko hipotezo potrdimo, saj je primarna produktivnost večja v Perniškem kot v Velenjskem jezeru. Jezeri imata povsem drugačne lastnosti, kar se odraža v rezultatih v primarni produktivnosti. Velenjsko jezero ima oligotrofne značilnosti, kar pomeni, da je dostopnost hranil, še posebej fosforja neprimerno manjša kot v Perniškem jezeru, ki ima evtrofne značilnosti.

Drugi del hipoteze ne moremo ovrednotiti, saj je z danim eksperimentom ni bilo mogoče ne potrditi in ne ovreči. Ugotavljamo, da uporabljena metoda bodisi ni primerna za ugotavljanje primarne produkcije tekočih voda (saj ne upošteva še mnogo drugih dejavnikov) ali pa bi moral biti časovni razpon merjenja veliko daljši. Metoda »svetla/ temna steklenica« se je pokazala kot primerna metoda za merjenje primarne produktivnosti v stoječih sladkih vodah.

Zaključimo lahko, da je eksperiment z metodo »svetla/temna steklenica« proizvajalca Vernier najbolj uporaben pri merjenju primarne produktivnosti v stoječih vodah - jezerih ter v okviru naravnega dnevnega ciklusa. Položaj plastenk na dostopnost svetlobe skozi mrežice ne vpliva, prav tako se je začetni izbran svetlobni vir (UV-luč) izkazal za neustreznega.

V nadaljevanju bi lahko eksperiment nadgradili s testiranjem drugih virov svetlobe, ki pa bi se morda izkazali za bolj ustrezne.

V kolikor bi želeli bolj podrobno analizo in rezultate danega eksperimenta, bi bilo v prihodnje smiselno vključiti še meritve motnosti posameznega vodnega telesa. Kot smo že poudarili, je jakost svetlobe eden izmed najbolj pomembnih faktorjev, ko pride do produktivnosti določenega sistema.

6 POVZETEK

Diplomsko delo raziskuje in preučuje primarno produktivnost nekaterih vodnih teles na izbranih lokacijah v Sloveniji. Povzema informacije o kisiku, njegovem kroženju, pomembnosti kroženja vode in o razvoju fotosinteze, zaradi katere se je razvila atmosfera, ki lahko vzdržuje procese življenja, kot ga poznamo danes. Delo postavlja v ospredje razumevanje primarne produkcije in metode, ki jih uporabljamo za njeno določitev, to je metoda »svetla/temna steklenica« proizvajalca Vernier. Prav tako so opisani faktorji, ki lahko povzročijo omejitve primarne produkcije v površinskih vodah.

Periodično merjenje primarne produktivnosti vodnih ekosistemov je nadvse pomembno iz več razlogov. Eden bolj pomembnih je ta, da vrednosti nakazujejo zdravje ekosistema. Vodni ekosistemi podpirajo kompleksne prehranjevalne mreže. Primarna produktivnost je temelj teh prehranjevalnih spletov z zagotavljanjem energije in organske snovi za druge organizme. Merjenje primarne produktivnosti nam pomaga razumeti razpoložljivost energije in hranil za višje trofične ravni. Po drugi strani pa so meritve bistvene za spremljanje kakovosti vode in ocenjevanje ravni onesnaženosti v vodnih sistemih.

Drugi del diplomskega dela predstavlja terensko in laboratorijsko analizo zastavljenih vodnih teles. Pomembno je bilo spremljanje temperature ozračja, saj smo določili dva temperaturna razpona za merjenje primarne produktivnosti. Na terenu so bili izmerjeni fizikalno-kemijski parametri (temperatura vode, pH, električna vrednost in koncentracija kisika). V laboratoriju smo odvzeti vzorec razdelili v dve paralelki, kjer smo eno položili pod fotosintetsko UV-lučjo, drugo pa postavili na okensko polico. V okviru laboratorijskega dela smo spektrofotometrično določili tudi vsebnosti nitratov in fosfatov s pomočjo kivetnih testov ter določili vrednosti BPK5.

Na podlagi izvedenega poskusa in meritev lahko trdimo, da je največja primarna produktivnost v evtrofnih vodnih telesih – v Perniškem jezeru in Hotinjskem ribniku. Ugotovljena je bila tudi višja primarna produktivnost v drugem temperaturnem razponu (27-35 °C). Pomembna ugotovitev se nanaša tudi na ustreznost fotosintetske luči, ki smo jo želeli v eksperimentu uporabiti. Na podlagi meritev smo ugotovili, da izbrana UV-luč ni ustrezna, saj so bile koncentracije raztopljenega kisika v paralelki, izpostavljeni dnevni svetlobi, neprimerno višje (v nekaterih primerih več kot 100 %).

SUMMARY

The diploma thesis investigates and examines the primary productivity of certain water bodies in Slovenia. It summarizes information about oxygen, its cycling, the importance of water cycling, and the development of photosynthesis, which led to the formation of an atmosphere capable of supporting life processes as we know them today. The work focuses on understanding primary production and the methods used to determine it. It also describes factors that can limit primary production in surface waters.

Periodic measurement of the primary productivity of aquatic ecosystems is highly important for several reasons. One of the most significant reasons is that the values indicate the health of the ecosystem. Aquatic ecosystems support complex food webs, and primary productivity forms the foundation of these food webs by providing energy and organic matter for other organisms. Measuring primary productivity helps us understand the availability of energy and nutrients for higher trophic levels. On the other hand, these measurements are essential for monitoring water quality and assessing pollution levels in water systems.

The second part of the diploma thesis presents field and laboratory analysis of the selected water bodies. Monitoring the air temperature was important as we had defined two temperature groups. In the field, we measured physicochemical parameters (water temperature, pH, electrical conductivity, and oxygen concentration). In the laboratory, we divided the collected water samples into two sets, placing one set under photosynthetic light and the other on a windowsill. In the laboratory work, we also used spectrophotometry to determine the concentrations of nitrates and phosphates using test kits.

Based on the conducted experiment and measurements, we can conclude that the highest primary productivity was found in Pernica lake and Hotinja pond. Higher primary productivity was also observed in the second temperature group between 27-35°C. An important finding relates to the suitability of the photosynthetic light used in one of the sets. Based on the measurements, we found that the light was not appropriate, as the concentrations of dissolved oxygen in the set exposed to natural daylight were significantly higher (in some cases more than 100%) compared to the photosynthetic light-exposed set.

7 VIRI IN LITERATURA

- 1) Ali, B., A., & Mishra, A. (2022). Effects of dissolved oxygen concentration on freshwater fish: A review. 10, 113–127. <https://doi.org/10.22271/fish.2022.v10.i4b.2693>
- 2) Arora, P. (2017). Physical, Chemical and Biological Characteristics of Water (e Content Module).
- 3) Balasubramanian, A. (2011, julij 4). Water Quality Parameters.
- 4) Bubik, A. (2023). Navodila za uporabo OxiTop
- 5) Dickinson, G. in Murphy, K. (2007). Ecosystems: second edition. New York: Routledge
- 6) Häder, D. (2022). Photosynthesis in Plants and Algae. *Anticancer Research*, 42(10), 5035. <https://doi.org/10.21873/anticancer.16012>
- 7) Hassan, O., N. (2020). Water Quality Parameters. V K. Summers (Ur.), *Water Quality—Science, Assessments and Policy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89657>
- 8) Howarth, R. in Michaels, A. (2000). The Measurement of Primary Production in Aquatic Ecosystems. 10.1007/978-1-4612-1224-9_6.
- 9) Huang, J., Liu, X., He, Y., Shen, S., Hou, Z., Li, S., Li, C., Yao, L., in Huang, J. (2021). The Oxygen Cycle and a Habitable Earth. *Science China Earth Science*. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9747-1>
- 10) Jones, A., M. (1997). Environmental Biology. New York, Routledge
- 11) K., V., Gururaja & N., A., Aravind. (2006). Inland Waters Biodiversity.
- 12) Kasting, J., F. in Canfield D E. (2012). The Global Oxygen Cycle. In: Knoll A H, Canfield D E, Konhauser K O, eds. *Fundamentals of Geobiology*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. 93–104, doi: 10.1002/9781118280874.ch7
- 13) Kolar, J., Rismal, M., Skobrne, P., Vidic, J. in Vuk, D. (1992): Kako deluje?: Človekovo okolje, 1.ponatis, Ljubljana, Tehniška založba Slovenije
- 14) Martin, E. in Hine, R. (2008). A Dictionary of Biology. Oxford: Oxford University Press.
- 15) Nursall, J. Oxygen as a Prerequisite to the Origin of the Metazoa. *Nature* 183, 1170–1172 (1959). <https://doi.org/10.1038/1831170b>
- 16) Oki, T., Entekhabi, D. in Harrold, T. (2004). The global water cycle. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 225–237. <https://doi.org/10.1029/150GM18>
- 17) Olson, K. (2012). Mitochondrial adaptations to utilize hydrogen sulfide for energy and signaling. *Journal of comparative physiology. B, Biochemical, systemic, and environmental physiology*. 182. 881-97. 10.1007/s00360-012-0654-y.
- 18) O'Neill, P. (1998). Environmental Chemistry. UK, Thomson Science
- 19) Reinhard, C. T., Planavsky, N. J., Olson, S. L., Lyons, T. W., & Erwin, D. H. (2016). Earth's oxygen cycle and the evolution of animal life. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(32), 8933–8938. <https://doi.org/10.1073/pnas.1521544113>
- 20) Seiler, K.-P in Gat, J., R. (2007). The Water Cycle. 10.1007/978-1-4020-5306-1_2.
- 21) Shah, C. (2017). Which Physical, Chemical and Biological Parameters of water determine its quality?. 10.13140/RG.2.2.29178.90569.
- 22) Smale, D. A., Pessarrodona, A., King, N., Burrows, M. T., Yunnice, A., Vance, T., & Moore, P. (2020). Environmental factors influencing primary productivity of the forest-forming kelp *Laminaria hyperborea* in the northeast Atlantic. *Scientific Reports*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69238-x>

Zupančič, A.: Uporaba eksperimentalnih orodij Vernier pri določanju primarne produktivnosti vodnih teles, diplomsko delo, FVO, Velenje, 2023

- 23) Winfried, L. in Ulrich, S. (2008): Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams, New York: Oxford University Press Inc., <https://doi.org/10.1093/plankt/fbn013>
- 24) Žvanut, S. N. (2015). Ekosistemska biologija: Študijsko gradivo za ekosistemsko biologijo. Velenje: Fakulteta za varstvo okolja

8 PRILOGA

TERENSKA IN LABORATORIJSKA VAJA

Primarna produktivnost vodnih teles

TERENSKI DEL:

Vzorčili boste 3 vodna telesa v dveh različnih temperaturnih območjih; in sicer, med 22-27°C ter 27-35°C. Pri spremljanju temperatur ozračja si boste pomagali z ARSO samodejnimi meteorološkimi postajami za mesti Maribor in Velenje. Vzorci se bodo jemali ob isti uri (pribl. ob 10:00). Vzorčili boste naslednja vodna telesa:

- Perniško jezero
- Hotinjski ribnik
- Velenjsko jezero

Na terenu boste izvedli meritev naslednjih fizikalno-kemijskih parametrov: temperatura vode, pH, električna prevodnost in koncentracija raztopljenega kisika (DO). Za to boste uporabili orodje LabQuest 3 in ustrezne senzorje. Posodo s prostornino 5 L napolnite do vrha z vzorcem in ga odnesite v laboratorij! Na terenski list zapišite vse izmerjene parametre.

LABORATORIJSKI DEL:

Laboratorijsko delo bo zajemalo spremljanje primarne produktivnosti s pomočjo seta za merjenje primarne produktivnosti Vernier, merjenje koncentracije raztopljenega kisika vzorcev z merilnim sistemom Vernier LabQuest3 in določitev nitratov in fosfatov s pomočjo kivetnih testov LCK339 in LCSK349. Meritve in izračun primarne produktivnosti boste izvedli z uporabo metode »svetla/temna steklenica«. Odvzeti volumen vodnega vzorca boste razdelili na dva seta – dve paralelki. Ena paralelka sestavlja 7 plastenk, in sicer:

- 4 plastenke ovijte v mrežice, ki jih najdete v setu Vernier za primarno produktivnost;
- 2 platenki bosta popolnoma svetlobno prepustni (brez mrežic);
- 1 platenki ovijte z aluminijasto folijo, da preprečite dostop svetlobe.

Eno od paralelek boste položili pod fotosintetsko lučko, drugo pa nastavili na okensko polico. Po 24 urah boste izmerili in zapisali vrednosti raztopljenega kisika v obeh paralelkah in izračunali stopnjo respiracije (SR), bruto (BPP) in neto (NPP) vrednosti primarne produktivnosti za vodni posamezni vzorec. Pomagajte si s spodnjimi enačbami:

$$4) \text{ BPP} = \frac{\text{DO (svetla steklenica)} - \text{DO (temna steklenica)}}{\text{čas}} \text{ [mg/L/h]}$$

Zupančič, A.: Uporaba eksperimentalnih orodij Vernier pri določanju primarne produktivnosti vodnih teles, diplomsko delo, FVO, Velenje, 2023

$$5) NPP = \frac{DO(\text{svetla steklenica}) - DO(\text{začetna vrednost})}{\text{čas}} \quad [\text{mg/L/h}]$$

$$6) SR = \frac{DO(\text{temna steklenica}) - DO(\text{začetna vrednost})}{\text{čas}} \quad [\text{mg/L/h}]$$

Ko zaključite s pripravo plastenk in se 24-urni eksperiment prične, je čas za kivetni test nitratov in fosfatov. Vzorce preko filtrirne brizge (5 µm velikost por) prefiltrirajte v čisto posodo, 2-3 potege. V drugo čisto posodo dodajte nefiltrirani vzorec. Nato sledite navodilom za pripravo testa LCK339 in LCK349 na filtriranem in nefiltriranem vzorcu (ne pozabite označiti kivetne!). Po navodilih je potrebno pri LCK349 počakati 15 minut, pri LCK349 pa 10 minut, preden začnete določati koncentracije s spektrofotometrom Hach Lange DR3900.

MOŽNA VPRAŠANJA:

- Kakšna je razlika med bruto in neto primarno produkcijo? Katero od teh vrednosti uporabljamo za izkazovanje produktivnosti vodnega telesa?
- V katerem od izbranih vodnih teles je neto primarna produkcija najvišja?
- Grafično predstavite izračunane vrednosti neto primarne produkcije v odvisnosti od jakosti svetlobe.
- Kako si razlagate negativen rezultat pri izračunani neto primarni produkciji?
- Kateri faktorji vplivajo na primarno produkcijo v jezerih? Naštej vsaj 3.
- Kako motnost vode vpliva na primarno produktivnost?
- Kaj je eutrofikacija? Kako vpliva na primarno produktivnost?

Terenski list:

Slika 23 nam prikazuje primer terenskega lista, ki smo ga izdelali za naše potrebe pri izvajanju terenskih meritev vodnih teles.

TERENSKI LIST (Primarna produkcija)

Vodno telo	Datum, ura odvzema	Temperatura zraka °C	Temperatura vode (mesto vzorčenja) °C	Temperatura vode (v laboratoriju) °C	Raztopljeni O ₂ (DO) (mesto vzorčenja) mg/L	Raztopljeni O ₂ (DO) (v laboratoriju) mg/L	pH	Električna prevodnost μS/cm	Vsebnost nitratov NO ₃ ⁻ mg/L	Vsebnost fosfatov PO ₄ ⁻³ mg/L

Slika 23: Primer terenskega lista

Zupančič, A.: Uporaba eksperimentalnih orodij Vernier pri določanju primarne produktivnosti vodnih teles, diplomsko delo, FVO, Velenje, 2023

Laboratorijski list:

Slika 24 nam prikazuje primer laboratorijskega lista, ki smo ga izdelali v okviru našega eksperimenta. Vanj smo zapisovali meritve koncentracij raztopljenega kisika, na podlagi katerih so bile kasneje izračunane vrednosti primarne produktivnosti.

EKSPERIMENT-Koncentracija raztopljenega kisika O₂ po 24h

Vodno telo	Datum	Temperatura vode °C	Raztopljeni O ₂ (temna stekl.) mg/L	Raztopljeni O ₂ (svetla stekl.) mg/L	Raztopljeni O ₂ (M1) mg/L	Raztopljeni O ₂ (M3) mg/L	Raztopljeni O ₂ (M5) mg/L	Raztopljeni O ₂ (M8) mg/L

Slika 24: Primer laboratorijskega lista