

EKOLOŠKO STANJE POVRŠINSKIH VODA ECOLOGICAL STATUS OF SURFACE WATERS

SPREMLJANJE EKOLOŠKEGA STANJA JEZER NA PODLAGI SPLOŠNIH FIZIKALNO-KEMIJSKIH ELEMENTOV KAKOVOSTI Monitoring of ecological status of lakes based on general physico-chemical quality elements

Nina Štupnikar

Eden od pomembnih okoljskih ciljev Direktive Evropskega Parlamenta in Sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike (v nadaljevanju: vodna direktiva) je doseganje dobrega ekološkega stanja in preprečevanje slabšanja ekološkega stanja površinskih voda na ravni Evropske skupnosti. Z namenom doseganja tega cilja na Agenciji Republike Slovenije za okolje (v nadaljevanju: ARSO) redno in sistematično spremljamo in vrednotimo tudi ekološko stanje vodnih teles jezer v Sloveniji. V skladu z Uredbo o stanju površinskih voda (Uradni list RS, 14/2009, 98/2010, 96/2013, 24/2016), s katero so določila vodne direktive prenesena v slovenski pravni red, ekološko stanje jezer spremljamo in vrednotimo na podlagi bioloških in hidromorfoloških elementov kakovosti, posebnih onesnaževal kot tudi splošnih fizikalno-kemijskih elementov kakovosti. V Republiki Sloveniji smo za spremljanje ekološkega stanja jezer izbrali v preglednici 1 navedene relevantne splošne fizikalno-kemijske parametre, ki odražajo splošne fizikalno-kemijske elemente kakovosti toplotne razmere, kisikove razmere, stanje hranil, prosojnost, slanost in zakisanost v jezerih v skladu z vodno direktivo.

Preglednica 1. Splošni fizikalno-kemijski parametri za spremljanje ekološkega stanja jezer v Sloveniji
Table 1. General physico-chemical parameters for monitoring the ecological status of lakes in Slovenia

Splošni fizikalno-kemijski element kakovosti	Splošni fizikalno-kemijski parameter	Enota
Toplotne razmere	Temperatura vode	°C
Kisikove razmere	Koncentracija v vodi raztopljenega kisika	mg O ₂ /L
	Nasičenost vode s kisikom	%
	Raztopljeni organski ogljik (DOC)	mg C/L
Stanje hranil	Amonij	mg NH ₄ /L
	Nitrat	mg NO ₃ /L
	Celotni dušik	mg N/L
	Celotni fosfor	mg P/L
	Ortofosfat	mg PO ₄ /L
Prosojnost	Secchijeva globina	m
Slanost	Električna prevodnost (25 °C)	µS/cm
Zakisanost	pH	
	m-alkaliteta	m-ekv/L

Vloga splošnih fizikalno-kemijskih elementov kakovosti pri vrednotenju ekološkega stanja jezer

Ekološko stanje je izraz kakovosti zgradbe in delovanja vodnih ekosistemov površinskih voda, vrednotenje ekološkega stanja v skladu z vodno direktivo pa pomeni ugotavljanje spremenjenosti

zgradbe in delovanja vodnega ekosistema v primerjavi z naravnimi – referenčnimi razmerami. To so razmere, pri katerih ni opaziti vpliva človeka ali je ta zelo majhen in ustrezajo zelo dobremu ekološkemu stanju. Glede na ekološko kakovost razvrščamo vodne ekosisteme oz. vodna telesa v 5 razredov kakovosti ekološkega stanja: zelo dobro, dobro, zmerno, slabo ali zelo slabo ekološko stanje. V skladu z vodno direktivo splošne fizikalno-kemijske elemente v povezavi z ostalimi elementi kakovosti upoštevamo pri vrednotenju in razvrščanju vodnih teles v razreda zelo dobro in dobro ekološko stanje, pri čemer upoštevamo pravilo, da najslabši element določi stanje. Za razvrščanje v razred zmerno ekološko stanje pa morajo biti fizikalno-kemijske razmere po opredelitvi skladne z razmerami, ki jih odražajo biološki elementi kakovosti. V preglednici 2 so podane opredelitve ekološke kakovosti za zelo dobro, dobro in zmerno ekološko stanje za splošne fizikalno-kemijske elemente v jezerih.

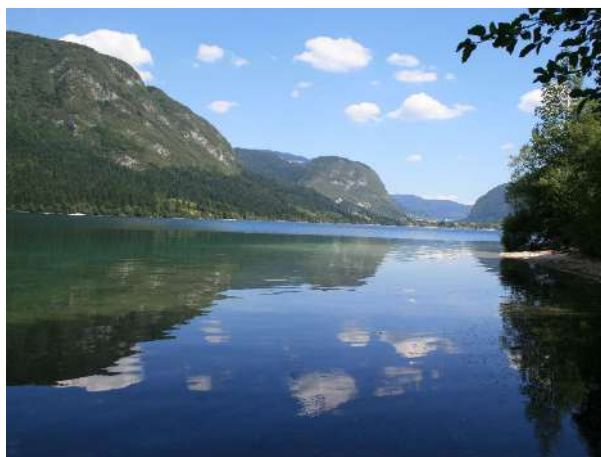
Preglednica 2. Opredelitve splošnih fizikalno-kemijskih elementov kakovosti za zelo dobro, dobro in zmerno ekološko stanje v jezerih

Table 2. Definitions of general physico-chemical quality elements for high, good and moderate ecological status in lakes

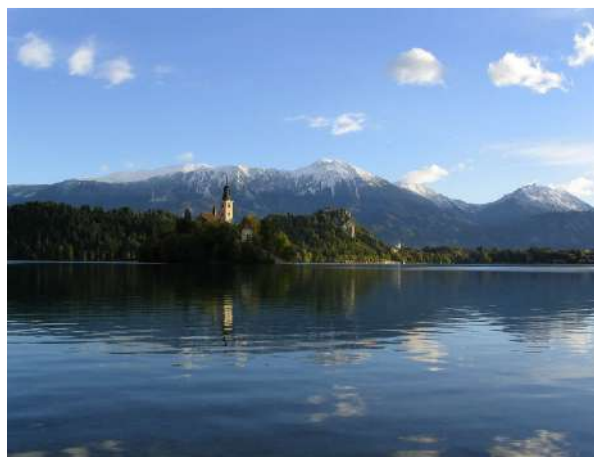
Zelo dobro stanje	Dobro stanje	Zmerno stanje
Vrednosti fizikalno-kemijskih elementov povsem ali skoraj povsem ustrezajo razmeram brez motenj. Koncentracije hranil so v območju, ki ga običajno povezujemo z razmerami brez motenj. Slanost, pH, kisikove razmere, kapaciteta nevtralizacije kislin, prosojnost in temperatura ne kažejo znakov motenj zaradi človekovega vpliva in so v območju, ki ga običajno povezujemo z razmerami brez motenj.	Temperatura, kisikove razmere, pH, kapaciteta nevtralizacije kislin, prosojnost in slanost ne segajo iz območja, ki zagotavlja delovanje ekosistema in doseganje opredeljenih vrednosti za biološke elemente kakovosti. Koncentracije hranil ne presegajo ravni, ki zagotavlja delovanje ekosistema in doseganje opredeljenih vrednosti za biološke elemente kakovosti.	Razmere, skladne z doseganjem opredeljenih vrednosti bioloških elementov kakovosti.

Tipi jezer za vrednotenje ekološkega stanja

Izhodišče vrednotenja ekološkega stanja predstavljajo referenčne razmere vodnega telesa. Ker se referenčne razmere vodnih teles razlikujejo, pri vrednotenju uporabljamo t. i. pristop za tip vodnega telesa značilnih referenčnih razmer, pri katerem vodna telesa najprej razvrstimo po tipih. Na ARSO spremljamo in vrednotimo ekološko stanje 11 vodnih teles jezer s površino večjo od 0,5 km², od katerih sta dve jezeri naravni (sliki 1 in 2), eno umetno, 8 pa je močno preoblikovanih vodnih teles oz. zadrževalnikov. 11 vodnih teles jezer je razvrščenih v 8 različnih tipov jezer, ki so opisani z uporabo deskriptorjev hidroekoregija in bioregija, ki sta jima dodana še deskriptorja povprečna globina in velikost površine jezera (preglednica 3).



Slika 1. Bohinjsko jezero – globoko alpsko jezero
Figure 1. Lake Bohinj – deep alpine lake



Slika 2. Blejsko jezero – globoko predalpsko jezero
Figure 2. Lake Bled - deep prealpine lake

Preglednica 3. Tipi jezer v Sloveniji z deskriptorji
Table 3. Lake types in Slovenia with the descriptors

Ime vodnega telesa	Tip jezera	Ime tipa jezera
VTJ Bohinjsko jezero	J_SI_4_KB-D_>15_1–10	Globoko alpsko jezero
VTJ Blejsko jezero	J_SI_4_PA-D_>15_1–10	Globoko predalpsko jezero
UVT Velenjsko jezero	J_SI_4_PA-D_>15_1–10	Srednje velik, globok zadrževalnik v bioregiji Predalpska hribovja-donavsko porečje
MPVT zadrževalnik Šmartinsko jezero	J_SI_11_PN-zAL_3–15_1–10	Srednje velik, srednje globok zadrževalnik v bioregiji Panonske ravnine z alpskim vplivnim območjem
MPVT zadrževalnik Slivniško jezero	J_SI_11_PN-zAL_3–15_<1	Majhen, srednje globok zadrževalnik v bioregiji Panonske ravnine z alpskim vplivnim območjem
MPVT Perniško jezero	J_SI_11_PN-gric_<3_1–10	Srednje velik, plitev zadrževalnik v bioregiji Panonska gričevja in ravnine
MPVT zadrževalnik Gajševsko jezero	J_SI_11_PN-gric_<3_<1	Majhen, plitev zadrževalnik v bioregiji Panonska gričevja in ravnine
MPVT zadrževalnik Ledavsko jezero	J_SI_11_PN-gric_<3_1–10	Srednje velik, plitev zadrževalnik v bioregiji Panonska gričevja in ravnine
MPVT zadrževalnik Klivnik	J_SI_5_SM-brez_3–15_<1	Majhen, srednje globok zadrževalnik v bioregiji Submediteranska hribovja brez površinskega odtoka
MPVT zadrževalnik Mola	J_SI_5_SM-brez_3–15_<1	Majhen, srednje globok zadrževalnik v bioregiji Submediteranska hribovja brez površinskega odtoka
MPVT zadrževalnik Vogršček	J_SI_3_Vip-Brda_3–15_<1	Majhen, srednje globok zadrževalnik v bioregiji Spodnja vipavska dolina in Brda

LEGENDA:

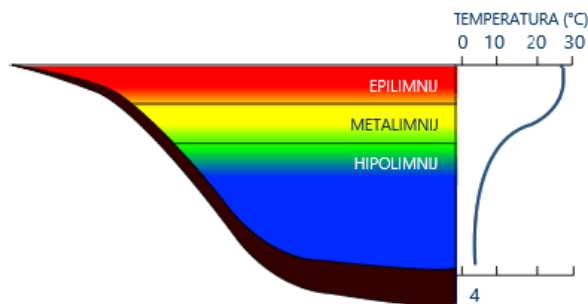
J	jezero	KB-D	Karbonatne Alpe-donavsko porečje
VT	vodno telo	PA-D	Predalpska hribovja-donavsko porečje
UVT	umetno vodno telo	SM-brez	Submediteranska hribovja brez površinskega odtoka
MPVT	močno preoblikovano vodno telo	PN-gric	Panonska gričevja in ravnine
SI	Slovenija	PN-zAL	Panonske ravnine z alpskim vplivnim območjem
3	hidroekoregija Padska nižina	< 3	povprečna globina manjša od 3 m
4	hidroekoregija Alpe	3–15	povprečna globina 3 do 15 m
5	hidroekoregija Dinaridi	> 15	povprečna globina večja od 15 m
11	hidroekoregija Panonska nižina	< 1	velikost površine manjša od 1 km ²
Vip-Brda	Spodnja vipavska dolina in Brda	1–10	velikost površine 1 do 10 km ²

Splošni fizikalno-kemijski element toplotne razmere v jezerih

Toplotne razmere v jezerih so primarno odvisne od podnebnih razmer, med drugim pa nanje vplivajo še pretočnost, izpostavljenost vetrovom in morfologija jezera. Na spremembo temperature v jezerih najpomembneje vpliva neposredna absorpcija sončnega sevanja, v nekoliko manjši meri pa še oddajanje toplote iz usedlin in zraka. Temperaturne spremembe v jezerih zmerno toplega pasu so predvsem sezonske (slika 3). Pozimi, preden se led stali, je temperatura vode po večini vodnega stolpca enaka in je približno 4 °C (pri kateri je voda najgostejša), plast vode tik pod ledom pa je hladnejša s temperaturo blizu 0 °C. Spomladi se zaradi intenzivnejšega sončnega sevanja led stali in površinska voda se segreje. Ko se temperatura in gostota površinske in globinske vode izenačita, je potrebno le malo energije vetra, da se sproži popolno kroženje jezerske vode od površine do dna jezera. Površinska voda se zaradi absorpcije sončnega sevanja nadalje segreva in poleti nastane temperaturna plastovitost vode, ko toplejše (manj goste) plasti vode ležijo nad hladnejšimi (gostejšimi) in voda po celem vodnem stolpcu ne more več krožiti. V dovolj globokih jezerih se oblikujejo 3 razpoznavne plasti (slika 4): epilimnij – zgornja, najtoplejša in dobro premešana plast vode, metalimnij – vmesna plast vode z največjimi spremembami temperature in gostote po globini, ki preprečuje mešanje zgornje in spodnje plasti in hipolimnij – plast hladne vode na dnu jezera. Šele jesensko ohlajanje površinske vode povzroči tonjenje hladne (gostejše) vode ter s tem izpodrivanje spodnje, toplejše vode navzgor. Sproži se jesensko kroženje jezerske vode, ki traja, dokler nima voda od površine pa do dna temperature 4 °C. K mešanju prispevajo še jesenski vetrovi, ki vzvalovijo jezero. Z ohlajanjem ozračja se površinska voda nadalje ohlaja in lahko pozimi zamrzne. Pod ledom se oblikuje temperaturna plastovitost, pri kateri ima večina vode po globini enako temperaturo približno 4 °C in je gostejša in težja od hladnejše in lažje vode s temperaturo 0 °C tik pod ledom (anomalija vode). Jezera s popolnim kroženjem vode, ki zajame cel vodni stolpec, imenujemo holomiktična jezera. Jezera v zmernem pasu z dvakrat letnim popolnim kroženjem vode spomladi in jeseni imenujemo dimiktična jezera.



Slika 3. Letni cikel temperaturne plastovitosti in kroženja vode v dimiktičnem jezeru
Figure 3. Annual cycle of thermal stratification and water circulation in a dimictic lake



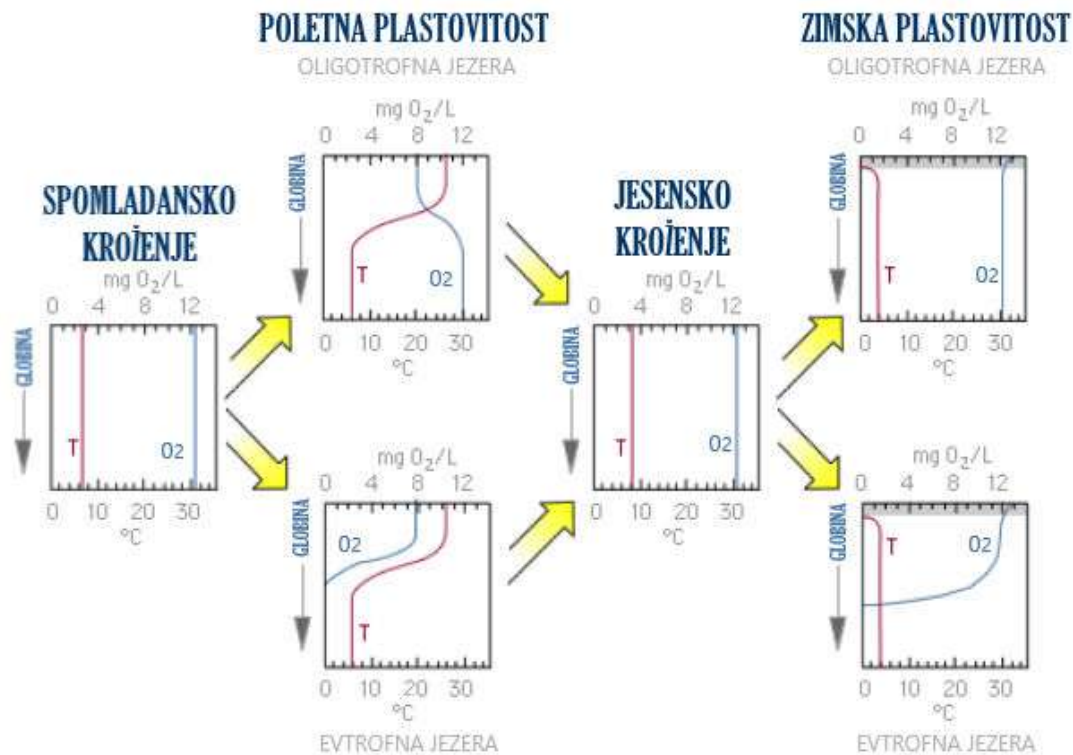
Slika 4. Poletna temperaturna plastovitost jezera z oblikovanim epilimnijem, metalimnijem in hipolimnijem
Figure 4. Summer thermal stratification of a lake into the epilimnion, metalimnion, and hypolimnion

Temperatura vode neposredno vpliva na fizikalne, kemijske in biološke procese v vodnem okolju in je zato ključni ekološki dejavnik v jezerih. Ob zviševanju temperature vode se kemijske reakcije in izhlapevanje pospešijo. Zmanjša se topnost nekaterih plinov v vodi (npr. O₂, CO₂, N₂, CH₄). Tudi fiziološka aktivnost vodnih organizmov je povezana s temperaturo. V toplejši vodi zvišana stopnja respiracije vodi v povečano privzemanje kisika in pospešeno razgradnjo organskih snovi. Zviša se stopnja rasti (najbolj opazna pri bakterijah in fitoplanktonskih organizmih, ki se hitro množijo), zaradi česar se zmanjša prosojnost vode. Makrofiti rastejo hitreje in kadar je na voljo tudi dovolj hranil, se lahko pojavi cvetenje fitoplanktona.

Splošni fizikalno-kemijski element kisikove razmere v jezerih

Vsebnost kisika v vodi je eden bistvenih dejavnikov, ki neposredno vpliva na združbe organizmov v jezerih. Vsebnost kisika je odvisna od fizikalnih, kemijskih in bioloških procesov v vodi. Spreminja se v odvisnosti od temperature in zračnega tlaka, slanosti, turbulence, fotosintezne aktivnosti primarnih producentov in respiracijske aktivnosti organizmov. Z višanjem temperature in slanosti vode se topnost kisika manjša, medtem ko z večanjem turbulence narašča. Čeprav imajo fizikalni in kemijski procesi ključno vlogo pri raztapljanju kisika v vodi, na njegovo končno koncentracijo in razporeditev v vodnem stolpcu bistveno vplivata primarna produkcija rastlin in razgradni procesi bakterij. S fotosintezno aktivnostjo se koncentracija kisika povečuje, medtem ko respiracijska aktivnost organizmov zmanjšuje vsebnost raztopljenega kisika.

V jezerih so spremembe v koncentraciji kisika sezonske in tudi dnevne v odvisnosti od temperature in aktivnosti organizmov. Vertikalna porazdelitev kisika, ki je povezana s sezonskimi temperaturnimi spremembami v jezeru, je odvisna tudi od produktivnosti oz. trofičnega tipa jezera (slika 5). V oligotrofnih jezerih - jezerih z majhnim vnosom hranil in nizko produktivnostjo organskih snovi (npr. Bohinjsko jezero) - je vse leto dovolj kisika od površine pa do dna. Celo ob koncu poletne plastovitosti je nasičenost vode s kisikom v hipolimniju večja od 50 %. V mnogih evtrofnih jezerih - jezerih z visoko vsebnostjo hranil in visoko produktivnostjo organskih snovi (npr. zadrževalniki v vzhodni Sloveniji) - pa zaradi plastovitosti občasno (poleti in pozimi) prihaja do značilnega pomanjkanja kisika v hipolimniju. Nasičenost vode s kisikom pade precej pod 50 % in ob dnu, še posebej v coni izmenjave med usedlinami in vodo, kjer prihaja do intenzivne razgradnje organskih usedlin, se pojavijo anoksične razmere - razmere brez kisika. V dimiktičnih jezerih se vsebnost kisika v globinskih delih obnovi s popolnim spomladanskim in jesenskim kroženjem vode. V meromiktičnih jezerih pa se ob dnu oblikuje stalno ločena plast vode brez kisika - monimolimniji in popolnega kroženja vode po celem vodnem stolpcu ni več. Voda kroži le v zgornji plasti - miksolimniju, medtem ko mešanja vode med zgornjo in spodnjo monimolimnijsko plastjo ni. Primer meromiktičnega jezera v Sloveniji je Velenjsko jezero.



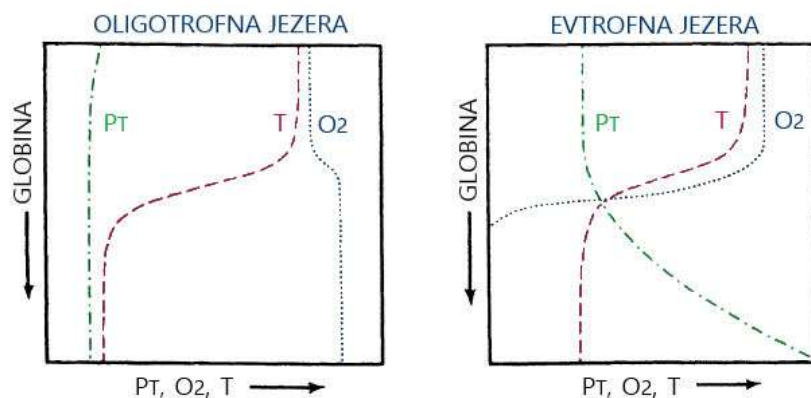
Slika 5. Sezonske spremembe v vertikalni porazdelitvi kisika (O_2) in temperature (T) v oligotrofnih in evtrofnih dimiktičnih jezerih

Figure 5. Seasonal changes in the vertical distribution of oxygen (O_2) and temperature (T) in oligotrophic and eutrophic dimictic lakes

Splošni fizikalno-kemijski element kakovosti stanje hranil v jezerih

Fosfor je bistveno hranilo in omejujoč dejavnik rasti rastlin, vključno s cianobakterijami, od katerega je odvisna primarna produkcija v jezerih. V vodi je fosfor prisoten predvsem vezan v raztopljenih ortofosfatu in polifosfatu ter v trdnih organskih spojinah. Pretvorbe med temi spojinami v jezerih potekajo kontinuirano v odvisnosti od razgradnje in sinteze organskih spojin ter oksidacije anorganskih spojin. Naravni vir fosforja so kamnine, ki vsebujejo fosfor in razgrajene organske snovi. V vodah je fosfor redko prisoten v višjih koncentracijah, predvsem zaradi aktivnega privzemanja primarnih producentov. Povišanje koncentracij fosforja v jezerih povzroči spiranje s kmetijskih površin ter komunalne in industrijske odpadne vode. Ker je fosfor bistvena komponenta kroženja med živo in neživo naravo, je vključen v spremljanje in vrednotenje trofičnega stanja jezer, saj povečane koncentracije fosforja pospešujejo produktivnost alg in eutrofikacijske procese. Zviševanje koncentracij fosforja kot posledica človekove dejavnosti velja za osnovni vzrok eutrofikacije.

Kroženje fosforja v jezerski vodi je odvisno od sezonskih temperaturnih sprememb in od trofičnega tipa jezera. V oligotrofnih jezerih se vsebnost fosforja z globino le malo spreminja (slika 6). Podobno velja v obdobju jesenskega in spomladanskega kroženja vode, ko je porazdelitev fosforja v jezerih po globini bolj ali manj enakomerna. V eutrofnih jezerih med poletno plastovitostjo, ko so v hipolimniju anoksične razmere, se fosfor iz usedlin sprošča in prehaja v plast vode ob dnu jezera, zato so tam njegove koncentracije višje. V epilimniju se vsebnost fosforja manjša, ker ga porabljajo tamkajšnji primarni producenti, vračanje fosforja iz globine pa preprečuje metalimnijska plast (slika 6). Z jesenskim popolnim kroženjem jezerske vode, ko se kisikove zaloge po vodnem stolpcu obnovijo, ponovno pride do vezave fosforja v usedline.



Slika 6. Vertikalna porazdelitev celotnega fosforja (P_T) med plastovitostjo v oligotrofnih in eutrofnih jezerih
Figure 6. Vertical distribution of total phosphorus (P_T) in stratified oligotrophic and eutrophic lakes

Splošni fizikalno-kemijski element kakovosti prosojnost v jezerih

Parameter za spremljanje in vrednotenje splošnega fizikalno-kemijskega elementa prosojnost v jezerih je Secchijeva globina. Ker nanjo med drugim vpliva tudi gostota in biomasa fitoplanktona (in zooplanktona), je primeren indikator trofičnega stanja jezera. Na zmanjšano prosojnost jezerske vode pa neodvisno od trofičnega stanja jezera lahko vplivajo tudi suspendirane anorganske snovi, ki v jezero pridejo zaradi spiranja površin ob nalivih, pritokov, biogenega obarjanja kalcijevega karbonata (krede) ali majhne globine jezera. Zato za jezera, ki vsebujejo velike količine suspendiranih anorganskih snovi, vrednotenje ekološkega oz. trofičnega stanja na podlagi splošnega fizikalno-kemijskega elementa prosojnost ni ustrezno oz. je le omejeno ustrezno.

Splošni fizikalno-kemijski element kakovosti slanost v jezerih

Slanost v jezerih predstavlja vsoto vseh v vodi raztopljenih soli oz. ionov, od katerih v slovenski jezerih prevladujeta kalcij in magnezij (Ca^{2+} in Mg^{2+}) med kationi in hidrogenkarbonat (HCO_3^-) med anioni. Parameter za spremljanje in vrednotenje slanosti v jezerih je električna prevodnost (pri 25 °C), ki predstavlja sposobnost vode za prevajanje električnega toka in je odvisna od temperature in koncentracije ionov v raztopini ter njihovih značilnosti (stopnja disociiranosti, električni naboj in mobilnost ionov). Na slanost v jezerih najpomembneje vplivajo značilnosti geološke podlage, podnebne razmere (padavine, izhlapevanje) in tudi obremenitve (spiranje hranil s kmetijskih površin, spiranje soli s cest). Bolj kot je jezero obremenjeno s hranili, višja je električna prevodnost, saj se z dotokom hranil praviloma poveča količina nabitih delcev. Poleg neposrednih fizioloških vplivov na vodne organizme lahko velike spremembe slanosti vplivajo tudi na vzorce kroženja vode v jezerih. Tak primer je meromiktično Velenjsko jezero, v katerem je zaradi povečanih koncentracij hranil in sulfata v spodnji monimolimnijski plasti vode ter strmega gradienta slanosti in gostote med zgornjo in spodnjo plastjo popolno kroženje vode preprečeno.

Splošni fizikalno-kemijski element kakovosti zakisanost v jezerih

Parameter za spremljanje in vrednotenje zakisanosti v jezerih je pH. pH vpliva na mnoge biološke in kemijske procese v vodi. Definiran je kot negativni desetiški logaritem koncentracije H^+ ionov. Vrednosti pH se lahko nahajajo med 0 (zelo kislo) in 14 (zelo bazično), pri čemer pH = 7 predstavlja nevtralno območje. V neobremenjenih jezerih je pH pretežno odvisen od karbonatnega ravnotežja (ravnotežja med CO_2 , HCO_3^- in CO_3^{2-}). Karbonatno ravnotežje zavira večja nihanja pH in predstavlja glavni mehanizem pufrske kapacitete vode. Na naravno karbonatno ravnotežje lahko vplivajo industrijske odpadne vode in atmosfersko obremenjevanje s kislimi snovmi. Dnevno nihanje pH je lahko rezultat fotosintezne aktivnosti in respiracije primarnih producentov. Veliko pomanjkanje CO_2 zaradi fotosintezne aktivnosti v zelo produktivnih jezerih lahko poruši karbonatno ravnotežje. pH večine naših jezer zaradi prevladujoče karbonatne podlage in velike pufrske kapacitete vode znaša med 7,5 in 9,0. Nižje vrednosti se lahko pojavijo v jezerih bogatih z raztopljenimi organskimi snovmi, medtem ko so višje vrednosti pogoste v evtrofnih jezerih.

SUMMARY

One of the important environmental objectives of the Water Framework Directive (2000/60/EC) is to achieve good ecological status of surface waters and to prevent deterioration of the ecological status of surface waters at European Community level. With the aim of achieving this objective, the Slovenian Environment Agency also performs regular and systematic monitoring and assessment of the ecological status of eleven lake water bodies in Slovenia. In accordance with the Decree on the surface water status, which transposes the requirements of the Water Framework Directive into Slovenian legislation, is monitoring and assessment of the ecological status of lakes based on biological, hydromorphological quality elements, specific pollutants and general physico-chemical quality elements. For lakes the Water Framework Directive identifies six general physico-chemical quality elements for the assessment of ecological status. The six elements are thermal conditions, oxygenation conditions, nutrient conditions, transparency, salinity and acidification status. Every member state is required to select relevant parameters indicative of all six general physico-chemical quality elements. The physico-chemical quality elements are taken into account in combination with other quality elements when assessing and classifying water bodies as being at high or good ecological status. For moderate ecological status class the physico-chemical conditions must, by definition, be consistent with the conditions of the biological quality elements.