

# BILJNI UREĐAJI: ZELENA TEHNOLOGIJA ZA OBRADU OTPADNIH VODA

**dr. sc. Stanka Zrnčević, red. prof. u miru**  
Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet kemijskog inženjerstva i  
tehnologije  
Marulićev trg 19, Zagreb  
szrnce@fkit.hr

U radu je opisana primjena biljnih uređaja kao alternativnog tehnološkog rješenja za pročišćavanje različitih tipova otpadnih voda. Opisani su osnovni tipovi biljnih uređaja te su navedene njihove prednosti i nedostaci. Dane su informacije o mehanizmima i procesima kojima se iz sirove otpadne vode uklanjaju različite onečišćujuće tvari. Rad sumarizira i nova saznanja vezana uz razvoj i unapređenje biljnih uređaja s više od 50 referenci koje mogu poslužiti kao osnova za daljnja istraživanja u tom području te moguću komercijalnu primjenu. Prema objavljenim rezultatima istraživanja navedeni su podaci o njihovoj učinkovitosti u smanjenju ulaznog opterećenja otpadnih voda. Također, navode se čimbenici koji su presudni za održiv i učinkovit rad biljnih uređaja, poput ispravnog odabira močvarne vegetacije i supstrata te drugih bitnih parametara kao što je dubina vode/supstrata, hidrauličko vrijeme zadržavanja i hidraulička brzina unosa te način distribucije otpadne vode kroz uređaj.

**Ključne riječi:** otpadne vode, pročišćavanje, biljni uređaji, učinkovitost pročišćavanja, dimenzioniranje

## 1. UVOD

Biljni uređaji (BU) su kompleksni biološki sustavi koji zahvaljujući simbiotskim odnosima između biljaka, mikroorganizama, podloge (supstrata) i vode, imaju sposobnost uklanjanja i/ili konvertiranja brojnih onečišćenja prisutnih u otpadnoj vodi poput organskih (KPK, BPK<sub>5</sub>) i suspendiranih tvari, dušika, fosfora, metala, pesticida i patogena (Zhao i dr., 2020.). U odnosu na konvencionalne tehnologije pročišćavanja, BU karakterizira jednostavan rad, visoka učinkovitost, fleksibilnost u pogonu, relativno niski troškovi izgradnje i održavanja te estetska prihvatljivost (Carvalho i dr., 2017.). Najčešće se koriste za obradu komunalnih otpadnih voda manjih naselja udaljenih od urbanih sredina, ali i za obradu industrijskih otpadnih voda, procjednih voda s odlagališta otpada, oborinskih dotoka s prometnica, poljoprivrednih otpadnih voda te za stabilizaciju i odvodnjavanje mulja. Biljni uređaji se mogu koristiti i u konvencionalnom sustavu kao tercijarni stupanj obrade nakon procesa s aktivnim muljem za dodatno „poliranje“ otpadne vode (Malus i Vouk, 2012.; Stefanakis, 2019.). Pročišćena se voda može ispustiti u prirodne recipijente, zadržati u umjetnim akumulacijama

ili upotrijebiti za gašenje požara, pranje ulica, natapanje poljoprivrednih površina, uzgoj vodenih organizama i sl. (Malus i Vouk, 2012.). Osim za pročišćavanje otpadnih voda koje potječu iz različitih izvora, BU-i kao „građene močvare“ mogu se koristiti za obnovu degradiranih ili stvaranje novih ekoloških staništa koja omogućavaju život različitim divljim vrstama te kao bioretencijska područja u koja se slijeva višak oborinskih voda čime se smanjuje štetno djelovanje voda. Estetski uređene močvare lijepo se uklapaju u okoliš kao zasebno formiran ekosustav te mogu stvoriti novi rekreacijski prostor (Stefanakis, 2019.).

Nakon prve izgradnje BU-a 60-ih godina prošlog stoljeća, biljni uređaji se koriste u mnogim zemljama svijeta. U Europi ih je u pogonu više od 50.000 u Sjevernoj Americi preko 100.000, a sve se češće koriste u Indiji, Kini, Hong Kongu, Južnoj Americi, Australiji, pa čak i u Norveškoj unatoč hladnoj klimi (Yan i Xu, 2014.; Wang i dr., 2017.; Stefanakis, 2018.). Premda RH zbog niskog udjela pružanja usluge pročišćavanja otpadnih voda stanovništvu i velikog broja aglomeracija manjih od 2.000 ES te pogodnih klimatskih uvjeta ima veliki potencijal za izgradnju BU-a, u njoj je do danas izgrađeno

svega nekoliko uređaja, što je posljedica nedovoljne informiranosti javnosti o prednostima i nedostacima BU-a.

Stoga je cilj rada upoznavanje hrvatske stručne javnosti koja se bavi nekim od aspekata zaštite voda, s osnovnim podacima vezanim za razvoj i primjenu ove učinkovite, ekonomične i „okolišno prijateljske“ tehnologije koja bi u budućnosti mogla zauzeti vodeće mjesto u procesu pročišćavanja otpadnih voda i oporavku vodenih površina.

## 2. BILJNI UREĐAJI

Biljni uređaji su kompleksni biološki sustavi koji su projektirani i izgrađeni s ciljem da se iskoriste procesi koji se odvijaju u prirodnim vodnim sustavima u kojima uz interakciju vode, supstrata, biljaka, mikroorganizama te okolišnih čimbenika dolazi do poboljšanja kakvoće vode (Ružinski i Anić Vučinić, 2010.; Gorgoglione i Torretta, 2018.). Sastoje se od jednog ili više međusobno povezanih bazena ili kanala kroz koje prolazi otpadna voda. Pri tome se uklanjanje onečišćujućih tvari odvija pomoću fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa, koji uključuju taloženje i filtraciju suspendiranih tvari, razgradnju organskih tvari mikroorganizmima i biljkama, asimilaciju hranjivih tvari biljkama i mikroorganizmima te razne kemijske reakcije uključujući reakcije kemisorpcije, oksidacije/redukcije i precipitacije (tablica 1). Na odvijanje ovih procesa direktno i/ili indirektno utječu različiti unutrašnji ili vanjski okolišni čimbenici poput temperature, dostupnosti otopljenog kisika i izvora ugljika, pH te oksidacijsko-redukcijski uvjeti u BU (Chen i dr., 2011.; Saeed i Sun, 2012.; Meng i dr., 2014.; Kassa, 2019.).

Zbog opasnosti od gubitka vode procjeđivanjem u tlo, što može dovesti do onečišćenja podzemnih voda,

dno biljnih uređaja se oblaže glinom koja je sama po sebi slabo propusna ili vodonepropusnim oblogama od sintetskih materijala (geomembrane od polietilena, PE ili *etilen-propilen-dien monomera, EPDM*). Danas se većinom koriste obloge od sintetskih materijala koje moraju biti otporne na različite utjecaje koji uključuju UV zračenje, smrzavanje, agresivan utjecaj otpadnih voda te mehanička oštećenja obloge uzrokovane supstratom i korijenjem biljaka (Ružinski i Anić Vučinić, 2010.). Da bi uređaj pravilno funkcionirao, potrebno je bazene izvoditi s blagim uzdužnim nagibom (1 – 3 %) kako bi voda gravitacijski tekla kroz BU. Izgradnja uređaja na ravnom terenu uvjetuje ugradnju crpki za pumpanje vode koje troše energiju dok pad terena veći od 5 % može uzrokovati nefunkcionalnost sustava te dodatni trošak izgradnje (Malus i Vouk, 2012).

Specifičnost uređaja je u tome što ne postoji univerzalno rješenje za njihovu izgradnju i održavanje budući da svako mjesto na kojem se grade ima svoje hidrološke, geomorfološke, biološke i klimatske značajke, a i otpadna voda koja se želi pročititi nije uvijek istog sastava i podrijetla. Iz tog razloga biljni uređaji mogu biti različitih oblika, konstrukcija te različitih značajki (Ružinski i Anić Vučinić, 2010.; Vymazal, 2014.). U skladu s tim, BU-i se mogu klasificirati pomoću različitih izvedbenih kriterija. Primjerice, to su režim tečenja te način raspodjele otpadne vode kroz uređaj, vrste biljaka i supstrata koji se koriste, tipovi konfiguracije tla te vrste otpadne vode koja se obrađuje. Međutim, tri najznačajnija parametra o kojima ovisi učinkovitost BU-a su režim tečenja i smjer toka otpadne vode kroz uređaj te vrsta supstrata i biljaka koje se koriste (Stefanakis, 2018.; Gorgoglione i Torretta, 2018.). Otpadna voda u pravilu mora biti podvrgnuta prethodnom pročišćavanju kako bi se što učinkovitiije uklonile suspendirane

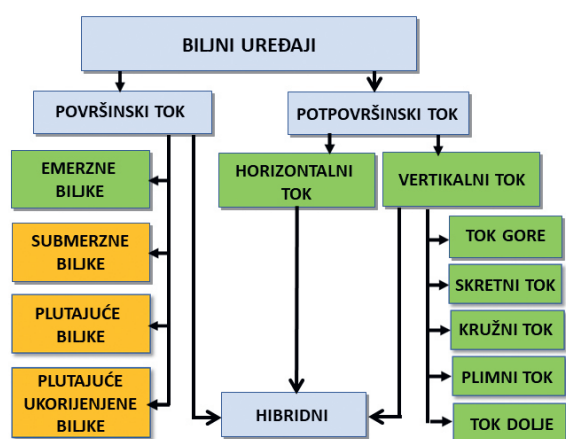
Tablica 1: Procesi uklanjanja onečišćenja u BU (Choudhary i dr., 2011.).

Parametri	Fizikalni	Kemijski	Biološki
Suspendirane tvari	Sedimentacija Filtracija		Biodegradacija
BPK	Sedimentacija	Oksidacija Redukcija	Biodegradacija
KPK	Sedimentacija	Oksidacija Redukcija	Biodegradacija Fitodegradacija Fitoisparavanje Unos u biljke
N - spojevi	Sedimentacija Isparavanje	Adsorpcija	Bio-denitrifikacija-nitrifikacija Unos u biljke
P - spojevi	Sedimentacija	Adsorpcija Precipitacija	Unos u mikroorganizme Unos u biljke
Metali	Sedimentacija Filtracija	Adsorpcija Precipitacija	Unos u biljke
Patogeni	Filtracija UV zračenje	Adsorpcija Precipitacija	Prirodna smrt Izloženost prirodnim toksinima Napad bakterijofagima

tvari te ulja i masti. U protivnom postoji opasnost od začepljenja uređaja, a slijedom toga i smanjenja učinkovitosti pročišćavanja, pojave neugodnih mirisa te potpunog prekida rada (Malus i Vouk, 2012.; Pozo-Morales i dr., 2014.). Također, neophodno je održavanje sustava kao i monitoring, ne samo da bi se zadovoljili zakonski propisi, već da bi sustav funkcionirao u punom kapacitetu cijelog svojeg projektiranog radnog razdoblja. Uređaji koji se neredovito održavaju često imaju znatno manju učinkovitost uz pojavu brojnih problema vezanih za njihov rad, poput začepljenja distribucijskih cijevi, začepljenja ispune, plavljenja površine, širenja neugodnih mirisa, nekontroliranog rasta vegetacije, intenzivnog razmnožavanja neželjenih insekata i dr. (Malus i Vouk, 2012.). Pritom, učinkovitost uređaja ne treba procjenjivati na osnovi kraćeg vremena monitoringa (1 – 2 god.) već to vrijeme mora biti znatno duže (Hijosa-Valsero i dr., 2012.).

## 2.1. Osnovni tipovi biljnih uređaja

Kao što je vidljivo na slici 1, biljni uređaji se s obzirom na režim tečenja vode kroz sustav razvrstavaju na dva



Slika 1. Podjela biljnih uređaja za obradu otpadnih voda (zelenom bojom su označeni BU-i kod kojih se koriste emerzne biljke).

osnovna tipa: na BU sa slobodnim vodnim licem te na BU s potpovršinskim tokom vode. S obzirom na smjer toka vode, potpovršinski BU-i se dijele na: potpovršinski BU s horizontalnim tokom vode te BU s vertikalnim tokom vode. Važnu ulogu u radu svih tipova BU-a ima i močvarna vegetacija. Stoga se s obzirom na vrstu vegetacije BU-i dijele na uređaje s plutajućim biljkama, uređaje s potopljenim (submerznim) biljkama te uređaje s uronjenim (emerznim) biljkama. Za svaku od ovih vrsta uređaja koriste se različite skupine makrofita. Tako se za uređaje s plutajućim biljkama koriste vrste iz skupine *Pleustophyta*, za uređaje sa submerznim biljkama iz skupine *Hydrophyta*, a za uređaje s emerznim biljkama iz skupine *Helophyta*. (Rehman i dr., 2019.).

### 2.1.1. Biljni uređaji sa slobodnim vodnim licem (BUSV)

Izgledom nalikuju prirodnim močvarama. Većina uređaja sastoji se od relativno plitkih bazena (10 – 60

cm) ispunjenih supstratom (najčešće zemljom) koji služi za rast močvarnih biljki kroz koje otpadna voda slobodnim tokom teče iznad površine supstrata prema ispustu (Stefanakis i Headley, 2019.). Kako bi se osigurao približno čepoliki protok (engl. *plug flow*) vode kroz BU, omjer dužine i širine bazena trebao bi biti  $\geq 2$  (Vyamazal, 2010.). Pritom je potrebno osigurati ravnomjerno dotjecanje otpadne vode po čitavom presjeku BU-a kako bi se izbjeglo stvaranje tzv. mrtvih zona, koje ne sudjeluju u pročišćavanju ili sudjeluju sa smanjenim djelovanjem, što u konačnici rezultira smanjenom učinkovitošću pročišćavanja cjelokupnog uređaja. Kod ovog uređaja površina vode je izložena utjecaju atmosfere. Blizu površinskog sloja vode odvijaju se aerobni procesi, dok se u dubljoj vodi i podlozi uglavnom odvijaju anaerobni procesi (Stefanakis i Headley, 2019.).

Ovakav je tip BU-a učinkovit za uklanjanje organskih tvari koje se razgrađuju pomoću mikroorganizama pričvršćenih za stabljike i korijenje biljaka te supstrat, dok se suspendirane tvari uklanjaju flokulacijom/taloženjem, filtracijom kroz gustu vegetaciju te adhezijom na površinu biljaka. Uklanjanje ukupnog dušika je uglavnom slabo zbog niske nitrifikacije. Dušik se odstranjuje nitrifikacijom u aerobnom vodenom stupcu i naknadnom denitrifikacijom u anoksičnom sloju na površini podloge. Zbog kontakta otpadnih voda s atmosferom značajno je isparavanje dušika. Tijekom dana, alge za vrijeme fotosinteze povećaju pH vode koja dodatno pospješuje isparavanje. Zbog ograničenog kontakta vode sa česticama tla koje adsorbiraju i/ili precipitiraju fosfor uklanjanje P je slabo. Smanjenje koncentracije može biti zadovoljavajuće jedino ako dotok sadrži manje od  $0,1 \text{ g P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Vyamazal, 2010.). Premda se glavni procesi uklanjanja dušika i fosfora međusobno razlikuju, oba nutrijenta tijekom proljeća i ljeta mogu biti pomoću korijenja i /ili listova unesena u biljke koje ih konvertiraju u spojeve potrebne za rast. Međutim, ovo uklanjanje je privremeno budući se asimilirani nutrijenti otpuštaju u vodu tijekom jeseni i zime, kada biljke ugibaju (Herath i Vithange, 2015.; Almutkar i dr., 2018.). Što se tiče teških metala, oni mogu biti uklonjeni iz otpadne vode unosom u biljke, fizikalno-kemijskom interakcijom s ispunom te mikrobiološki posredovanim reakcijama (Gorgoglione i Torretta, 2018.). Danas se ovaj tip BU-a znatno rjeđe koristi kao samostalni uređaj. Preporuča se njegovo korištenje pri izgradnji hibridnih biljnih uređaja s više serijski povezanih bazena kod kojih se BUSV izvodi posljednji u nizu i preuzima funkciju polirajućeg bazena (Malus i Vouk, 2012.; Gorgoglione i Torretta, 2018.).

Biljke koje se najčešće koriste u ovom tipu BU-a i koje pokrivaju gotovo 50 % ukupne površine uređaja su uobičajene emerzne vrste poput trske (*Phragmites australis*), rogoza (*Typha latifolia*), uspravnog ježinca (*Sparganium erectum*), običnog oblića (*Scirpus lacustris*), žute perunike (*Iris pseudacorus*), šaša (*Carex sp.*) te blještaca (*Phalaris arundinacea*). Većinom se koriste zasebno ili kako bi se povećala učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda u kombinaciji s drugim

emerznim, plutajućim ukorijenjenim te plutajućim slobodnim vrstama (Vymazal, 2011.; Wu i dr., 2015.).

### 2.1.2. Biljni uređaji s potpovršinskim tokom (BUPT)

Sastoje se od jednog ili više međusobno povezanih bazena, obloženih vodonepropusnim materijalom i ispunjenih poroznim supstratom odgovarajuće veličine čestica te takav uređaj nije izložen utjecaju atmosfere. Otpadna voda teče horizontalno ili vertikalno ispod površine unutar porozne ispune (supstrat) u koju su najčešće posađene emerzne biljke te takav uređaj funkcionira kao horizontalni ili vertikalni prokapnik. Prednost ovog tipa uređaja je neovisnost o klimatskim uvjetima, odsustvo neugodnih mirisa i insekata te se vrlo lijepo uklapa u okoliš kao zasebno formiran ekosustav (Malus i Vouk, 2012.; Stefanakis, 2019.).

**a) BU-i s horizontalnim potpovršinskim tokom (BUHPT)** sastoje se od relativno plitkih bazena ispunjenih supstratom koji se sastoji od tri zone karakteristične debljine i sastava (Marzo i dr., 2019.). Uljevni dio sadrži supstrat krupnije granulacije kako bi voda bila što bolje raspodijeljena po ispuni. Glavni središnji filtarski dio sadrži supstrat od šljunka ili pijeska, a izljevni drenažni dio sadrži supstrat krupnije granulacije. Visina ispune kreće se od 30 – 80 cm ovisno o vrsti biljaka koje se koriste, a razina voda je 5 – 10 cm ispod površine supstrata (Akratos i Tsihrintzis, 2007.; Kadlec i Wallace, 2009.; Ružinski i Anić Vučinić, 2010.). Prolaskom vode kroz uređaj, voda dolazi u kontakt s mrežom aerobnih, anoksičnih i anaerobnih područja. Aerobna područja se nalaze oko korijenja i rizoma biljaka koje koloniziraju aerobni mikroorganizmi, budući se kisik iz atmosfere u vodeni medij najvećim dijelom prenosi pomoću biljaka. Za vrijeme prolaska otpadne vode kroz područje rizosfere, otpadne tvari prisutne u vodi se uklanjaju kombinacijom fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa (Rehman i dr., 2016.).

Ovaj tip BU-a učinkovito uklanja organske nečistoće, suspendirane tvari i bakterije, dok je zbog ograničenog prijenosa kisika unutar filterskog sloja (supstrata) uklanjanje nutrijenata, posebice dušika, znatno slabije. Pritom većinu organskih i dušikovih spojeva uglavnom razgrađuju fakultativni i anaerobni mikroorganizmi. Uklanjanje dušika hlapljenjem, adsorpcijom i unosom u biljke praktički je zanemarivo. Fosforni se spojevi i teški metali adsorbiraju na inertnom materijalu koji ispunjava BU. Supstrat također djeluje kao filter za uklanjanje suspendiranih tvari (Herath i Vithange, 2015.; Gorgoglione i Torretta, 2018.). Kako bi se povećala koncentracija kisika u ispuni, a time i učinkovitost smanjenja KPK, BPK<sub>5</sub> te amonijakalnog dušika (NH<sub>4</sub>-N), mnogi autori sugeriraju korištenje plitkih BU-a (20 cm) kako bi se prisililo da sva voda prolazi kroz zonu korijenja biljaka zasađenih u supstratu (Aguirre i dr., 2010.; Wu i dr., 2015.; Sanchez-Ramos i dr., 2017.).

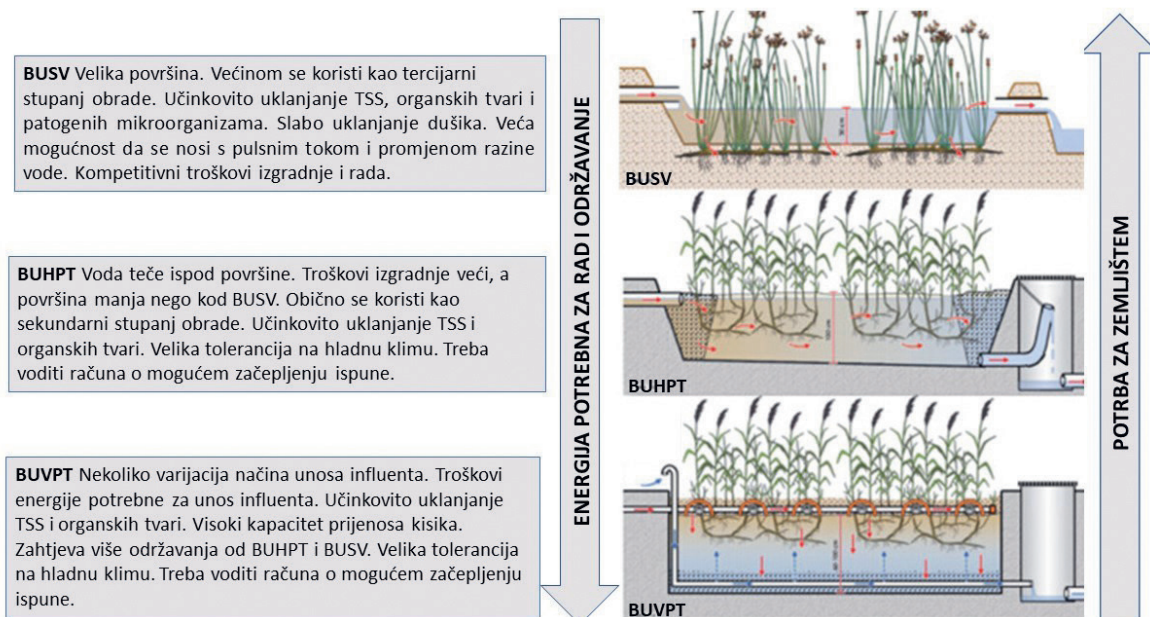
Najčešće korištene biljke su emerzni makrofiti poput trske (*Phragmites australis*), rogoza (*Typha latifolia*), običnog oblića (*Scirpus lacustris*), žute perunike (*Iris pseudacorus*) te blještaca (*Phalaris arundinacea*). Osim

spomenutih makrofita, često se koriste i lokalne vrste poput kane (*Canna indica*) te papirusa (*Cyperus papyrus*) koje su lako dostupne i dobro napreduju u pojedinim lokalnim klimatskim uvjetima (Vymazal, 2011.; Wu i dr., 2015.).

**b) BU s vertikalnim potpovršinskim tokom (BUVPT)** se sastoji od tri sloja supstrata odgovarajuće debljine i značajki: površinskog sloja sa supstratom od krupnog šljunka, središnjeg filtarskog sloja sa supstratom od pijeska srednje do krupne granulacije te pridnenog drenažnog sloja sa supstratom od krupnog šljunka (Ružinski i Anić Vučinić, 2010.). Otpadna se voda distribuira po površini ispune, a potom vertikalno kontinuirano ili diskontinuirano protječe kroz uređaj čija dubina iznosi od 30 do 180 cm (Vymazal i Kröpfelová, 2008.; Stefanakis, 2015.). Najčešće se koristi BU s isprekidanim silaznim tokom vode pri čemu se površina uređaja potapa otpadnom vodom (2 – 12 x na dan) nakon čega slijedi period tijekom kojeg se voda pod djelovanjem gravitacije procjeđuje kroz ispunu (Kang i dr., 2017.; Gorgoglione i Torretta, 2018.). Nova se količina vode uvodi u BU kad je ispuna slobodna od vode. Između dva dotjecanja otpadne vode na površinu BU-a omogućeno je prozračivanje središnjeg filtarskog sloja, što je važno za održavanje aerobnih uvjeta potrebnih za razgradnju organskih tvari. Veća koncentracija kisika ubrzava proces nitrifikacije dušika ili barem pretvarajući veći dio u amonijakalni dušik, dok je denitrifikacija neznatna (Stanković, 2017.; Vymazal, 2007.). Fosfor se iz otpadne vode uklanja fizikalnim procesima (primjerice precipitacija s Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> ili Fe<sup>3+</sup> koji mogu biti prisutni u ispuni) te ne ovisi o koncentraciji kisika. Ovim uređajem moguće je iz otpadne vode ukloniti i neke bakterije (Headley i dr., 2013.).

Ovisno o klimatskim uvjetima najčešće emerzne biljke koje se koriste u BUVPT-u su trske (*Phragmites australis*), rogoz (*Typha latifolia*) i trava (*Echinochloa pyramidalis*) (Vymazal, 2011.; Wu i dr., 2015.). Na slici 2 dan je shematski prikaz osnovnih tipova BU-a te su naznačene neke prednosti i nedostaci.

Korištenjem spomenutih BU-a moguće je postići smanjenje KPK i BPK<sub>5</sub> za 80 – 99 %, TSS za 80 – 90 %, NH<sub>4</sub>-N za 20 – 90 % te koliformnih bakterija za 90 – 99 %, dok je smanjenje ukupnog dušika (TN) i fosfora (TP) znatno manje i iznosi 40 – 55 %, odnosno 40 – 60 % (Llorens i dr., 2009.; Thalla i dr., 2019.). Razlog da se smanjenje TSS podudara sa smanjenjem KPK i BPK<sub>5</sub> leži u činjenici, da je u otpadnoj vodi značajna količina suspendirane tvari organskog podrijetla. U većini BU-a koji se koriste za pročišćavanje otpadnih voda, uklanjanje ukupnog dušika je uglavnom slabo ili gotovo nikakvo zbog nemogućnosti da se u istom uređaju postignu aerobni uvjeti potrebni za nitrifikaciju te anaerobni/anoksični za denitrifikaciju (Lee i dr., 2009.; Shi i dr., 2018.). Budući se u većini BU-a kao ispuna rabi šljunak ili pijesak koji imaju mali kapacitet sorpcije fosfora, njegovo je uklanjanje također neznatno (Xu i dr., 2006.; Frazer-Williams, 2010.).



Slika 2. Shematski prikaz osnovnih tipova BU-a (modificirano prema Wu i dr., 2015.)

### 2.1.3. Hibridni biljni uređaji (HBU).

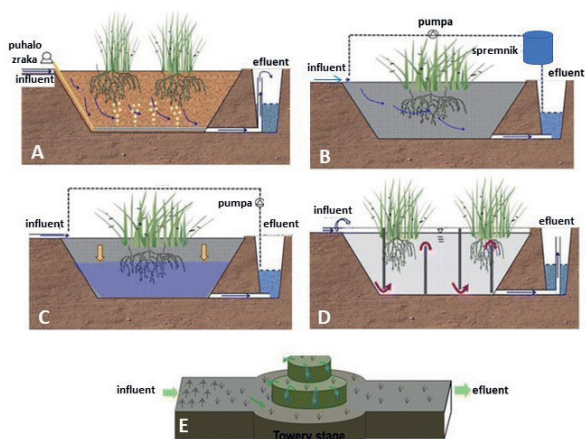
Kako bi se izbjegli nedostaci pojedinog tipa BU-a i pospješila učinkovitost uklanjanja nutrijenata, često se koriste HBU-i koji se sastoje od dva ili više serijski povezanih bazena s različitim tipovima biljnih uređaja. Kombinacijom različitih BU-a koriste se prednosti svakog uređaja te se ostvaruje veća učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda, osobito uklanjanja ukupnog dušika te patogenih mikroorganizama (Vymazal, 2013.; Malus i Vouk, 2012.; Wu i dr. 2015.; Wang i dr., 2017.). Najčešće se koristi kombinacija BU-a s vertikalnim i horizontalnim potpovršinskim tokom vode. Uređaji s vertikalnim potpovršinskim tokom su zbog aerobnih uvjeta koji vladaju u BU-u djelotvorni za nitrifikaciju dušikovih spojeva, dok je denitrifikacija neznatna. Stoga se kod HBU-a najčešće primjenjuju kao prvi u nizu tj. na početku sustava. Zbog stalne potopljenosti ispune kod uređaja s horizontalnim potpovršinskim tokom prevladavaju anaerobni uvjeti, dok se aerobna područja nalaze oko korijenja i rizoma biljki budući se kisik iz atmosfere u vodeni medij najvećim dijelom prenosi pomoću biljaka. Anaerobni uvjeti omogućuju odvijanje procesa denitrifikacije, ako je tomu prethodila nitrifikacija, stoga se ti uređaji najčešće ugrađuju nakon BUVPT-a. Kod HBU-a česta je i kombinacija BUSV-a i BUPT-a. U tom je slučaju BUSV posljednji u nizu i preuzima funkciju završnog poliranja pročišćene vode (Malus i Vouk, 2012.). Korištenjem HBU-a moguće je postići značajno smanjenje TN (62 – 86 %) i TP (66 – 95 %), međutim, površina potrebna za njihovu izgradnju znatno je veća od površine pojedinog BU-a koji se koristi za pročišćavanje otpadne vode (Zhao i dr., 2011.; Foladori i dr., 2012.; Marzec i dr., 2018.; Rousso i dr., 2019.).

## 2.2. Napredni tipovi biljnih uređaja

U Europi se uglavnom koriste BU-i s potpovršinskim tokom vode. Pritom veličina površine potrebne za izgradnju BUVPT-a obično iznosi 1,2 – 5 m<sup>2</sup> ES<sup>-1</sup>, a za BUHPT 3 – 10 m<sup>2</sup> ES<sup>-1</sup> što je dovoljno za uklanjanje organskih i suspendiranih tvari, ali nedovoljno za uklanjanje nutrijenata (Kadlec i Wallace, 2009.; Hoffmann i dr. 2011.). Na osnovi praktičnih iskustva vezanih uz izvedbu i rad BU-a neki autori sugeriraju da bi za uklanjanje N < 8 mg dm<sup>-1</sup> i P < 1,5 mg dm<sup>-1</sup>, bila potrebna neto površina od 15 do 30, odnosno 40 do 70 m<sup>2</sup> ES<sup>-1</sup> (Babatunde i dr., 2008.; Ilyas i Masih, 2017.). Kako bi se povećala koncentracija otopljenog kisika u uređaju te na taj način maksimizirala učinkovitost obrade otpadnih voda, posebice uklanjanje N i P te ujedno smanjila površina potrebna za njihovu izgradnju, u posljednje se vrijeme koriste ili istražuju različiti napredni tipovi biljnih uređaja (Wu i dr., 2015a.; Ilyas i Masih, 2017.; Stefanakis, 2019.; Kassa, 2019.; Zhao i dr., 2020.). To su primjerice biljni uređaji s recirkulacijom vode, s plimnim tokom vode, s aeracijom, s pregradama, te toranjski hibridni BU-i koji predstavljaju varijacije klasičnih uređaja, najčešće BU-i s vertikalnim potpovršinskim tokom vode (slika 3).

### 2.2.1. Biljni uređaji s aeracijom

Kako bi se povećala učinkovitost obrade otpadnih voda i smanjila površina potrebna za njihovu izgradnju u brojnim se radovima navodi uporaba mehaničke aeracije posebice u uređajima s horizontalnim i vertikalnim potpovršinskim tokom vode. (Ilyas i Masih, 2017.; Wang i dr., 2017.; Wallace i dr. 2019.; Nivala i dr., 2020.). Za uvođenje zraka najčešće se koriste difuzori koji ispuštaju mjehuriće zraka veličine 2 – 5 mm stvarajući slobodni, turbulentni mlaz mjehurića koji se podiže do površine



Tipovi BU	Prednosti	Nedostaci
A - BU s aeracijom	Učinkovita nitrifikacija zbog viška kisika, podesan za opterećene vode	Veća potreba za energijom
B - BU s recirkulacijom	Poboljšane performanse za obradu jako opterećenih voda	Više energije za pumpanje
C - BU s plimnim tokom	Manji kapitalni i operativni troškovi od BU s aeracijom	Može doći do začepljenja uređaja
D - BU s pregradama	Pružaju aerobne, anoksne i anaerobne uvjete u istom sustavu	Promjena u ukupnom dizajnu nagiba, radi dužeg puta vode
E - Toranjski hibridni BU	Učinkovit u smanjenju KPK i TN, jer objedinjuje prednosti BUPT i BUSV	Potreba za većim prostorom

Slika 3. Shematski prikaz naprednih biljnih uređaja (modificirano prema Zhao i dr., 2004.; Wu i dr., 2015.)

ispune pomoću sile uzgona (Kadlec i Wallace, 2009.; Stefanakis, 2018.). U usporedbi s pasivnim BU-om, uporaba aeracije dramatično utječe na brzinu prijenosa

kisika čime se stvaraju aerobni uvjeti te ubrzavaju reakcije za čije odvijanje treba kisik (nitrifikacija). Premda uporabom mehaničke aeracije brzina prijenosa kisika može biti veća od  $250 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , u većini uređaja brzina prijenosa iznosi  $100 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Wallace i dr., 2019.). Osim kontinuiranog uvođenja zraka u BU, aeracija može biti i isprekidana čime se uz manju potrošnju energije, osim nitrifikacije pospješuje i brzina denitrifikacija (Wu i dr., 2015b.; Uggetti i dr., 2016.; Patil i Chakraborty, 2017.; Wallace i dr. 2019.). Površina potrebna za izgradnju BU-a s aeracijom znatno je manja od površine koju zauzimaju isti pasivni uređaji. Tako se primjerice površina za izgradnju HBU-a kreće između  $1,2 - 6 \text{ m}^2 \text{ ES}^{-1}$ , BUHPT-a od  $3,4 - 6 \text{ m}^2 \text{ ES}^{-1}$  te BUVPT-a od  $1,8 - 9,9 \text{ m}^2 \text{ ES}^{-1}$  (Fan i dr., 2013.; Foladori i dr., 2013.; Li i dr., 2014.; Zapater-Pereyra i dr., 2014. i 2015.; Wu i dr., 2015b.). Zahvaljujući spomenutim značajkama, danas je širom svijeta u uporabi oko 500 BU-a s aeracijom koji se koriste za obradu različitih tipova otpadne vode (Nivala i dr., 2019.). Učinkovitost pročišćavanja otpadne vode u BU-u s aeracijom prikazana je u tablici 2.

### 2.2.2. Biljni uređaj s recirkulacijom

Positivan efekt recirkulacije na učinkovitost obrade visoko opterećenih otpadnih voda navodi se u brojnim radovima (Garcia-Perez i dr., 2011.; Wang i dr. 2017.;

Tablica 2: Učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda u različitim tipovima BU s aeracijom.

Tip BU/ skala/ voda	Dubina, m	Površina, m <sup>2</sup>	HLR, m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	OLR, gKPK m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	Protok zraka, m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	TSS, %	KPK, %	NH <sub>4</sub> -N, %	TN, %	TP, %	Reference
<b>BUVPT</b>											
lab/K	0,65	1,6	0,21	73	0,09	n.p.	97	99	29	n.p.	Fan i dr., 2013.
pilot/K	0,6	1,8	0,16	64	3,50	73-86	80-88	66-76	29-49	24-29	Foladori i dr., 2013.
lab/S	0,65	9,7	0,01	12	1,86	n.p.	63-97	21-99	27-99	52-91	Wu i dr., 2015b.
lab/K	0,65	1,4	0,20	85	0,06	n.p.	97	98	91	n.p.	Wu i dr., 2016.
<b>BUHPT</b>											
pilot/K	1,0	3,4	0,06	35	60	n.p.	n.p.	20-89	36-86	84-85	Zhang i dr., 2010.
pilot/S	0,75	8,0	0,10	30,1	0,1	n.p.	97	95	80	n.p.	Fan i dr., 2013a.
lab/K	0,38	6,0	0,07	19,7	0,5-0,7	89-95	69-79	9-99	23-34	n.p.	Zapater-Pereyra i dr., 2014.
lab/ŽF	0,5	3,5	0,03	27	0,18	n.p.	64	94	52	n.p.	Wu i dr., 2016a.
<b>HBU</b>											
pilotH+V+H/K	1,0	2,3	1,6	51	n.p.	87	85	81	82	67	Ye i Li, 2009.
labH+H/K	0,38	6	0,07	19,7	0,5-0,7	89-91	69-82	9-57	23-41	n.p.	Zapater-Pereyra i dr., 2014.
labV+H/K	0,8/0,3	2,6	0,046	37	0,12	84-89	91-95	55-72	71-78	44-46	Zapater-Pereyra i dr., 2015.

Napomena: V- BUVPT; H- BUHPT; HLR- hidraulička brzina unosa; OLR- brzina unosa organske tvari; K - kućanska otpadna voda; S - sintetska otpadna voda; ŽF- otpadna voda sa životinjske farme

Tablica 3. Učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda u različitim tipovima BU-a s recirkulacijom.

Tip BU/ skala/ voda	Dubina, m	Površina m <sup>2</sup>	HLR, m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	OLR, gKPK m <sup>2</sup> d <sup>-1</sup>	OR, vol:vol	TSS, %	KPK, %	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N, %	TN, %	TP, %	Reference
<b>BUVPT</b>											
pilot/K	1,0	1,0	0,08	133	0,5:1	49-77	n.p.	36-44	n.p.	42-49	Lian-sheng i dr., 2006.
pilot/K	0,6	0,5	0,5	270	n.p.	90	84	92	n.p.	n.p.	Sklarz i dr., 2009.
pilot/K	0,6	1,4	0,17	83	0,6:1	73-76	80-84	79-72	29-44	29-21	Foladori i dr., 2013.
<b>BUHPT</b>											
pilot/S	1,0	6,0	0,03	15	0,5:1	n.p.	88-85	79-38	n.p.	77-65	Stefanakis i Tsihrintzis, 2009.
<b>HBU</b>											
pilot <sup>V+V</sup> /S	0,6/0,4	1,8	0,04	110	1:1	87-97	75-94	n.p.	73	59-73	Travis i dr., 2012.
puno <sup>V+V+V+H+V</sup> /ŽF	0,8	1,7	0,007	53	2,6:1	87-98	72-93	57-88	50-71	75-92	Zhang i dr., 2016.
pilot <sup>V+V</sup> /ŽF	0,7	4	0,005	n.p.	0,75:1	99,3	97,8	97,1	53,5	50,5	Sharma i dr., 2018.

Napomena: V- BUVPT; H- BUHPT; HLR- hidraulička brzina unosa; OLR- brzina unosa organske tvari; OR- omjer recirkulacije; K – kućanska otpadna voda; S – sintetska otpadna voda; ŽF- otpadna voda sa životinjske farme

Al-Zreiqata i dr., 2018.; Stefanakis, 2018.). Ovim se postupkom povećava prozračivanje otpadne vode zbog kontinuirane recirkulacije dijela vode u BU-u. Pritom omjer recirkulacije najčešće iznosi od 0,5 do 2,5 (Ilyas i Masih, 2017.). Recirkulacija se češće koristi kod BU-a s vertikalnim potpovršinskim tokom, budući da ispuna ima daleko veću hidrauličku vodljivost od ispune uređaja s horizontalnim potpovršinskim tokom te mu zbog povećanog hidrauličkog opterećenja prijete manja opasnost od začepljenja. Zbog duljeg vremena kontakta između vode i biomase (Zhao, 2004.), puferskog efekta recirkulirane vode na promjene ulaznih koncentracija tvari (Sklarz i dr. 2009.) te povećane koncentracije kisika u uređaju (Rehman i dr. 2017.) raste učinkovitost pročišćavanja otpadne vode posebice uklanjanje dušika (tablica 3). Osim povećane učinkovitosti i površina potrebna za izgradnju uređaja je znatno manja od površine potrebne za izgradnju pasivnog BU-a i iznosi 0,5 – 1,6 m<sup>2</sup> ES<sup>-1</sup> (Wu i dr. 2014.; Ilyas i Masih, 2017.). Međutim, recirkulacija zahtijeva uporabu elektro-strojarskog uređaja (pumpa za recirkulaciju) što uzrokuje veću potrošnju energije čime se smanjuje eko-prijateljski karakter procesa (Stefanakis i Tsihrintzis, 2009.).

### 2.2.3. Biljni uređaj s plimnim tokom

Kod ovog tipa BU-a kontrolirajući učestalost punjenja i pražnjenja uređaja moguće je uzastopno ili periodično izlagati biofilm, korijenje biljaka te adsorbirane nečistoće, aerobnom (pražnjenje i prazna faza BU-a) i anaerobno/anoksičnom okruženju (punjenje i puna faza BU-a) te na taj način istodobno pospješiti procese nitrifikacije i denitrifikacije (Wu i dr. 2014.; Borkar i Mahatme, 2015.; Kang i dr., 2017.; Wallace i Austin, 2019a.). Brzina punjenja i pražnjenja uređaja s određenim volumenom otpadne vode se može povećati ili smanjiti ovisno o koncentraciji organskih i dušikovih spojeva prisutnih u

vodi i s tim u vezi potrebne količine kisika. Preporuča se da se uređaj puni i prazni manje od 6 x dnevno (Kadlec i Wallace, 2009.). Uporabom pasivne aeracije značajno se smanjuju kapitalni troškovi i troškovi energije u usporedbi s obradom vode u drugim potpovršinskim BU-ima te uređajima s aktivni muljem ili membranskim bioreaktorima.

Za učinkovitost pročišćavanja vode značajan je kapacitet ionske izmjene supstrata. Kada se BU ispuni vodom, amonijevi ioni (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) se adsorbiraju na negativno nabijenoj površini unutar ispune/biofilm. Kada se voda ispusti iz uređaja, on djeluje kao „pasivna pumpa“ povlačeći zrak u ispunu. U tom su slučaju adsorbirani amonijevi ioni u biofilmu izloženi atmosferskom kisiku i konvertiraju se do negativno nabijenih nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) iona. Brzo zasićenje ispune kisikom dovodi do nitrifikacije pomoću mikroorganizama adsorbiranih u ispuni i do aerobne razgradnje organskih tvari. Tijekom slijedećeg ciklusa plavljenja ispune, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ioni se desorbiraju u vodu gdje dolazi do bakterijama potpomognute denitrifikacije. Kada su nitrat ioni i kisik u potpunosti konzumirani, dolazi do anaerobne razgradnje organskih tvari. (Hu i dr. 2014.). Nakon brzog ispuštanja vode iz uređaja (preporuča se vrijeme od 30 min ili manje) započinju kemijske transformacije u praznoj fazi uređaja i ciklus se ponavlja (Wallace i Austin, 2019.). Osim povećane učinkovitosti uklanjanja dušika i površina potrebna za njegovu izgradnju je znatno manja od klasičnog BUVPT-a te ovisno o uvjetima provedbe procesa iznosi od 0,5 do 5 m<sup>2</sup> ES<sup>-1</sup> (Zhao i dr., 2004.; Hu i dr., 2014.; Wu i dr., 2015a.; Zapater-Pereyra i dr., 2015.; Stefanakis, 2019.). Učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda u ovom tipu BU-a prikazana je u tablici 4.

Tablica 4: Učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda u različitim tipovima BU s plimnim tokom.

Tip BU/ skala/voda	Dubina, m	Površina m <sup>2</sup>	HLR, m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	OLR, gKPK m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	Punjenje: pražnjenje, h : h	TSS, %	KPK, %	NH <sup>+</sup> <sub>4</sub> -N, %	TN, %	TP, %	Reference
<b>BUVPT</b>											
lab/S	0,65	3,3	0,1	36	1:2	n.p.	96	94	47	91	Jia i dr., 2010.
lab/ŽF	0,70	2,2	0,44	88	1:1	86	70	96	60	88	Hu i dr., 2014.
pilot/S	1,8	0,3	0,39	436	3:3	n.p.	93	93	75	n.p.	Wu i dr., 2015a.
<b>BUHPT</b>											
pilot/S	0,6	14	0,03	8,4	n.p.	n.p.	95	81	n.p.	41	Zhang i dr., 2012.
<b>HBU</b>											
lab <sup>V+H</sup> /K	0,85/0,35	3,4	0,046	27	1:2	93	93	73	82	61	Zapater-Pereyra i dr., 2015.
lab <sup>V+H</sup> /K	0,85/0,34	2,6	0,046	37	1:2	84	91	55	78	44	Zapater-Pereyra i dr., 2015.

Napomena: V- BUVPT; H- BUHPT; HLR- hidraulička brzina unosa; OLR- brzina unosa organske tvari; K – kućanska otpadna voda; S – sintetska otpadna voda; ŽF - otpadna voda sa životinjske farme

#### 2.2.4. Biljni uređaji s pregradama

Ovaj se tip uređaja temelji na klasičnom BUHPT-u, koji sadrži pregrade u horizontalnom, vertikalnom ili horizontalno-vertikalnom (hibridnom) smjeru, prisiljavajući otpadnu vodu da prolazi kroz uređaj gore-dolje, cik-cak ili kombinirano (Tee i dr. 2012.; Chang i dr., 2017.). Zbog boljeg prozračivanja ispune i dužeg vremena zadržavanja vode u uređaju, interakcija između onečišćivala i mikroorganizama (na korijenju biljaka i površini supstrata) je veća. Samim tim zbog slijednih

aerobnih, anoksni i anaerobnih uvjeta u BU i učinkovitost uklanjanja onečišćivala, posebice nutrijenata je znatno veća (tablica 5). Nadalje, ovako izveden uređaj koji je pregradama podijeljen na odjeljke, može biti ispunjen različitim supstratima (primjerice donorima elektrona čime se pospješuje denitrifikacija), zasađen različitim makrofitima te pojedinačno aeriran što dodatno može povećati učinkovitost pročišćavanja otpadne vode bez da se poveća površina uređaja (Peng i dr., 2012.; Lehl i dr., 2016.)

Tablica 5: Učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda u različitim tipovima BU s pregradama.

Tip BU/ skala/voda	Dubina, m	Površina m <sup>2</sup>	Broj pregrada/ tok vode	HLR, m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	OLR, gKPK m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	TSS, %	KPK, %	BPK, %	NH <sup>+</sup> <sub>4</sub> -N, %	TN, %	TP, %	Reference
<b>BUSV</b>												
puno/Jialu River	n.p.	7400	2/cik-cak	0,14	n.p.	78-80	25-40		45-85	30-75	73-78	Wang i dr., 2012.
<b>BUHPT</b>												
pilot/K	0,75	2,0	4/cik-cak	n.p.	n.p.	n.p.	61	49	57	33	84	Cui i dr., 2015.
			4/gore-dolje			n.p.	60	72	72	55	93	
			4/ kombinirano			n.p.	71	63	77	33	96	
lab/I	0,34	0,25	4/cik-cak	0,042	n.p.	n.p.	98	n.p.	98	n.p.	n.p.	Lehl i dr., 2016.
pilot/UPOV	0,47	0,90	4/ kombinirano	10,2	16	n.p.	54	n.p.	94	n.p.	48	Kutty I dr., 2016.
pilot/K	0,60	1,08	2/cik-cak	0,092	3,79- 5,55	76	72	80	51	60	57	Aalam i Kali, 2019.
			2/gore-dolje			80	77	86	59	66	64	

Napomena: HLR- hidraulička brzina unosa; OLR- brzina unosa organske tvari; K - kućanska otpadna voda; I - industrijska otpadna voda; UPOV - voda s uređaja za obradu voda



### 2.2.5. Toranjski hibridni BU

Kako bi pospješili uklanjanje nutrijenata iz kućanske otpadne vode Ye i Li (2009.) su dizajnirali toranjski hibridni BU koji se sastoji od BUHPT-a u čijem se središnjem djelu nalazi tro-stupanjski cilindrični toranj. Zahvaljujući pasivnoj aeraciji kad se dio vode (cca. 20 %) prelijeva s gornje kaskade tornja prema donjoj i ulazi u drugi dio BU-a poboljšana je brzina nitrifikacije, dok se dodatkom organske tvari kao rezultat optoka influenta oko tornja povećava brzina denitrifikacije. Ovako izvedenim HBU-om uklonjeno je 89 % TSS, 85 % KPK, 83 %  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ , 83 % TN i 64 % TP, a površina uređaja znatno je manja od klasičnih BU-a i iznosi  $1,2 \text{ m}^2 \text{ ES}^{-1}$ . Isti tip BU-a u kojem je KPK smanjen za 62 %, TSS za 86 % te  $\text{NH}_4^+ -\text{N}$  i TP za više od 95 %, koristili su Zhu i dr.(2012.) za pročišćavanje visoko opterećene otpadne vode sa životinjske farme.

## 3. ODRŽIVA IZVEDBA I RAD BILJNIH UREĐAJA

Poznavanje pojedinih pokazatelja kakvoće otpadnih voda preduvjet je za kvalitetan odabir konceptualnog rješenja te pravilnog oblikovanja i dimenzioniranja BU-a. Glavne značajke otpadnih voda uključuju koncentraciju otopljenih tvari i čvrstih organskih spojeva, tj. biokemijsku potrošnju kisika, suspendirane tvari, spojeve dušika i fosfora, teške metale, patogene bakterije i/ili viruse (Gorgoglione i Torretta, 2018.). Nakon procjene kakvoće otpadne vode treba razmotriti druge čimbenike koji doprinose poboljšanju održivosti i učinkovitosti BU-a. To su odabir lokacije, vrste uređaja, biljaka i supstrata, hidrauličkog vremena zadržavanja (HRT) i hidrauličke brzine unosa (HLR), dubine vode, načina distribucije otpadne vode (kontinuirana, šaržna ili isprekidana) te postupaka održavanja uređaja. Međutim, čimbenici koji

mogu biti presudni za održiv i učinkovit rad BU-a su ispravan odabir biljaka i supstrata te odabir optimalnih radnih parametara (dubine vode, HRT i HLR te načina distribucije otpadne vode) (Kadlec i Wallace 2009.; Wu i dr., 2014.; Gorgoglione i Torretta, 2018.).

### 3.1. Odabir biljaka

Iako biljke u pročišćavanju otpadnih voda imaju tek podređenu ulogu, ipak su zahvaljujući svojim značajkama važan dio svih BU-a. Biljke svojim korijenjem stabiliziraju površinu BU-a, osiguravaju dobre uvjete za fizičku filtraciju, tijekom zimskih mjeseci sprječavaju značajnije sniženje temperature vode unutar ispune i njezino smrzavanje, listovima i stabljikama vrše prijenos kisika u zonu korijenja, povećavaju površinu raspoloživu za razvoj mikroorganizama, a njihovom stabljikama pod utjecajem vjetra rahli se supstrat održavajući hidrauličku provodljivost. Time se ujedno sprječava mogućnost začepjenja tijela ispune, a dodatno se osigurava i prijenos kisika unutar supstrata otapanjem iz atmosfere (Ružinski i Anić Vučinić, 2010.; Wang i dr., 2018.; Pat-Espadas i dr., 2018.). Osim što djeluju kao posrednik u reakcijama pročišćavanja otpadnih voda, one mogu direktno korijenskim sustavom unositi onečišćujuće tvari prisutne u vodi te ih akumulirati u podzemnim i/ili nadzemnim dijelovima biljke (Vymazal, 2007.; Wang i dr., 2014.). Količina tvari unesena biljkama može biti različita, a ovisi o konfiguraciji uređaja, HRT, HLR, tipu otpadne vode i biljke te njejoj starosti, godišnjem dobu i klimatskim uvjetima (Saeed i Sun, 2012.). Relativna važnost makrofita u različitim izvedbama BU-a prikazana je u [tablici 6](#) (Brix, 1994.).

Biljke koje se koriste u BU-ima trebaju biti tolerantne na promjenljivu razinu vode, višu koncentraciju organskih

Tablica 6: Relativna važnost makrofita u različitim izvedbama BU (broj + raste s važnošću procesa, a – označava manju važnost).

Površina BU	BUSV	BUHPT	BUVPT	HBU
	> 20 $\text{m}^2 \text{ ES}^{-1}$	~ 10 $\text{m}^2 \text{ ES}^{-1}$	~ 5 $\text{m}^2 \text{ ES}^{-1}$	2 – 5 $\text{m}^2 \text{ ES}^{-1}$
Stabilizira površinu supstrata	+++++	+++++	+++	+++
Sprječava začepljenje	-	-	+++++	+++++
Smanjuje brzinu strujanja	+++	-	-	-
Prigušuje svijetlo	+++++	++	+	+++
Izolira	+++	+++	+++	+++
Površina za mikrobe	+++++	+++	+	+
Unos nutrijenata	+++++	+	-	+
Prijenos kisika	+	++	+	+
Stanište za životinje	+++++	+++	+	+
Estetska vrijednost	+++++	+++++	+++	+++++

tvari i nutrijenata, imati razvijenu mrežu korijenja i rizoma te kapacitet prijenosa kisika. Nadalje, trebaju posjedovati visoki kapacitet fotosintetske aktivnosti, otpornost na bolesti te veliku nadzemnu biomasu za termičku izolaciju tijekom zime u hladnijim područjima. Od emerznih vrsta to su trska (lat. *Phragmites australis*), rogoz (lat. *Typha latifolia*), uspravni ježinac (lat. *Sparganium erectum*), obični oblič (lat. *Scirpus lacustris*), žuta perunika (lat. *Iris pseudacorus*), šaš (lat. *Carex sp.*), blješćac (lat. *Phalaris arundinacea*). U BU-u sa slobodnim vodnim licem osim emerznih vrsta mogu se koristiti i submerzne vrste poput vodene varjače (*Hydrilla verticillata*), krute voščike (*Ceratophyllum demersum*), pršljenastog krocjanja (*Myriophyllum verticillatum*), uvijuša (*Vallisneria natans*) te mrijesnjava (*Potamogeton crispus*), plutajuće ukorijenjene vrste kao što su lopoč (*Nymphaea tetragona*), okruglolisni plavun (*Nymphoides peltata*) i četverolisna raznorotka (*Marsilea quadrifolia*) te plutajuće slobodne vrste poput vodenog zumbula (*Eichhornia crassipes*), plivajuće nepačke (*Salvinia natans*), žabogriza (*Hydrocharis dubia*) te vodene leće (*Lemna Minor*) (Vymazal, 2011.; Wu i dr., 2015.). Potrebno je izbjegavati uporabu egzotičnih biljnih vrsta, koje nisu karakteristične za određeno podneblje, budući se mogu invazivno širiti na okolno područje onemogućujući razvoj autohtone flore (Malus i Vouk, 2012.).

### 3.2. Odabir supstrata

Odabir supstrata jedan je od ključnih elemenata pri projektiranju BU-a posebice biljnih uređaja s potpovršinskim tokom vode. Supstrat čini tijelo BU-a, osigurava pogodan medij za rast biljaka, uspješno kretanje vode kroz uređaj, površinu za naseljavanje različitih vrsta mikroorganizama te na taj način pospješuje biorazgradnju (Morvannou i dr., 2013.; Meng i dr., 2014.). Osim toga, igra važnu ulogu u procesu pročišćavanja otpadnih voda djelujući kao filtracijski, precipitacijski, adsorpcijski, kompleksacijski i ionoizmjenjivački medij (Saeed i Sun, 2012.; Wu i dr., 2015.).

Supstrati koji se mogu koristiti u BU-u uključuju prirodne materijale (npr. pijesak, šljunak, glina, tlo, lava, vapnenac, zeolit, mramor, antracit, dolomit, vermikulit, volastonit, škriljevac, školjke), industrijske nusprodukte (npr. troska, leteći pepeo, crveni mulj, pepeo ugljena, komadiće opeke, ljuske kokosa i palmi) te umjetno načinjene supstrate (npr. aktivni ugljen, kompost, keramizit, agregati male težine) (Wu i dr., 2015.; Tsihrintzis, 2017.; Gorgoglione i Torretta, 2018.; Yang i dr., 2018.).

S praktičnog stanovišta, lokalna dostupnost te cijena dva su temeljna čimbenika o kojima ovisi odabir supstrata, budući da u ukupnim troškovima izgradnje BU-a, supstrat sudjeluje s udjelom od 25 do 41 % (Dordio i Carvalho, 2013.). Međutim, kako bi rad uređaja bio učinkovit, pri odabiru supstrata daleko su važnije njegove fizičke (npr. veličina čestica, poroznost, veličina površine, mehanička čvrstoća, hidraulička i električna provodljivost), kemijske (npr. površinski naboj,

toksičnost, kemijska stabilnost) te biološke značajke (npr. elektron donor/akceptor) (Wu i dr., 2015.; Yang i dr., 2018.; Sandoval i dr., 2019.). Tako primjerice, o veličini i obliku zrna supstrata ovisi veličina površine dostupne za rast biofilma kao i hidrauličke značajke te poroznost ispune (Bruch i dr., 2014.). Obično se uporabom sitnijih čestica (veća površina) povećava učinkovitost BU-a zbog veće koncentracije mikroorganizama. Međutim, sitnije čestice uzrokuju začepjenja uređaja (biološko, fizičko ili kemijsko začepjenje) zbog čega dolazi do smanjenja poroznosti i hidrauličke vodljivosti ispune, a time i do pada učinkovitosti pročišćavanja (Meng i dr., 2014.; Wu i dr., 2015c.). Nadalje, supstrat mora biti mehanički otporan kako bi izdržao različite uvjete provedbe procesa (npr. protok, kemijski sastav vode) bez gubitka glavnih značajki. Također, mora biti i ekološki prihvatljiv kako ne bi uzrokovao sekundarno onečišćenje okoliša (npr. ispiranje toksičnih metala) te treba imati dug životni vijek (Dordio i Carvalho, 2013.). O kemijskom sastavu ovisi sorpcijske značajke supstrata, a time i učinkovitost pročišćavanja. Supstrati s visokim sadržajem Ca, Al, Mg ili Fe te njihovih oksida ili hidroksida (poput vapnenca, atapulgita, boksita, troske, laterita, crvenog mulja, mulja kisele rudničke drenaže) posjeduju visok kapacitet za uklanjanje fosfora (Liu i dr., 2016.; Dai i Hu, 2017.; Yin i dr., 2017.). Supstrati s visokim ionoizmjenjivačkim kapacitetom poput zeolita, vermikulita, vapnenca te biokara djelotvorno uklanjaju metale, fosfor i amonijakalni dušik, zbog sposobnosti kompleksacije, ionske izmjene i adsorpcije onečišćenja (Wu i dr., 2014.; Mojiri i dr., 2016.; Maharjan i dr., 2020.). Organski supstrati (rižine ljuskice, slama ili malč) pogodni su za uklanjanje nitrata budući ih denitrificirajuće bakterije koriste kao izvor ugljika (Cao i dr., 2016.; Ilyas i Masih, 2017.). Kako bi se poboljšala učinkovitost BU-a za uklanjanje određenih zagađivača često se koriste kombinacije različitih supstrata ili se supstrati modificiraju kiselinama, lužinama, različitim solima ili se termički obrađuju (Wu i dr., 2015c.; Yin i dr., 2017.; Wang i dr. 2018.).

U literaturi se navodi cijeli niz različitih tvari kao potencijalnih supstrata, međutim, kod većine realnih BUPT-a se uglavnom koristi šljunak (krupan i srednje krupan), pijesak (krupan, srednje krupan i fini) te lomljeni kamen zbog njihove dostupnosti i niske cijene koštanja (Dordio i Carvalho, 2013.). Prije ugradnje, supstrat treba prosijati i isprati kako bi se spriječilo začepjenje uređaja česticama sitnije granulacije koje su zaostale u supstratu. Također je potrebno koristiti supstrat otporan na trošenje sa zaobljenim glatkim zrnom, kako bi se osigurala bolja hidraulička provodljivost te smanjila vjerojatnost začepjenja ispune (Malus i Vouk, 2012.).

### 3.3. Odabir optimalnih radnih parametara

#### 3.3.1. Dubina vode/supstrata

Jedan od bitnih izvedbenih parametara koji utječe na hidrauličke značajke, odabir biljaka, kao i na biokemijske reakcije odgovorne za uklanjanje onečišćenja, mijenjajući redoks status i količinu otopljenog kisika u uređaju

(Sewwandi i dr.2010.; 2013.; Ranieri i dr., 2013.; Wu i dr., 2015.; Gorgoglione i Torretta, 2018.).

Kod primjene određenih vrsta močvarne vegetacije, poput trske (*Phragmites australis*) ili jezerskog oblika (*Schoenoplectus lacustris*) s dubinom prodiranja korijenja većom od 50 – 70 cm odabiru se dubine vode od 100 cm, dok su dubine od 30 cm svojstvene vegetaciji plitkog rasta korijenja poput trstastog blještca (*Phalaris arundinacea* L), rogoza (*T. latifolia*), velike pirovine (*Glyceria maxima*), dugog oštika (*Cyperus longus* L.) i dr. (Vymazal i Kröpfelová, 2008.; Vymazal, 2011.).

### 3.3.2. Hidrauličko vrijeme zadržavanja i hidraulička brzina unosa

Ključni su čimbenici o kojima ovisi djelotvornost svih tipova BU-a (Wu i dr., 2015.; Alkamur i dr., 2018.; Gorgoglione i Torretta, 2018.). Pri manjoj hidrauličkoj brzini unosa, hidrauličko vrijeme zadržavanja je veće, uspostavlja se odgovarajuća zajednica mikroorganizama te raste djelotvornost uklanjanja onečišćujućih tvari prisutnih u otpadnoj vodi i obrnuto (Saeed i Sun, 2012; Yan i Xu, 2014.; Wang i dr., 2014.). Hidraulička brzina unosa osim na učinkovitost pročišćavanja otpadne vode utječe i na rast biljaka u uređaju (Chazarenc i dr., 2007.; Dong i dr., 2011.).

### 3.3.3. Način unosa influenta u BU

Također jedan od bitnih izvedbenih parametara o kojima ovisi učinkovitost uklanjanja nečistoća prisutnih u otpadnoj vodi (Wu i dr. 2015.; Gorgoglione i Torretta, 2018.; Almuktar i dr., 2018.). Najčešći načini unosa otpadne vode u BUVPT su šaržni, kontinuirani i isprekidani unos (Rahman i dr., 2020.). Kod BU-a sa šaržnim režimom unosa koji se naziva i plimni unos, ritmički se generiraju sekvencijski ciklusi „punjenja“ i „pražnjenja/odmaranja“ tijekom kojih se BU puni, voda se zadržava određeno vrijeme u uređaju, a zatim se u potpunosti isprazni prije nego se injektira sljedeća šarža otpadne vode. Kod isprekidanog unosa izmjenjuju se ciklusi punjenja i pražnjenja uređaja bez zadržavanja vode u uređaju (Jia i dr., 2010.; Li i dr., 2018.), dok kod kontinuiranog unosa, voda kontinuirano prolazi kroz BU. Različiti načini unosa u BU mogu utjecati na oksido-redukcijske uvjete u uređaju, na rast biomase, kao i na prijenos i difuziju kisika u sustavu što može rezultirati promjenom u učinkovitosti pročišćavanja otpadne vode.

## 4. ZAKLJUČAK

Biljni uređaji su se tijekom posljednjih šest desetljeća razvili u pouzdane tehnologije obrade otpadnih voda. Prvenstveno se koriste za pročišćavanje kućanskih otpadnih voda manjih naselja s dovoljno raspoloživog prostora. Uspješno se primjenjuju i za obradu industrijskih otpadnih voda s farmi, klaonica, procjednih voda

odlagališta otpada i oborinskih dotoka s prometnica. Posebno je povoljno što su troškovi pogona i održavanja biljnih uređaja znatno niži nego kod konvencionalnih postupaka pročišćavanja, što je izuzetno važno za ruralne lokalne zajednice malog ekonomskog potencijala.

Premda se istraživanja vezana uz tradicionalne BU-e i njihovu praktičnu primjenu i dalje provode, potrebno je razvijati nove strategije i tehnologije kako bi se povećala koncentracija otopljenog kisika u BU-u te se na taj način maksimizirala učinkovitost pročišćavanja otpadnih voda, posebice uklanjanja dušika. Strategije kojima se povećava provjetranje BU-a su primjerice aeracija, recirkulacija i plimni tok vode te korištenje inovativnih konfiguracija uređaja poput toranjskog hibridnog BU-a ili BU-a s pregradama koji su zahvaljujući posebnom dizajnu učinkovitiji i manji od klasičnih BU-a.

Pregledom literature vezane uz obrađivanu tematiku, može se zaključiti da su biljke i supstrat dva kritična čimbenika o kojima ovisi učinkovitost uklanjanja onečišćujućih tvari prisutnih u otpadnoj vodi. Stoga se posebna pažnja treba posvetiti odabiru biljaka koje su primjerice otporne na bolesti, koje su tolerantne na promjenu razine vode, koje podnose visoke ili niske temperature te koje se mogu uspješno koristiti za obradu slanih otpadnih voda. Nedostaci vezani uz klasične supstrate (šljunak, pijesak) mogu se riješiti uporabom različitih nekonvencionalnih supstrata (industrijskih nusprodukata, poljoprivrednog otpada i dr.), kombinacijom različitih supstrata te kemijskom ili termičkom modifikacijom, kako bi se povećale njihove adsorpcijske i hidrauličke značajke te na taj način povećalo uklanjanje onečišćujućih tvari.

Čimbenici koji mogu utjecati na oksido-redukcijske uvjete u uređaju, na rast biomase, kao i na prijenos i difuziju kisika u sustavu, a time i na učinkovitost BU-a su dubine vode/supstrata, hidrauličko vrijeme zadržavanja, hidraulička brzina unosa te način distribucije otpadne vode kroz uređaj, stoga posebnu pažnju treba posvetiti optimiranju tih radnih parametara.

Može se zaključiti da primjena postojećih znanja i iskustva o korištenju BU-a kao pouzdane tehnologije za obradu različitih otpadnih voda može biti jedan od temelja budućeg učinkovitog upravljanja vodama i u RH. Premda u RH postoji veliki potencijal za izgradnju BU-a (zbog niskog udjela pružanja usluge pročišćavanja otpadnih voda stanovništvu i velikog broja aglomeracija manjih od 2.000 ES te povoljnih klimatskih uvjeta) do danas ih je izgrađeno svega nekoliko. Međutim, poticanjem osviještenosti javnosti te suradnje između znanstvenika i praktičara kao i svih onih koji sudjeluju u donošenju odluka, moguće je premostiti jaz između znanosti i tehnologije te primjene ove ekološki i ekonomski atraktivne tehnologije u praksi. ■

## REFERENCE

- Aguirre P.; Ojeda E.; Garcíá J.; Barragán J.; Mujeriego R. (2010.): Effect of water depth on the organic matter in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Science and Health, Part A. Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 40, 1457-1466.
- Akratos C.S.; Tsihrintzis V.A. (2007.): Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 29, 173-191.
- Aalam T.; Khalil N. (2019.): Performance of horizontal sub-surface flow constructed wetlands with different flow patterns using dual media for low-strength municipal wastewater: a case of pilot scale experiment in a tropical climate region. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54, 1245-1253.
- Almuktar S.A.A.N.; Abed S.N.; Scholza M. (2018.): Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25, 23595-23623.
- Álvarez J.A.; Armstrong E.; Soto M. (2008.): Anaerobic treatment of low-strength municipal wastewater by a two-stage pilot plant under psychrophilic conditions. *Bioresource Technology*, 99, 7051-7062.
- Babatunde A.O.; Zhao Y.Q.; O'Neill M.; O'Sullivan B. (2008.): Constructed wetlands for environmental pollution control: A review of developments, research and practice in Ireland. *Environment International*, 34, 116-126.
- Borkar R.P.; Mahatme P.S. (2015.): Tidal flow constructed wetland: An overview. *Research Inventy: International Journal of Engineering and Science*, 5, 31-34.
- Brix, H. (1997.): Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35, 11-17.
- Bruch I.; Alewell U.; Hahn A.; Hasselbach R.; Alewell C. (2014.): Influence of soil physical parameters on removal efficiency and hydraulic conductivity of vertical flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 68, 124-132.
- Carvalho P.N.; Arias C.A.; Brix H. (2017.): Constructed wetlands for water treatment: New developments. *Water*, 9, 1-9.
- Caselles-Osorio A.; Garcíá J. (2009.): Impact of different strategies and plant presence on the performance of shallow subsurface-flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 378, 253-262.
- Chang J.; Ma L.; Chen J.; Lu Y.; Wang X. (2017.): Greenhouse wastewater treatment by baffled subsurface-flow constructed wetlands supplemented with flower straws as carbon source in different modes. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 1578-1587.
- Chazarenc F.; Maltais-Landry G.; Troesch S.; Comeau Y.; Brisson J. (2007.): Effect of loading rate on performance of constructed wetlands treating an anaerobic supernatant. *Water Science and Technology*, 56, 23-29.
- Chen Y.; Wen Y.; Cheng J.; Xue C.; Yang D.; Zhou Q. (2011.): Effects of dissolved oxygen on extracellular enzymes activities and transformation of carbon sources from plant biomass: implications for denitrification in constructed wetlands. *Bioresource Technoogy*, 102, 2433-2440.
- Choudhary A.K.; Kumar S.; Sharma C. (2011.): Constructed wetlands: an approach for wastewater treatment. *Elixir Pollution*, 37, 3666-3672.
- Cui L.; Ouyang Y.; Yang W.; Huang Z.; Xu Q.; Yu G. (2015.): Removal of nutrients from septic tank effluent with baffle subsurface flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Management*, 153, 33-39.
- Dai H.; Hu F. (2017.): Phosphorus adsorption capacity evaluation for the substrates used in constructed wetland systems: a comparative study. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26, 1003-1010.
- Dong Y.; Wilinski P.R.; Dzakpasu M.; Scholz M. (2011.): Impact of hydraulic loading rate and season on water contaminant reductions within integrated constructed wetlands. *Wetlands*, 3, 499-509.
- Dordio A.V.; Carvalho A.J.P. (2013.): Organic xenobiotics removal in constructed wetlands, with emphasis on the importance of the support matrix. *Journal of Hazardous Materials*, 252-253, 272-292.
- Fan J.; Liang S.; Zhang B.; Zhang J. (2013.): Enhanced organics and nitrogen removal in batch-operated vertical flow constructed wetlands by combination of intermittent aeration and step feeding strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 2448-2455.
- Fan J.; Zhang B.; Zhang J.; Ngo H.H.; Guo W.; Liu F.; Guo Y.; Wu H. (2013a.): Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 141, 117-122.
- Foladori P.; Ortigara A.R.C. Ruaben J.; Andreottola G. (2012.): Influence of high organic loads during the summer period on the performance of hybrid constructed wetlands (VSSF + HSSF) treating domestic wastewater in the Alps region. *Water Science and Technology*, 65, 890-897.
- Foladori P.; Ruaben J.; Ortigara A.R.C. (2013.): Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: a comparative study for treating high load wastewater. *Bioresource Technology*, 149, 398-405.
- Frazer-Williams R.A.D. (2010.): A review of the influence of design parameters on the performance of constructed wetlands. *Journal of Chemical Engineering*, 25, 29-42.
- Gergoglione A.; Torretta V. (2018.): Sustainable management and successful application of constructed wetlands: A critical review. *Sustainability*, 10, 1-19.
- Headley T.R.; Nivala J.; Kassa K.; Olsson L.; Wallace S.; Brix H.; van Afferden M.; Müller R. (2013.): Escherichia

- coli removal and internal dynamics in subsurface flow ecotechnologies: Effects of design and plants. *Ecological Engineering*, 61, 564–574.
- Herath I.; Vithange M. (2015.): Phytoremediation in constructed wetlands, in book *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*, Eds. Ansari A.A.; Gill S.S.; Gill R.; Lanza G.R.; Newman L., Springer, Cham, Switzerland, pp. 243–263.
- Hijosa-Valsero M.; Sidrach-Cardona R.; Bécares E. (2012.): Comparison of interannual removal variation of various constructed wetland types. *Science of the Total Environment*, 430, 174–183.
- Hoffmann H.; Platzer C.; Winker M.; von Muench E. (2011.): Technology review of constructed wetlands. Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment, Eds. von Muench E., Eschborn, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Hu Y.; Zhao Y.; Rymaszewicz A. (2014.): Robust biological nitrogen removal by creating multiple tides in a single bed tidal flow constructed wetland. *Science and Total Environment*, 470, 1197–1204.
- Ilyas H.; Masih I. (2017.): The performance of the intensified constructed wetlands for organic matter and nitrogen removal: A review. *Journal of Environmental Management*, 198, 372–383.
- Jia W.; Zhang J.; Wu J. (2010.): Effect of intermittent operation on contaminant removal and plant growth in vertical flow constructed wetlands: a microcosm experiment. *Desalination*, 262, 202–208.
- Kadlec R.H.; Wallace S.D. (2009.): *Treatment wetlands*, CRC Press/Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL 33487-2742, USA.
- Kang W.; Chai H.; Xiang Y.; Chen W.; Shao Z.; He Q. (2017.): Assessment of low concentration wastewater treatment operations with dewatered alum sludge-based sequencing batch constructed wetland system. *Scientific Reports*, 7, 1–7.
- Kassa Y. (2019.): Recent advances in application of constructed wetland technologies for enhanced wastewater treatment. *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)*, 8, 121–130.
- Kulshrestha K.; Khalil N. (2019.): Treatment of domestic waste water in pilot vertical flow constructed wetland with recycle and with tidal flow constructed wetland in India. Conference: "Sustainable solutions in industrial pollution, water and waste water treatment" At: Aligarh Muslim University, Aligarh, India, pp. 1–5.
- Kutty S.R.B.M.; Nagum A.T.A.; Ezechi, E.H. (2016.): Organic matter and nutrient removal in a sequencing baffled steep-flow constructed wetland system. *Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 340–344.
- Lee C-G.; Fletcher T.D.; Sun G. (2009.): Nitrogen removal in constructed wetland systems. *Engineering in Life Science*, 9, 11–22.
- Lehl H.K.; Ong S.A.; Ho L.N.; Wong Y.S.; Saad F.N.M.; Oon Y.L.; Oon Y.S.; Yong C.Y.; Thung W.E. (2016.): Multiple aerobic and anaerobic baffled constructed wetlands for simultaneous nitrogen and organic compounds removal, *Desalination and Water Treatment*, 57, 29160–29167.
- Li M.; Liang Z.; Callier M.D.; d'Orbecastel E.R.; Ma X.; Sun L.; Li X.; Wang S.; Song X.; Liu Y. (2018.): Nitrogen and organic matter removal and enzyme activities in constructed wetlands operated under different hydraulic operating regimes. *Aquaculture*, 496, 247–254.
- Lian-sheng H.; Hong-liang L.; Bei-dou X.; Ying-bo Z. (2006.): Effects of effluent recirculation in vertical-flow constructed wetland on treatment efficiency of livestock wastewater. *Water Science and Technology*, 54, 137–146.
- Lorens E.; Matamoros V.; Domingo V.; Bayona J.M.; García J. (2009.): Water quality improvement in a full-scale tertiary constructed wetland: Effect on conventional and specific organic contaminants. *Science of Total Environment*, 407, 2517–2524.
- Maharjan A.K.; Mori K.; Toyama T. (2020.): Nitrogen removal ability and characteristics of the laboratory scale tidal flow constructed wetlands for treating ammonium-nitrogen contaminated groundwater. *Water*, 12, 1–16.
- Malus, D., Vouk, D. (2012.): *Priručnik za učinkovitu primjenu biljnih uređaja za pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb.
- Marzec M.; Józwiakowski K.; Debska A.; Gizinska-Górna M.; Pytka-Woszczyło A.; Kowalczyk-Jusko A.; Listosz A. (2018.): The efficiency and reliability of pollutant removal in a hybrid constructed wetland with Common Reed, Manna Grass, and Virginia Mallow. *Water*, 10, 1–18.
- Meng P.; Pei H.; Hu W.; Shao Y.; Li Z. (2014.): How to increase microbial degradation in constructed wetlands: influencing factors and improvement measures. *Bioresource Technology*, 157, 316–326.
- Mojiri A.; Ziyang L.; Tajuddin R.M.; Farraji H.; Alifar N. (2016.): Co-treatment of landfill leachate and municipal wastewater using the ZELIAC/zeolite constructed wetland system. *Journal of Environmental Management*, 166, 124–130.
- Morvannou A.; Forquet N.; Vanclooster M.; Molle P. (2013.): Characterizing hydraulic properties of filter material of a vertical flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 60, 325–335.
- Nivala J.; Boog J.; Headley T.; Aubron T.; Wallace S.; Brix H.; Mothes S.; van Afferden M.; Müller R.A. (2019.): Side-by-side comparison of 15 pilot-scale conventional and intensified subsurface flow wetlands for treatment of domestic wastewater. *Science of Total Environment*, 658, 1500 – 1513.
- Pat-Espadas A.M.; Portales R.L.; Amabilis-Sosa L.E.; Gómez G.; Vidal G. (2018.): Review of constructed wetlands for acid mine drainage treatment. *Water*, 10, 1–25.
- Patil S.; Chakraborty S. (2017.): Effects of step-feeding and intermittent aeration on organics and nitrogen

- removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 52, 403–412.
- Peng J.; Song Y.; Liu Z.; Gao H.; Yu H. (2012.): Performance of a novel circular-flow corridor wetland toward the treatment of simulated high-strength swine wastewater. *Ecological Engineering*, 49, 1–9.
- Pozo-Morales L.; Garvi D.; Martinez L. (2014): Experimental basis for the design of horizontal subsurface-flow treatment wetlands in naturally aerated channels with an anti-clogging stone layout. *Ecological Engineering*, 70, 68–81.
- Rahman M.E.; Halmi M.I.E.B.; Samad M.Y.B.A.; Uddin M.K.; Mahmud K.; Shukor M.Y.A.; Abdullah S.R.S.; Shamsuzzaman S.M. (2020): Design, Operation and Optimization of Constructed Wetland for Removal of Pollutant. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 1–40.
- Ranieri E.; Gorgoglione A.; Solimeno A. A (2013.): Comparison between model and experimental hydraulic performances in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 60, 45–49.
- Rehman F.; Pervez A.; Khattak B.N.; Ahmad R. (2016.): Constructed wetlands: Perspectives of the oxygen released in the rhizosphere of macrophytes. *Clean Soil Air Water*, 45, 1–11.
- Rehman K.; Ijaz, A.; Arslan M.; Afzal M. (2019.): Floating treatment wetlands as biological buoyant filters for wastewater reclamation. *International Journal of Phytoremediation*, 21, 1273 – 1289.
- Reyes-Contreras C.; Matamoros V.; Ruiz I.; Soto M.; Bayona J.M. (2011.): Evaluation of PPCPs removal in combined anaerobic digester-constructed wetland pilot plant treating urban wastewater. *Chemosphere*, 84, 1200–1207.
- Rouso B.Z.; Pelissari C.; dos Santos M.O. (2019.): Hybrid constructed wetlands system with intermittent feeding applied for urban wastewater treatment in South Brazil. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 9, 559–570.
- Ružinski N.; Anić Vučinić A.: Obrada otpadnih voda biljnim uređajima, Hrvatska sveučilišna naklada, Zagreb 2010.
- Saeed T.; Sun G. (2012.): A review on nitrogen and organic removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and support media. *Journal of Environmental Management*, 112, 429–448.
- Sanchez-Ramos D.; Agulló N.; Samsó R.; García J. (2017.): Effect of key design parameters on bacteria community and effluent pollutant concentrations in constructed wetlands using mathematical models. *Science of The Total Environment*, 584–585, 374–380.
- Sandoval L.; Marín-Muñiz J.L.; Zamora-Castro S.A.; Sandoval-Salas F.; Alvarado-Lassman A. (2019.): Evaluation of wastewater treatment by microcosms of vertical subsurface wetlands in partially saturated conditions planted with ornamental plants and filled with mineral and plastic substrates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 1–15.
- Sharma P.K.; Minakshi D.; Anju Rani A.; Malaviya P. (2018.): Treatment efficiency of vertical flow constructed wetland systems operated under different recirculation rates. *Ecological Engineering*, 120, 474–480.
- Sewwandi B.G.N.; Weragoda S.K.; Mowjood M.I.M.; Tanaka N.; Sasikala S. (2010.): Effect of submerged and floating plants on dissolved oxygen dynamics and nitrogen removal in constructed wetlands. *Tropical Agricultural Research*, 21, 353 – 360.
- Shi W.; Li,H.; Li A. (2018.): Mechanism and influencing factors of nitrogen removal in subsurface flow constructed wetland. *Applied Chemical Engineering*, 1, 189–195.
- Sklarz M.Y.; Gross A.; Yakirevich A.; Soares M.I.M. (2009.): A recirculating vertical flow constructed wetland for the treatment of domestic wastewater. *Desalination*, 246, 617–624.
- Stanković D. (2017.): Biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda. *Građevinar*, 8, 639–652.
- Stefanakis A.I.; Tsihrintzis V.A. (2009.): Effect of outlet water level raising and effluent recirculation on removal efficiency of pilot-scale, horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Desalination*, 248, 961–976.
- Stefanakis A.I. (2018.): Introduction to constructed wetland technology, in book: *Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment*, Ed. Stefanakis A.I., Wiley, pp. 1–21.
- Stefanakis A.I. (2019.): The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management. *Sustainability*, 11, 1–20.
- Thalla A.K.; Devatha C.P.; Anagh K.; Sony E. (2019.): Performance evaluation of horizontal and vertical flow constructed wetlands as tertiary treatment option for secondary effluents. *Applied Water Science*, 9, 1–9.
- Tsihrintzis V.A. (2017.): The use of vertical flow constructed wetlands in wastewater treatment. *Water Resources Managements*, 31, 3245–3270.
- Tee H-C.; Lim P-E.; Seng C-E.; Nawi M-A. (2012.): Newly developed baffled subsurface-flow constructed wetland for the enhancement of nitrogen removal. *Bioresource Technology*, 104, 235–242.
- Travis M.J.; Weisbrod N.; Gross A. (2012.): Decentralized wetland-based treatment of oil-rich farm wastewater for reuse in an arid environment. *Ecological Engineering*, 39, 81–89.
- Uggetti E.; Hughes-Riley T.; Morris R. Newton I.M.; Trabi C.L.; Hawes P.; Puigagut J.; García J. (2016.): Intermittent aeration to improve wastewater treatment efficiency in pilot-scale constructed wetland. *Science of The Total Environment*, 559, 212–217.

- Vymazal, J. (2007.): Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 380, 48–65.
- Vymazal J.; Kröpfelová L. (2008.): Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow, Eds., Alloway B.J.; Trevors J.T., Springer, pp. 93–116.
- Vymazal, J. (2010.): Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2, 530–549.
- Vymazal, J. (2011.): Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow. *Hydrobiologia*, 10, 738–749.
- Vymazal J. (2013.): The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Research*, 47, 4795–4811.
- Vymazal J. (2014.): Constructed wetlands for treatment of industrial wastewater. A review. *Ecological Engineering*, 73, 726–751.
- Wallace S.; van Oirschot D.; Stefanakis A. (2019.): Aerated wetlands, in book: *Wetland Technology: Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands*, Eds. Langergraber G.; Dotro G.; Nivala J.; Stein O.R.; Rizzo A., IWA Publishing, pp. 105–107.
- Wallace S.; Austin D. (2019a.): Fill-and-drain wetlands, in book: *Wetland Technology: Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands*, Eds. Langergraber G.; Dotro G.; Nivala J.; Stein O.R.; Rizzo A., IWA Publishing, pp. 95–97.
- Wang W.; Gao J.; Guo X.; Li W.; Tian X.; Zhang R. (2012.): Long-term effects and performance of two-stage baffled surface flow constructed wetland treating polluted river. *Ecological Engineering*, 49, 93–103.
- Wang C.; Zheng S.-S.; Wang P.-F.; Qian J. (2014.): Effects of vegetations on the removal of contaminants in aquatic environments. A review. *Journal of Hydrodynamics*, 26, 497–511.
- Wang M.; Zhang D.Q.; Dong J.W.; Tan S.K. (2017.): Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate. A review. *Journal of Environmental Science*, 57, 293–311.
- Wang Q.; Hu Y.; Xie H.; Yang Z. (2018.): Constructed wetlands: A review on the role of radial oxygen loss in the rhizosphere by macrophytes. *Water*, 10, 678, 1–11.
- Wang H.; Xu J.; Sheng L.; Liu X. (2018a.): A review of research on substrate materials for constructed wetlands. *Materials Science Forum*, 913, 917–929
- Wu H.; Zhang J.; Ngo H.H.; Guo W.; Hu Z.; Liang S.; Fan J.; Liu H. (2015.): A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 175, 594–601.
- Wu H.; Fan J.; Zhang J.; Ngo H.H.; Guo W.; Liang S.; Hu Z.; Liu H. (2015a.): Strategies and techniques to enhance constructed wetland performance for sustainable wastewater treatment. *Environment Science and Pollution Research International*, 22, 14637–14650.
- Wu H.; Fan J.; Zhang J.; Ngo H.H.; Guo W.; Hu Z.; Liang S. (2015b.): Decentralized domestic wastewater treatment using intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Impact of influent strengths. *Bioresource Technology*, 176, 163–168.
- Wu J.; Xu D.; He F.; He J.; Wu Z. (2015c.): Comprehensive evaluation of substrates in vertical-flow constructed wetlands for domestic wastewater treatment. *Water Practice and Technology*, 10, 621–632.
- Wu S.; Dong X.; Chang Y.; Carvalho P.N.; Pang C.; Chen L.; Dong R. (2015d.): Response of a tidal operated constructed wetland to sudden organic and ammonium loading changes in treating high strength artificial wastewater. *Ecological Engineering*, 82, 643–648.
- Wu S.; Wallace S.; Brix H.; Kusch P.; Kirui W.K.; Masi F.; Dong R. (2015e.): Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. *Environmental Pollution*, 201, 107–120.
- Wu H.; Fan J.; Zhang J.; Ngo H.H.; Guo W.; Hu Z.; Lv J. (2016.): Optimization of organics and nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: effects of aeration time and aeration rate. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 113, 139–145.
- Wu S.; Lei M.; Lu Q.; Guo L.; Dong R. (2016a.): Treatment of pig manure liquid digestate in horizontal flow constructed wetlands: effect of aeration. *Engineering in Life Science*, 16, 263–271.
- Xu D.; Xu J.; Wu J.; Muhammad A. (2006.): Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland system. *Chemosphere*, 63, 344–352
- Yan Y.; Xu J. (2014.): Improving winter performance of constructed wetlands for wastewater treatment in northern China. A review. *Wetlands*, 34, 243–253.
- Yang Y.; Zhao Y.; Liu R.; Morgan D. (2018.): Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 261, 441–452.
- Ye F.; Li Y. (2009.): Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. *Ecological Engineering*, 35, 1043–1050.
- Yin H.; Yan X.; Gu X. (2017.): Evaluation of thermally-modified calcium-rich attapulgitite as a low-cost substrate for rapid phosphorus removal in constructed wetlands. *Water Research*, 115, 329–338.
- Zapater-Pereyra M.; Gashugi E.; Rousseau D.P.L.; Alam M.R.; Bayansan T.; Lens P.N.L. (2014.): Effect of aeration on pollutants removal: biofilm activity and protozoan abundance in conventional and hybrid horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Environmental Technology*, 35, 2086–2094.
- Zapater-Pereyra M.; Ilyas H.; Lavrnic S.; van Bruggen J.J.A.; Lens P.N.L. (2015.): Evaluation of the performance and space requirement by three different

- hybrid constructed wetlands in a stack arrangement. *Ecological Engineering*, 82, 290–300.
- Zhang L.; Zhang L.; Liu Y.; Shen Y.; Liu H.; Xiong Y. (2010.): Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater. *Desalination*, 250, 915–920.
- Zhang D.Q.; Gersberg R.M.; Zhu J.; Hua T, Jinadasa K.; Tan S.K. (2012.): Batch versus continuous feeding strategies for pharmaceutical removal by subsurface flow constructed wetland. *Environmental Pollution*, 167, 124–131.
- Zhang X.; Inoue T.; Kato K.; Harada J.; Izumoto H.; Wu D.; Sakuragi H.; Ietsugu H.; Sugawara Y. (2016.): Performance of hybrid subsurface constructed wetland system for piggery wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 73, 13–20.
- Zhao Y.Q.; Sun G.; Allen, S.J. (2004.): Purification capacity of a highly loaded laboratory scale tidal flow reed bed system with effluent recirculation. *Science of Total Environment*, 330, 1–8.
- Zhao Y.; Hui Z.H.; Chao X.Y.; Nie E.; Li H.; He J.Y.; Zheng Z. (2011.): Efficiency of two-stage combinations of subsurface vertical down-flow and up-flow constructed wetland systems for treating variation in influent C/N ratios of domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 37, 1546–1554.
- Zhao J.; Ji B.; Liu R.; Ren B.; Wei T. (2020.) Constructed treatment wetlands: Glance of development and future perspective. *Water Cycle*, 1, 104–112.
- Zhu D.; Sun C.; Zhang H.; Wu Z.; Jia B.; Zhang Y. (2012.): Roles of vegetation, flow type and filled depth on livestock wastewater treatment through multi-level mineralized refusebased constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 39, 7–15.

### CONSTRUCTED WETLANDS: GREEN TECHNOLOGY FOR WASTE WATER TREATMENT

**Abstract.** The paper describes the implementation of constructed wetlands as an alternative technological solution for treating different waste water types, including the advantages and disadvantages of the main constructed wetlands types. The information on the mechanisms and processes for different pollutant type removal from raw waste water are provided. The paper also summarises new insights into the development and improvement of constructed wetlands, including over 50 references that could serve as a basis for further research in the field and a potential commercial application. Based on the published research results, the data on their efficiency in reducing the input waste water load are provided. In addition, the critical factors for sustainable and efficient operation of constructed wetlands are listed, such as correct selection of wetland vegetation and substrates as well as other important parameters - water depth / substrate thickness, hydraulic retention time and hydraulic feed rate, including the manner of waste water distribution through constructed wetlands.

**Key words:** waste water, treatment, constructed wetlands, treatment efficiency, sizing

### PFLANZENKLÄRANLAGEN: GRÜNE TECHNOLOGIE FÜR DIE ABWASSERBEHANDLUNG

**Zusammenfassung.** In diesem Beitrag wird die Anwendung von Pflanzenkläranlagen als alternative Technologie für die Behandlung verschiedener Abwasserarten dargestellt. Es werden die Grundtypen von Pflanzenkläranlagen beschrieben und ihre Vor- und Nachteile genannt. Es werden auch Informationen über Mechanismen und Verfahren gegeben, mit welchen aus dem rohen Abwasser verschiedene Schadstoffe entfernt werden können. Es werden auch neue Erkenntnisse in Bezug auf die Entwicklung und Verbesserung von Pflanzenkläranlagen zusammengefasst samt möglicher kommerziellen Anwendung und einem Literaturverzeichnis mit mehr als 50 Titeln, die als Basis zu weiteren Nachforschungen auf diesem Gebiet dienen können. Die dargestellten Untersuchungsergebnisse enthalten Angaben über die Effizienz von Pflanzenkläranlagen in der Verringerung der Eingangsbelastung des Abwassers. Es werden auch die Faktoren gegeben, die für den nachhaltigen und effizienten Betrieb der Pflanzenkläranlagen von großer Bedeutung sind. Das sind, zum Beispiel, die richtige Wahl von Sumpfpflanzen und Substrat sowie anderer wichtiger Parameter, wie Wassertiefe/Substrathöhe, hydraulische Verweilzeit, hydraulische Durchlässigkeit des Bodenfilters und die Funktionsweise (horizontal/vertikal durchströmte Pflanzenkläranlage).

**Schlüsselwörter:** Abwasser, Reinigung, Pflanzenkläranlage, Effizienz von Abwasserbehandlung, Dimensionierung