

# Upotreba umjetnih močvarnih površina u sanaciji zagađenja voda

---

**Matić, Nikol**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:264724>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Prijediplomski studij naftnog rudarstva

**UPOTREBA UMJETNIH MOČVARNIH POVRŠINA U SANACIJI ZAGAĐENJA  
VODA**

Završni rad

Nikol Matić

N4435

Zagreb, 2023.

## UPOTREBA UMJETNIH MOČVARNIH POVRŠINA U SANACIJI ZAGAĐENJA VODA

NIKOL MATIĆ

Završni rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### SAŽETAK

Razvojem tehnologije, globalnim povećanjem broja stanovnika i industrijalizacijom, povećavaju se količine zagađivača u okolišu. Proporcionalno povećanju količine zagađivača, javlja se sve veća potreba za razvojem novih tehnologija za sanaciju istih. Voda je, kao primarni element za živa bića, izložena emisijama i utjecajima štetnih tvari te se kao rezultat toga povećava količina otpadnih voda koje je potrebno zbrinuti na adekvatan način. Biljni uređaji, koji se temelje na prirodnim procesima, a u kojima sudjeluju biljke, mikroorganizmi te supstrati, pokazali su se jeftinim, učinkovitim i jednostavnim pročišćivačima otpadnih voda.

Ključne riječi: zagađivači, otpadna voda, biljni uređaji, sanacija, prirodni procesi

Završni rad sadrži: 41 stranicu, 5 tablica, 10 slika i 22 reference

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr.sc. Lidia Hrnčević, redovita profesorica RGNf-a

Ocjenjivači: : Dr.sc. Lidia Hrnčević, redovita profesorica RGNf-a  
Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNf-a  
Dr. sc. Karolina Novak Mavar, izv. prof. RGNf-a

# SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA</b> .....	II
<b>POPIS TABLICA</b> .....	III
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I KRATICA</b> .....	IV
<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. OTPADNE VODE</b> .....	3
2.1. Onečišćivači u otpadnoj vodi.....	7
2.2. Obrada otpadnih voda.....	10
<b>3. BILJNI UREĐAJI</b> .....	12
3.1. Biljni uređaji—umjetni močvarni sustavi.....	12
3.2. Povijest razvoja biljnih uređaja.....	14
3.3. Vrste biljnih uređaja.....	15
3.3.1. <i>Površinski biljni uređaji</i> .....	17
3.3.2. <i>Potpovršinski biljni uređaji</i> .....	21
3.4. Kisik u biljnom uređaju.....	24
3.5. Utjecaj temperature i pH otpadne vode na procese u biljnom uređaju.....	25
<b>4. OBRADA OTPADNE VODE U BILJNOM UREĐAJU</b> .....	27
4.1. Uklanjanje suspendiranih tvari u biljnim uređajima.....	27
4.2. Uklanjanje organskih tvari u biljnim uređajima.....	29
4.3. Uklanjanje dušika u biljnim uređajima za pročišćavanje voda.....	30
4.4. Uklanjanje fosfora u biljnim uređajima za pročišćavanje voda.....	32
4.5. Uklanjanje mikroorganizama u biljnim uređajima za pročišćavanje voda.....	32
<b>5. PRIPREMA, IZGRADNJA, ODRŽAVANJE I MONITORING BILJNOG UREĐAJA</b> .....	34
5.1. Dimenzioniranje biljnih uređaja.....	35
5.2. Održavanje i monitoring biljnih uređaja.....	36
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	38

<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>39</b>
----------------------------	-----------

## **POPIS SLIKA**

<b>Slika 2-1.</b> Izgled otpadne vode.....	8
<b>Slika 3-1.</b> Biljni uređaj .....	13
<b>Slika 3-2.</b> Izrada najvećeg biljnog uređaja u Kaštelir-Labinci u Hrvatskoj.....	15
<b>Slika 3-3.</b> Klasifikacija biljnih uređaja.....	16
<b>Slika 3-4.</b> Površinski biljni uređaji.....	17
<b>Slika 3-5.</b> Površinski biljni uređaji čiji su biljni dijelovi iznad razine površine vode .....	19
<b>Slika 3-6.</b> Plutajući močvarni uređaji.....	20
<b>Slika 3-7.</b> Potpovršinski biljni uređaji.....	21
<b>Slika 3-8.</b> Biljni uređaj s horizontalnim potpovršinskim tokom.....	22
<b>Slika 3-9.</b> Biljni uređaj s vertikalnim potpovršinskim tokom.....	23
<b>Slika 3-10.</b> Utjecaj temperature na topljivost kisika pri atmosferskom tlaku .....	25

## **POPIS TABLICA**

<b>Tablica 2-1.</b> Usporedba smjernica WHO i direktive EU-e o maksimalni dopuštenim tvarima (MDK) u pitkoj vodi.....	4
<b>Tablica 2-2.</b> MDK tvari u zdravstveno ispravnoj vodi prema HZ-u .....	5
<b>Tablica 2-3.</b> Vrsta otpadnih voda prema izvoru nastanka .....	7
<b>Tablica 2-4.</b> Onečišćivači u otpadnim vodama.....	9
<b>Tablica 5-1.</b> Parametri za dimenzioniranje biljnih uređaja.....	35

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA I OZNAKA

EU – Europska unija

WHO – Svjetska zdravstvena organizacija (engl. *World Health Organization*)

Al – aluminij

Sb – antimon

As – arsen

C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> - benzen

B – bor

Cr – krom

Pb – olovo

C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> – tetrakloretoan

Mn – mangan

Hg – živa

Ni – nikal

Se – selen

H<sub>2</sub>S – sumporovodik

CO<sub>2</sub> - ugljikov dioksid

BPK – biološka potrošnja kisika

KPK – kemijska potrošnja kisika

MDK – maksimalna dopuštena koncentracija

RH – Republika Hrvatska

BPK<sub>5</sub> – biološka potrošnja kisika nakon pet dana

UST – ukupna suspendirana tvar



V – volumen ( $m^3$ )

A – površina ( $m^2$ )

h – visina (m)

$V_R$  – realni volumen vode ( $m^3$ )

$\phi$  – poroznost

NVZ – nominalno vrijeme zadržavanja (s)

Q – volumni protok ( $m^3/s$ )

H – širina (m)

d – dubina (m)

$A_p$  – površina poprečnog presjeka ( $m^2$ )

$k_s$  – hidrauličko površinsko opterećenje (m/s)

C – ugljik

N – dušik

P – fosfor

PAB – fosfat akumulirajuće bakterije

S – nagib

pH - lat. *potentia hydrogenii*: potencijal vodika; mjera kiselosti ili bazičnosti vodenih otopina

HZ – Hrvatsko zdravstvo

K – vodonepropusnost

PVC – polivinil klorid (engl. *polyvinyl chloride*)

PP – polipropilen

## 1. UVOD

Zbog intenzivne urbanizacije, razvoja industrijske poljoprivredne proizvodnje, kao posljedice povećanja broja stanovništva na Zemlji te, shodno tome, povećanja potreba za resursima i energijom, javljaju se brojni problemi u vidu zagađenja okoliša. Neki od tih problema predstavljaju povećanje krutih, tekućih i plinovitih otpadnih tvari koje se odlažu na ili u tlo, ili se ispuštaju u površinske i podzemne vode. Uz prethodno navedeno, do zagađenja okoliša u današnje vrijeme dovela je i povećana potreba za energentima uzrokovana velikim porastom broja stanovnika počevši od druge polovice 20. stoljeća. Voda je, kao jedna od najvažnijih resursa za čovječanstvo, posebno izložena zagađivanju zbog sposobnosti otapanja različitih tvari, izloženosti ljudskim aktivnostima te zbog svoje pokretljivosti.

Zbog navedenih problema, posljednjih desetljeća 20. stoljeća povećano se javlja potreba za smanjenjem i kontrolom utjecaja na okoliš te razvojem tehnologija sanacije zagađenja za bilo koju sastavnicu okoliša, pa tako i vodu. Utjecaj na okoliš je, dakle, poželjno svesti na minimalnu razinu, a kada to nije moguće, nastalo onečišćenje ili zagađenje (teži oblik onečišćenja) je potrebno sanirati do razine, koja je propisana zakonskom regulativom. Takvi se zakonski propisi stalno ažuriraju te su njihovi zahtjevi, vođeni povećanjem brige za okoliš, sve veći. Shodno tome, proizvođači otpadnih voda su, na neki način, primorani potražiti učinkovitije tehnologije obrade otpadnih voda kao odgovor na zakonski povećane zahtjeve.

Razni su načini nastanka otpadnih voda, ali bez obzira na njih, općenito je moguće razlikovati konvencionalne i nekonvencionalne uređaje za pročišćavanje otpadnih voda.

Konvencionalni uređaji podrazumijevaju složene postupke prilikom njihovog projektiranja, održavanja te upravljanja istima, zbog primjene skupih i sofisticiranih tehnoloških rješenja i veće cijene energije potrebne za njihov rad. Stoga se današnja istraživanja u navedenom području sve češće usmjeravaju u pronalazak alternativnih rješenja u vidu uporabe nekonvencionalnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, odnosno u razvoj biljnih uređaja. Ti su uređaji produkt ideje o pročišćavanju otpadnih voda korištenjem prirodnih procesa koji se odvijaju u močvarnoj vegetaciji i tlu, a ujedno uključuju i aktivnost prisutnih mikrobioloških skupina. Procesi pročišćavanja otpadnih voda u nekonvencionalnim uređajima su projektirani tako da se odvijaju u prirodnim sustavima, ali u kontroliranim uvjetima. Iako u svijetu postoji velik broj biljnih uređaja, koji se koriste već duži niz godina, zbog njihove složenosti, složenosti sustava obrade otpadnih voda te drugih čimbenika (karakteristike otpadnih voda, klimatski uvjeti, korištene biljne vrste...) i dalje ne postoje precizni kriteriji pri

projektiranju takvih uređaja. Neke od odlika biljnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda su niski zahtjevi za energijom i vođenjem sustava, ekološka prihvatljivost te sposobnost učinkovitog odlaganja organskih tvari. Jedna od malobrojnih mana je potreba za korištenjem velike površine pri otklanjanju otpadnih tvari u relativno maloj količini otpadne vode (Ružinski i Anić Vučinić, 2010). Ovaj Završni rad je koncipiran tako da prikaže osnovne informacije o biljnim uređajima te specifičnosti izgradnje istih. U radu je sažeto prikazana podjela biljnih uređaja, dat je prikaz njihovih glavnih dijelova, način njihovog održavanja istih, potreba prethodnog pročišćavanja te važnosti obrade otpadnih voda za manje sredine i naselja koja često nemaju izgrađeni kanalizacijski sustav priključen na veće sustave za obradu otpadnih voda.

## 2. OTPADNE VODE

Otpadnim vodama nazivaju se sve vode nastale pod utjecajem ljudskog djelovanja kojima je promijenjena kakvoća odnosno korisna svojstva uslijed unošenja, ispuštanja ili odlaganja određenih tvari u njih ili djelovanje drugih uzročnika (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Voda je izuzetno bitna za sva živa bića. Shodno povećanju količine otpadne vode, smanjuje se količina pitke vode koja je jedna od osnovnih potreba živih bića. Pristup pitkoj vodi ključna je sastavnica u zdravlju čovjeka, njegovog ljudskog prava te je sastavni dio globalnih politika zaštite okoliša.

Voda, kao univerzalno otapalo, može sadržavati i tvari koje su opasne za zdravlje živih bića i čovjeka. S obzirom na izvor nastanka, prisutne su različite količine i vrste otpadnih tvari u otpadnoj vodi. Jedan od načina procjene onečišćenja vode je onaj pomoću uočavanja promjene boje, okusa ili mirisa vode. Osim toga, razvijeni su standardi kvalitete vode koji opisuju dozvoljene koncentracije odgovarajućih tvari koji se mogu pronaći u sastavu vode. Opskrbljenost pitkom vodom postala je nacionalni, regionalni i lokalni problem, međutim ne postoje univerzalno priznati i prihvaćeni međunarodni standardi za pitku vodu. Čak i tamo gdje postoje standardi, vrijednosti dopuštenih tvari mogu varirati i do nekoliko puta više između dva standarda. Mnoge razvijene zemlje određuju svoje standarde onečišćenosti voda temeljem standarda koji se primjenjuju za pitku vodu. U Europskoj uniji (EU) standardi kvalitete pitke vode definirani su u *Direktivi (EU) 2020/2184 o kvaliteti vode namijenjene za ljudsku potrošnju* dok u zemljama bez zakonodavnog ili administrativnog okvira, Svjetska zdravstvena organizacija (engl. *World Health Organization*) objavljuje standarde koji se moraju poštovati (Tablica 2-1.). Istraživanja su pokazala da se povećala neto ekonomska korist u zemljama koje su ulagale u poboljšanje standarda vode iz razloga što se smanjio ukupni zdravstveni trošak uzrokovan utjecajem štetnih tvari koji su bili sastavnice vode (WHO, 2017).

**Tablica 2-1.** Usporedba smjernica WHO i direktive EU-e o maksimalnim dopuštenim tvarima (MDK) u pitkoj vodi (prema WHO, 2017 i Direktivi (EU) 2020/2184)

Parametar	Kratica	Svjetska zdravstvena organizacija	Europska unija
Aluminij	Al	0,9 mg/L	0,2 mg/L
Antimon	Sb	0,02 mg/L	5,0 µg/L
Arsen	As	0,01 mg/L	10 µg/L
Benzen	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,01 mg/L	1,0 µg/L
Bor	B	2,4 mg/L	1,0 mg/L
Krom	Cr	0,05 mg/L	50 µg/L
Olovo	Pb	0,01 mg/L	10 µg/L
Tetrakloretan	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	40 µg/L	10 µg/L
Mangan	Mn	0,08 mg/L	0,05 mg/L
Živa	Hg	0,006 mg/L	1 µg/L
Nikal	Ni	0,07 mg/L	20 µg/L
Nitrati		50 mg/L	50 mg/L
Nitriti		3 mg/L	0,5 mg/L
Selen	Se	0,04 mg/L	10 µg/L

U Republici Hrvatskoj ispravnost vode za piće propisana je *Pravilnikom o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće* (NN 47/2008). Pravilnikom se propisuje kakva mora biti zdravstvena ispravnost vode za ljudsku uporabu, kolike moraju biti granične vrijednosti pokazatelja zdravstvene ispravnosti, vrste i obim analiza uzoraka te dinamika uzorkovanja vode za piće. Prema Pravilniku, voda za piće se definira kao voda koja je u svojem izvornom stanju ili nakon obrade namijenjena za piće, kuhanje, pripremu hrane ili druge kućanske namjene, neovisno o njenom porijeklu te neovisno o tome da li se isporučuje razvodnim mrežama, cisternama ili spremnicima. Zdravstveno ispravnom vodom se smatra ona voda koja ne sadrži mikroorganizme, parazite te njihove razvojne oblike, tvari u određenim koncentracijama koje predstavljaju opasnost za ljudski život. Hrvatski zavod za javno zdravstvo održava stalno praćenje (monitoring) parametara koji definiraju ispravnost vode za piće. Ukoliko se utvrdi da voda nije ispravna, potrebno je odmah ograničiti ili prekinuti isporuku vode, obavijestiti

potrošače te im dati odgovarajuće preporuke i provesti hitne mjere za uklanjanje tvari koje pogoršavaju kvalitetu vode. U Tablici 2-2. prikazane su maksimalno dopuštene koncentracije (MDK) tvari u vodi za piće propisane Pravilnikom.

**Tablica 2-2.** MDK tvari u zdravstveno ispravnoj vodi prema HZ-u (Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti za piće, NN 47/2008)

<b>Parametar</b>	<b>Kratica</b>	<b>MDK</b>
Aluminij	Al	0,2 mg/L
Antimon	Sb	5,0 µg/L
Arsen	As	10 µg/L
Benzen	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	1 µg/L
Bor	B	1000 µg/L
Krom	Cr	50 µg/L
Olovo	Pb	10 µg/L
Tetrakloretan	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	10 µg/L
Mangan	Mn	50 µg/L
Živa	Hg	1 µg/L
Nikal	Ni	20 µg/L
Nitrati		50 mg/L
Nitriti		0,5 mg/L
Selen	Se	10 µg/L

S obzirom na vrstu nastanka, otpadne vode se općenito mogu podijeliti u četiri grupe (Tablica 2-3.) (Ružinski i Anić Vučinić, 2010):

1. komunalne,
2. industrijske,
3. poljoprivredne i
4. oborinske otpadne vode.

Komunalne otpadne vode su vode koje nastaju iz kućanstava, ureda, malih komercijalnih izvora i malih industrijskih pogona. One su vrlo raznolikog sastava te sadrže

velik broj organskih, odnosno razgradivih komponenti kojima je za razgradnju potreban kisik. Mali komercijalni izvori onečišćenja povećavaju količinu otpadne vode, jer su to vode koje potječu iz restorana, od pranja vozila te ostalih svakodnevnih procesa. Mali industrijski izvori također povećavaju količinu komunalnih otpadnih voda, ali njihovi tehnološki procesi mogu uključivati predobradu otpadne vode, kojom se u nekoj mjeri smanjuje količina otpadnih tvari.

Industrijske otpadne vode potječu od različitih izvora (industrijski pogoni) te samim time postoji velika razlika u njihovom sastavu, količini i protoku. Takvim otpadnim vodama se mogu smatrati i one koje nastaju procjeđivanjem kišnice po odlagalištima otpada te industrijskim postrojenjima.

Poljoprivredne otpadne vode nastaju kao posljedica intenzivnih poljoprivrednih aktivnosti te se takve vode u vrlo malo slučajeva obrađuju.

Oborinske vode se razlikuju po svom sastavu ovisno o mjestu izvora (pod utjecajem vjetrova mogu doći iz znatno udaljenih mjesta kao npr. crvene ili žute kisele kiše koje nastaju ispiranjem pustinjske prašine) te ih je nužno što prije prikupiti s površina pomoću sustava za odvodnju. Ukoliko se prikupljaju s parkirališta, površinskih prometnica, benzinskih postaja ili drugih uređenih površina, u svom sastavu mogu sadržavati i naftne derivate, koji predstavljaju potencijalnu opasnost za tla i vode te utječu u sustave javne odvodnje.

Javna odvodnja je djelatnost sakupljanja otpadne vode prilikom čega se otpadna voda odvodi do uređaja za njezino pročišćavanje i obrade otpadnog mulja koji nastaje kao nusprodukt obrade otpadne vode. Otpadni mulj sadrži akumulirane krute tvari koje nastaju tijekom fizikalnih, bioloških i kemijskih procesa, sastav mu je složen i predstavlja mješavinu anorganskih i organskih tvari te sadrži parazite, viruse i brojne toksične elementne i spojeve (Domazet, 2022).

**Tablica 2-3.** Vrste otpadnih voda prema izvoru nastanka (Ružinski i Anić Vučinić, 2010)

<b>Vrste otpadnih voda</b>	<b>Izvor</b>	<b>Opis</b>
Komunalna otpadna voda	Primarno stambeni i poslovni objekti	Razrijeđena do koncentrirana mješavina urina, fekalija, papira, plastike, deterdženata, masnoća i kemikalija iz domaćinstva i industrije
Industrijska otpadna voda	Primarni industrijski procesi i procjeđivanje	Razrijeđena do koncentrirana mješavina emulzija nekoliko do mnogo biorazgradivih i/ili nerazgradivih kemikalija
Poljoprivredna otpadna voda	Intenzivne poljoprivredne aktivnosti, primjerice mljekarstvo ili stočarstvo i klaonice	Razrijeđene do koncentrirane otopine biorazgradivih tvari
Oborinska voda	Slivene vode s gradskih, prigradskih i seoskih površina	Tipično razrijeđena mješavina mineralnih i organskih krutina i otopljenih soli, nutrijenata i tvari u tragovima

### 2.1. Onečišćivači u otpadnoj vodi

Otpadne vode (Slika 2-1.) u svom sastavu sadrže različite tvari koje mogu u određenim koncentracijama štetno djelovati na sastavnice okoliša (Tablica 2-4.). Različitim procesima obrade potrebno je smanjiti njihovu koncentraciju do mjere propisane zakonskom regulativom ili ih je potrebno u potpunosti ukloniti, ukoliko se takva voda želi ponovno upotrijebiti ili ispuštati u okoliš.



Boja i miris svojstva su otpadnih voda pomoću kojih se može odrediti njezina starost. Otpadna voda može biti sivo-smeđe do crne boje. Takve boje potječu od metalnih sulfida, koji nastaju reakcijom sulfida s metalima u anaerobnim uvjetima. Mirisi su posljedica proizvedenih plinova, koji su produkt razgradnje organskih tvari ili su posljedica tvari koje se dodaju u otpadne vode. Najkarakterističniji miris potječe od sumporovodika ( $H_2S$ ), koji nastaje anaerobnom mikrobiološkom razgradnjom, pri čemu se sulfat reducira u sulfid (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).



**Slika 2-1.** Izgled otpadne vode (Zagrebačke otpadne vode, 2020)

**Tablica 2-4.** Onečišćivači u otpadnim vodama (Ružinski i Anić Vučinić, 2010)

<b>Onečišćivač</b>	<b>Razlog važnosti</b>
Suspendirane tvari	Suspendirane tvari mogu uzrokovati naslage mulja i stvaranje anaerobnih uvjeta ako se neobrađena otpadna voda ispusti u vodeni okoliš.
Biorazgradive organske tvari	Sastoje se od proteina, ugljikovodika i masnoća. Njihova količina se najčešće određuje pomoću BPK (biološka potrošnja kisika) i KPK (kemijska potrošnja kisika) vrijednosti. Ako se otpadne vode bogate organskim tvarima neobrađene ispuste u okoliš, njihova biološka stabilizacija može uzrokovati iscrpljivanje prirodnih izvora kisika i razvoj anaerobnih (septičnih) uvjeta.
Patogeni	Zarazne bolesti mogu se prenositi pomoću patogenih organizama u vodi.
Hranjive tvari (nutrienti)	Dušik, fosfor i ugljik su osnovno hranjivo za rast primarnih producenata (autotrofnih organizama). Ako se ispuste u vodeni okoliš, hranjive tvari mogu uzrokovati povećani razvoj biljnih i životinjskih vrsta. Ako se ispuste u velikoj količini na tlo, također mogu prouzročiti onečišćenje podzemnih voda.
Ostali onečišćivači	Ostali onečišćivači jesu određene organske i anorganske tvari, klasificirane u tu skupinu temeljem sumnji u kancerogenost, mutagenost, teratogenost ili visoku akutnu toksičnost, a mnogi od njih nalaze se u otpadnim vodama.
Stabilni organski spojevi	Ove spojeve je vrlo teško ukloniti konvencionalnim metodama obrade otpadnih voda. Tipični primjeri ovih spojeva jesu površinski aktivne tvari, fenoli i pesticidi.
Teški metali	Teški metali u otpadnoj vodi potječu od komercijalnih i/ili industrijskih aktivnosti, a potrebno ih je ukloniti ako se otpadna voda nakon obrade ponovno koristi, odnosno reducirati ukoliko se nakon obrade ispusti u okoliš (do one koncentracije određene zakonskom regulativom).
Otopljeni anorganski spojevi	Anorganske spojeve, kao što su kalcij, natrij i sumpor, potrebno je ukloniti ako se otpadna voda nakon obrade ponovno koristi, odnosno reducirati ukoliko se nakon obrade ispusti u okoliš (do one koncentracije određene zakonskom regulativom).

## 2.2. Obrada otpadnih voda

Otpadne vode (komunalne, poljoprivredne, industrijske i oborinske) sadržavaju veliku količinu štetnih tvari koje okoliš ne može asimilirati. Postoji nekoliko uvriježenih tehnologija pročišćavanja i obrade otpadnih voda. Već spomenuti konvencionalni uređaji za obradu primjenjuju fizikalne, kemijske i biološke procese, koji se međusobno mogu i kombinirati.

Fizikalni procesi uključuju miješanje, flotaciju, filtraciju, taloženje ili sedimentaciju te otplinjavanje i odmuljivanje otpadnih voda. Pod kemijskim procesima, koji su usko povezani s fizikalnim, podrazumijeva se dodavanje kemikalija ili induciranje kemijskih reakcija u otpadnoj vodi. U skupinu kemijskih procesa ubrajaju se procesi adsorpcije, taloženja te dezinfekcije. Biološki procesi se odnose na mikrobiološku razgradnju organskih tvari u otpadnoj vodi, pri čemu se one kemijskim reakcijama prevode u plinove i mikrobnu biomasu, te uklanjanje nutrijenata, odnosno dušičnih i fosforinih spojeva. Biološke obrade se mogu provoditi korištenjem biofiltera, aktivnog mulja ili nekim drugim izvorima mikroorganizama kako bi se ostvario proces nitrifikacije, denitrifikacije i uklanjanja fosfora (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Ovisno o stupnju pročišćavanja otpadnih voda, prilikom obrade otpadnih voda, razlikuje se predobrada, primarna, sekundarna i tercijarna obrada otpadnih voda (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Predobrada je početni proces obrade otpadnih voda, koji uključuje fizikalne procese s ciljem uklanjanja tvari koje svojom prisutnošću mogu onesposobiti i otežati daljnje procese obrade. Prilikom predobrade otpadnih voda, iz vode se uklanjaju čvrste suspendirane tvari, jer iste mogu uzrokovati začepljenje sustava, a flotacijom se uklanjaju masti i ulja.

Nakon procesa predobrade slijedi primarna obrada otpadnih voda, koja uključuje kombinaciju fizikalnih i kemijskih procesa. Sedimentacijom se uklanja znatan dio suspendiranih tvari, koje se u obliku mulja uklanjaju i odvede na daljnju propisanu obradu.

Preostali dio krutih i otopljenih organskih tvari uklanja se mikrobiološkom razgradnjom i rastom mikroorganizama (bakterije, alge i gljivice) ili biljaka i gljiva, točnije biljnim uređajima. Često se tercijarna metoda obrade otpadnih voda svrstava u sekundarnu iz razloga što se temelji na biološkim procesima.

Odabir metode obrade otpadne vode ovisi o količini otpadnih tvari i o zahtjevima za kvalitetom izlaznog efluenta (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

### 3. BILJNI UREĐAJI

#### 3.1. Biljni uređaji—umjetni močvarni sustavi

Močvarni sustavi su površine tla koje su većim dijelom godine potopljene vodom. Razlog tomu je slaba propusnost ili nepropusnost tla i njihov geografski položaj. Slaba propusnost ili nepropusnost tla je produkt dugog bivanja tla pod vodom, a nastala je zbog bioloških, kemijskih i fizikalnih procesa koji se odvijaju unutar vodom natopljenog tla. Unutar močvarnog sustava, tijekom godine izmjenjuju se sušna i poplavna razdoblja, stoga biljke takvih staništa moraju biti prilagođene takvim uvjetima.

Opasne tvari iz otpadnih voda mogu se različitim prirodnim procesima koji se odvijaju u močvarnim sustavima prevesti u neopasne bioprodukte i hranjive tvari potrebne za rast i razvoj mikroorganizmima. Takvi se procesi odvijaju pomoću supstrata, biljaka i mikroorganizama (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Biljni uređaj je umjetno oblikovana močvara (Slika 3-1.), izvan prirodne lokacije, u kojem su stvoreni uvjeti za poboljšano pročišćavanje otpadnih voda. Koriste se u drugom stupnju pročišćavanja otpadnih voda nakon što su one već bile podvrgnute primarnoj i/ili prethodnoj obradi. U biljnim uređajima dolazi do međudjelovanja biljaka, životinja, vode te ostalih okolišnih čimbenika, a otpadna voda se obrađuje kombinacijom fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa.

U biljnim uređajima najviše se koriste vodene biljke koje prirodno rastu u obalnim područjima jezera i močvara – tzv. helofiti. Najčešće se koriste su: trska, žuta perunika, jezerski oblič. Glavne karakteristike navedenih biljaka su njihova velika rasprostranjenost te mogućnost prilagodbe različitim uvjetima, uključujući i uvjete relativno niske temperature.

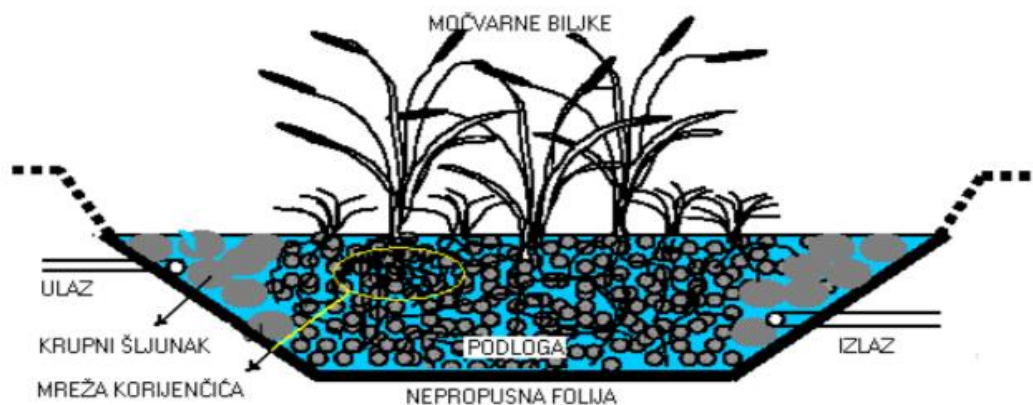
Biljni uređaji ispunjeni su poroznom ispunom, odnosno filtracijskim materijalom, supstratom. Supstrat je važna komponentna biljnog uređaja iz razloga što se obrada otpadnih voda u velikoj mjeri odvija u glavnom filtracijskom sloju. Protjecanje otpadne vode kroz supstrat uvjetovano je propusnošću supstrata. Odabir supstrata ima jako veliku ulogu u učinkovitosti uklanjanja otpadnih tvari iz otpadne vode, a od materijala najčešće se koriste pijesak, šljunak, glina te drugi rastresiti materijali (šljake, školjke) pogodni za proces filtracije. Bitna je pravilna ugradnja supstrata u biljnom uređaju kako ne bi došlo do njegovog zbivanja i

smanjenja propusnosti otpadne vode. Supstrat mora biti dovoljno propustan kako bi se osiguralo jednoliko protjecanje otpadne vode kroz isti, jer će, u suprotnom doći do njenog površinskog tečenja (Stanković, 2017). Također, propusnost supstrata mora biti takva da osigura optimalno vrijeme zadržavanje otpadne vode u uređaju.

Makrofiti su prijeko potrebne komponente biljnih uređaja koje imaju fizički učinak u obradi otpadnih voda. Omogućavaju stvaranje velike površine za rast mikroorganizama, služe kao izolatori kako bi spriječili smrzavanje tijekom hladnih doba godine te stabiliziraju površinu biljnih uređaja (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Uloga biljaka, iako je ograničena, prijeko je potrebna za biljne uređaje jer svojom prisutnošću biljke uspostavljaju heterogenost okoliša. Uklanjanje ili transformacija zagađivača ne odvija se samo apsorpcijom od strane biljaka, nego i djelovanjem mikroorganizama. Biljke svojim korijenjem omogućavaju razvoj mikroorganizama, koji svojim djelovanjem uklanjaju dušik u većoj mjeri nego što to biljke obavljaju procesom asimilacije. Zbog toga biljke u ovakvim sustavima pročišćavanja otpadnih voda, imaju više fizikalnu nego biološku ulogu.

Na površini korijenja biljaka ili supstrata nalaze se mikroorganizmi koji su glavni čimbenici u procesu biološkog pročišćavanja otpadnih voda. Mikroorganizmi koriste organsku tvar iz otpadne vode kao hranu te kao izvor energije i složenim je biološkim procesima



**Slika 3-1.** Biljni uređaj (Šperac i dr., 2013)

transformiraju u biomasu i energiju. Prilikom biološke obrade otpadnih voda važan proces je proces nitrifikacije pomoću kojeg se smanjuje količina amonijaka tako da se njegovom oksidacijom stvaraju nitriti, a nakon oksidacije nitriti, nitrati. Bakterije koje omogućuju procese nitrifikacije pripadaju porodici *Nitrobacteriaceae*, roda *Nitrosomonas* (oksidiraju amonijak u nitrit), te roda *Nitrobacter* (oksidiraju nitrit u nitrat).

Budući da otpadna voda sadrži vrlo malu količinu otopljenog kisika, primarni organizmi, koji sudjeluju u biološkoj obradi, su ili obligatni anaerobi ili različite aerobne vrste. Zbog male količine kisika u ovakvim biljnim uređajima vladaju anaerobni uvjeti, međutim, bez obzira na anaerobne uvjete, vrijednosti biološke potrošnje kisika (BPK) i kemijske potrošnje kisika (KPK) se ipak smanjuju prilikom prolaska otpadne vode kroz biljni uređaj. Mikroskopske aerobne zone su smještene oko korijenja biljaka te na supstratu blizu površine (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

### 3.2. Povijest razvoja biljnih uređaja

Močvarni sustavi, kao sustavi za pročišćavanje otpadnih voda, su korišteni već u drevnim kineskim i egipatskim civilizacijama. Značajnija istraživanja ovakvih sustava pročišćavanja voda su započela 1950.-ih godina te je taj trend u stalnom porastu sve do danas. Nastanak prvih biljnih uređaja povezan je s njemačkom znanstvenicom dr. Käthe Seidel (1907.-1990.), koja je cijeli svoj životni rad posvetila proučavanju biljnih uređaja. Temelj njenog istraživanja je bila hipoteza da se biljke najbolje osjećaju u svom prirodnom okruženju, gdje je korijenje okruženo organskom tvari, mikroorganizmima i životinjama. U početku to stajalište nije bilo prihvaćeno u širim znanstvenim krugovima, jer se smatralo da biljke najbolje napreduju u nezagađenim vodama. Temeljem provedenih istraživanja, dr. Seidel je napravila prvi biljni uređaj u gradiću Plön (Njemačka) sredinom šezdesetih godina prošlog stoljeća. Nedugo potom, prof. Reinhold Kickuth je razvio poseban biljni sustav pročišćavanja otpadnih voda metodom korijenskog područja u kojoj je, za razliku od dr. Seidel, umjesto sustava filtracije visoke hidrauličke vodljivosti koristio slabo propusno tlo s visokim udjelom gline. To je bio prvi biljni uređaj koji je pušten u rad 1974. godine na zajedničkom teritoriju u mjestima Liebenburg i Othfresen u Njemačkoj (Karlović, 2021).

Nakon Njemačke, biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda počeli su se koristiti i u Danskoj, Velikoj Britaniji i Kanadi. Mogućnost njihovog korištenja nije ograničena hladnom kontinentalnom klimom, pa se mogu koristiti i na 3000 m nadmorske visine, kao što je slučaj na Himalajama u Indiji (WWF-India, 2013). Prvi biljni uređaj izgrađen u Republici Hrvatskoj (RH) pušten je u rad 2001. godine u autokampu Bijar na otoku Cresu. Najveći biljni pročišćivač otpadnih voda, nastao 2016. godine, u Republici Hrvatskoj nalazi se u općini Kaštelir-Labinci

(Slika 3-2.). Za razliku od ostalih europskih zemalja (Slovenija, Austrija, Velika Britanija, Njemačka, Danska), koje broje i stotinjak biljnih uređaja, u RH ih je tek nekolicina: Vinogradci, Hrušćica, Žminj u Istri, autokamp Glavotok na Krku, autokamp Bijar na Cresu, pilot biljni uređaj Jakuševac (Šperac i dr., 2013).



**Slika 3-2.** Izrada najvećeg biljnog uređaja u Kaštelir-Labinci u Hrvatskoj (Poreština.info, 2015)

### 3.3. Vrste biljnih uređaja

S obzirom na način nastanka, biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda dijele se u dvije kategorije (Ružinski i Anić Vučinić, 2010):

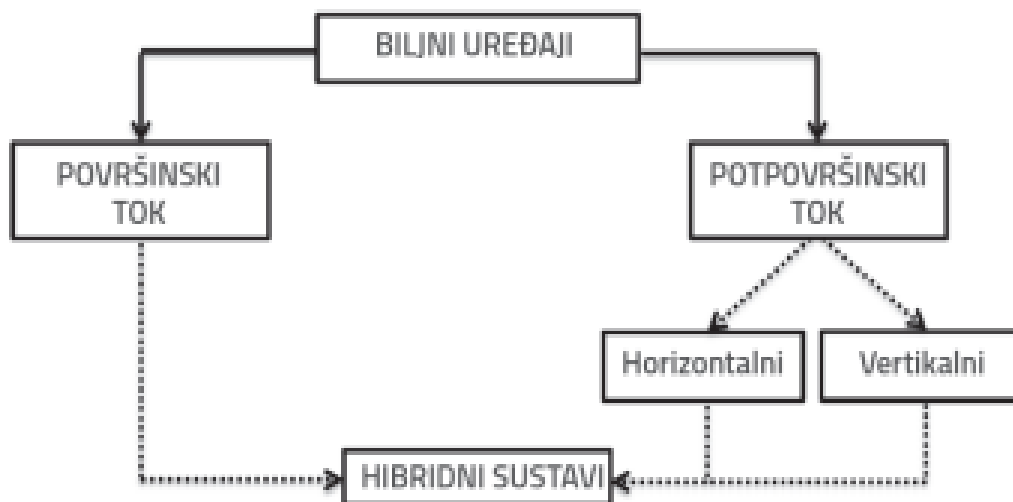
- Prirodni biljni uređaji – močvarni sustavi koji otpadnu vodu obrađuju na mjestu gdje su prirodno nastali;
- Umjetno izvedeni biljni uređaji – biljni uređaji koji su smješteni na lokaciji na kojoj nisu prirodno nastali.

Na slici 3-3. prikazana je podjela biljnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda.

Umjetno izvedene biljne uređaje također je moguće podijeliti u dvije osnovne skupine (Ružinski i Anić Vučinić, 2010):



- Površinski biljni uređaji;
- Potpovršinski biljni uređaji.



**Slika 3-3.** Klasifikacija biljnih uređaja (Stanković, 2017)

### 3.3.1. Površinski biljni uređaji

Površinski biljni uređaji (Slika 3-4.) su sustavi u kojima je vodeni medij, koji se obrađuje, izložen djelovanju atmosfere i Sunčevu zračenju (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).



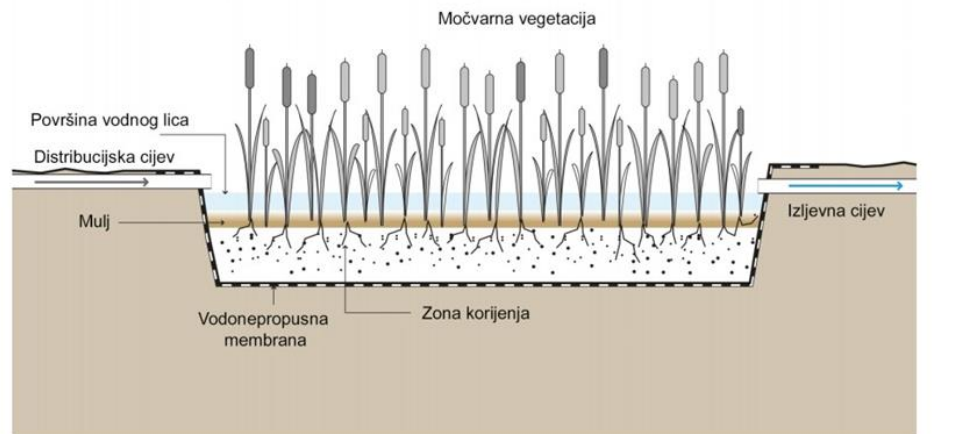
**Slika 3-4.** Površinski biljni uređaji ( Emajstor, 2022)

Površinske biljne uređaje moguće je podijeliti s obzirom na stanje biljaka koje su u njima zasađene na sljedeće (Ružinski i Anić Vučinić, 2010):

- Površinske biljne uređaje s biljkama čiji dijelovi izlaze iznad razine površine vode koja se obrađuje;
- Površinske biljne uređaje u kojima dijelovi biljaka plutaju po površini vode koja se obrađuje;
- Površinske biljne uređaje u kojima su biljke potopljene ispod površine vode koja se obrađuje.

Površinski biljni uređaji s biljkama čiji dijelovi izlaze iznad razine površine vode koja se obrađuje (Slika 3-5.) se gotovo isključivo koriste za obradu otpadne komunalne vode. Sastoje se od vodonepropusnog sloja, građenog od gline ili sintetskih materijala, čime se sprječava infiltracija otpadnih tvari u okolno tlo do vodonosnog sloja. Na vodonepropusni sloj postavlja se sloj zemlje, debljine do 40 cm, na koji se zasađuju biljke. Također se sastoji od niza kanala i/ili bazena pomoću kojih se sustav naplavljuje. U ovakvim sustavima, otpadna voda, koja se obrađuje, protječe cijelom dužinom sustava gotovo vodoravno vrlo malom brzinom, pri čemu se iznad vodonepropusnog sloja stvara stupac otpadne vode visine između 20 i 40 cm, pa čak i do 80 cm. Održavanje određene visine stupca otpadne vode omogućeno je pomoću sustava kontrole odvoda. Proces koji se odvijaju u ovom sustavu mogu biti aerobni ili anaerobni ovisno o tome gdje se odvijaju, na površini ili unutar otpadne vode. Naime, aerobni procesi su kemijski procesi koji se odvijaju uz prisutnost kisika. Prijenos kisika u biljnim uređajima odvija se pomoću fotosinteze, fizikalnog prijenosa kisika iz zraka u vodu, prijenosa kisika iz biljke u vodu te prolaskom otpadne vode u supstrat. Anaerobni procesi se odvijaju bez prisutnosti kisika, a dominantni su u potpovršinskim sustavima, gdje je koncentracija kisika puno manja, dok u površinskim sustavima prevladavaju aerobni procesi.

Ova vrsta površinskih biljnih uređaja je vrlo učinkovita za uklanjanje fosfora (biološkim i fizikalnim procesima) i dušika. Biološko uklanjanje fosfora se odvija pomoću bakterija, a fizikalno uklanjanje fosfora sedimentacijom tvari koje sadrže fosfor. Uklanjanje dušika se odvija procesima amonifikacije, nitrifikacije (u aerobnim uvjetima) i denitrifikacije (u anaerobnim uvjetima) (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).



**Slika 3-5.** Površinski biljni uređaji čiji su biljni dijelovi iznad razine površine vode (Malus i Vouk, 2012)

U skupinu površinskih biljnih uređaja ubrajaju se i plutajuće močvare (engl. *artificial wetlands*) za obradu otpadnih voda ili takozvani „močvarni otoci“ koji slobodno plutaju po površini prirodnog vodnog tijela (jezera, potoci, bare, oborinske vode). Plutajuće močvare (Slika 3-6.) pripadaju novijim zelenim tehnologijama obrade otpadne vode te su još u fazi razvoja i istraživanja. Biljke, koje se koriste u ovim biljnim uređajima (npr. mačji repak, rogoz), sade se na posebnim plutajućim "krevetima" koji im služe kao prostirka tj. supstrat, jer, je voda koju obrađuju preduboka da bi bila njihovo stanište. Biljne vrste koje se koriste u ovim sustavima, moraju biti neinvazivne te višegodišnje. One svojim korijenjem stvaraju gustu korijensku mrežu koja prodire ispod plutajuće prostirke, i pruža se u vodenom tijelu, te stvara aktivnu podlogu za rast i razvoj simbiotskog života cijanobakterija i mikroalgi (Waguespack, 2013). Kao i u ostalim biljnim uređajima i kod ovakvih sustava, mikroorganizmi imaju važnu ulogu u procesima razgradnje otpadnih tvari, jer transformiraju otpadne tvari iz vode u hranjive tvari i tako smanjuju njihovu koncentraciju u vodi. Zbog dostupnosti velike količine hranjivih tvari u otpadnoj vodi, dolazi do razvoja algi i vodenog korova, a razgradnjom hranjivih tvari, smanjuje se njihova koncentracija čime dolazi do kontroliranog rasta algi i vodenog korova. Koja količina otpadnih tvari će biti uklonjena iz otpadne vode ovisi o vrsti korištenih biljaka, njihovom rastu, vrsti i razvoju korijena. Medij, koji se koristi kao supstrat, mora biti dovoljno porozan i propustan za zrak, kako bi se omogućio prijenos kisika iz zraka u ostale dijelove biljnog uređaja. Supstrat može biti građen od bambusa, zemlje, treseta ili drvenog ugljena. Da

bi se ostvarilo pravilno funkcioniranje plutajućih biljnih uređaja potrebno je uzeti odgovarajuće biljne vrste koje imaju aerenhimska tkiva, osigurati dovoljnu dubinu vodenog medija te izraditi plutajući okvir koji će dodatno omogućiti flotaciju sustava. Minimalna dubina vode na kojoj se koriste „plutajuće močvare“ mora biti od 0,8 do 1 m kako bi se mogla razvijati korijenska mreža biljaka. Plutajući okviri građeni su od bambusa, PVC ili PP cijevi. Biljni uređaji su koncipirani na način da vegetacija bude optimalne količine. To znači da je cilj u svakom uređaju imati što veći broj biljaka uz uvjet da bude osigurano dovoljno sunčeve svjetlosti, kako bi alge na korijenskoj mreži, procesom fotosinteze stvarale kisik (Samal i dr., 2019). U Kanadi je provedeno istraživanje djelovanja plutajućih močvarnih uređaja. Takvi su uređaji postavljeni u dva različita jezera - Jezero 227 i Jezero 114. Jezero 227 je sadržavalo velike koncentracije fosfora, dok je Jezero 114 imalo normalnu razinu koncentracije fosfora. Nakon primjene plutajućih močvarnih uređaja, utvrđeno je da je biljka rogoz, koja je bila sastavni dio plutajućeg močvarnog uređaja, na Jezeru 227 imala i do osam puta veću produktivnost, pet puta veću korijensku mrežu i četiri puta veću koncentraciju fosfora u sebi nego rogoz biljnog uređaja na Jezeru 114 (IISD, 2018). Na području južne Azije plutajući močvarni uređaji se koriste za obradu riječnih tokova kako bi se smanjila koncentracija otpadnih tvari te poboljšali uvjeti za život slatkovodnih dupina koji su u fazi izumiranja (Banfi, 2023).



**Slika 3-6.** Plutajući močvarni uređaji (Atuah, 2020)

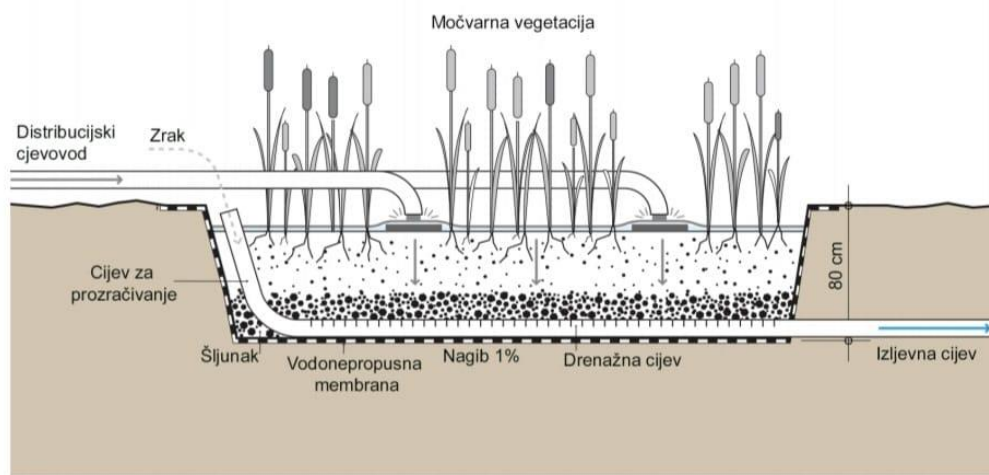
Plutajući močvarni sustavi, osim zbog svoje atraktivnosti i ekološke prihvatljivosti, su se pokazali kao vrlo učinkoviti uređaji u procesu sanacije otpadnih tvari u vodenim sustavima

te se velik dio istraživanja posvećuje njihovoj modifikaciji i razvoju (Water quality solutions, 2018).

Preostala grupacija biljnih uređaja u kojima su biljke potpuno uronjene ispod površine vode koja se obrađuje je još uvijek u eksperimentalnoj fazi.

### 3.3.2. Potpovršinski biljni uređaji

Potpovršinski biljni uređaji (Slika 3-7.) su sustavi kod kojih vodeni medij koji se obrađuje nije izložen djelovanju atmosfere. Ovakvi su uređaji neovisni o klimatskim uvjetima te isključuju negativne karakteristike površinskih biljnih uređaja, kao što su neugodni mirisi i razvoj insekata. Sastoje se od jednog ili više bazena, čije je dno prekriveno nepropusnim slojem, a ispunjeni su supstratom različite granulacije. Na površini, koja može biti suha ili mokra, zasađene su biljke, čije korijenje prodire kroz supstrat, a čija je površina pogodna za razvoj mikroorganizama. Otpadna voda prolazi kroz supstrat, bez kontakta s atmosferom. S obzirom na način ulaska otpadne vode u biljni uređaj, ovi se uređaji dijele na horizontalne i vertikalne (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

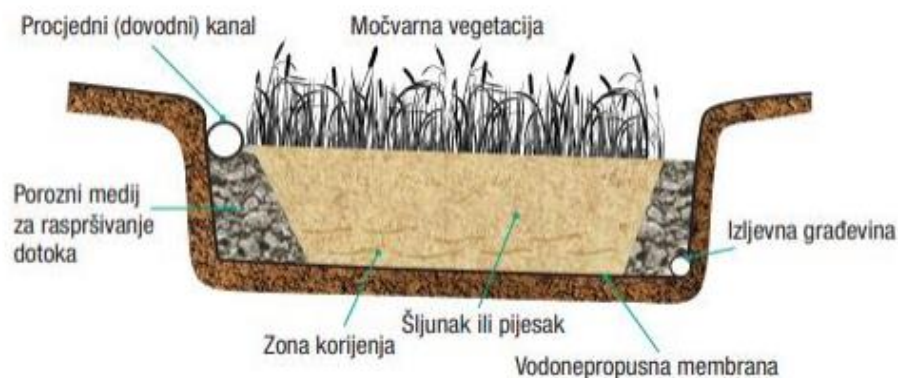


**Slika 3-7.** Potpovršinski biljni uređaji (Barišić i Kulić, 2017)

U potpovršinskim biljnim uređajima s horizontalnim protokom (Slika 3-7.), otpadna se voda uvodi bočno pomoću distribucijskog cjevovoda koji je ugrađen plitko ispod površine. Protjecanje otpadne vode se odvija kontinuirano i jednoliko po čitavoj širini uređaja kako bi se



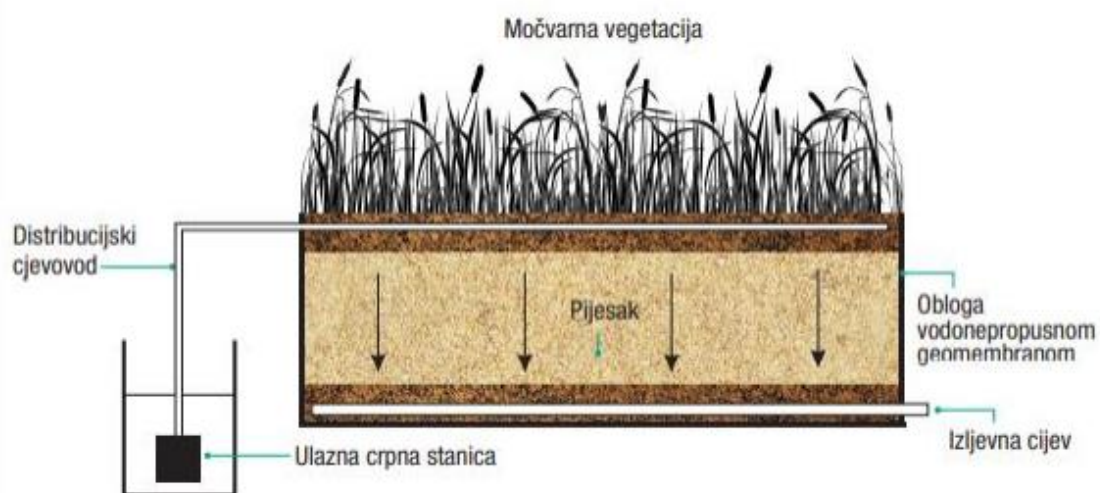
maksimizirao učinak ovakvog sustava. Učinkovitost ovakvih sustava je 90-95%. Kontinuiranim uvođenjem otpadne vode supstrat je tijekom cijelog procesa zasićen vodom, a kisik iz atmosfere u vodeni medij ulazi pomoću biljaka. Oko mjesta ulijevanja i izljeva otpadne vode postavlja se supstrat krupnije granulacije (krupni šljunak ili drobljeni kamen), a središnji dio ovakvog biljnog uređaja, koji je ujedno najveći i najaktivniji dio uređaja, ispunjen je šljunkom ili pijeskom (Malus i Vouk, 2012). Prema glavnom, središnjem dijelu uređaja često se postavlja prijelazna zona s postupno manjom granulacijom, koja sprečava čepljenje glavnog dijela uređaja (Stanković, 2017). Horizontalni tok otpadne vode do izlazne cijevi potpomognut je blagim nagibom dna. Volumen cijevnog sustava i gubici uslijed trenja uvjetuju odabir promjera cjevovoda distribucijskog sustava otpadne vode kroz ovaj uređaj. Kod ovakvih biljnih uređaja, potrebno je osigurati dovoljan broj otvora kako bi se omogućilo ravnomjerno raspoređivanje otpadne vode kroz uređaj. Cijevi distribucijskog sustava najčešće su plastične, dok se metalne rjeđe koriste (Stanković, 2017). U odabiru prethodno navedenih cijevi bitno je voditi računa o temperaturnoj deformaciji i djelovanju ultraljubičastog zračenja na iste. Ovakvi biljni uređaji moraju biti složeni na način da njihov distribucijski dio osigura samostalno otjecanje otpadne vode u slučaju prestanka rada sustava, čime se otklanja mogućnost smrzavanja vode u zimskim mjesecima. Ipak, ako je sustav konstruiran na način da je zadržavanje vode moguće, tada mora biti osigurano da se distribucijski dio sustava nalazi na dubini pri kojoj ne može doći do smrzavanja (Stanković, 2017).



**Slika 3-8.** Biljni uređaj s horizontalnim potpovršinskim tokom (Malus i Vouk, 2012)

U potpovršinskim biljnim uređajima s vertikalnim protokom (Slika 3-9.), otpadna se voda odvodi od crpne stanice, gdje se tlači do distribucijskog cijevnog sustava uređaja te

raspoređuje po cijeloj površini uređaja. Distribucijski cjevovod uređaja, koji je ugrađen ispod površine poroznog supstrata, obavlja diskontinuirane procese, odnosno otpadna se voda dovodi u intervalima čime supstrat nije uvijek njome zasićen zbog čega je omogućena lakša difuzija kisika iz atmosfere u vodeni medij. Količina otpadne vode, koja se dovodi jednim intervalom, mora biti dovoljno velika kako bi se postigla ravnomjerna raspodjela iste po cijeloj površini supstrata. Ukoliko je količina otpadne vode nezadovoljavajuća, može doći do njenog poniranja izravno ispod otvora distribucijskog sustava, čime ne dolazi do njene ravnomjerne raspodjele. Kako bi čitav sustav bio što učinkovitiji, dotok otpadne vode do vertikalnog filtra najčešće je pod tlakom, čime se osigurava ravnomjernija raspodjela otpadne vode po površini filtra, kao posljedica ujednačenije raspodjele tlaka duž čitavog distribucijskog cijevnog sustava. Kod ove vrste biljnih uređaja, u ulaznom i izljevnom dijelu uređaja supstrat je krupne granulacije, dok je središnji dio uređaja ispunjen pijeskom (Malus i Vouk, 2012).



**Slika 3-9.** Biljni uređaj s vertikalnim potpovršinskim tokom (Malus i Vouk, 2012)

Potpovršinski biljni uređaji s vertikalnim protokom su se pokazali pouzdani u procesima potpune nitrifikacije zbog prisutnosti aerobnih uvjeta te se zbog toga često koriste kao početna stanica sustava pročišćivača voda. Zbog stalne potopljenosti sustava, u ovakvom biljnom uređaju, vladaju anaerobni uvjeti, odnosno uvjeti bez prisustva kisika, koji omogućuju procese denitrifikacije, dok su aerobni uvjeti prisutni djelomično oko korijenja biljaka. Kako bi se postigla što bolja učinkovitost obrade otpadne vode potpovršinskim biljnim uređajima,



kombinirani su sustavi s horizontalnim i vertikalnim strujanjem čime su nastali kombinirani ili hibridni sustavi. Njihova učinkovitost je 90-95% (Karlović, 2021). Učinkovitost hibridnih sustava je najbolja, posebno kada je riječ o uklanjanju dušika te patogenih mikroorganizama (Kraljević, 2017).

### 3.4. Kisik u biljnom uređaju

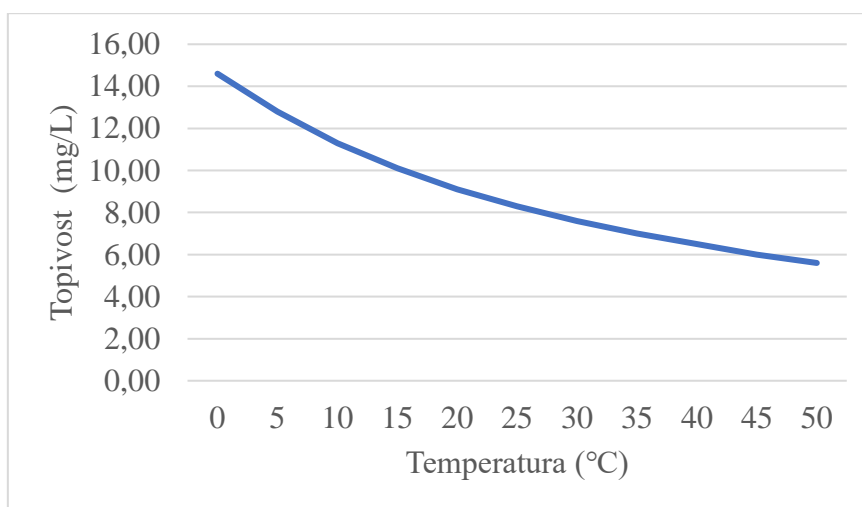
Kisik, kao jedna od najvažnijih elemenata za život živih bića, nastaje procesom fotosinteze te je njegov udio u atmosferi 21%. Iako je prisutan u zraku u znatnoj koncentraciji, zbog svojih kemijskih i fizikalnih svojstava slabo je topljiv u vodenom mediju te je zbog toga često limitirajući čimbenik rasta biljaka i mikroorganizama u biljnom uređaju. Kako bi se prilagodile takvim uvjetima oskudnim kisikom, močvarne biljke su se prilagodile svojim rastom i vitalnim funkcijama. Koncentracija kisika u vodenom mediju ovisi o temperaturi, biološkim aktivnostima te otopljenim solima. Proces koji povećavaju koncentraciju kisika u biljnom uređaju su: proces fotosinteze, fizikalni prijenos kisika iz zraka u vodu, prijenos kisika iz biljke u vodu te prijenos kisika zbog prolaska otpadne vode kroz supstrat (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Dva procesa prijenosa kisika u površinskim biljnim uređajima su fotosinteza i fizikalni prijenos kisika iz zraka u vodu. Ciklus fotosintetskog djelovanja biljaka, uz prisustvo Sunčeve svjetlosti, povećava koncentraciju kisika ispod površine vode. Fizikalni prijenos kisika iz zraka u vodu odvija se sve dok otpadna voda nije zasićena otopljenim kisikom, a zasićenost otpadne vode kisikom primarno ovisi o temperaturi i sastavu vode. Kroz kontaktu površinu zrak-voda odvija se proces difuzije, prilikom kojeg kisik iz zraka prelazi u tanki površinski sloj vode, a nakon toga migrira u dublju vodenu masu sustava. Prijenos kisika ispod površine vode kombinacija je procesa koji uključuju molekularnu difuziju i makroskopsko gibanje vodene mase (Ružinski i Anić Vučinić, 2010). Povećanje koncentracija kisika u biljnom uređaju se odvija i nakon oborinske kiše, koja u svom sastavu ima otopljeni kisik.

U biljnim se uređajima odvija nekoliko paralelnih procesa koji troše kisik u vodi. Otopljeni kisik se troši na procese respiracije biljaka i životinja u biljnom uređaju, razgradnju organskih tvari i dušičnih spojeva, zbog čega je stalna potreba unosa kisika u biljni uređaj iz vanjskih izvora (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

### 3.5. Utjecaj temperature i pH vrijednosti otpadne vode na procese u biljnom uređaju

Važan parametar, kojeg je potrebno poznavati pri projektiranju biljnog uređaja, je temperatura okoliša i otpadne vode. Temperatura ima jako veliki utjecaj na fizikalne i kemijske procese. Topljivost kisika je obrnuto proporcionalna temperaturi (Slika 3-10.), što znači da se prilikom povećanja temperature topljivost kisika smanjuje i obratno (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).



**Slika 3-10.** Utjecaj temperature na topljivost kisika pri atmosferskom tlaku (The Engineering ToolBox, 2005)

Ciklus transformacije dušika također je vrlo osjetljiv na temperaturne promjene. Proces denitrifikacije ne može se odvijati u uvjetima u kojima je temperatura ispod 5°C. U temperaturnom rasponu od 20°C do 40°C, proces se odvija konstantnom brzinom, ali najveća brzina kemijske reakcije se postiže pri temperaturi od 35°C. Temperatura također utječe i na proces nitrifikacije. Pri temperaturi ispod 5°C, ili većoj od 45°C, proces nitrifikacije će biti inhibiran. Optimalni temperaturni raspon za proces nitrifikacije je od 20°C do 32°C (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Oscilacije temperature mogu biti dnevne i sezonske. Dnevne oscilacije su posljedica solarne radijacije, točnije izmjene dana i noći, dok sezonske temperaturne oscilacije ovise o sezonskim insolacijama, zbog čega se učinkovitost biljnog uređaja mijenja ovisno o promjeni godišnjeg doba.

pH vrijednost je također bitan parametar koji utječe na biokemijske procese, gdje stvaranje ioniziranih i neioniziranih oblika kiselina i baza utječe na topljivost plinova i krutina. Za većinu vrsta bakterija optimalna pH vrijednost varira između 4,0 i 9,5. Optimalna pH vrijednost za denitrificirajuće bakterije je u granicama između 6,5 i 7,5, a za nitrificirajuće bakterije optimalna pH vrijednost je 7,2. pH vrijednosti močvarnih sustava kreću se od blago alkalnih (pH 7-8) do jako kiselih (pH 3-4) (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

## 4. OBRADA OTPADNE VODE U BILJNOM UREĐAJU

Mehanizmi obrade otpadne vode su vrlo složeni te ovise o sastavu otpadne vode, kao i potrebnom stupnju pročišćavanja. Ukoliko je poznat sastav otpadne vode, taj se podatak koristi u projektiranju, optimiranju rada i u radu biljnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda. Biološka, kemijska i fizikalna svojstva otpadnih voda uvelike utječu na način odabira načina obrade otpadne vode. Na biološka svojstva otpadne vode utječu životinje, biljke, bakterije i virusi. Prisustvo organskih i anorganskih tvari obilježava kemijska svojstva, dok su fizikalna obilježena temperaturom, bojom, mirisom i količinom čvrstih čestica. Svi fizikalno-kemijski procesi utječu na biološke, a produkt rada uređaja je rezultat njihova suodnosa.

Parametri temeljem kojih se odabire metoda pročišćavanja otpadne vode su koncentracija u vodi otopljenih tvari, čvrstih čestica i organskih tvari, biokemijska potrošnja kisika te sadržaj spojeva dušika i fosfora. Biljni uređaji moraju biti projektirani na način da svojim djelovanjem uklone otpadne tvari do koncentracija koje su dopuštene zakonom (maksimalno dozvoljene koncentracije, MDK).

### 4.1. Uklanjanje suspendiranih tvari u biljnim uređajima

Ukupnim suspendiranim tvarima se smatraju one tvari koje će ostati prisutne u otpadnoj vodi nakon isparavanja na temperaturi od 103-105°C. Taložne tvari su tvari koje će se istaložiti u konusnoj posudi nakon 60 minuta (Ružinski i Anić Vučinić, 2010). Dobiveni parametri se koriste za projektiranje primarnog taložnika biljnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda u kojem će doći do taloženja mulja koji se kasnije može koristiti za kompost.

Suspenzija se definira kao heterogeni fluid koji u svom sastavu ima čvrste čestice koje su premale gustoće za sedimentaciju, a raspršene su u fluidu mehaničkim utjecajem. Razlika između koloida i suspenzije je u tome da će se čvrste tvari u suspenziji nakon nekog vremena istaložiti, odnosno sedimentirati, dok u koloidnim otopinama neće. U otpadnoj vodi prisutne su različite suspendirane i otopljene štetne tvari koje utječu na odabir metode pročišćavanja otpadne vode.

Ukoliko se želi definirati ukupna količina suspendiranih tvari u otpadnoj vodi, obavlja se proces filtracije filtrom čije su pore veličine od 0,45 do 1,6 μm (Ružinski i Anić Vučinić,

2010). Smatra se da otpadna voda, koja u sebi sadrži suspendirane otpadne tvari, a prošla je kroz filtar tijekom filtracije, sadrži samo otopljene tvari.

Jedna od osnovnih funkcija biljnih uređaja je uklanjanje ukupnih suspendiranih tvari koje su prisutne u otpadnoj vodi te u samim uređajima. Prisustvo suspendiranih tvari u biljnim uređajima posljedica je pojačane aktivnosti mikroorganizama zbog velike količine hranjivih tvari te njihovog odumiranja i razgradnje. Otpadna voda, prilikom ulaska u biljni uređaj, sa sobom nosi suspendirane tvari koje se pridružuju velikoj količini interno nastalog suspendiranog materijala. Tada se ukupna suspendirana tvar prenosi kroz uređaj i tijekom njezina prijenosa odvijaju se procesi sedimentacije, filtracije, resuspenzije i stvaranja nove suspendirane tvari. Zbog laminarnog protjecanja, u uređaju se odvija proces taloženja ukupnih suspendiranih tvari, međutim, ipak se može odviti i proces resuspenzije. Proces resuspenzije, iako nije dominantan, potaknut je djelovanjem vjetra, biološkim mikroturbulencijama, oslobađanjem plinova, koji nastaju kao produkt procesa u vodenom mediju, te aktivnosti živog svijeta. U povećanju učinkovitosti uklanjanja suspendiranih tvari i sprječavanju resuspenzije, značajan utjecaj ima proces filtracije, gdje se suspendirane tvari hvataju na krute tvari unutar biljnog uređaja. U biljnim uređajima uslijed kemijskih reakcija, može doći do stvaranja produkata reakcije - sedimenata kao što su kalcijev karbonat i bivalentni metalni sulfid. Ti produkti mogu svojom postojanošću promijeniti pH vrijednost unutar vodenog medija.

U potpovršinskim biljnim uređajima, pri prolasku otpadne vode, odvija se uklanjanje, resuspenzija i proizvodnja suspendiranih tvari u određenim omjerima. Kod ovakvih uređaja, resuspenzija ne može biti potaknuta vjetrom već protokom vode, jer vodno lice kod ovakvog biljnog uređaja nije podložno atmosferskim uvjetima. Prilikom taloženja ukupnih suspendiranih tvari kod ovakvih uređaja, javlja se potencijalni problem čepjenja supstrata, pogotovo u ulaznom i izlaznom dijelu (Ružinski i Anić Vučinić, 2010). Začepljene pora supstrata također može biti uzorkovano i rastom korijenja bilja, jer se time smanjuje slobodan porni prostor. Posljedice takvih djelovanja su smanjenje brzine protoka otpadne vode i povećanje nominalnog vremena zadržavanja otpadne vode unutar samog uređaja. Hlapljive suspendirane tvari se mogu razgraditi u plin i otopljenu tvar pri čemu dolazi do akumulacije mineralnog dijela (Ružinski i Anić Vučinić, 2010). Okolišne temperaturne oscilacije utječu na uklanjanje suspendiranih tvari, ali je takav utjecaj kod potpovršinskih biljnih uređaja u odnosu na površinke, zanemariv. Uklanjanje suspendiranih tvari primarno ovisi o brzini slijeganja čestica i protoku otpadne vode.

#### 4.2. Uklanjanje organskih tvari u biljnim uređajima

Organski spojevi su kemijski spojevi koji sadrže ugljik. Osnovne grupe organskih spojeva su proteini, ugljikohidrati, masti i ulja. U svom sastavu, organski spojevi mogu sadržavati kisik i vodik te rjeđe sumpor, fosfor i željezo. Razgradnja im ovisi o kemijskom sastavu, molekularnoj masi te prisustvu aerobnih ili anaerobnih mikroorganizama. Ovisno o podrijetlu nastanka, organske je spojeve moguće podijeliti u dvije grupe: prirodne i sintetičke spojeve, koji su ujedno i antropogeni tj. spojevi nastali djelovanjem čovjeka. S obzirom da njihovog izvora nema u prirodi, razgradnja sintetičkih organskih spojeva je otežana, a njihova se koncentracija u okolišu sve više povećava (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Proteini ili bjelančevine, uz vodu, su jedni od najvažnijih gradivnih tvari živih bića. Osnovna građevna jedinica proteina su aminokiseline, koje su međusobno povezane peptidnom vezom. To su molekule složene građe i velike molekularne mase, zbog čega su kemijski relativno nestabilne, a mogu se razgraditi na nekoliko načina procesom hidrolize. Organski dušik je sadržan u velikom spektru različitih spojeva te tako i u aminokiselinama. Također, organski dušik je prisutan i u urei i uričnoj kiselini koje nastaju kao produkt procesa živih bića.

Ugljikohidrati su velike biološke molekule ili makroskopske molekule koje su građene od kemijskih elemenata ugljika, vodika i kisika. U ugljikohidrate se ubrajaju škrob, celuloza, šećer te drvena vlakna. S obzirom na njihovu građu slabo su topljivi u vodi te nemaju veliku mogućnost razgradnje (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Masti, ulja, esteri glicerola te zasićene masne kiseline su neki su od glavnih sastojaka hrane te su zbog toga učestale štetne tvari otpadnih voda. Zbog polarnosti molekula ne otapaju se u vodi te zbog toga stvaraju koloidne ili micelarne otopine, a topljivi su u organskim otapalima. Zbog svoje kemijske stabilnosti teško se razgrađuju.

Osim štetnih organskih tvari, u otpadnoj vodi mogu biti prisutne i anorganske otpadne tvari koje se klasificiraju temeljem potencijalne kancerogenosti, mutagenosti te visokoakutne toksičnosti. Takvu skupinu anorganskih otpadnih tvari čine pesticidi, metali, nemetali, insekticidi (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Jedan od, ili pak najvažniji, element u močvarnim ekosustavima je ugljik. Širok je raspon kruženja ovog elementa u prirodi što omogućuje stvaranje ugljikovih procesa potrebnih za asimilaciju i održavanje sustava.

Osim što je ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>) potreban za rast biljaka (fotosinteza), on je također nusprodukt metabolizma brojnih organizama. Uz ugljik je također prisutan i metan, a kako su oba topljiva u vodi, prisutan je aktivan prijenos plinova između vode i atmosfere.

Kisik je neizostavan element u procesima biokemijske oksidacije organskih tvari unutar biljnih uređaja. Parametar, koji govori o količini kisika potrebnog za oksidaciju naziva se petodnevna biokemijska potrošnja kisika (BPK<sub>5</sub>) (Ružinski i Anić Vučinić, 2010). Pomoću njega je moguće utvrditi razliku u količini kisika unutar vode na početku praćenja u odnosu na onu nakon pet dana.

#### 4.3. Uklanjanje dušika u biljnim uređajima za pročišćavanje voda

Dušik stvara spojeve različite stabilnosti koji imaju oksidacijska stanja u rasponu od +5 do -3. Oni uključuju organske i anorganske spojeve dušika, a najvažniji su amonijak, nitriti, nitrati, nitrooksid, otopljeni elementarni dušik te diatomarni dušik u plinskoj fazi (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Važnost amonijaka u močvarnim sustavima je trojaka. On je izvor dušika te pomoću njega organizmi transformiraju anorganske spojeve u organske. Prilično lako oksidira, što zahtijeva veću koncentraciju kisika, te ima mogućnost degradacije vodenih okoliša putem eutrofikacije, koja se događa zbog povećanja količine dušika i njegovih spojeva, odnosno povećanja razvoja algi te izumiranja životinjskih vrsta. Zbog toga projektiranje biljnih uređaja vodi k smanjenju koncentracije ovog spoja unutar sustava.

Nitrit je intermedijar oksidacijskog procesa između amonijaka i nitrata, nije kemijski stabilan te se zbog toga u močvarnim sustavima proizvodi u vrlo malim koncentracijama. Nitrat je najviši oksidirani stupanj dušika zbog čega je kemijski stabilan. Služi kao osnovni nutrijent za rast biljaka, međutim, ako je u suvišku dovodi do eutrofikacija voda. Bitno je poznavati koncentraciju nitrata i nitrita u vodama, jer imaju toksična djelovanja na dojenčad.

Uklanjanje dušika iz otpadnih voda u biljnim uređajima se odvija vrlo složenom i skupom tehnologijom, koja uključuje složenu opremu, osposobljenu radnu snagu te određenu količinu električne energije. Navedeno nerijetko čini ovakve zahvate skupima i neodrživima. Brojni su

procesu koji se odvijaju prilikom obrade otpadnih voda u biljnom uređaju, a u nastavku slijedi pregled najvažniji od njih: amonifikacije, nitrifikacije i denitrifikacije.

Amonifikacija predstavlja biološku transformaciju organskog dušika u amonijak te je ujedno prvi korak u mineralizaciji organskog dušika (Ružinski i Anić Velić, 2010). Proces koji se odvijaju pri nastanku amonijaka su vrlo složeni te slijede određene zakonitosti. Upravo te zakonitosti i detalje je nužno poznavati pri projektiranju biljnih uređaja.

Nitrifikaciju obavljaju mikrobne zajednice na čelu s bakterijama, a to je aerobni dvostupanjski mikrobiološki proces razgradnje amonijaka u nitrate. Bakterije koje omogućuju proces nitrifikacije pripadaju porodici *Nitrobacteriaceae*, roda *Nitrosomonas* (oksidiraju amonijak u nitrit) i *Nitrobacter* (oksidiraju nitrit u nitrat). Proces se odvijaju pomoću dvije aerobne reakcije koje, obje zahtijevaju kisik. Spomenuti proces ne rezultira promjenom ukupne koncentracije dušika u otpadnoj vodi, ali se smanjuje vrijednost BPK<sub>5</sub> (Ružinski i Anić Velić, 2010.). Nitrifikacija pripada skupini aerobnih procesa, međutim, novija istraživanja su dokazala da se uz aerobni proces odvija i anaerobna oksidacija amonijaka.

Pri procesu denitrifikacije, nitrati uz pomoć mikroorganizama prelaze u plinoviti elementarni dušik (Ružinski i Anić Velić, 2010.). Proces denitrifikacije se odvija u anaerobnim uvjetima, odnosno, anoksičnim uvjetima (bez kisika). Bakterije, koje provode proces denitrifikacije, prilagođavaju svoj metabolizam ovisno o koncentraciji kisika u okolišu. Te bakterije pripadaju rodu: *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Flavobacterium*, *Moraxella*, *Klesbsiella*. Postoji nekoliko međukoraka u ovom složenom procesu koje je također potrebno dobro poznavati pri projektiranju uređaja. Naime, ova reakcija se, kao i mnoge druge, odvija u točno određenim uvjetima uz različite brzine.

Zaključno, procesi nitrifikacije i denitrifikacije zaslužni su za uklanjanje većinske koncentracije dušika iz otpadne vode. Ti procesi ovise o anaerobnim i aerobnim uvjetima koje je u biljnim uređajima teško regulirati. Površinski biljni uređaji su uspješniji u procesima nitrifikacije zbog prevladavanja aerobnih uvjeta, dok se potpovršinski biljni uređaji koriste kao denitrifikacijske jedinice zbog anoksičnih uvjeta.



#### 4.4. Uklanjanje fosfora u biljnim uređajima za pročišćavanje voda

Fosfor je nužan sastojak za rast bilja te je često limitirajući čimbenik rasta vegetacije. Odnos tvari u biomasi nekog sustava, koji je prijeko potreban za rast mikroorganizama je C:N:P = 106:16:17 (molarni odnos). Postoji nekoliko načina uklanjanja fosfora iz otpadnih voda. Najbrži način je mikrobiološki, odnosno pomoću mikroorganizama. On se odvija u aerobnim i anaerobnim uvjetima, a ovisi o nekoliko čimbenika kao što su pH vrijednost otpadne vode, temperatura i otopljeni kisik (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Procesi uklanjanja fosfora i njegovih spojeva bitni su za vodene ekosustave, jer fosforni spojevi ubrzavaju proces eutrofikacije zbog čega ih je, prilikom pročišćavanja otpadne vode, potrebno reducirati do njihove niske koncentracije. Za biološko uklanjanje fosfora iz otpadnih voda zaslužne su fosfat-akumulirajuće bakterije (PAB). Kolika će koncentracija fosfata biti uklonjena iz otpadne vode, ovisi o kapacitetu soja navedenih bakterija te brojnosti soja u aktivnom mulju (Hrenović, 2011).

Fizikalni procesi uklanjanja fosfora uključuju sedimentaciju tvari i precipitaciju otopljenog fosfata ionima kalija, kalcija, željeza i aluminija (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

#### 4.5. Uklanjanje mikroorganizama u biljnim uređajima za pročišćavanje voda

Patogeni, kao što su virusi, bakterije, plijesni, gljivice i prabakterije su uvijek prisutni u otpadnoj vodi. Parazitskog su karaktera, a smanjenju njihovog broja, kao i broja mikroorganizama doprinose prirodno odumiranje, temperatura i ultraljubičasta svjetlost te grabežljivci i sedimentacija (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

S obzirom da je određivanje apsolutnog broja patogena vrlo skupo, znanstvenici konstantno osmišljavaju nove, jeftinije načine određivanja apsolutnog broja patogena. Zbog toga se kao indikatori broja patogena uglavnom koriste drugi organizmi čiju je pojavnost lakše pratiti. Tako se različite bakterije (npr. *Escherichia Coli*) koriste u detekciji broja određenih patogena uz različite uvjete kao što je temperatura. Iako ova metoda ne daje apsolutno točne rezultate, uzevši u obzir sve faktore, pokazala se najprihvatljivijom.

Patogeni organizmi se iz otpadnih voda uklanjaju procesima taloženja, koagulacije i adsorpcije u tlo dok se sedimentacijom akumulira koncentracija patogenih organizama.

## 5. PRIPREMA, IZGRADNJA, ODRŽAVANJE I MONITORING BILJNOG UREĐAJA

Biljni uređaji se najčešće koriste kao sekundarni pročišćivači otpadnih voda. To znači da prije obrade u njima, otpadne vode prolaze kroz predobradu i primarnu obradu kako bi se odstranili neki onečišćivači s ciljem otklanjanja mogućnosti onesposobljavanja biljnih uređaja (začepljenje pora, uklanjanje krupnijeg otpada, krupnijih suspendiranih tvari...). Nakon toga slijedi sekundarna obrada, odnosno ona kroz biljni uređaj. To prije svega podrazumijeva zahtjevan posao konstrukcije biljnih uređaja s obzirom da na isti utječe mnogo čimbenika. Nakon odabira biljnih uređaja kao sekundarnih pročišćivača otpadne vode potrebno je odlučiti da li će oni sadržavati ispunu (potpovršinski) ili neće (površinski). Kod površinskih biljnih uređaja potrebno je definirati vrstu bilja koja će biti korištena s obzirom na položaj unutar uređaja tj. ovisno o tome radi li se o biljkama koje plutaju na površini, biljkama koje su ispod površine ili o kombinaciji te dvije opcije. Za potpovršinske biljne uređaje potrebno je definirati način dotoka otpadne vode: horizontalni ili vertikalni.

Biljni uređaji su rasprostranjeni po cijelom svijetu, a s obzirom na izabranu lokaciju uređaja, razlikuju se po učinkovitosti. Neki od čimbenika pri odabiru lokacije biljnog uređaja su sastav tla, klimatske karakteristike područja, socioekonomski čimbenici itd. Također, odabir lokacije utječe i na financijski plan izvedbe biljnih uređaja. Pri izradi biljnog uređaja potrebno je postaviti vodonepropusnu podlogu kako bi se spriječilo daljnje vertikalno protjecanje otpadne vode. To se postiže postavljanjem vodonepropusnih folija ili izgradnjom uređaja na tlu čija je vodonepropusnost manja od  $K = 10^{-7}$  cm/s. Takve karakteristike propusnosti imaju glinovita tla, koja se ujedno smatraju dobrim izolatorima. Pri odabiru lokacije poželjno je osigurati gravitacijski tok niz uređaj, kako bi se smanjila ili eliminirala potreba za dodatnom energijom. Klimatske promjene je također potrebno uzeti u obzir prilikom projektiranja biljnih uređaja, jer utječu na rad biljnih uređaja (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Dva važna parametra za projektiranje biljnih uređaja su ulazna količina otpadne vode, odnosno protok vode i kakvoća otpadne vode. Ulazna količina otpadne vode određuje kapacitet biljnog uređaja, a osim nje, na kapacitet utječu još i njezine sezonske, tjedne i dnevne varijacije i oborine na toj lokaciji. Sve navedeno je potrebno integrirati u program izrade uređaja, kako bi uređaj mogao funkcionalno obavljati sve aktivnosti na svim razinama. Drugi parametar se odnosi na koncentraciju onečišćenja otpadne vode, koju je potrebno smanjiti. Važni parametri,

koje je potrebno pratiti tijekom obrade otpadne vode su BPK<sub>5</sub>, KPK (kemijska potrošnja kisika), UST (ukupna suspendirana tvar), fosfati i količine i vrste bakterija uz njihove sezonske, tjedne i dnevne varijacije. Ukupan udio otpadnih tvari je potrebno smanjiti na razinu one koje je propisana zakonskom regulativom (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

### 5.1. Dimenzioniranje biljnih uređaja

Protok koncentracije onečišćivača i maseno opterećenje bazne komponente (aktivni mulj – supstrat) su temeljni parametri za projektiranje biljnih uređaja. Dva su moguća pristupa projektiranju biljnih uređaja. Prvi se temelji na poznavanju ulazne koncentracije onečišćivača i volumnom protoku otpadne vode te se pomoću tih parametara izračunava površina biljnog uređaja. Drugi način se odnosi na omjer ulazne i izlazne koncentracije onečišćivača s obzirom na već navedenu zakonsku regulativu (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Brojni su parametri koji utječu na dimenzioniranje biljnih uređaja, a izračunavaju se pomoću izraza navedenih u Tablici 5-1.

**Tablica 5-1.** Parametri za dimenzioniranje biljnih uređaja (Ružinski i Anić Velić, 2010)

Parametar	Formula
Volumen biljnog uređaja	$V = A * h$ (5-1)
Realni volumen vode	$V_R = \phi * A * h$ (5-2)
Nominalno vrijeme zadržavanja	$NVZ = \frac{V_R}{Q}$ (5-3)
Hidraulično površinsko opterećenje	$k_s = \frac{Q}{A_p * S}$ (5-4)
Širina biljnog uređaja	$H = \frac{A_p}{d}$ (5-5)

Volumen biljnog uređaja ( $V$ ) je proporcionalan masi otpadne vode koja ulazi u biljni uređaj. Površina ( $A$ ) i dubina ( $h$ ) biljnog uređaja definirana je volumnim protokom otpadne vode. Istraživanja su pokazala da je optimalna dubina za potpovršinske biljne uređaje između 0,4 i 0,8 metara. Takva dubina omogućuje korijenu bilja prodiranje kroz cijeli bazen i aerizira otpadnu vodu. Neka su pak istraživanja pokazala da dubina biljnog uređaja može biti i do jednog metra dubine te da će uklanjanje onečišćivača rezultirati dobrom obradom iako je korijenje bilja raslo do 0,4 metra dubine (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

U potpovršinskim biljnim uređajima postavlja se supstrat, koji ima određenu poroznost ( $\Phi$ ), čije se vrijednosti kreću u rasponu od 0,35 do 0,45. Taj se podatak mora uzeti u obzir kako bi se izračunao realni volumen vode ( $V_R$ ). Poroznost supstrata, kao i nekih drugih tvari, određuje se laboratorijskim putem (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Nominalno vrijeme zadržavanja ( $NVZ$ ) je vrijeme potrebno da bi se odvale kemijske reakcije unutar biljnih uređaja, koji su u osnovi kemijski reaktori. Ono ovisi o srednjem volumnom protoku ( $Q$ ) i korisnom volumenu uređaja, a vrijednost tog parametra je 40-80% manja od teorijske vrijednosti, jer dolazi do rasta korijenja biljaka, smanjenja volumena pora, prirasta biomase itd. (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

Hidraulično površinsko opterećenje ( $k_s$ ) predstavlja odnos volumena i površine poprečnog presjeka uređaja ( $A_p$ ) i nagiba dna bazena ( $S$ ). Širina biljnog uređaja ( $H$ ) predstavlja odnos poprečnog presjeka uređaja ( $A_p$ ) i dubine uređaja ( $d$ ) (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

O važnosti kvalitetnog dimenzioniranja govore podaci o brojnim uređajima konstruiranih 90-ih godina uglavnom na području Velike Britanije, koji su bili projektirani bez stručnog nadzora. To je rezultiralo vrlo niskom učinkovitošću pročišćavanja otpadne vode te su se kao takvi pokazali beskorisnima (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

## 5.2. Održavanje i monitoring biljnih uređaja

Nakon konstrukcije biljnih uređaja, u prvih 30 dana, potrebno je raditi s vodom koja je čista ili blago onečišćena. Postupno se koncentracija onečišćivača povećava (umješavanje otpadne vode), a nakon 3-4 mjeseca rada biljni uređaj se može koristiti punim kapacitetom (Ružinski i Anić Vučinić, 2010). Tijekom rada biljnog uređaja, potrebno je pratiti brojne

vanjske čimbenike (meteorološki parametri: temperatura, vlaga, oborine) koji utječu na rad biljnog uređaja, jer se promjenom vrijednosti svakog od njih smanjuje učinkovitost rada biljnog uređaja.

Tijekom prve godine rada, potrebno je pratiti rad pumpe, protok otpadne vode te razinu vode u uređaju. Nakon što se rad uređaja optimira (u prvoj godini rada), te parametre potrebno je pratiti jednom od dva puta mjesečno. Biljke je potrebno kositi svaka 3-4 tjedna u sezoni rasta (Ružinski i Anić Vučinić, 2010).

## 6. ZAKLJUČAK

Zbog povećane količine otpadnih voda, javlja se sve više načina njihove sanacije. Uređaji, koji se koriste u svrhu obrade otpadne vode, dijele se u dvije kategorije: konvencionalne i nekonvencionalne. Konvencionalni uređaji iziskuju složeniju gradnju, više energije te samim time i veće financijske izdatke. Nekonvencionalni uređaji su biljni uređaji koji posjeduju brojne prednosti, te se zbog toga sve više upotrebljavaju pri obradi otpadnih voda.

Biljni uređaji, koji se koriste u sekundarnoj obradi otpadnih voda, su vrlo učinkoviti, jer obrađuju velike količine otpadnih voda, smanjuju količinu onečišćivača do vrijednosti propisanih zakonskim regulativama, u većini slučajeva ne iziskuju dodatnu energiju, jeftini su za izradu, a procesi, koji se odvijaju unutar samog uređaja, su prirodni. Biljni uređaji su rasprostranjeni diljem svijeta, jer se konstrukcije uređaja mogu prilagoditi različitim vrstama klime, reljefu, sastavu tla, nadmorskoj visini itd. Shodno navedenome, razlikuju se brojne vrste biljnih uređaja te je stoga nemoguće izdati jasno definirane smjernice za izradu istih. Također, ne postoji puno podataka o karakteristikama njihovog rada što uvelike otežava projektiranje.

Upotreba biljnih uređaja je u stalnom porastu, međutim uspoređujući njihovu rasprostranjenost u svijetu i u Republici Hrvatskoj, razlika je znatna jer su u ostatku svijeta biljni uređaji uvelike zastupljeniji. Na našim prostorima postoji velik broj potencijalnih površina, koje se mogu iskoristiti u svrhu stvaranja biljnih uređaja. Iako su to uređaji, koji se u većini slučajeva koriste za obradu komunalnih otpadnih voda, bili bi odlično rješenje za obradu komunalnih voda u područjima, gdje nije razvijen kanalizacijski sustav. Unatoč velikom potencijalu, zbog financijskih ulaganja i neznanja, njihovo korištenje na našim prostorima započelo je tek unazad nekoliko godina.

Velika pažnja trebala bi se usmjeriti na biljne uređaje - ne samo iz razloga što je njihova primarna uloga obrada otpadnih voda, već su oni kao takvi postali i staništa nekih životinjskih vrsta koje u tom sustavu zelene tehnologije žive u simbiozi.

## 7. LITERATURA

1. BANFI, F. 2023. Artificial floating wetlands for river dolphins.
2. IISD. 2018. Floating Treatment Wetlands.
3. KARLOVIĆ, M. 2021. Biljni pročišćivači otpadnih voda. Završni rad. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu.
4. KRALJEVIĆ, L., 2017. Alternativni sustavi pročišćavanja otpadnih voda. Završni rad. Osijek: Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet
5. MALUS, D., VOUK, D. 2012. Priručnik za učinkovitu primjenu biljnih uređaja za pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, str. 9-65.
6. NARODNE NOVINE 47/2008. *Pravilnik o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće*. Zagreb: Narodne novine d.d.
7. RUŽINSKI, N., ANIĆ VUČINIĆ, A. 2010. Obrada otpadnih voda biljnim uređajima. Zagreb: Hrvatska sveučilišna naklada.
8. SAMAL, K., KAR, S., TRIVEDI, S. 2019. Ecological floating bed (EFB) for decontamination of polluted water bodies: Design, mechanism and performance. Odisha: School of Civil Engineering, Kalinga Institute of Industrial Technology
9. SLUŽBENI LIST EUROPSKE UNIJE br. 435/1. 2020. Direktiva (EU) 2020/2184 Europskog parlamenta i Vijeća od 16. prosinca 2020. o kvaliteti vode namijenjene za ljudsku potrošnju
10. STANKOVIĆ, D. 2017. Biljni uređaji za pročišćivanje otpadnih voda. Građevinar.
11. ŠPERAC, M., KALUĐER, J., ŠRENG, Ž., 2013. Biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda. Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek.
12. WHO. 2017. Guidelines for drinking - water quality. 4. izdanje.



Internet izvori:

13. ATUAH, A. 2020. Artificial floating islands will help safety of water ohioans.  
URL: <https://www.thelantern.com/2020/11/artificial-floating-islands-will-help-safety-of-water-for-ohioans/> (13.08.2023.)
14. DOMAZET, N. 2022. Otpadni mulj – problem bez jednoznačnih rješenja, ali s mnogim prilikama.  
URL: <https://www.energetika-net.com/izdvajamo/otpadni-mulj-problem-bez-jednoznacnih-rjesenja-ali-s-mnogim-prilikama-34036> (21.07.2023.)
15. EMAJSTOR. 2022. Biljni uređaji za pročišćavanje  
URL: [https://www.emajstor.hr/clanak/461/biljni\\_uredzaji\\_za\\_prociscavanje](https://www.emajstor.hr/clanak/461/biljni_uredzaji_za_prociscavanje) (19.08.2022.)
16. HRENOVIĆ, J. 2011. Bakterije odgovorne za biološko uklanjanje fosfata iz otpadnih voda.  
URL: <https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/prilog-casopis/173562> (23.07.2023.)
17. POREŠTINA.INFO. 2015. U Kašteliru se gradi najveći biljni pročistač.  
URL: <https://porestina.info/u-kasteliru-se-gradi-najveci-biljni-procistac/> (19.08.2022.)
18. THE ENGINEERING TOLLBOX. 2005.  
URL: [https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-solubility-water-d\\_841.html](https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-solubility-water-d_841.html) (02.08.2023.)
19. WAGUESPACK, N. 2013. Wastewater pond uses floating wetlands for nutrient removal.  
URL: <https://www.wateronline.com/doc/wastewater-pond-uses-floating-wetlands-for-nutrient-removal-0001> (13.08.2023.)
20. WATER QUALITY SOLUTIONS. 2018. Floating wetlands: What are the benefits?  
URL: <https://waterqualitysolutions.com.au/floating-wetlands/> (13.08.2023.)
21. WWF-India. 2013. Himalayan High Altitude Wetlands.  
URL: [https://www.wwfindia.org/about\\_wwf/critical\\_regions/high\\_altitude\\_wetlands/](https://www.wwfindia.org/about_wwf/critical_regions/high_altitude_wetlands/) (20.07.2023.)

22. ZAGREBAČKE OTPADNE VODE D.O.O. 2020. Kako su znanstvenici pratili i identificirali bolesti.

URL: <https://www.zov-zagreb.hr/hr/novosti/kako-su-znanstvenici-pratili-i-identificirali-bolesti-prije-nego-sto-su-se-prosirile-putem-otpadnih-voda.html>  
(18.08.2022.)

## **IZJAVA**

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.*



---

Nikol Matić



KLASA: 602-01/23-01/72  
URBROJ: 251-70-12-23-2  
U Zagrebu, 15.09.2023.

**Nikol Matić, studentica**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/72, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 31.05.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### UPOTREBA UMJETNIH MOČVARNIH POVRŠINA U SANACIJI ZAGAĐENJA VODA

Za mentoricu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada prof. dr. sc. Lidia Hrnčević nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

prof. dr. sc. Lidia Hrnčević

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Luka  
Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)