



Univerzitetna založba  
Univerze v Mariboru

Marjana Simonič  
Maša Islamčević Razboršek

# Tehnologija vod

Laboratorijske vaje







Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo  
in kemijsko tehnologijo

# Tehnologija vod

Laboratorijske vaje

Avtorici

**Marjana Simonič**

**Maša Islamčević Razboršek**

April 2026

<b>Naslov</b> <i>Title</i>	<b>Tehnologija vod</b> <i>Water Technology</i>
<b>Podnaslov</b> <i>Subtitle</i>	<b>Laboratorijske vaje</b> <i>Laboratory Exercises</i>
<b>Avtorici</b> <i>Authors</i>	Marjana Simonič (Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo)
	Maša Islamčević Razboršek (Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo)
<b>Recenzija</b> <i>Review</i>	Julija Volmajer Valh (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
<b>Lektoriranje</b> <i>Language editing</i>	Lidija Murenc
<b>Tehnična urednika</b> <i>Technical editors</i>	Maša Islamčević Razboršek (Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo)
	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
<b>Oblikovanje ovitka</b> <i>Cover designer</i>	Maša Islamčević Razboršek (Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo)
<b>Grafika na ovitku</b> <i>Cover graphics</i>	Vodni pljuski, foto: PublicDomainPictures, pixabay.com, 2013
<b>Grafične priloge</b> <i>Graphic material</i>	Viri so lastni, razen če ni navedeno drugače. Simonič, Islamčević Razboršek (avtorici), 2026

<b>Založnik</b> <i>Published by</i>	<b>Univerza v Mariboru</b> <b>Univerzitetna založba</b> Slomškovo trgo 15 2000 Maribor, Slovenija <a href="https://press.um.si">https://press.um.si</a> , <a href="mailto:zalozba@um.si">zalozba@um.si</a>
<b>Izdajatelj</b> <i>Issued by</i>	<b>Univerza v Mariboru</b> <b>Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo</b> Smetanova ulica 17 2000 Maribor, Slovenija <a href="https://www.fkkt.um.si">https://www.fkkt.um.si</a> , <a href="mailto:fkkt@um.si">fkkt@um.si</a>
<b>Izdaja</b> <i>Edition</i>	Prva izdaja.
<b>Izdano</b> <i>Published at</i>	Maribor, Slovenija, april 2026
<b>Vrsta publikacije</b> <i>Publication type</i>	E-knjiga
<b>Dostopno na</b> <i>Available at</i>	<a href="https://press.um.si/index.php/ump/sl/catalog/book/1116">https://press.um.si/index.php/ump/sl/catalog/book/1116</a>



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba  
/ University of Maribor, University of Maribor Press

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Brez predelav 4.0 Mednarodna. / This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International License.

Uporabnikom je dovoljeno reproduciranje brez predelave avtorskega dela, distribuiranje, dajanje v najem in priobčitev javnosti samega izvirnega avtorskega dela, in sicer pod pogojem, da navedejo avtorja in da ne gre za komercialno uporabo.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Univerzitetna knjižnica Maribor

543:628.1(076.5)

SIMONIČ, Marjana

Tehnologija vod [Elektronski vir] : laboratorijske vaje / avtorici Marjana Simonič, Maša Islamčević Razboršek. - 1. izd. - E-knjiga. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2026

Način dostopa (URL): <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/1116>

ISBN 978-961-299-140-1 (PDF)

doi: 10.18690/um.fkkt.4.2026

COBISS.SI-ID 275385091

**ISBN** 978-961-299-140-1 (pdf)

**DOI** <https://doi.org/10.18690/um.fkkt.4.2026>

**Cena** Brezplačni izvod  
**Price**

**Odgovorna oseba založnika** prof. dr. Zdravko Kačič,  
*For publisher* rektor Univerze v Mariboru

**Citiranje** Simonič, M., Islamčević Razboršek, M. (2026). *Tehnologija vod:*  
*Attribution* *laboratorijske vaje*. Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba. doi.:  
10.18690/um.fkkt.4.2026



## KAZALO VSEBINE

OSNOVNA NAVODILA ZA VARNO DELO V LABORATORIJU.....	8
SPECIFIČNA NAVODILA ZA VARNO DELO V LABORATORIJU.....	10
NAVODILA ZA PRVO POMOČ.....	11
SIMBOLI ZA NEVARNOST NA EMBALAŽI NEVARNIH SNOVI .....	12
<b>FIZIKALNI PARAMETRI KVALITETE VODA.....</b>	<b>1</b>
1. Suspendirane snovi.....	1
2. Barva vode.....	1
3. Vonj.....	1
4. Temperatura.....	2
<b>KEMIJSKI PARAMETRI KVALITETE VODA.....</b>	<b>3</b>
1. Raztopljene trdne snovi (TDS).....	3
2. pH.....	3
3. Trdota vode.....	4
4. Onesnaženje voda.....	5
<b>SAMOČISTILNA SPOSOBNOST NARAVNIH VODNIH SISTEMOV.....</b>	<b>9</b>
<b>ZAHTEVANA KVALITETA VODA GLEDE NA UPORABO.....</b>	<b>9</b>
1. Izbor reprezentativnega dela celotnega vzorca za analize in meritve.....	10
<b>DOLOČITEV TEMPERATURE, PREVODNOSTI, pH, MOTNOSTI IN OBARVANOSTI VODE.....</b>	<b>13</b>
1. Namen.....	13
2. Aparature.....	13
3. Teoretske osnove.....	15
4. Delo.....	18
5. Meritve in izračuni:.....	20
6. Rezultati in opažanja:.....	21
<b>DOLOČANJE TRDOTE VODE.....</b>	<b>23</b>
1. Namen.....	23
2. Aparatura.....	23
3. Teoretske osnove.....	23
4. Delo.....	25
5. Meritve in izračuni:.....	28
6. Rezultati in opažanja:.....	29
<b>DOLOČANJE PROSTE OGLIKOVE KISLINE.....</b>	<b>31</b>
1. Namen.....	31
2. Aparatura.....	31
3. Teoretske osnove.....	31
4. Delo.....	36
5. Meritve in izračuni:.....	37
6. Rezultati in opažanja:.....	38
<b>RAČUNSKO IN EKSPERIMENTALNO PREVERJANJE KARBONATNEGA RAVNOTEŽJA.....</b>	<b>39</b>
1. Namen.....	39
2. Aparatura.....	39

3.	Teoretske osnove.....	39
4.	Delo.....	40
5.	Meritve in izračuni.....	41
6.	Rezultati in opažanja:.....	42

**RAČUNSKO PREVERJANJE KARBONATNEGA RAVNOTEŽJA Z LANGELIERJEVIM INDEKSOM NASIČENJA (LSI) ..... 43**

1.	Namen .....	43
2.	Teoretske osnove.....	43
3.	Izračuni .....	49
4.	Rezultati.....	52

**JAR – TEST ..... 53**

1.	Namen .....	53
2.	Aparatura.....	53
3.	Teoretske osnove.....	54
4.	Delo.....	56
5.	Meritve in izračuni.....	57
6.	Rezultati in opažanja:.....	58

**REVERZNA OSMOZA ..... 59**

1.	Namen .....	59
2.	Aparatura.....	59
3.	Teoretske osnove.....	59
4.	Delo.....	62
5.	Meritve, rezultati in opažanja.....	63

**LITERATURA ..... 65**

**Pred pričetkom dela se seznanimo z navodili za varno laboratorijsko delo, simboli za nevarne snovi in prevzamemo laboratorijski inventar!**

**OSNOVNA NAVODILA ZA VARNO DELO V LABORATORIJU**

- V laboratoriju vzdržujemo čistočo, red in mir.
- V laboratoriju ne uživamo hrane in pijače.
- V laboratoriju ne uporabljamo prenosnih telefonov.
- Študenti smejo v laboratoriju izvajati samo predpisane postopke v skladu s pisnimi navodili za izvajanje posameznih vaj.
- Pred pričetkom praktičnega izvajanja posamezne vaje študenti počakajo na dovoljenje asistenta in lahko pričnejo z izvajanjem šele, ko jim asistent po predhodnem dogovoru to dovoli.
- Pri delu v laboratoriju vedno nosimo zaščitno haljo (plašč).
- Pri delu v laboratoriju obvezno uporabljamo zaščitna očala s stransko zaščito.
- Dolge lase povežemo v čop.
- Pred pričetkom eksperimentalnega dela se seznanimo z lastnostmi spojin, ki jih bomo uporabljali (strupenost, vnetljivost, eksplozivnost itd.). Upoštevamo simbole za nevarne snovi.
- Pri delu z jedkimi ali strupenimi snovmi ter vročimi ali hladnimi predmeti smo posebej previdni in uporabljamo ustrezne dodatne zaščitne rokavice.
- Kadar prenašamo jedke, strupene ali vroče snovi, poskrbimo za preventivno zaščito osebja in okolja.
- V laboratoriju se ne dotikamo vročih delov naprav in instrumentov, vse dokler se ne ohladijo.
- Steklovino, ki jo pobiramo iz sušilnikov, gorilnikov in/ali žarilnih peči, vedno previdno prijemamo z zaščitnimi kleščami in s posebnimi negorljivimi zaščitnimi rokavicami.
- Pri delu z nevarnimi hlapnimi ali praškastimi snovmi zaščitimo dihalne organe (nos in usta) s primerno zaščitno masko.
- Hlapne, jedke, potencialno eksplozivne in zdravju škodljive snovi vedno hranimo in odmerjamo izključno v digestoriju.
- Vse raztopine pipetiramo le z nastavkom za pipetiranje.
- Odvečnih količin reagentov nikoli ne vračamo v originalno posodo, iz katere smo jih odvzeli.
- Odpadnih kemikalij in drugih spojin ne izlivamo v komunalne odtoke (pomivalna korita) ali jih odlagamo skupaj s komunalnimi odpadki, ampak jih zbiramo v posebnih zbiralnih posodah (navodila tehničnega sodelavca in asistenta).
- Električne naprave uporabljamo v skladu z navodili. Po uporabi jih postavimo v osnovno stanje ali izključimo iz omrežja. Še posebej je potrebno paziti, da pri delu z raztopinami

električni priključki ne pridejo v kontakt z njimi. Naprav, ki niso brezhibne, ni dovoljeno uporabljati! Pred pričetkom vaj asistent ali tehnični sodelavec pregledata in preizkusita delovanje vseh naprav in instrumentov.

- Popravila naprav sme izvajati izključno le za to usposobljena oseba, pri čemer je pred pričetkom popravil naprave potrebno izključiti iz omrežja!
- Pri uporabi zemeljskega plina upoštevamo navodila za varno delo s plinsko instalacijo.
- Plinske (Bunsenove) gorilnike prižigamo postopoma: najprej osnovni plamen, nato glavni plamen, nazadnje uravnamo dotok zraka. Laboratorijske prostore primerno zračimo. Po končanem delu izključimo plinsko instalacijo in elektromagnetno varnostno stikalo.
- Pri uporabi plinov v jeklenkah pred uporabo preverimo tesnjenje celotnega sistema in
  - delovanje reducirnih ventilov.
- Če pride v laboratoriju do nesreče, takoj nudimo prvo pomoč, če smo za to usposobljeni; prav tako nesrečo takoj sporočimo asistentu, vodji laboratorijskih vaj in tehničnemu osebju!
- Po končanem delu je vse kemikalije potrebno pospraviti v ustrezno in primerno embalažo, ter vse naprave izključiti iz omrežja in zapreti dotok vode in plinov!
- Po končanem delu pospravimo in očistimo delovno mesto ter si temeljito umijemo roke [1].

# SPECIFIČNA NAVODILA ZA VARNO DELO V LABORATORIJU

## Nevarnosti

V laboratoriju so naslednji izvori nevarnosti:

- delo z električnimi napravami,
- delo s topili, jedkimi, hlapnimi in eksplozivnimi spojinami,
- stik z vročo vodo in vročimi ter hladnimi površinami,
- delo s plini v jeklenkah.

## Navodila za varno delo

V laboratoriju morajo študenti:

- dosledno upoštevati navodila za varno delo v laboratoriju,
- obvezno uporabljati zaščitna sredstva (očala, halja, rokavice, nastavek za pipetiranje, krpa),
- ustrezno ravnati s kemikalijami in instrumenti.

**V primeru kakršnekoli nezgode ali nesreče v laboratoriju morajo študenti o tem TAKOJ obvestiti asistenta - vodjo laboratorijskih vaj in tehnično osebje [1]!**

## NAVODILA ZA PRVO POMOČ [1]

<b>Poškodbe oči z jedkimi snovmi:</b>	<b>Druge poškodbe z jedkimi snovmi:</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• oko spiraj 10-15 minut z blagim curkom vode z izpiralko za spiranje oči,</li><li>• tujkov ne odstranjuj,</li><li>• poškodovano oko prekrij s sterilno gazo.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• obleko, namočeno z jedkimi snovmi, takoj odstrani,</li><li>• poškodovane dele 15 minut izpiraj s tekočo vodo,</li><li>• na rane ne dodajaj mazil, praškov, ampak jo prekrij s sterilno gazo,</li><li>• pri poškodbi ustne votline, požiralnika, želodca s kislino ali bazo pij veliko tekočine (vodo).</li></ul>
<b>Opeklina in poškodbe s paro:</b>	<b>Rane, odrgnine, vreznine, krvavitve:</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• gorečo obleko pogasi z vodo ali z ovijanjem odeje za gašenje,</li><li>• obleko na mestu opeklina odstrani in prekrij s sterilno gazo.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• poškodovano površino očisti z aseptično tekočino, prekrij s sterilno gazo in poveži s sterilnim povojem,</li><li>• krvavitev poskušaj zaustaviti s kompresijskim zavojem.</li></ul>

## SIMBOLI ZA NEVARNOST NA EMBALAŽI NEVARNIH SNOVI [1]



AKUTNA STRUPENOST / ZELO STRUPENO (SMRTNO)



ZDRAVJU ŠKODLJIVO, DRAŽLJIVO



JEDKO



RAZLIČNI ŠKODLJIVI VPLIVI NA ZDRAVJE



NEVARNO ZA OKOLJE



EKSPLOZIVNO



VNETLJIVO



OKSIDATIVNO



## **FIZIKALNI PARAMETRI KVALITETE VODA**

Fizikalni parametri, ki vplivajo na kakovost voda, so:

### **1. Suspendirane snovi**

Suspendirane snovi so delci, ki jih z uporabo filtracije ali sedimentacije ločimo iz vzorca vode. Ti delci so lahko organskega ali anorganskega izvora. Visoke koncentracije anorganskih delcev zmanjšujejo prehod svetlobe (kalnost), povzročajo poškodbe organizmov zaradi trenja in pospešujejo usedanje snovi – to lahko zmanjša primarno produkcijo ter poveča tveganje za evtrofične procese v stoječih vodnih telesih. Organske suspendirane snovi predstavljajo hranilno bazo za heterotrofne organizme, kar spodbuja njihovo dihalno aktivnost in vodi k znižanju koncentracije raztopljenega kisika ter poslabšanju kakovosti vode [2].

### **2. Barva vode**

Barva vode je odvisna od valovnih dolžin svetlobe, ki jih raztopljene ali suspendirane snovi ne absorbirajo. Dejanska barva se meri po odstranitvi delcev (s filtracijo/centrifugacijo), medtem ko navidezna barva izvira iz suspendiranih delcev, kot so huminske snovi ali plankton, ki spreminjajo lom in odbijanje svetlobe. Znanje o obarvanosti je pomembno za oceno kakovosti voda – intenzivna barva lahko kaže na prisotnost industrijskih izpustov ali organskih in anorganskih barvil. Močno onesnažene vode imajo lahko intenzivno navidezno barvo. Ob izpustih odpadnih voda tekstilne, papirne, prehranske, metalurške in drugih industrij se koncentracije nekaterih obarvanih organskih in anorganskih snovi povečajo in vplivajo na obarvanost [3].

### **3. Vonj**

Neprijeten vonj vode pogosto izvira iz hlapnih organskih spojin, ki jih proizvajajo mikroorganizmi, fitoplankton ali razkroj organskih snovi. Takšne spojine so indikator povečane anaerobne biotske aktivnosti. Vonj lahko povzročijo tudi industrijske ali

komunalne odpadne vode. Pitna voda z neprijetnim vonjem, kljub dovoljenim koncentracijam določenih snovi, ni užitna in ni primerna za uporabo.

#### **4. Temperatura**

Temperatura je ključen parameter, saj vpliva na kemijske reakcije, biološko aktivnost in topnost plinov. Povišanje temperature za 10 °C lahko podvoji biotske procese, kar poveča potrebo po kisiku. Topnost kisika pada s povečanjem temperature, kar zmanjša koncentracijo raztopljenega kisika v vodi in lahko sproži hipoksijo – stanje, ki ogroža vodno življenje. Temperatura je glavni dejavnik, ki določa dnevno variacijo koncentracije raztopljenega kisika v rekah. Problematične so lokalne spremembe temperatur vodotokov, ki so posledica industrijskih izpustov hladilnih in drugih odpadnih voda. Koncentracija kisika v segreti vodi upada, saj se z višanjem temperature zmanjšuje topnost plinov v vodi. Zaradi hitrejše biooksidacije nekaterih organskih snovi se poraba kisika še povečuje in sicer do te mere, da ga začne primanjkovati, zato mnogi organizmi odmrejo. Povišanje temperature naravnih voda posredno vpliva tudi na vonj in okus vode [2] [4], [5].

Tabela 1: Pomen fizikalnih lastnosti vode za vodne ekosisteme

Parameter	Pomen za vodne ekosisteme
Suspendirane snovi	Vplivajo na svetlobo, dihanje in prehranski krog; imajo ekotoksikološki učinek.
Barva	Zavira fotosintezo, vpliva na estetsko in uporabniško vrednost vode.
Vonj	Indikator bioloških in industrijskih sprememb; vpliva na sprejemljivost vode.
Temperatura	Pospeši biološke procese, zmanjša količino kisika, ogroža organizme in spremeni kemijsko sestavo vode.

## KEMIJSKI PARAMETRI KVALITETE VODA

Kemijski parametri, ki vplivajo na kakovost voda so:

### 1. Raztopljene trdne snovi (TDS)

Raztopljene trdne snovi v vodi vključujejo predvsem organske in anorganske spojine, ki izvirajo iz razgradnje rastlinskih in živalskih organizmov ter iz geološkega okolja. Njihova koncentracija je močno odvisna od tipa vodnega telesa in vira napajanja. V vodotokih lahko vrednosti znašajo od nekaj deset do več kot 10.000 mg/L, medtem ko je mejna vrednost za pitno vodo določena pri 500 mg/L [3]. Povišana vsebnost raztopljenih snovi lahko zmanjša uporabnost vode za tehnološke procese in predstavlja tveganje za zdravje, saj so nekatere snovi lahko toksične ali kancerogene [6].

### 2. pH

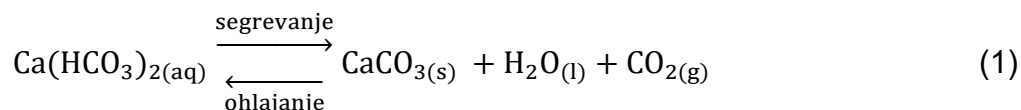
pH vrednost uravnava številne kemijske in biološke procese v vodi. V naravnih pogojih je odvisna predvsem od karbonatnega sistema oz. ravnotežja  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ , pa tudi od prisotnosti huminskih in fulvinskih kislin. Spremembe

pH in karbonatnega ravnotežja povzročajo izpusti industrijskih efluentov in atmosferski vnosi kislih snovi (acidifikacija). Poleg tega na dnevne oscilacije pH vplivata fotosinteza in respiracija vodnih organizmov [7].

### 3. Trdota vode

Trdota je posledica prisotnosti raztopljenih soli, zlasti kalcijevih in magnezijevih hidrogenkarbonatov. Ločimo karbonatno (začasno) in nekarbonatno (trajno) trdoto, izraženo v nemških trdotnih stopinjah ( $^{\circ}\text{dH}$ ), kjer  $1^{\circ}\text{dH}$  ustreza  $10 \text{ mg/L CaO}$ . V praksi ločimo razrede od zelo mehke ( $<4^{\circ}\text{dH}$ ) do zelo trde vode ( $>30^{\circ}\text{dH}$ ). Trdota vpliva na tehnološke procese, okus vode in pojav vodnega kamna [8].

Trdota vode je mera za skupno količino raztopljenih ionov soli v njej. V odvisnosti od geografskega porekla vode in geološke podlage, po kateri se zbira oz. teče, so v njej raztopljene različne količine različnih anorganskih soli. Med njimi predstavljata največji delež kalcijev hidrogenkarbonat ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ) in magnezijev hidrogenkarbonat ( $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ), ki najbolj prispevata h karbonatni (začasni) trdoti vode. Drugih soli je manj, največkrat so to magnezijev karbonat, kalijev klorid, sulfati in nitrati. Te soli so vzrok za nekarbonatno (trajno) trdoto vode. Začasno trdoto vode lahko odstranimo s prekuhavanjem, saj se pri segrevanju vode kalcijevi in magnezijevi hidrogenkarbonati pretvorijo v netopne karbonate (enačba 1). Izločeni karbonati so tako imenovani »vodni kamen ali kotlovec«. Pri segrevanju vode pride do razkroja kalcijevega hidrogenkarbonata, izloča se kalcijev karbonat, izhaja tudi ogljikov dioksid.



Trdoto vode znižujemo s segrevanjem vse dotlej, dokler iz vode odstranjujemo oborjen  $\text{CaCO}_3$  in tako pomikamo ravnotežje iz leve proti desni. Če prenehamo s segrevanjem, se bo raztopina ohladila in v njej se bo pričel raztapljati  $\text{CO}_2$  iz ozračja, ki bo povzročil raztapljanje  $\text{CaCO}_3$  v raztopini in ravnotežje se bo pomaknilo nazaj iz desne proti levi.

Vse ostale mineralne snovi, ki se pri prekuhavanju ne oborijo, sodijo med trajno trdoto vode (sulfati, kloridi, natrijev karbonat, itd.). Celokupna trdota je celotna množina  $\text{Ca}^{2+}$  in  $\text{Mg}^{2+}$  ionov, ki so raztopljeni v vodi. Kalcijevo trdoto tvorijo vse kalcijeve soli, magnezijevo trdoto pa vse magnezijeve snovi.

Trdotni razredi vode glede na celokupno trdoto so naslednji:

- zelo mehka voda: 0 – 4 °d
- mehka voda: 4 – 8 °d
- srednje trda voda: 8 – 12 °d
- precej trda voda: 12 – 18 °d
- trda voda: 18 – 30 °d
- zelo trda voda: čez 30 °d.

#### **4. Onesnaženje voda**

Onesnaženje voda je posledica vnosa različnih snovi, ki spreminjajo fizikalne, kemijske in biološke lastnosti vodnega sistema ter porušijo njegovo ekološko ravnovesje. Med najpomembnejšimi onesnaževali so organske snovi, dušikove spojine ter različne spojine antropogene izvora, kot so površinsko aktivne snovi, pesticidi, biocidi ipd. Organske spojine v vodi izvirajo iz naravnih procesov in človekove dejavnosti, njihova razgradnja pa porablja raztopljeni kisik, kar spremljamo s parametrom biokemijske potrebe po kisiku (BPK) [9]. Povečane koncentracije organskih snovi lahko vodijo do pomanjkanja kisika v vodi in poslabšanja življenjskih razmer za vodne organizme.

Pomembno skupino predstavljajo tudi dušikove spojine, ki v vodne sisteme prehajajo predvsem z odpadnimi vodami in kmetijskimi izpusti. V večjih količinah povzročajo eutrofikacijo, kar se kaže kot prekomerno razraščanje alg in cianobakterij ter posledično zmanjšanje koncentracije kisika v vodi [10]. Podobno tudi detergenti in površinsko aktivne snovi vplivajo na vodne ekosisteme, saj lahko povečujejo dostopnost drugih onesnaževal in njihovo škodljivost [11]. Raztopljeni kisik je eden ključnih pokazateljev kakovosti vode, saj odraža ravnovesje med

fizikalnimi, kemijskimi in biološkimi procesi. Njegovo zmanjšanje je pogosto povezano z organskim ali anorganskim onesnaženjem, zato predstavlja pomemben indikator stanja vodnega okolja [12]. Biološko kakovost voda ocenjujemo z različnimi metodami, kot so saprobiološke in bakteriološke analize. Te temeljijo na prisotnosti in številčnosti organizmov, ki odražajo stopnjo onesnaženosti vodnega sistema [13], [14].

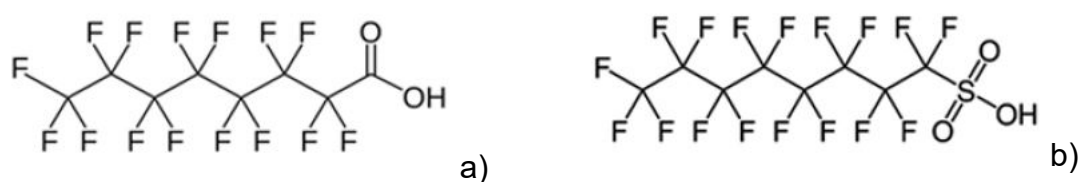
Glavni viri onesnaženja so odpadne vode, ki nastajajo kot posledica človekovih dejavnosti. Med njimi prevladujejo industrijske, komunalne in kmetijske odpadne vode, ki vsebujejo različne organske in anorganske snovi ter lahko pomembno vplivajo na kakovost površinskih in podzemnih voda [15], [16], [17].

Poleg tradicionalnih virov onesnaženja, povezanih z odpadnimi vodami, se v sodobnem času vse pogosteje obravnavajo tudi obstojna organska onesnaževala nove generacije. Med najpomembnejše uvrščamo PFAS (per- in polifluorirane alkilne snovi) ter mikroplastiko, ki zaradi svojih specifičnih lastnosti predstavljajo poseben izziv za vodno okolje.

Per- in polifluoroalkilne snovi (PFAS) so velika skupina sintetičnih organskih spojin, za katere je značilna prisotnost vsaj ene perfluorirane metilne ( $-CF_3$ ) ali metilenske ( $-CF_2-$ ) skupine v molekuli. Zaradi močne vezi med ogljikom in fluorom (C–F) so te spojine izjemno kemijsko in termično stabilne, kar povzroča njihovo obstojnost v okolju, kjer lahko ostanejo zelo dolgo časa, tudi stoletja, zato jih pogosto imenujemo tudi »večne kemikalije« [18].

Strukturno so PFAS sestavljene iz hidrofobnega fluoriranega ogljikovega repa in hidrofilne funkcionalne skupine (npr. karboksilne ali sulfonatne), kar jim daje amfifilne lastnosti in omogoča dobro topnost ter mobilnost v vodnem okolju. Glede na dolžino ogljikove verige jih delimo na kratkoverižne in dolgoverižne PFAS, pri čemer slednje običajno izkazujejo večjo bioakumulacijo.

Med najbolj raziskanimi predstavniki sta perfluorooktanska kislina (PFOA) (Slika 1a) in perfluorooktanska sulfonska kislina (PFOS) (Slika 1b), ki sta zaradi svoje obstojnosti, mobilnosti in bioakumulacije okoljsko posebej problematični. PFAS se v okolje vnašajo predvsem z industrijskimi procesi in uporabo v številnih izdelkih (teflonski izdelki, pena za gašenje, vodoneprepustna oblačila in obutev, sredstva za impregnacijo, kozmetika, ličila, kreme, kartonska embalaža, barve, laki itd.), njihova prisotnost pa predstavlja globalno tveganje za vodne vire in zdravje ljudi [18].



Slika 1: Struktura a) perfluorooktanske kisline PFOA, b) perfluorooktan sulfonske kisline PFOS

Mikroplastika predstavlja enega največjih sodobnih okoljskih problemov, saj se z naraščajočo proizvodnjo plastike njena prisotnost v naravi stalno povečuje. Plastika se v okolju ne razgradi v osnovne snovi, temveč razpada na vedno manjše delce, ki lahko vztrajajo desetletja ali celo stoletja. Mikroplastiko običajno definiramo kot plastične delce, manjše od 5 mm, ki se pojavljajo v različnih oblikah in izvirajo iz številnih virov [19].

Glede na nastanek ločimo primarno mikroplastiko, ki je namensko proizvedena (npr. v kozmetiki ali industriji), ter sekundarno mikroplastiko, ki nastaja z razpadom večjih plastičnih odpadkov pod vplivom okoljskih dejavnikov, kot so UV-sevanje, mehanski vplivi in kemijska razgradnja. Mikroplastika tako izvira iz vsakdanjih virov, kot so embalaža, tekstil, avtomobilske pnevmatike in gospodinjski odpadki, zaradi česar je njena prisotnost v okolju praktično neizogibna.

Poseben problem predstavlja dejstvo, da mikroplastika v vodnem okolju deluje kot nosilec drugih onesnaževal. Na svojo površino veže obstojne organske snovi, težke kovine in mikroorganizme, vključno s potencialno patogenimi bakterijami, ki tvorijo

biofilm. S tem mikroplastika ne predstavlja le mehanskega onesnaževala, temveč tudi omogoča prenos škodljivih snovi v ekosistemih.

Vodni organizmi mikroplastiko pogosto zaužijejo, kar ima lahko številne negativne posledice. Delci lahko povzročajo mehanske poškodbe prebavil, lažen občutek sitosti in posledično pogin zaradi izstradanja. Poleg tega se na mikroplastiko vezane strupene snovi sproščajo v organizem in se kopičijo v tkivih. Mikroplastika je bila zaznana v vseh členih prehranske verige, od planktona do rib in morskih sesalcev, kar pomeni, da posredno vstopa tudi v prehrano človeka.

Raziskave kažejo, da je mikroplastika danes prisotna tudi v pitni vodi, zraku in gospodinjskem okolju. Analize so pokazale, da se mikroplastični delci nahajajo tako v vodi iz vodovoda kot tudi v ustekleničeni vodi, v slednji pogosto celo v večjih količinah. Poleg tega pomemben vir predstavljajo sintetična tekstilna vlakna, ki se med pranjem sproščajo v odpadno vodo in kljub čiščenju delno prehajajo v vodotoke. Med največje vire mikroplastike sodijo prav gospodinjstva, kar kaže na pomembno vlogo posameznika pri zmanjševanju onesnaževanja.

Mikroplastika predstavlja globalni problem, ki ni omejen le na oceane, temveč zajema tudi celinske vode. Prisotna je v rekah, jezerih in celo v oddaljenih območjih, kar kaže na njeno široko razširjenost. Zaradi svoje majhnosti lahko najmanjši delci prehajajo tudi v tkiva organizmov, kar odpira vprašanja o dolgoročnih vplivih na zdravje ljudi. Čeprav so raziskave na tem področju še v teku, številni podatki kažejo na možne vplive na hormonski sistem, imunski odziv in druge fiziološke procese. Zaradi obstojnosti, razširjenosti in potencialnih vplivov na okolje in zdravje, mikroplastika predstavlja enega ključnih izzivov sodobne družbe, pri katerem so nujni tako sistemski ukrepi kot tudi spremembe v vedenju posameznikov[19].

## **SAMOČISTILNA SPOSOBNOST NARAVNIH VODNIH SISTEMOV**

Samočistilna sposobnost naravnih voda je omejena in je za vsak vodotok drugačna glede na njegove naravne značilnosti. Naravna onesnaževala so v površinskih vodah vedno prisotna in niso posledica človekovega onesnaževanja. Mnogi so v manjših koncentracijah v naravnih vodnih sistemih posledica medsebojnega učinkovanja posameznih sestavnih delov ekosistema. Večina primesi se v vodnem ekosistemu zaradi samočistilne sposobnosti polagoma izloči ali nevtralizira. Današnja stopnja civilizacijskega onesnaževanja je z velikimi količinami odpadnih voda presegla samočistilno sposobnost predvsem lokalnih naravnih vodnih sistemov. Take odpadne vode je potrebno očistiti do te mere, da po izpustu koncentracije nečistoč ne presegajo samočistilne sposobnosti lokalnega vodotoka ali jezera. Samočistilni mehanizem naravnih voda sestoji iz fizikalnih, kemijskih in biotskih procesov. Samočistilno sposobnost voda izkoriščajo v čistilnih napravah, zato tudi to čiščenje obsega fizikalno – mehansko, kemijsko in biološko stopnjo [20], [21].

## **ZAHTEVANA KVALITETA VODA GLEDE NA UPORABO**

Zahteve po kvaliteti vode se močno razlikujejo glede na namen in vrsto uporabe. Uporaba vode za določene tehnološke, energetske in reakcijske namene je povezana z zelo specifičnimi zahtevami in standardi, ki so opredeljeni v opisu določenega procesa. Z vidika tehničnega varstva okolja je ključna zahtevana kakovost voda naravnih sistemov, ki jo določajo standardi vladnih institucij na podlagi priporočil mednarodnih zdravstvenih, sanitarnih in okoljskih organizacij. Dovoljena ekološka obremenjenost industrijskih in komunalnih odpadnih voda je odvisna od trenutnega stanja vodnih sistemov, v katere se odpadne vode iztekajo. Zato so veljavni predpisi o kvaliteti odpadnih voda splošni in jih je treba prilagoditi kvaliteti in samočistilni sposobnosti določenega vodnega sistema. Za vzdrževanje stanja naravnih vodnih sistemov v okviru standardov, določenih v predpisih o onesnaženosti, je treba poskrbeti za čim popolnejši nadzor in čiščenje industrijskih

in odpadnih voda že na mestu njihovega nastanka, kar predstavlja osnovno nalogo varstvu okolja na področju voda [21].

Od kvalitete naravnih vodnih sistemov je v veliki meri odvisno stanje pitnih voda, za katere veljajo najstrožji predpisi in standardi. Po splošnih merilih pitna voda ne sme vsebovati nobenih dispergiranih snovi, ki povzročajo kalnost ali motnost, biti mora brez barve in okusa, raztopljene anorganske snovi so lahko prisotne le v zmernih količinah, popolnoma pa morajo biti odstranjene organske snovi, toksične sestavine in patogeni organizmi. Danes je vse manj naravnih vodnih zajetij, ki ustrezajo tem zahtevam glede čistosti, zato so potrebni številni tehnološki postopki za pripravo pitne vode, ki vodo v končni uporabi zelo podražijo [21].

### **1. Izbor reprezentativnega dela celotnega vzorca za analize in meritve**

Selektivni izbor majhnega, a reprezentativnega dela celotnega vzorca ali materiala za izvedbo analiz in meritev je ključnega pomena. Reprezentativen vzorec je vzorec, ki ima lastnosti celotnega vzorca oziroma so v njem, kljub vzorčenju, vse lastnosti ostale ohranjene in nespremenjene. Vzorčenje se mora izvajati v skladu z navodili za izbrano metodo merjenja (analizno metodo). Za pravilnost analize vode moramo zajeti vzorec, ki predstavlja kakovostno povprečje vode, ki jo nameravamo analizirati. Način odvzema vzorcev je za analizo pomembna komponenta in lahko močno vpliva na rezultat. Čas od odvzema vzorca do analize mora biti čim krajši. Priporoča se analiza takoj po odvzemu, v skrajnem primeru najkasneje po 24 urah. Idealno bi bilo, da bi analizo izvedli na kraju samem, kar pa navadno ni izvedljivo. Da čim bolj zavremo razkroj, hranimo vzorce v hladilniku.

Vzorčenje izvedemo na terenu v bližnji okolici. Vzorec vode zajamemo na sredini toka (potoka, reke,...) s čisto vzorčno posodo, ter zabeležimo vse podatke, kot so:

- ime reke,
- datum in čas vzorčenja, vreme, temperatura
- globina reke, širina reke, pretok

- temperature okolice in opis vremena
- opis odvzetega vzorca
- odzemno mesto (koordinate)
- opis reke potoka in struge itd.

## VAJE

# DOLOČITEV TEMPERATURE, PREVODNOSTI, pH, MOTNOSTI IN OBARVANOSTI VODE

## 1. Namen

Namen vaje je določitev temperature, električne prevodnosti, motnosti, obarvanosti in pH vrednosti vzorcev vod.

## 2. Aparature

Potrebni aparati so prikazani na slikah 2 do 5.



Slika 2: Merilnik električne prevodnosti (konduktometer). Vir: lasten.



Slika 3: pH meter za merjenje pH vrednosti. Vir: lasten.



Slika 4: Turbidimeter in kiveta z vzorcem za merjenje motnosti. Vir: lasten.



Slika 5: UV-ViS spektrofotometer za določanje obarvanosti. Vir: lasten.

### 3. Teoretske osnove

#### ***Električna prevodnost vode***

Električna prevodnost ( $\sigma$ ), izražena najpogosteje v enoti  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (mikroSimens na centimeter), opisuje sposobnost vode, da le-ta prevaja električni tok. Ta lastnost je neposredno povezana s prisotnostjo ionov v vodi, pri čemer imajo ključno vlogo njihova koncentracija, mobilnost, električni naboj ter temperatura med meritvijo. Matematično je električna prevodnost recipročna električnemu uporu:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad [\mu\text{S}/\text{cm}] \quad (2)$$

Prevodnost se z zviševanjem temperature povečuje. Ker je občutljiva na spremembe v ionski sestavi vode, se uporablja kot indikatorski parameter kakovosti, saj lahko odstopanja od običajnih vrednosti nakazujejo onesnaženje ali mešanje pitne vode z drugimi viri. Prevodnost pitne vode je najpogosteje odvisna od vsebnosti ionov kalcija ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnezija ( $\text{Mg}^{2+}$ ), natrija ( $\text{Na}^+$ ), kalija ( $\text{K}^+$ ), hidrogenkarbonata ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfata ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) in klorida ( $\text{Cl}^-$ ). Zaradi različnih koncentracij ionov se vrednosti močno razlikujejo med vrstami voda: morska voda

dosega približno 50.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , deževnica pa le 5–30  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Za kakovostno pitno vodo velja, da ima električno prevodnost v območju 300–500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  [3].

### **pH vrednost vode**

Drugi pomemben kazalnik kakovosti vode je pH, ki označuje stopnjo kislosti ali bazičnosti vodne raztopine. Opredeljen je kot negativni desetiški logaritem aktivnosti oksonijevih ionov:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+] \quad (3)$$

Veljavna je relacija:

$$[\text{H}_3\text{O}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 1 \cdot \frac{10^{-14} \text{ mol}^2}{\text{L}^2} \quad (4)$$

od koder izhaja, da velja:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14 \quad (5)$$

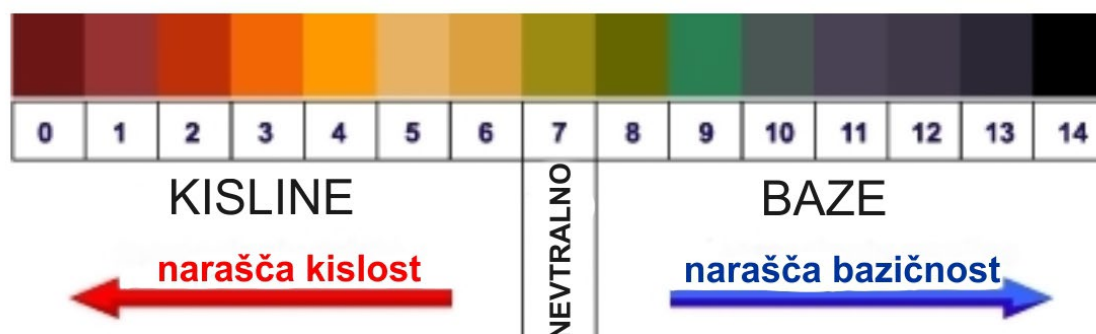
Nevtralna voda ima  $\text{pH} = 7$ . Če  $\text{pH}$  presega 7, je raztopina bazična zaradi presežka hidroksidnih ionov ( $\text{OH}^-$ ), medtem ko  $\text{pH}$  pod 7 označuje kislo okolje z večjo koncentracijo oksonijevih ionov ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ).

V naravnih vodah je  $\text{pH}$  pogosto povezan z ravnotežjem med ogljikovim dioksidom ( $\text{CO}_2$ ), ogljikovo kislino ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), hidrogenkarbonatnimi ( $\text{HCO}_3^-$ ) in karbonatnimi ioni ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Prisotnost huminskih snovi in raztopljenega  $\text{CO}_2$  povzroča, da se  $\text{pH}$  naravnih voda navadno giblje med 4,5 in 8,5. Mehke vode imajo običajno nižji  $\text{pH}$ , trde pa višjega.

Za določanje  $\text{pH}$  se uporabljata dve glavni metodi: **elektrokemijska meritev s pH-metrom** ali uporaba **indikatorskih barvil ali univerzalnega pH lističa**, ki spremenijo barvo glede na kislost ali bazičnost raztopine (slika 6).

pH je izredno pomemben za organizme v vodah. Človek vnaša več kislih kot bazičnih snovi v naravne vode. Kot primer navajamo vpliv pH na ravnotežje ionov (Na, K, Ca, Cl) v ribah: v kislih vodah le-te ne dobijo dovolj natrijevih ionov in ob zmanjšanju koncentracije natrija pod določeno mejo, ribe poginejo.

pH merimo običajno s kombinirano stekleno elektrodo. Sestavljena je iz Ag/AgCl žičke potopljene v 0,1 M HCl v tanki, okrogli stekleni membrani. Srebrova elektroda ali nasičena kalomelova elektroda je referenčna elektroda, ki je v stiku z merilno stekleno elektrodo. Elektrokemijsko merjenje pH vrednosti deluje na principu merjenja razlike potencialov med tema dvema elektrodama. Ko stekleno elektrodo potopimo v vzorec, potujejo protoni v vzorcu k elektrodi, medtem ko protoni v referenčni raztopini znotraj steklene membrane potujejo proti notranjosti membrane, stran od stene, posledica je sprememba električnega potenciala znotraj elektrode, kar odčitamo kot pH vrednost raztopine.



Slika 6: Primer barvne lestvice univerzalnega indikatorja. Vir: lasten.

### **Motnost**

Motnost vode določimo s Hach-ovim laboratorijskim turbidimetrom. Motnost v vodi povzročajo anorganske in organske suspendirane snovi. Več kot je prisotnih suspendiranih delcev v raztopini, tem večja je motnost vzorca in tem bolj se na delcih sipa svetloba. Intenziteta sipanja svetlobe je poleg koncentracije suspendiranih delcev funkcija velikosti in oblike delcev, valovne dolžine svetlobe in razlike lomnih količnikov delcev in vode.

## **Obarvanost**

V vzorcih vode izmerimo absorbanco pri dveh valovnih dolžinah:

$\lambda = 254 \text{ nm}$  in  $\lambda = 436 \text{ nm}$ .

Za merjenje absorbance v vidnem delu spektra med 380 in 800 nm, uporabimo steklene kivete, v UV območju med 100 in 380 nm, uporabljamo kivete iz kvarčnega stekla. Pri 254 nm v glavnem absorbirajo organske substance (splošno vse), pri 436 nm pa anorganske substance (kot so fosfatne spojine, nitrati itd.).

Izračunamo spektralni absorpcijski koeficient (*SAK*) po enačbi 6:

$$SAK = \frac{A}{d} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (6)$$

Kjer je:

*A* - absorbanca

*d* - dolžina poti svetlobe, ki je enaka širini kivete

## **4. Delo**

Na terenu pravilno vzorčite vsaj 5 L vzorca vode, mu izmerite temperaturo in takoj prenesite vzorec v laboratorij za nadaljnje analize. V laboratoriju mu izmerite električno prevodnost, pH, motnost in obarvanost po navodilih. Rezultate evidentirajte.

### ***Električna prevodnost vode***

Za merjenje električne prevodnosti uporabite merilnik električne prevodnosti. Vzorec vode nalijte v čisto čašo in vanjo vstavite konduktometrično celico, malo premešajte in izmerite električno prevodnost v  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Rezultate evidentirajte.

### ***pH vrednost vode***

Za merjenje pH vrednosti uporabite pH meter, kombinirano elektrodo in magnetno mešalo. Merilna elektroda je steklena elektroda, primerjalna (referenčna) elektroda pa je nasičena kalomelova elektroda. pH elektrodo pred meritvami ustrezno umerite po navodilih s puframa  $\text{pH}=4,00$  in  $\text{pH}=7,00$ . Vzorec vode nalijete v čisto čašo in vanjo vstavite pH elektrodo, vklopite mešalo ali ročno malo premešajte in izmerite pH vrednost. Rezultate evidentirajte.

### ***Motnost***

Vzorec nalijete v kiveto, jo zaprete s pokrovom in jo vstavite v turbidimeter ter pritisnete tipko »read« in počakate, da instrument opravi meritev. Motnost zabeležite v NTU enotah. Rezultate evidentirajte.

### ***Obarvanost***

V dve stekleni kiveti natočite slepi vzorec (ultračista voda), ter ju vstavite v UV-ViS spektrofotometer, ter umerite aparaturo pri valovni dolžini  $\lambda = 254 \text{ nm}$ . Odstranite prvo kiveto, ter vanjo nalijte vzorec in izmerite absorbanco za vzorec. Meritev ponovite 3-krat.

Enako ponovite meritve pri valovni dolžini  $\lambda = 436 \text{ nm}$ .

## **5. Meritve in izračuni:**

## **6. Rezultati in opažanja:**



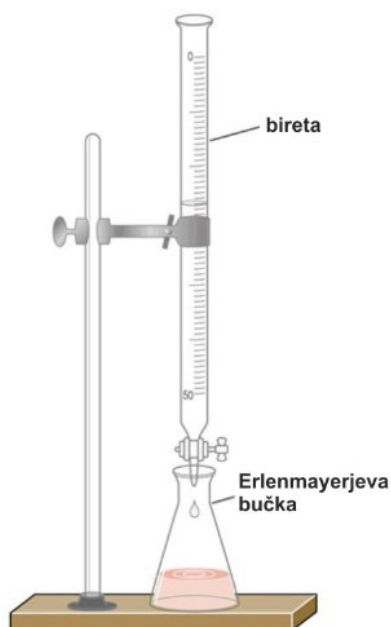
## DOLOČANJE TRDOTE VODE

### 1. Namen

Določimo karbonatno, nekarbonatno, celokupno, kalcijevo in magnezijevo trdoto vode. Rezultate podamo v °d in v mmol/L Ca-ionov.

### 2. Aparatura

Trdote določamo volumetrično (slika 7).



Slika 7: Bireta in Erlenmayerjeva bučka. Vir:lasten.

### 3. Teoretske osnove

Trdota vode je eden najpomembnejših fizikalno-kemijskih parametrov kakovosti vode, saj vpliva tako na njeno uporabnost, kot tudi na tehnične in ekološke procese. Povzročajo jo predvsem kalcijevi ( $\text{Ca}^{2+}$ ) in magnezijevi ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ioni, ki se v vodi nahajajo v obliki hidrogenkarbonatov, sulfatov, kloridov in drugih soli. Glede na sestavo razlikujemo med celokupno trdoto, ki predstavlja skupno koncentracijo  $\text{Ca}^{2+}$

in  $Mg^{2+}$  ionov, karbonatno (začasno) trdoto, ki jo povzročajo hidrogenkarbonati kalcija in magnezija, ter nekarbonatno (trajna) trdoto, ki je posledica prisotnosti sulfatov, kloridov in drugih topnih soli.

Začasna trdota se odstrani s prekuhavanjem, pri čemer se kalcijev hidrogenkarbonat pretvori v netopen kalcijev karbonat (vodni kamen) in sprosti ogljikov dioksid (glej enačbo 1- str. 4). Pri ohlajanju vode se ravnotežje ponovno pomakne v levo, saj raztopljeni  $CO_2$  omogoča raztapljanje apnenca in ponovno nastajanje hidrogenkarbonatov. Trajno trdoto pa povzročajo soli, ki se pri segrevanju ne oborijo, npr. sulfati in kloridi.

Trdota vode je tesno povezana z geološko podlago: vode, ki tečejo preko apnenčastih ( $CaCO_3$ ) ali dolomitnih kamnin ( $CaMg(CO_3)_2$ ), so praviloma trde, medtem ko vode s peščenih ali granitnih območij pogosto ostajajo mehke.

Za kvantitativno določanje trdote se najpogosteje uporablja kompleksometrična titracija z EDTA (etilendiamintetraocetno kislino). EDTA tvori stabilne, topne komplekse s kovinskimi ioni v stehiometričnem razmerju 1:1, ne glede na naboj kationa. Kot indikatorji se uporabljajo barvila, ki z ioni  $Ca^{2+}$  in  $Mg^{2+}$  tvorijo obarvane komplekse, ob končni točki titracije pa se barva spremeni, kar omogoča natančno določitev vsebnosti ionov v vzorcu.

Trdota vode je pomembna tako z vidika tehnološke uporabe (npr. tvorjenje vodnega kamna v kotlih in cevovodih) kot tudi v okolju, saj vpliva na biološke procese v vodnih ekosistemih in na kakovost pitne vode.

## 4. Delo

### ***Določanje karbonatne trdote (KT)***

Odpipetirajte 50 mL vzorca v elenmajerico, dodajte destilirano vodo, nekaj kapljic indikatorja metiloranž in titrirajte z raztopino HCl ( $c = 0,1 \text{ mol/L}$ ) iz birete do preskoka iz rumene v čebulno barvo. Nato iz porabljenega volumna 0,1M HCl izračunajte karbonatno trdoto ob upoštevanju definicije, da je 1 °d enaka 10 mg/L CaO oz. 0,0001785 mol/L CaO ter podajte rezultate v mmol/L  $\text{Ca}^{2+}$ , po formuli 7:

$$KT = V(\text{HCl}) \cdot c(\text{HCl}) \cdot M(\text{CaO}) \quad (7)$$

kjer je:

KT - karbonatna trdota (°d),

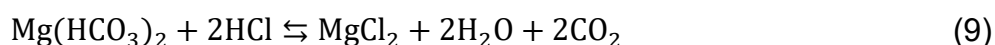
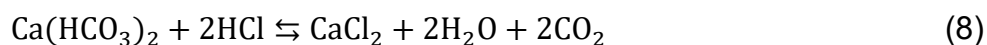
$V(\text{HCl})$  - volumen porabljene HCl pri določanju karbonatne trdote (mL),

$c(\text{HCl})$  - množinska koncentracija HCl (0,1 mol/L)

$M(\text{CaO})$  - molska masa CaO (56 g/mol).

Normalna vrednost je med 5-15 °d.

Reakciji:



### ***Določanje celokupne trdote (CT)***

Odpipetirajte 50 mL vzorca v elenmajerico, dodajte destilirano vodo in toliko 0,1M raztopine HCl, kolikor ste je porabili za določanje karbonatne trdote. Dodajte še 5 mL puferne raztopine ( $\text{NH}_4\text{Cl}/\text{NH}_3$ ) in za noževno konico indikatorja eriokrom črno T. Titrirajte z raztopino kompleksona III oz. EDTA iz birete do preskoka iz močno roza v modro barvo. Nato izračunajte celokupno trdoto po formuli (10):

$$\text{CT} = 2 \cdot V(\text{EDTA}) \quad (10)$$

kjer je:

CT - celokupna trdota ( $^{\circ}\text{d}$ ),

$V(\text{EDTA})$  - volumen porabljenega kompleksona III oz. EDTA pri določanju celokupne trdote (mL).

Upoštevajte definicijo, da je  $1 \text{ mL} = 1 ^{\circ}\text{d}$ .  $1 ^{\circ}\text{d}$  pa je enaka  $10 \text{ mg/L CaO}$  oz.  $0,0001785 \text{ mol/L CaO}$ . Normalna vrednost je med  $10\text{-}20^{\circ}\text{d}$ .

### ***Določanje kalcijeve trdote (CaT)***

Odpipetirajte 50 mL vzorca v elenmajerico, dodajte destilirano vodo in toliko 0,1M raztopine HCl, kolikor ste je porabili za določanje karbonatne trdote. Dodajte še 5 mL raztopine NaOH ( $c = 5 \text{ mol/L}$ ), za noževno konico indikatorja mureksid in takoj titrirajte z raztopino kompleksona III oz. EDTA iz birete do preskoka iz rdeče v vijolično barvo. Nato izračunajte kalcijevo trdoto po formuli 11:

$$\text{CaT} = 2 \cdot V(\text{EDTA}) \quad (11)$$

kjer je:

CaT - kalcijeva trdota (°d),

V(EDTA) - volumen porabljenega kompleksona III oz. EDTA pri določanju kalcijeve trdote (mL),

Upoštevajte definicijo, da je 1 mL = 1 °d. 1 °d pa je enaka 10 mg/L CaO oz. 0,0001785 mol/L CaO. Normalna vrednost je med 10-20 °d.

### ***Določanje nekarbonatne trdote (NKT)***

NKT se določa po enačbi 12:

$$NKT = CT - KT \quad (12)$$

kjer je:

NKT - nekarbonatna trdota (°d),

CT - celokupna trdota (°d),

KT - karbonatna trdota (°d).

*Določanje magnezijeve trdote (MgT) poteka po enačbi 13:*

$$MgT = CT - CaT \quad (13)$$

kjer je:

MgT - magnezijeva trdota (°d),

CT - celokupna trdota (°d),

CaT - kalcijeva trdota (°d).

## 5. Meritve in izračuni:

## **6. Rezultati in opažanja:**



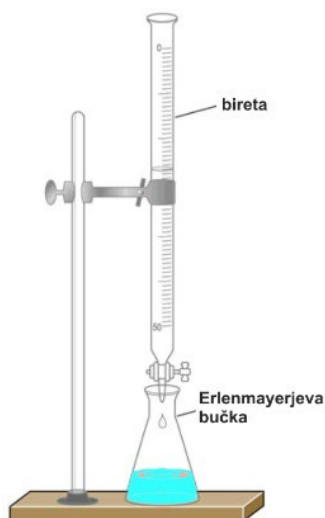
## DOLOČANJE PROSTE OGLJIKOVE KISLINE

### 1. Namen

Določimo prosto ogljikovo kislino v vzorcih vode.

### 2. Aparatura

Ogljikovo kislino določamo volumetrično (slika 8).



Slika 8: Bireta in Erlenmayerjeva bučka. Vir: lasten.

### 3. Teoretske osnove

Celotni anorganski ogljik ( $Q_c$ ) je vsota koncentracij proste ogljikove kisline, hidrogenkarbonata in karbonata, kar podamo z enačbo 14:

$$Q_c = c(\text{CO}_2) + c(\text{HCO}_3^-) + c(\text{CO}_3^{2-}) \quad (14)$$

oziroma,  $Q_c$  je razlika med vrednostima  $m$  in  $p$ , kar nam podaja enačba 15:

$$Q_c = m \text{ (vrednost)} - p \text{ (vrednost)} \quad (15)$$

V enačbi 15 gre za razliko med porabo HCl pri titraciji vzorca vode z indikatorjem metiloranž ( $m$ -vrednost) in porabo NaOH pri titraciji z indikatorjem fenolftalein ( $p$ -vrednost).

Potrebujemo še podatke za temperaturo vode, pH-vrednost in prevodnost, da lahko izračunamo  $\omega$  (% delež) CO<sub>2</sub> (tabela 2).

Tabela 2: Podatki za izračun  $\omega$  (% delež) CO<sub>2</sub>

$t$ %	0° C					4° C				
	100	300	500	700	900	100	300	500	700	900
pH										
6,0	77,3	76,4	75,4	74,4	73,4	75,4	74,4	73,4	72,4	71,3
6,1	73,0	71,9	70,9	69,8	68,7	70,9	69,8	68,7	67,6	66,4
6,2	68,2	67,1	65,9	64,7	63,5	65,9	64,7	63,5	62,3	61,1
6,3	63,0	61,8	60,5	59,3	58,0	60,5	59,3	58,0	56,8	55,5
6,4	57,5	56,2	54,9	53,7	52,4	54,9	53,7	52,4	51,1	49,8
6,5	51,5	50,5	49,2	47,9	46,6	49,2	47,9	46,6	45,3	44,0
6,6	46,0	44,8	43,5	42,2	40,9	43,5	42,2	40,9	39,7	38,5
6,7	40,4	39,2	37,9	36,7	35,5	37,9	36,7	35,5	34,4	33,2
6,8	35,0	33,8	32,7	31,6	30,4	32,7	31,6	30,4	29,4	28,3
6,9	29,9	28,9	27,8	26,8	25,8	27,8	26,8	25,8	24,8	23,9
7,0	25,3	24,4	23,4	22,5	21,6	23,4	22,5	21,6	20,8	19,9
7,1	21,2	20,4	19,6	18,8	18,0	19,6	18,8	18,0	17,2	16,5
7,2	17,7	16,9	16,2	15,5	14,8	16,2	15,5	14,8	14,2	13,6
7,3	14,5	13,9	13,3	12,7	12,1	13,3	12,7	12,1	11,6	11,1
7,4	11,9	11,4	10,9	10,4	9,89	10,9	10,4	9,89	9,45	9,00
7,5	9,69	9,25	8,82	8,42	8,02	8,82	8,42	8,02	7,65	7,29
7,6	7,85	7,49	7,13	6,80	6,47	7,13	6,80	6,47	6,17	5,87
7,7	6,34	6,04	5,75	5,48	5,21	5,75	5,48	5,21	4,96	4,72
7,8	5,10	4,86	4,62	4,40	4,18	4,62	4,40	4,18	3,98	3,78
7,9	4,09	3,90	3,70	3,52	3,35	3,70	3,52	3,35	3,19	3,03
8,0	3,28	3,12	2,96	2,82	2,67	2,96	2,82	2,68	2,55	2,42
8,1	2,62	2,49	2,36	2,25	2,13	2,36	2,25	2,14	2,03	1,93
8,2	2,09	1,99	1,88	1,79	1,70	1,89	1,79	1,70	1,62	1,53
8,3	1,66	1,58	1,50	1,43	1,35	1,50	1,43	1,35	1,29	1,22
8,4	1,32	1,26	1,19	1,13	1,07	1,19	1,14	1,08	1,02	0,97

<i>t</i>	10° C					15° C				
	100	300	500	700	900	100	300	500	700	900
pH										
6,0	72,7	71,7	70,6	69,6	68,4	70,6	69,6	68,4	67,3	66,1
6,1	67,9	66,8	65,6	64,5	63,3	65,6	64,5	63,3	62,1	60,8
6,2	62,7	61,5	60,3	59,0	57,7	60,3	59,0	57,8	56,5	55,2
6,3	57,2	56,0	54,6	53,4	52,1	54,6	53,4	52,1	50,8	49,5
6,4	51,5	50,2	48,9	47,6	46,3	48,9	47,6	46,3	45,1	43,8
6,5	45,7	44,5	43,2	41,9	40,7	43,2	41,9	40,7	39,4	38,1
6,6	40,1	38,9	37,6	36,5	35,2	37,6	36,5	35,2	34,1	32,9
6,7	34,7	33,6	32,4	31,3	30,2	32,4	31,3	30,2	29,1	28,0
6,8	29,7	28,7	27,6	26,6	25,6	27,6	26,6	25,6	24,6	23,6
6,9	25,1	24,2	23,2	22,3	21,4	23,2	22,3	21,4	20,6	19,7
7,0	21,0	20,2	19,4	18,6	17,8	19,4	18,6	17,8	17,1	16,3
7,1	17,5	16,8	16,0	15,4	14,7	16,0	15,4	14,7	14,1	13,4
7,2	14,4	13,8	13,2	12,6	12,0	13,2	12,6	12,0	11,5	11,0
7,3	11,8	11,3	10,7	10,3	9,79	10,7	10,3	9,79	9,35	8,91
7,4	9,59	9,16	8,73	8,33	7,93	8,73	8,33	7,93	7,57	7,21
7,5	7,77	7,41	7,06	6,73	6,40	7,06	6,73	6,40	6,11	5,81
7,6	6,27	5,98	5,69	5,42	5,15	5,69	5,42	5,15	4,91	4,67
7,7	5,04	4,80	4,57	4,35	4,13	4,57	4,35	4,13	3,94	3,74
7,8	4,05	3,85	3,66	3,48	3,31	3,66	3,49	3,31	3,15	2,99
7,9	3,24	3,08	2,93	2,79	2,64	2,93	2,79	2,64	2,52	2,39
8,0	2,59	2,46	2,34	2,22	2,11	2,34	2,22	2,11	2,01	1,90
8,1	2,06	1,96	1,86	1,77	1,68	1,86	1,77	1,68	1,60	1,52
8,2	1,64	1,56	1,48	1,41	1,34	1,48	1,41	1,34	1,27	1,20
8,3	1,31	1,24	1,18	1,12	1,06	1,18	1,12	1,06	1,01	0,96
8,4	1,04	0,99	0,94	0,89	0,84	0,93	0,89	0,84	0,80	0,76

<i>t</i>	20° C					25° C				
	100	300	500	700	900	100	300	500	700	900
pH										
6,0	68,7	67,6	66,4	65,3	64,1	67,2	66,0	64,8	63,7	62,5
6,1	63,5	62,3	61,1	59,9	58,6	61,9	60,7	59,4	58,2	56,9
6,2	58,0	56,8	55,5	54,2	52,9	56,4	55,1	53,8	52,5	51,2
6,3	52,4	51,1	49,8	49,5	47,2	50,6	49,4	48,0	46,8	45,5
6,4	46,6	45,3	44,0	42,8	41,5	44,9	43,6	42,3	41,1	39,8
6,5	40,9	39,7	38,5	37,3	36,0	39,3	38,1	36,8	35,7	34,5
6,6	35,5	34,4	33,2	32,1	30,9	33,9	32,8	31,7	30,6	29,5
6,7	30,4	29,4	28,3	27,3	26,2	29,0	28,0	26,9	25,9	24,9
6,8	25,8	24,8	23,9	22,9	22,0	24,5	23,6	22,6	21,7	20,9
6,9	21,6	20,8	19,9	19,1	18,3	20,5	19,7	18,8	18,1	17,3
7,0	18,0	17,2	16,5	15,8	15,1	17,0	16,3	15,6	14,9	14,3
7,1	14,8	14,2	13,6	13,0	12,4	14,0	13,4	12,8	12,2	11,7
7,2	12,1	11,6	11,1	10,6	10,1	11,4	10,9	10,4	9,95	9,49
7,3	9,89	9,45	9,00	8,60	8,19	9,29	8,87	8,45	8,07	7,68
7,4	8,02	7,65	7,29	6,95	6,61	7,52	7,18	6,83	6,51	6,20
7,5	6,47	6,17	5,87	5,60	5,32	6,07	5,78	5,50	5,24	4,98
7,6	5,21	4,96	4,72	4,50	4,27	4,88	4,65	4,42	4,21	4,00
7,7	4,18	3,98	3,78	3,60	3,42	3,91	3,72	3,54	3,37	3,20
7,8	3,35	3,19	3,03	2,88	2,73	3,13	2,98	2,83	2,69	2,55
7,9	2,68	2,54	2,42	2,30	2,18	2,50	2,38	2,26	2,15	2,04
8,0	2,13	2,03	1,93	1,83	1,74	1,99	1,90	1,80	1,71	1,62
8,1	1,70	1,62	1,53	1,46	1,38	1,59	1,51	1,43	1,36	1,29
8,2	1,35	1,29	1,22	1,16	1,10	1,26	1,20	1,14	1,08	1,02
8,3	1,08	1,02	0,97	0,92	0,87	1,00	0,95	0,90	0,86	0,81
8,4	0,85	0,81	0,77	0,73	0,69	0,80	0,76	0,72	0,68	0,64

#### 4. Delo

V erlenmajerico odpipetiramo 100 mL vzorca vode, dodamo indikator fenolftalein in titriramo z 0,1 M NaOH do preskoka iz brezbarvne v rahlo rožnato obarvanje. Določimo 3 paralelke in izračunamo povprečno porabo NaOH v mL.

Izpišemo podatke za temperaturo vode, pH vrednost, prevodnost,  $M(\text{CO}_2) = 44\text{g/mol}$  in glede na te podatke iz priložene tabele (tabela 2) odčitamo  $\omega(\text{CO}_2)$ .

Račun 16:

$$p(\text{vrednost}) = 1000 \cdot c(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH})_{\text{vzorca}} \left[ \frac{\text{mmol}}{\text{L}} \right] \quad (16)$$

$m(\text{vrednost})$  je poraba HCl pri titraciji vzorca vode z indikatorjem metiloranžem (iz vaje »Določanje trdote vode - karobonatna trdota«, volumen porabljene HCl), po enačbi 17.

$$m(\text{vrednost}) = 2 \cdot V(\text{HCl}) \quad (17)$$

$$Qc = c(\text{CO}_2) + c(\text{HCO}_3^-) + c(\text{CO}_3^{2-}) = m(\text{vrednost}) - p(\text{vrednost}) \left[ \frac{\text{mmol}}{\text{L}} \right]$$

Z uporabo enačbe 15 (str. 32), priložene tabele (tabela 2 - odčitamo  $\omega$  (% delež)  $\text{CO}_2$ ) in enačbe 18:

$$\gamma(\text{CO}_2) = Qc \cdot \omega(\text{CO}_2) \cdot M(\text{CO}_2) \quad (18)$$

- $\gamma(\text{CO}_2)$  [mg/L]
- $\omega(\text{CO}_2)$  [%]
- $M(\text{CO}_2) = 44 \text{ g/mol}$

izračunamo masno koncentracijo proste ogljikove kisline v vzorcu vode (mg/L).

## 5. Meritve in izračuni:

## **6. Rezultati in opažanja:**

# RAČUNSKO IN EKSPERIMENTALNO PREVERJANJE KARBONATNEGA RAVNOTEŽJA

## 1. Namen

Določimo karbonatno ravnotežje v vzorcih vode računsko po Axtu iz eksperimentalnih podatkov s pomočjo tabele 2 in eksperimentalno z določanjem pH-vrednosti vod, nasičenih s  $\text{CaCO}_3$ . Primerjaj rezultate.

## 2. Aparatura

Potrebni pripomočki so prikazani na sliki 9.

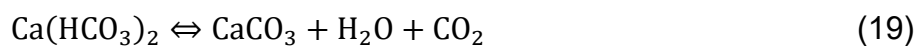


Slika 9: Bireta in Erlenmayerjeva bučka, tehtnica, pH meter, trovrata bučka.

Vir: lasten.

## 3. Teoretske osnove

V vodi so vedno prisotne določene količine proste in vezane ogljikove kisline. Govorimo o karbonatnem ravnotežju vode, ki ga podaja enačba 19:



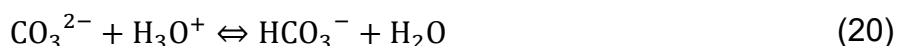
CO<sub>2</sub>, ki je potreben, da je vzpostavljeno karbonatno ravnotežje, imenujemo ravnotežni CO<sub>2</sub>. Glede na količino prisotnega ravnotežnega CO<sub>2</sub> ločimo tri možnosti: voda je v karbonatnem ravnotežju, ko je prisotnega ravno dovolj CO<sub>2</sub> glede na ravnotežnega, druga možnost je, da imamo agresivni CO<sub>2</sub> (če ga je preveč, glede na ravnotežje), tretja možnost pa je, da je prisotnega CO<sub>2</sub> premalo glede na ravnotežje.

#### 4. Delo

Trovrato bučko napolnimo z vzorcem vode. Skozi sredinski vrat merimo pH, skozi stranski vrat merimo temperaturo, drugi stranski vrat zamašimo. Po 2 minutah odčitamo pH. Odmašimo drugi stranski vrat, dodamo 1 g CaCO<sub>3</sub> in po 2 minutah odčitamo pH.

Imamo tri možnosti:

- Voda je v karbonatnem ravnotežju, pH vrednost se ne spremeni za več kot 0,04 pH- enote.
- Voda vsebuje agresivni CO<sub>2</sub>(enačba 20):



tvorijo se HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ioni, koncentracija H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> ionov pada in pH narašča. pH vrednost se spremeni za več kot + 0,04 enote pH.

- Voda ne vsebuje dovolj CO<sub>2</sub> (v vodi je manj CO<sub>2</sub>, kot ga je potrebno za ravnotežje): tvorijo se CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ioni, koncentracija H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> ionov narašča in pH pada. pH vrednost se spremeni za več kot - 0,04 enote pH.

Primerjajte, ali se eksperimentalno in računsko ugotovljene vrednosti ujemajo.

## 5. Meritve in izračuni

➤ Na začetku ( $t = 2 \text{ min}$ ):

pH = \_\_\_\_\_

$T =$  \_\_\_\_\_ °C

➤ Po dodatku  $\text{CaCO}_3$  ( $t = 2 \text{ min}$ ):

pH = \_\_\_\_\_

$T =$  \_\_\_\_\_ °C

Razlika v pH: \_\_\_\_\_

## **6. Rezultati in opažanja:**

# RAČUNSKO PREVERJANJE KARBONATNEGA RAVNOTEŽJA Z LANGELIERJEVIM INDEKSOM NASIČENJA (LSI)

## 1. Namen

Karbonatno ravnotežje v vzorcih vode določimo računsko z Langelierjevim indeksom nasičenja LSI iz eksperimentalnih podatkov s pomočjo podanih enačb (21-23) in tabel (3-6).

## 2. Teoretske osnove

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pHs} \quad (21)$$

pH – eksperimentalno izmerjen

pHs – pri nasičenju

$$\text{pHs} = -\log \left( K_{a2} \cdot \gamma(\text{Ca}^{2+}) \cdot c(\text{Ca}^{2+}) \cdot \gamma(\text{HCO}_3^-) \cdot \frac{c(\text{HCO}_3^-)}{K_p} \right) \quad (22)$$

oziroma

$$\text{pHs} = \text{p}K_{a2} - \text{p}K_p - \gamma(\text{Ca}^{2+}) + \text{p}c(\text{Ca}^{2+}) - \gamma(\text{HCO}_3^-) + \text{p}c(\text{HCO}_3^-) \quad (23)$$

S »p« je označena logaritemska vrednost naslednjih parametrov:

$K_{a2}$  – konstanta ravnotežja (tabela 3),

$\gamma(\text{Ca}^{2+})$  – aktivnostni koeficient za kalcijeve ione,

$c(\text{Ca}^{2+})$  – koncentracija za kalcijeve ione [mol/L],

$\gamma(\text{HCO}_3^-)$  – aktivnostni koeficient za hidrogenkarbonatne ione,

$c(\text{HCO}_3^-)$  – koncentracija za hidrogenkarbonatne ione [mol/L],

$K_p$  – topnostni produkt za  $\text{CaCO}_3$  (tabela 3).

Tabela 3: Konstante karbonatnega ravnotežja v odvisnosti od temperature

Temperatura (°C)	Konstanta $K_{a1}$	Konstanta $K_{a2}$	Konstanta $K_p$
5	$3,020 \cdot 10^{-7}$	$2,754 \cdot 10^{-11}$	$8,128 \cdot 10^{-9}$
10	$3,467 \cdot 10^{-7}$	$3,236 \cdot 10^{-11}$	$7,080 \cdot 10^{-9}$
15	$3,802 \cdot 10^{-7}$	$3,715 \cdot 10^{-11}$	$6,020 \cdot 10^{-9}$
20	$4,169 \cdot 10^{-7}$	$4,169 \cdot 10^{-11}$	$5,248 \cdot 10^{-9}$
25	$4,467 \cdot 10^{-7}$	$4,477 \cdot 10^{-11}$	$4,571 \cdot 10^{-9}$
40	$5,012 \cdot 10^{-7}$	$6,026 \cdot 10^{-11}$	$3,090 \cdot 10^{-9}$

Pri tem se aktivnostni koeficienti računajo po enačbah 24 in 25:

$$\text{Log } \gamma = \frac{0,5 \cdot z_i^2 \cdot \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad (24)$$

$z_i$  – naboj i-tega iona,

$I$  – ionska moč.

$$I = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot TDS \quad (25)$$

$TDS$  - raztopljene snovi, ki jih izračunamo s pretvorbo prevodnosti  $\chi$ .

Velja zveza 26:

$$TDS = 0,4216 \cdot \chi - 1,9946 \quad (26)$$

$\chi$  – prevodnost [ $\mu\text{Si}/\text{cm}$ ].

Imamo tri možnosti:

- $LSI > 0$  – izpada vodni kamen,
- $LSI \sim 0$  – voda je v ravnotežju,
- $LSI < 0$  – v vodi je prisoten agresivni ogljikov dioksid.

Po Ryznerju primerjamo izmerjen pH z izračunanim pHs, po naslednji enačbi 27:

$$RI = 2 \cdot pHs - pH \quad (27)$$

V tem primeru je možnosti pet:

- $RI < 5,5$  – močno izpada vodni kamen,
- $5,5 < RI < 6,2$  – izpada vodni kamen,
- $6,2 < RI < 6,8$  – ravnotežje,
- $6,8 < RI < 8,5$  – v vodi je prisoten agresivni ogljikov dioksid,
- $RI > 8,5$  – v vodi je prisotno veliko agresivnega ogljikovega dioksida.

Tabela 4: Podatki za izračun ionske moči  $I$

$CT(^{\circ}d)$	$I$	$CT(^{\circ}d)$	$I$	$CT(^{\circ}d)$	$I$
0,5	$0,2675 \cdot 10^{-3}$	10,5	5,616	20,5	1,0965
1,0	0,5349	11,0	5,883	21,0	1,1232
1,5	0,8022	11,5	6,150	21,5	1,1502
2,0	$1,0698 \cdot 10^{-3}$	12,0	6,417	22,0	1,1769
2,5	1,337	12,5	6,687	22,5	1,2036
3,0	1,605	13,0	6,954	23,0	1,2303
3,5	1,872	13,5	7,221	23,5	1,2570
4,0	2,139	14,0	7,488	24,0	1,2837
4,5	2,407	14,5	7,755	24,5	1,3104
5,0	2,675	15,0	8,025	25,0	1,3374
5,5	2,942	15,5	8,292	25,5	$1,3641 \cdot 10^{-2}$
6,0	3,210	16,0	8,559	26,0	1,3909
6,5	3,477	16,5	8,826	26,5	1,4175
7,0	3,744	17,0	$9,093 \cdot 10^{-3}$	27,0	1,4442
7,5	4,110	17,5	9,360	27,5	1,4712
8,0	4,278	18,0	9,627	28,0	1,4979
8,5	4,545	18,5	9,897	28,5	1,5246
9,0	4,815	19,0	$1,0164 \cdot 10^{-2}$	29,0	1,5513
9,5	5,082	19,5	1,0431	29,5	1,5780
10,0	5,349	20,0	1,0696	30,0	1,6047

Tabela 5: Podatki za izračun konstante  $f$ 

$I$	$f$	$I$	$f$	$I$	$f$
0,27 · 10 <sup>-3</sup>	1,101	12,8	1,645	25,6	1,833
0,53	1,124	13,2	1,653	25,8	1,835
0,8	1,187	13,6	1,661	26,0	1,838
1,2	1,228	13,8	1,664	26,4	1,842
1,6	1,260	14,0	1,668	26,8	1,846
1,8	1,281	14,4	1,675	27,0	1,849
2,0	1,289	14,8	1,683	27,2	1,851
2,4	1,314	15,0	1,686	27,6	1,855
2,8	1,337	15,2	1,690	28,0	1,859
3,0	1,348	15,6	1,696	28,2	1,861
3,2	1,358	16,0	1,703	28,4	1,863
3,6	1,377	16,2	1,706	28,8 · 10 <sup>-3</sup>	1,867
4,0	1,396	16,4	1,710	29,2	1,871
4,2	1,404	17,8	1,716	29,4	1,873
4,4	1,413	17,2	1,723	29,6	1,875
4,8	1,429	17,4	1,726	30,0	1,879
5,2	1,444	17,6	1,729	30,4	1,883
5,4	1,451	18,0	1,735	30,8	1,887
5,6	1,459	18,4	1,741	31,2	1,890
6,0	1,472	18,6	1,744	31,6	1,894
6,4	1,485	18,8	1,747	32,0	1,898
6,6	1,492	19,2	1,752	32,4	1,901
6,8	1,498	19,6 · 10 <sup>-3</sup>	1,758	32,8	1,905
7,2	1,511	19,8	1,761	33,2	1,909
7,6	1,522	20,0	1,764	33,6	1,912
7,8	1,528	20,4	1,769	34,0	1,915
8,0	1,534	20,8	1,774	34,4	1,919
8,4	1,544	21,0	1,777	34,8	1,922
8,8	1,555	21,2	1,780	35,2	1,926
9,0	1,560	21,6	1,785	35,6	1,929
9,2	1,565	22,0	1,791	36,0	1,932
9,6	1,575	22,2	1,793	36,4	1,936
10,0 · 10 <sup>-3</sup>	1,585	22,4	1,795	36,8	1,939
10,2	1,590	22,8	1,800	37,2	1,942
10,4	1,594	23,2	1,805	37,6	1,945
10,8	1,603	23,4	1,808	38,0	1,948
11,2	1,612	23,6	1,810	38,4	1,951
11,4	1,616	24,0	1,815	38,8	1,954
11,6	1,621	24,4	1,820	39,2	1,957
12,0	1,629	24,6	1,822	39,6	1,960
12,4	1,637	24,8	1,824	40,0	1,963
12,6	1,641	25,2	1,829		

Tabela 6: Podatki za izračun konstante  $K$

$t$ (°C)	$K$	$t$ (°C)	$K$	$t$ (°C)	$K$
0	0,0736	17	0,1358	34	0,2449
1	0,0762	18	0,1406	35	0,2541
2	0,0789	19	0,1458	36	0,2636
3	0,0816	20	0,1513	37	0,2736
4	0,0845	21	0,1570	38	0,2838
5	0,0875	22	0,1629	39	0,2944
6	0,0908	23	0,1686	40	0,3055
7	0,0942	24	0,1749	41	0,3163
8	0,0978	25	0,1815	42	0,3281
9	0,1014	26	0,1875	43	0,3396
10	0,1052	27	0,1932	44	0,3524
11	0,1091	28	0,1995	45	0,3648
12	0,1132	29	0,2056	46	0,3776
13	0,1172	30	0,2123	47	0,3918
14	0,1216	31	0,2203	48	0,4055
15	0,1261	32	0,2281	49	0,4208
16	0,1309	33	0,2366	50	0,4355

### 3. Izračuni

Podatki:

$$\chi = \text{_____} \mu\text{Si/cm}$$

$$c(\text{Ca}^{2+}) = \text{_____} \text{mol/L}$$

$$c(\text{HCO}_3^-) = \text{_____} \text{mol/L}$$

1. korak: izračunamo  $TDS$  po enačbi 28:

$$TDS = 0,4216 \cdot \chi - 1,9946 \quad (28)$$

2. korak: izračunamo ionsko moč  $I$  po enačbi 29:

$$I = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot TDS \quad (29)$$

3. korak: izračunamo aktivnostne koeficiente po enačbi 30:

$$\text{Log } \gamma = \frac{0,5 \cdot z_i^2 \cdot \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad (30)$$

oziroma:

$$\gamma(\text{Ca}^{2+}) = 10 \cdot \frac{0,5 \cdot z_i^2 \cdot \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad (31)$$

$$\gamma(\text{HCO}_3^-) = 10 \cdot \frac{0,5 \cdot z_i^2 \cdot \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad (32)$$

4. korak: iz tabele 3 odčitamo konstante karbonatnega ravnotežja  $K_{a2}$  in  $K_p$  pri izmerjeni temperaturi (v °C):

$$K_{a2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$K_p = \underline{\hspace{2cm}}$$

5. korak: vstavimo v enačbo za pHs

$$\text{pHs} = -\log (K_{a2} \cdot \gamma(\text{Ca}^{2+}) \cdot c(\text{Ca}^{2+}) \cdot \gamma(\text{HCO}_3^-) \cdot c(\text{HCO}_3^-) / K_p) \quad (33)$$

oziroma:

$$\text{pHs} = pK_{a2} - pK_p - \gamma(\text{Ca}^{2+}) + pc(\text{Ca}^{2+}) - \gamma(\text{HCO}_3^-) + pc(\text{HCO}_3^-) \quad (34)$$

6. korak: izračunamo LSI in RI:

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pHs} \quad (35)$$

$$\text{RI} = 2 \cdot \text{pHs} - \text{pH} \quad (36)$$

7. Primerjamo rezultate in napišemo komentar

## Izračun ravnotežnega ogljikovega dioksida in agresivnega ogljikovega dioksida po Axtovi metodi

Poiščemo podatke za:

$$T = \text{_____} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m\text{-vrednost} = \text{_____}$$

$$\text{prosti CO}_2 = \text{_____} \text{ mg/L}$$

$$\text{CaT} = \text{_____}$$

$$\text{KT} = \text{_____}$$

$$\text{CaT} = \text{_____}$$

Iz tabel (tabeli 4 in 5) določimo ionsko moč ( $I$ ) in korekcijski faktor ( $f$ ):

$$I = \text{_____}$$

$$f = \text{_____}$$

Iz tabele (tabela 6) odčitamo konstanto  $K$  odvisno od merjene temperature:

$$K = \text{_____}$$

in vstavimo v nadaljnje enačbe in izračunamo po enačbah 37 in 38:

$$\text{ravnotežni CO}_2 = \frac{K}{f} \cdot \text{CaT} \cdot m^2 = \text{_____} \quad (37)$$

$$\text{agresivni CO}_2 = \text{prosti CO}_2 - \text{ravnotežni CO}_2 = \text{_____} \quad (38)$$

#### 4. Rezultati

LSI =

RI =

ravnotežni CO<sub>2</sub> =

agresivni CO<sub>2</sub> =

## JAR – TEST

### 1. Namen

S pomočjo »JAR-testa« ugotovimo optimalno množino flokulanta in optimalno pH- vrednost za flokulacijo. Podamo masno koncentracijo flokulanta v [mg/L].

### 2. Aparatura

Aparatura je razvidna s slike 10.



Slika 10: Laboratorijski flokulator. Vir: lasten.

### 3. Teoretske osnove

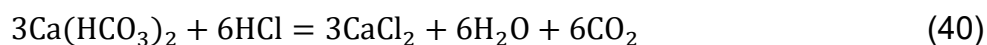
#### *Koagulacija in Flokulacija*

Koagulacija povzroča destabilizacijo koloidnih delcev z nevtralizacijo njihovega naboja, kar omogoči njihovo nadaljnje združevanje v procesu flokulacije. Pri obdelavi vode koagulant (aluminijeve in železove soli). Povzročijo destabilizacijo koloidnih delcev z nevtralizacijo njihovega naboja. V vodnem mediju nato nastajajo hidroksidne oborine, kot sta  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  in  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , ki imajo veliko specifično površino in omogočajo adsorpcijo destabiliziranih delcev. Med počasnim mešanjem (flokulacija) se ti delci združujejo v večje kosmiče – flokule, ki jih lahko učinkovito odstranimo z usedanjem ali filtracijo. Tudi mikroplastični delci se vežejo na površino nastajajočih hidroksidnih oborin zaradi elektrostatskih in hidrofobnih interakcij.

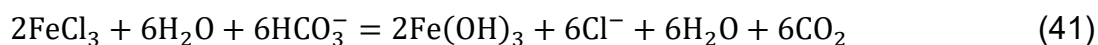
Za hitrejše posedanje flokul dodamo še polielektrolite, ki zamrežijo flokulo, da postane težja in se zato hitreje posede.

Najpogosteje uporabljeni koagulant so: aluminijeve soli ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ ), železove soli ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{FeClSO}_4$ ), mešani produkti aluminijevih in železovih soli, aluminosilikati, bentonit, kaolin, diatomejske zemlje. Polielektroliti so organske spojine, najpogosteje aluminijevi polimeri splošne formule  $\text{Al}_p(\text{OH})_q\text{Cl}_r(\text{SO}_4)_s$  in druge vrste polimeri, naravni ali umetni.

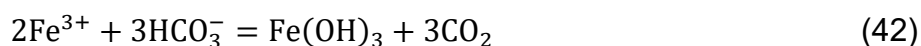
Mehanizem flokulacije s  $\text{FeCl}_3$  je naslednji:



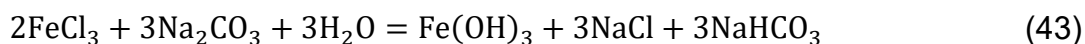
Skupna reakcija je naslednja:



Flokulacija poteka samo, če je v vodi dovolj hidrogenkarbonatnih ionov. Tako lahko zapišemo reakcije pri flokulaciji tudi v naslednji obliki:



Če je KT premajhna, dodajamo vodi natrijev karbonat oz. sodo, v razmerju 3 moli sode in 1 mol  $\text{FeCl}_3$ :



### **JAR-test**

Z JAR testom simuliramo koagulacijo/flokulacijo v laboratoriju. Namen testa je oceniti minimalno potrebno dozo koagulanta, da dosežemo določeno kvaliteto vode. Vzorec vode nalijemo v 4 (ali več) posode (čaše) in dodajamo različne koncentracije koagulanta.

JAR test poteka v več stopnjah:

- priprava in doziranje koagulanta,
- hitro mešanje vzorcev 2 min s 100 obrati/min, da se ustvari potreben stik med delci (nevtralizacija)
- počasno mešanje vzorcev 20 min z 20 obrati/min, da se tvorijo flokule,
- dodajanje polielektrolita, da zamrežimo flokule.

Po končanem mešanju opazujemo hitrost posedanja, saj je optimalna množina koagulanta tista, ki ima največjo hitrost, kar pomeni, da se najhitreje zbistri.

Ko določimo optimalno dozo koagulanta, ponovimo JAR test pri 4 različnih pH vrednostih vzorca. Po končanem posedanju flokul zapišemo optimalno pH vrednost za flokulacijo.

#### **4. Delo**

V 4 čaše nalijte 500 mL vzorca in dodajte koagulacijsko sredstvo (okoli 10 mg/L). Na flokulatorju nastavite hitro mešanje vzorcev s 100 obrati na minuto in mešajte 2 minuti, da se ustvari potreben stik med delci (nevtralizacija).

Nato 20 minut mešate počasi z 20 vrtljaji na minuto, da se tvorijo flokule. Nato dodajte polielektrolit, da se flokule zamrežijo. Mešajte 2 minuti pri 20 vrtljajih na minuto. Ustavite mešalo in opazujte posedanje flokul.

Optimalna množina flokulanta je tista, ki ima največjo hitrost posedanja in se najhitreje zbistri.

Ko določite optimalno dozo koagulanta, ponovite JAR test pri 4-ih različnih pH vrednostih vzorca. V 4 posode (čaše) nalijte 500 mL vzorca. V vsaki od 4 čaš uravnajte pH vode na 3, 5, 7 in 9 s pomočjo HCl in NaOH. Nato dodajte še optimalne količine koagulanta in ponovite JAR test, kot je že prej opisano. Po končanem posedanju flokul zapišite optimalno pH vrednost za flokulacijo.

## 5. Meritve in izračuni

## **6. Rezultati in opažanja:**

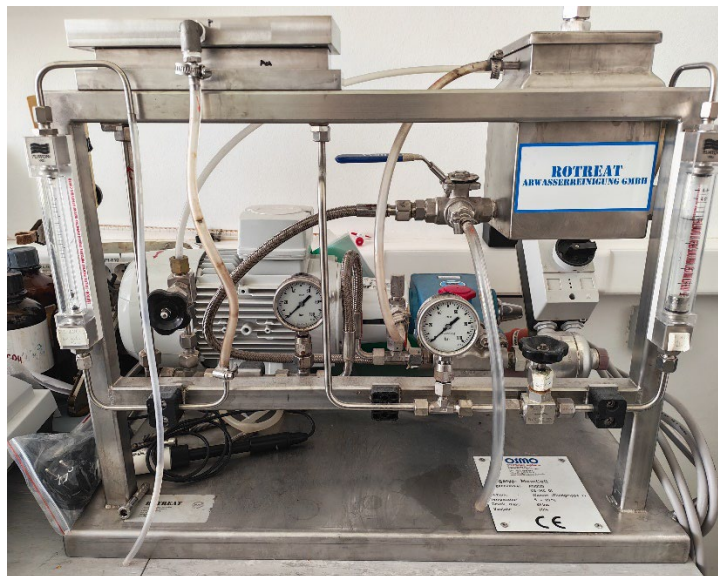
## REVERZNA OSMOZA

### 1. Namen

Izmerili bomo temperature, trdote, koncentracijo kalcija in magnezija ter prevodnost v pitni vodi in v permeatu po reverzni osmozi. Po enačbi 48 (na strani 62) izračunamo, koliko ionov je membrana zadržala.

### 2. Aparatura

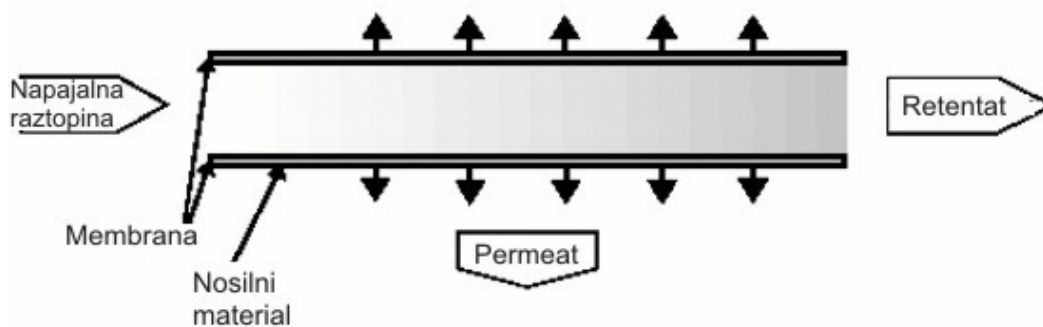
Aparatura je prikazana na sliki 11.



Slika 11: Reverzna osmoza. Vir: lasten.

### 3. Teoretske osnove

Napajalna raztopina, ki jo vodimo v membranski modul, se loči v permeat, ki prehaja skozi membrano in predstavlja očiščeno vodo ter retentat (tudi koncentrat), ki ga membrana zavrne, se ne prečisti in predstavlja odpadno vodo (slika 12). Permeat lahko recikliramo in ponovno uporabimo.



Slika 12: Princip pretočne tehnike (angl. *cross flow*). Vir: lasten.

Pri procesu reverzne osmoze prevladuje mehanizem difuzije. Semipermeabilno membrano uporabljamo za ločitev ionov in molekul iz raztopin pri obratovalnem tlaku, ki je vedno večji od osmotskega tlaka vhodne raztopine. Če ločimo raztopino od topila s polpropustno membrano, ki prepušča samo topilo in ne topljenca, potem teče topilo skozi membrano v raztopino, kjer je kemijski potencial topila nižji. Ta proces imenujemo osmoza.

Pretok topila lahko preprečimo, če dovolj povečamo tlak nad raztopino. Osmotski tlak  $p$  je padec tlaka skozi membrano, ki je potreben, da preprečimo spontan pretok v katerokoli smer skozi membrano. Osmotski tlak je koligativna lastnost, to je lastnost, ki je odvisna od števila molekul topljenca in ne od narave in vrste teh delcev. Predstavljamo si lahko, da ima raztopina težnjo po razredčenju. Ker prehaja topilo v raztopino, se prostornina raztopine povečuje. Nivo raztopine se dviga, pri tem pa narašča hidrostatski tlak ( $\rho \cdot g \cdot h$ ) v raztopini. Ko je dovolj velik, zaustavi prodiranje molekul topila skozi membrano. Težnjo molekul topila po prehajanju skozi polpropustno membrano definiramo kot osmotski tlak, ki ga lahko uravnoteži hidrostatski tlak. Pri zelo nizkih koncentracijah velja enačba (44):

$$p \cdot V = R \cdot T \quad \text{za 1 mol topljenca} \quad (44)$$

V ravnotežju je kemijski potencial čistega topila pri eni atmosferi ( $m_1^0$ ) enak kemijskemu potencialu topila v raztopini pod določenim tlakom ( $m_1'$ ). Kemijski potencial je za topilo v idealni raztopini podan z enačbo (45):

$$m_1 = m_1^0 + R \cdot T \cdot \ln(1 - x_2) \quad (45)$$

Enačba (37), ki jo je podal Van't Hoff na empirični osnovi, se glasi:

$$p = \left(\frac{n}{V}\right) \cdot R \cdot T = c \cdot R \cdot T \quad (46)$$

in velja natančno le za raztopine, ki vsebujejo kot molekule topljenca samo neelektrolite v nedisociirani obliki. Za raztopine elektrolitov je Van't Hoff vpeljal korekcijski faktor  $i$ :

$$p = i \cdot c \cdot R \cdot T \quad (47)$$

S povečanjem tlaka nad koncentrirano raztopino lahko proces osmoze obrnemo - iz koncentriranih raztopin "iztisnemo" vodo. Ta proces reverzne osmoze se uporablja za pridobivanje pitne vode.

V spodnji tabeli (tabela 7) so prikazani različni membranski procesi, velikosti delcev, ki jih membrana zadrži in obratovalni tlaki.

Tabela 7: Vrste membranskih procesov

Vrsta procesa	Velikost delcev	Tlak (bar)	Vrsta delcev
Mikrofiltracija	0,1 – 5 $\mu\text{m}$	0,1 – 2,0	bakterije, suspendirani delci, kvasovke
Ultrafiltracija	10 – 100 nm	1,0 – 5,0	proteini, polimeri
Nanofiltracija	1 – 10 nm	5,0 – 20	aminokisliline, oligosaharidi
Reverzna osmoza	< 1 nm	10 – 100	sladkorji, soli

Pomemben podatek za membrano je, koliko snovi se zadrži na membrani in koliko je gre skozi membrano. Imenuje se rejekcija (angl. *rejection*)  $R$  in je izražena z enačbo:

$$R = 1 - \frac{c_p}{c_0} \quad (48)$$

Kjer je:

$c_p$  – koncentracija snovi v permeatu (mol/L),

$c_0$  – koncentracija snovi v začetni raztopini (mol/L).

#### 4. Delo

Priključimo napravo in jo vklopimo po navodilih. Beležimo tlak in čas obratovanja. V vzorcu pitne vode in vzorcu po reverzni osmozi izmerimo temperature, trdote in prevodnost. Po enačbi 39 izračunamo, koliko  $\text{Ca}^{2+}$  in  $\text{Mg}^{2+}$  ionov je membrana zadržala.

## **5. Meritve, rezultati in opažanja**

V obliki tabele podamo vse izmerjene in izračunane vrednosti. Napišemo diskusijo.



## LITERATURA

- [1] M. Islamčević Razboršek and M. Kolar, *Analizna kemija II in industrijska analiza: Navodila za vaje*. Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2023. doi: 10.18690/um.fkkt.4.2023.
- [2] G. Urbančič and M. Toman Jožef, *Varstvo celinskih voda*. Ljubljana: Študentska založba, 2003.
- [3] WHO, "Fourth edition incorporating the first and second addenda Guidelines for drinking-water quality," Geneva, Switzerland, 2011.
- [4] S. Larance, J. Wang, M. A. Delavar, and M. Fahs, "Assessing Water Temperature and Dissolved Oxygen and Their Potential Effects on Aquatic Ecosystem Using a SARIMA Model," *Environments - MDPI*, vol. 12, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/environments12010025.
- [5] J. Koue, "Assessing the impact of climate change on dissolved oxygen using a flow field ecosystem model that takes into account the anaerobic and aerobic environment of bottom sediments," *Acta Geochimica*, vol. 44, no. 1, pp. 11–22, Feb. 2025, doi: 10.1007/s11631-024-00711-4.
- [6] A. Boretti and L. Rosa, "Reassessing the projections of the World Water Development Report," *NPJ Clean Water*, vol. 2, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41545-019-0039-9.
- [7] D. V. . Chapman, *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments, and water in environmental monitoring*. CRC Press, 2021.
- [8] C. N. . Sawyer, P. L. . McCarty, and G. F. . Parkin, *Chemistry for environmental engineering and science*. McGraw-Hill, 2007.
- [9] Jamie. Bartram and Richard. Ballance, *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. E & FN Spon, 1996.
- [10] H. W. Paerl and T. G. Otten, "Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences, and Controls," *Microb. Ecol.*, vol. 65, no. 4, pp. 995–1010, May 2013, doi: 10.1007/s00248-012-0159-y.
- [11] F. Freeling *et al.*, "Occurrence and potential environmental risk of surfactants and their transformation products discharged by wastewater treatment plants," *Science of the Total Environment*, vol. 681, pp. 475–487, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.445.
- [12] R. G. . Wetzel, *Limnology: lake and river ecosystems*. Academic Press, 2001.
- [13] S. Birk *et al.*, "Three hundred ways to assess Europe's surface waters: An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive," *Ecol. Indic.*, vol. 18, pp. 31–41, 2012, doi: 10.1016/j.ecolind.2011.10.009.
- [14] I. Douterelo, R. L. Sharpe, S. Husband, K. E. Fish, and J. B. Boxall, "Understanding microbial ecology to improve management of drinking water distribution systems," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 6, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.1002/WAT2.1325.
- [15] Meena. Palaniappan, *Clearing the waters: a focus on water quality solutions*. Pacific Institute; United Nations Environment Programme, Division of Environmental Policy Implementation, 2010.

- [16] K. Tarman, *Ekologija: učbenik za strokovne in tehniške gimnazije*. DZS, 2007.
- [17] *More people, more food, worse water? : a global review of water pollution from agriculture/ edited by Javier Mateo-Sagasta, Sara Marjani Zadeh, Hugh Turral*. International Water Management Institute, 2018.
- [18] K. Žitnik, "Tehnološki pristopi k čiščenju vode z vidika odstranjevanja PFAS-diplomsko delo," 2025.
- [19] C. Lassen *et al.*, *Title: Microplastics-Occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark*. [Online]. Available: [www.eng.mst.dk](http://www.eng.mst.dk)
- [20] J. A. Silva, "Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review," Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su151410940.
- [21] N. Samec, *Osnove okoljskega inženirstva*. Maribor: Tiskarna tehniških fakultet, 1999.

# TEHNOLOGIJA VOD: LABORATORIJSKE VAJE

MARJANA SIMONIČ, MAŠA ISLAMČEVIĆ RAZBORŠEK

Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Maribor, Slovenija  
marjana.simonic@um.si, masa.islamcevic@um.si

Publikacija predstavlja zbirko laboratorijskih vaj s področja tehnologije voda, namenjenih razumevanju osnovnih fizikalno-kemijskih lastnosti vode in metod njihovega določanja. Vključuje analize, kot so določanje pH, prevodnosti, motnosti, trdote, določanje proste ogljikove kisline in karbonatnega ravnotežja. Predstavljena sta JAR test in reverzna osmoza. Poseben poudarek je na praktičnem delu, pravilni uporabi laboratorijske opreme in interpretaciji rezultatov. Publikacija povezuje teoretično znanje s praktičnimi primeri ter spodbuja razumevanje pomena kakovosti vode v okoljskem in inženirskem kontekstu. Navodilom so dodana tudi navodila za varno delo v laboratoriju, pregled simbolov nevarnih snovi in napotki za prvo pomoč. Namenjena so predvsem študentom tehničnih in naravoslovnih smeri kot podpora pri laboratorijskem delu in razumevanju procesov v vodnem okolju.

DOI  
[https://doi.org/  
10.18690/um.fkkt.4.2026](https://doi.org/10.18690/um.fkkt.4.2026)

ISBN  
978-961-286-140-1

**Ključne besede:**  
tehnologija voda,  
kakovost vode,  
laboratorijske analize,  
fizikalno-kemijski  
parametri,  
trdota vode,  
prosta ogljikova kislina,  
karbonatno ravnotežje,  
JAR test,  
reverzna osmoza



Univerzitetna založba  
Univerze v Mariboru



Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za kemijo  
in kemijsko tehnologijo