

Primljen / Received: 5.4.2017.

Ispravljen / Corrected: 21.8.2017.

Prihvaćen / Accepted: 24.8.2017.

Dostupno online / Available online: 10.9.2017.

Biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda

Autor:



Davor Stanković, dipl.ing.grad.
Hidroprojekt-ing d.o.o.
stankovicd@hp-ing.hr

Stručni rad

Davor Stanković

Biljni uređaji za pročišćavanje otpadnih voda

U radu se daju osnovne informacije o biljnim uređajima, s težištem na biljne uređaje s potpovršinskim tokom, kao najraširenijem tipu biljnih uređaja u Europi. Dan je sažeti prikaz razvoja biljnih uređaja, njihove podjele, glavnih procesa pročišćavanja koji se odvijaju u njima, glavnih dijelova biljnih uređaja, potrebnog prethodnog pročišćavanja, oblikovanja biljnih uređaja, osnovnih konfiguracija biljnih uređaja, pogona i održavanja, rada u zimskim uvjetima, tijekom uporabe te mogućem razvoju neugodnih mirisa. Kao primjer prikazan je nedavno izgrađeni biljni uređaj Kaštelir, a na kraju je dan osvrt na mogućnosti primjene biljnih uređaja u Republici Hrvatskoj.

Ključne riječi:

biljni uređaji, pročišćavanje otpadnih voda, oblikovanje, horizontalni filter, vertikalni filter, prethodno pročišćavanje

Professional paper

Davor Stanković

Constructed wetlands for wastewater treatment

Basic information about constructed wetlands is provided, and an emphasis is placed on constructed wetlands with subsurface flow, being the most common type of constructed wetlands in Europe. A brief account of historical development of constructed wetlands is given, including classification of constructed wetlands, main purification processes taking place in such wetlands, principal components of constructed wetlands, preliminary treatment requirements, shaping of construction wetlands, basic configuration of construction wetlands, plants and maintenance, operation in winter season, service life, and possible generation of foul odours. The theme is illustrated by an example of a recently build constructed wetland in Kaštelir. An overview of possible use of constructed wetlands in the Republic of Croatia is given in the final part of the paper.

Key words:

constructed wetlands, wastewater treatment, shaping, horizontal filter, vertical filter, preliminary treatment

Fachbericht

Davor Stanković

Pflanzenabwasserkläranlagen

In der Arbeit werden die wichtigsten Informationen über Pflanzenkläranlagen gegeben, mit dem Schwerpunkt auf Pflanzenkläranlagen, bei welchem das Abwasser unter der Oberfläche fließt, was in Europa den häufigsten Typ von Pflanzenkläranlagen darstellt. Die Arbeit beinhaltet eine zusammengefasste Übersicht der Entwicklung und Einteilung von Pflanzenkläranlagen, der wichtigsten Klärverfahren in den Anlagen, der Hauptkomponenten von Pflanzenkläranlagen, der notwendigen Vorklärung, der Gestaltung von Pflanzenkläranlagen, der grundlegenden Konfigurationen der Pflanzenkläranlagen, des Betriebs und der Instandhaltung der Anlagen, des Betriebs in Winterbedingungen, des Verlaufs des Betriebs und der möglichen Entwicklung von unangenehmen Gerüchen. Als Beispiel wird die neulich errichtete Pflanzenkläranlage Kaštelir dargestellt. Zum Schluss wird eine Stellungnahme zu den Möglichkeiten des Einsatzes von Pflanzenkläranlagen in der Republik Kroatien gegeben.

Schlüsselwörter:

Pflanzenkläranlagen, Abwasserklärung, Gestaltung, Horizontalfilter, Vertikalfilter, Vorklärung

1. Uvod

Općenito se pod biljnim uređajima podrazumijevaju svi uređaji za pročišćavanje otpadnih voda kod kojih biljke imaju određenu ulogu [1]. Naziv "biljni uređaj za pročišćavanje" ustvari je prijevod njemačkog termina *Pflanzenkläranlage*, gdje su takvi uređaji i osmišljeni. U engleskom govornom području najčešće se upotrebljava naziv *constructed wetlands* (ili *treatment wetlands*), a i u Hrvatskoj se često rabi termin "građene močvare" [2]. Na slici 1. vidljiva je tipična vizura biljnog uređaja.



Slika 1. Tipična vizura biljnog uređaja

Pri upotrebi termina "biljni uređaj" valja ipak biti oprezan jer, ovisno o kontekstu, može imati različito značenje. Tako se, u širem smislu, pod pojmom "biljni uređaj za pročišćavanje" otpadnih voda podrazumijeva cjelovit uređaj za pročišćavanje [3]. Takav cjelovit uređaj, uz osnovne plitke spremnike, uključuje i sve ostale potrebne dijelove i građevine, primjerice, uređaje i građevine prethodnog pročišćavanja, prometne i manipulativne površine, ograde itd.

Ipak, često se termin "biljni uređaj" rabi u užem smislu, kada se obično podrazumijeva plitki spremnik u kojem su zasađene močvarne biljke [4]. Takvi plitki spremnici mogu biti različitih oblika i konstrukcija odnosno karakteristika. Stoga se često za takve "biljne uređaje" (u užem smislu) rabe odgovarajući sinonimi (poput gredice, tijelo biljnog uređaja, polja, močvare, lagune, filter i sl.) s kojima se, manje ili više uspješno, pokušava dočarati njihovo oblikovanje.

Biljni uređaji najčešće se koriste u funkciji drugog stupnja pročišćavanja otpadnih voda, dakle u većini slučajeva prije nego što dospjevaju do tijela biljnog uređaja, otpadne se vode podvrgavaju prethodnoj i/ili primarnoj obradi. Tijekom obrade na biljnim uređajima odvijaju se različiti biološki i fizikalni procesi kao što su adsorpcija, filtracija, precipitacija, nitrifikacija, dekompozicija itd [5].

Postoje različiti tipovi biljnih uređaja koji se mogu primijeniti za pročišćavanje različitih vrsta otpadnih voda. Stoga je njihova primjena široka i, između ostalog, uključuje prema [5]:

- obradu ili pročišćavanje komunalnih otpadnih voda
- obradu ili pročišćavanje otpadnih voda pojedinačnih kućanstava
- naknadnu (tercijarnu) obradu otpadnih voda pročišćenih na konvencionalnim uređajima za pročišćavanje
- obradu određenih tehnoloških otpadnih voda kao što su procjedne vode odlagališta otpada te otpadne vode rafinerija nafte ili one nastale u poljoprivrednoj proizvodnji i dr.
- odvodnju i mineralizaciju mulja izdvojenog iz procesa pročišćavanja otpadnih voda
- obradu i privremeno retenciranje oborinskih voda.

2. Razvoj biljnih uređaja

Prirodne su močvare odavna bile pogodan recipijent otpadnih voda. Nažalost, to za prirodne močvare nije uvijek bilo od osobite koristi. Početak razvoja stvarnih biljnih uređaja, močvara građenih radi obrade (pročišćavanja) otpadnih voda, vezuje se za njemačku limnologinju Käthe Seidel (1907.– 1990.) koja je na *Max Planck* institutu proučavala biljku jezerski oblič (*Schoenoplectus lacustris*) [6]. Otkrila je da ta biljka, kao i druge močvarne biljke, ima povoljan utjecaj na kvalitetu vode. Slijedom toga je u pedesetim godinama prošloga stoljeća eksperimentirala s tzv. hidrobotaničkim sustavima.

Seidel je razvila sustav biljnog uređaja (tzv. Krefeldski sustav) koji se sastojao od jednog vertikalnog i više horizontalno protjecajnih spremnika napunjenih šljunkom i s posađenim močvarnim biljkama. Pretpostavljala je da su za uočen učinak pročišćavanja zaslužne močvarne biljke. Poslije se otkrilo da to nije posve točno, tj. da su za glavninu učinka pročišćavanja ipak zaslužni različiti mikroorganizmi naseljeni na šljunku (supstratu). Tu je činjenicu spoznao Reinhold Kickuth sa Sveučilišta u Göttingenu koji je od sredine šezdesetih godina prošlog stoljeća surađivao s Käthe Seidel. Pokušavao je optimizirati sustav na način da je kao supstrat koristio glinovito tlo, s horizontalnim tečenjem vode, pa je takav sustav u sedamdesetim godinama propagirao kao tzv. postupak korijenskog prostora (njem. *Wurzelraum-Verfahren*).

Kickuth je smatrao da biljke u korijenski prostor glinovitog tla unose kisik i da rast korijena održava propusnost tog prostora. Usto je pretpostavljao da učinak pročišćavanja pospješuju aerobna i anaerobna područja u tlu, velika kontaktna površina finih frakcija čestica tla, dulji putovi horizontalnog tečenja kao i razni biološki i geokemijski procesi. No, i Reinhold Kickuth je samo djelomice bio u pravu jer je znatno precijenio unos kisika od strane biljaka u korijenski prostor. Usto, praksa je pokazala da rast korijena močvarnih biljaka ne može osigurati trajnu propusnost glinovitog supstrata jer je kod nekih uređaja dolazilo do začepijivanja [6]. Takvi su se primjeri negativno odrazili na ugled biljnih uređaja [7].

Od tada su, i izvan Njemačke, provedena brojna istraživanja o učinkovitosti pročišćavanja različitih tipova biljnih uređaja. Na rezultatima tih istraživanja zasnovane su i preporuke za dimenzioniranje, gradnju i pogon biljnih uređaja koje su objavljene u mnogim stručnim radovima i tehničkoj regulativi.

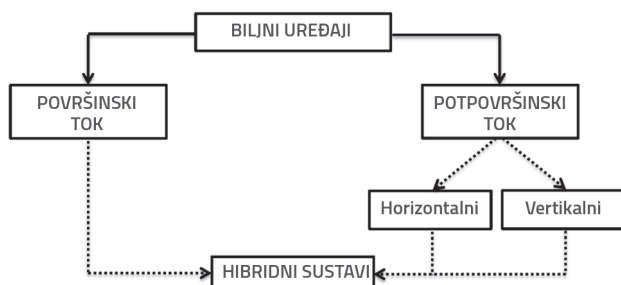
Posebno je tijekom devedesetih godina prošlog stoljeća došlo do povećanja broja izgrađenih biljnih uređaja, ali i proširivanja primjene u pročišćavanju različitih vrsta otpadnih voda (poput industrijskih otpadnih i oborinskih voda). Danas su biljni uređaji uobičajeni u mnogim razvijenim zemljama u Europi, ponajprije Njemačkoj, ali i u Velikoj Britaniji, Francuskoj, Danskoj, Austriji, Poljskoj i Italiji [5]. Sve je češća primjena biljnih uređaja i u Hrvatskoj.

3. Podjela biljnih uređaja

Kao što je rečeno, biljni uređaji mogu biti različitih oblika i konstrukcija te karakteristika. U skladu s tim, biljni se uređaji mogu klasificirati prema različitim stajalištima, prema [8]:

- vrsti biljaka
- režimu tečenja (slobodno vodno lice, potpovršinski tok – horizontalan i vertikalni)
- tipovima konfiguracije biljnih uređaja (hibridni, jednostupanjski ili višestupanjski sustavi)
- vrsti obrađivane otpadne vode
- razini obrade otpadne vode (I. stupanj, II. stupanj, III. stupanj, dezinfekcija)
- tipu prethodnog pročišćavanja
- vrsti supstrata (šljunak, pijesak i sl.)
- načinu distribucije otpadne vode (kontinuirana ili šaržna/ isprekidana distribucija otpadne vode).

Ipak se kao osnovni kriterij ustalio režim tečenja. Prema njemu se biljni uređaji razvrstavaju na dva osnovna tipa: biljni uređaji sa slobodnim vodnim licem te biljni uređaji s potpovršinskim tokom [4]. Međutim u Europi (a i u Hrvatskoj) pretežito se primjenjuju biljni uređaji s potpovršinskim tokom, a ovisno o smjeru tečenja razlikuje se vertikalni i horizontalni tok (slika 2.). Stoga se prikazi i informacije u ovom radu uglavnom odnose na biljne uređaje s potpovršinskim tokom.



Slika 2. Klasifikacija biljnih uređaja (modificirano prema [5])

Praktički je pri svim tipovima biljnih uređaja plitki spremnik ispunjen određenim filtarskim materijalom (takozvanim supstratom, obično pijesak ili šljunak) u kojemu su posađene močvarne biljke. Otpadna voda ulazi u tijelo biljnog uređaja i teče iznad površine supstrata (biljni uređaj sa slobodnim vodnim licem) ili kroz supstrat (biljni uređaji s potpovršinskim tokom). Na kraju se obrađena otpadna voda ispušta kroz konstrukciju

pomoću koje se može kontrolirati dubina otpadne vode u uređaju [7]. Kako je već rečeno, kod biljnih je uređaja s potpovršinskim tokom vodno lice ispod površine ispune. Time su izbjegnuti problemi s emisijama neugodnih mirisa i s komarcima koji su česti na uređajima sa slobodnim vodnim licem [5]. Mogu se, također, međusobno kombinirati pojedini tipovi i podtipovi biljnih uređaja u takozvane hibridne sustave.

U svim tipovima i podtipovima biljnih uređaja otpadna voda u pravilu mora biti podvrgnuta prethodnom pročišćavanju. Takvo pročišćavanje otpadnih voda usmjereno je na što učinkovitije uklanjanje suspendiranih tvari te ulja i masti, jer se u protivnom javljaju različite poteškoće u radu uređaja. Postoji opasnost od začepjenja, a slijedom toga i smanjivanje učinkovitosti pročišćavanja, ali i pojave neugodnih mirisa i sl., pa sve do potpunog prekida rada [4].

4. Proces, površina i glavni dijelovi biljnih uređaja

4.1. Glavni procesi pročišćavanja

Na biljnim uređajima s potpovršinskim tokom uklanjaju se sljedeća onečišćenja:

- organska materija izražena kao biološka potreba kisika (BPK) ili kemijska potreba kisika (KPK)
- suspendirane tvari
- hranjive tvari (dušik i fosfor)
- patogeni mikroorganizmi, teški metali i organska onečišćenja.

Biljni se uređaji često svrstavaju u grupu "jednostavnih" sustava ili sustava "niske tehnologije", no biološki, fizikalni i kemijski procesi pročišćavanja koji se u njima odvijaju nisu nimalo jednostavni. Ti se procesi odvijaju u različitim zonama glavnoga filtarskog sloja kojima pripadaju [5]:

- supstrat
- zona korijena i vode u porama
- otpaci (neživi organski materijal, npr. otpalo lišće i sl.)
- voda
- zrak
- biljke i korijenje biljaka
- zone biomase, npr. bakterije pričvršćene za supstrat i korijenje.

Pročišćavanje otpadnih voda u filtarskom tijelu biljnog uređaja rezultat je složenih interakcija između svih tih zona. U biljnom uređaju prisutan je mozaik područja s različitim razinama kisika, što pobuđuje različite procese degradacije i uklanjanja onečišćavajuće tvari.

Filtarsko tijelo biljnog uređaja djeluje kao mehanički i biološki filtar. Suspendirane tvari u ulaznoj otpadnoj vodi kao i generirane mikrobiološke krutine uglavnom se zadržavaju mehanički, dok se otopljena organska tvar fiksira i apsorbira takozvanim biofilmom. Sva organska materija razgrađuje se i stabilizira biološkim procesima tijekom duljega razdoblja. Biološko pročišćavanje u filtarskom tijelu zasniva se na

Tablica 1. Pregled procesa uklanjanja onečišćenja u biljnim uređajima s potpovršinskim tečenjem [5]

Onečišćenje	Proces pročišćavanja
Organska tvar (izražena kao BPK ili KPK)	Neotopljena organska tvar uklanja se taloženjem i filtracijom te pretvara u otopljeni BPK. Biofilm fiksira otopljenu organsku tvar koju uklanjaju pričvršćene bakterije (biofilm na stabljikama, korijenju, česticama supstrata itd.).
Suspendirane tvari	Filtracija. Razgradnja specijalnim bakterijama u tlu tijekom dugog vremena zadržavanja.
Dušik	Nitrifikacija i denitrifikacija u biofilmu. Unos u biljke (samo ograničeni utjecaj).
Fosfor	Zadržavanje u tlu (adsorpcija). Obaranje s kalcijem, aluminijem i željezom. Unos u biljke (samo ograničeni utjecaj).
Patogeni mikroorganizmi	Filtracija. Adsorpcija. Odumiranje tijekom dugog vremena zadržavanja.
Teški metali	Obaranje i adsorpcija. Unos u biljke (samo ograničeni utjecaj).
Organska onečišćenja	Adsorpcija na biofilm i čestice gline. Moguća razgradnja uslijed dugog vremena zadržavanja s pomoću specijaliziranih bakterija u tlu.

Tablica 2. Približne vrijednosti za određivanje potrebne površine biljnih uređaja s potpovršinskim tokom za različite klimatske uvjete i za kućanske otpadne vode nakon prethodne obrade [5]

	Hladna klima Srednja godišnja temperatura < 10°C		Topla klima Srednja godišnja temperatura >20°C	
	Horizontalno tečenje	Vertikalno tečenje	Horizontalno tečenje	Vertikalno tečenje
Površina po osobi [m ² /ES]	8	4	3	1,2

aktivnosti mikroorganizama, poglavito aerobnih i fakultativnih bakterija. Ti mikroorganizmi rastu na površini čestica supstrata i korijenja, gdje stvaraju aktivni biofilm. Pregled procesa uklanjanja onečišćenja u biljnim uređajima s potpovršinskim tečenjem prikazan je u tablici 1.

Nisko organsko opterećenje u biljnim uređajima omogućuje razgradnju teško razgradive organske tvari (organska onečišćenja) koju razgrađuju specijalizirane prirodne bakterije u tlu. Te se bakterije vrlo sporo razmnožavaju. Sve organske tvari, suspendirane tvari i generirane mikropske krutine se na kraju reduciraju uz pomoć aerobnih i anoksičnih procesa u CO₂, H₂O, NO₃ i N₂.

U biljnim je uređajima uočen unos teških metala u biljke. Još uvijek za to nisu u cijelosti poznati fiziološki razlozi i vjerojatno ovisi o vrsti biljke. Valja imati na umu da teški metali ne nestaju, već zaostaju u tkivu biljke. U normalnim okolnostima teški metali nisu od velike važnosti jer je uglavnom u otpadnim vodama njihova koncentracija mala.

4.2. Potrebna površina

Jedan od najjednostavnijih (i najčešće korištenih) parametara za dimenzioniranje biljnih uređaja je specifična površina, to jest površina (u m²) potrebna za jednog priključenog stanovnika ili ekvivalentnog stanovnika (ES). No, taj parametar nije jednoznačan i njegova veličina ovisi, između ostalog, o

klimatskom području, traženoj kakvoći pročišćene otpadne vode, tipu biljnog uređaja i dr.

Nadalje, od svih klimatskih elemenata, sa stajališta pročišćavanja otpadnih voda najvažnija je temperatura (zbog utjecaja na temperaturu otpadne vode koja pak utječe na kemijske reakcije i biološke aktivnosti). U kontekstu biljnih uređaja mogu se okvirno razlikovati hladna klima (kad je srednja godišnja temperatura manja od 10 °C), topla klima (kad je srednja godišnja temperatura veća od 20 °C) i umjerena klima (kad je srednja godišnja temperatura između tih vrijednosti) [5]. Približne vrijednosti specifičnih površina dane su u tablici 2., a odnose se na uobičajene zahtjeve za kakvoćom otpadne vode (II. stupanj pročišćavanja odnosno uklanjanje BPK5, KPK i suspendirane tvari).

4.3. Glavni dijelovi

Glavni odnosno bitni dijelovi biljnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (dakle cjelovitog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda) jesu objekti prethodnog pročišćavanja (koji pretežitim dijelom predstavlja mehanički stupanj pročišćavanja) te sam biljni uređaj (kao pretežito biološki stupanj pročišćavanja). Na koncept cjelovitog uređaja kao i dimenzioniranje pojedinih dijelova u najvećoj mjeri utječu karakteristike otpadne vode i željeni učinak pročišćavanja, te lokalni uvjeti [1].

5. Prethodno pročišćavanje

Radi osiguravanja dugoročne funkcionalnosti biljnih uređaja, nužno je prethodno pročišćavanje. Cilj je takvog pročišćavanja zadržavanje krutina i suspendiranih tvari, ali i ulja i masnoća, pa se tako smanjuje opterećenje otpadnih voda. Ujedno se izbjegavaju potencijalni problemi u radu, posebno začepljivanje biljnih uređaja. Zahtijevani učinak prethodnog pročišćavanja, posebno u pogledu suspendiranih tvari, ponajprije ovisi o tipu biljnog uređaja odnosno supstratu koji se namjerava upotrijebiti. Što je supstrat finiji (više sitnozrast), to je potreban veći učinak uklanjanja suspendiranih tvari kako ne bi došlo do začepljivanja (kolmatacije) [1]. U slučaju supstrata od pjeskovitog materijala, poželjno je da koncentracija suspendiranih tvari u prethodno pročišćenoj otpadnoj vodi bude u prosjeku ispod 100 mg/l [5]. Posebno je potrebno voditi računa o osjetljivosti određenih postupaka prethodnog pročišćavanja na varijacije u dotocima. Kod nekih postupaka može doći do pogoršanja učinka pročišćavanja i otpplavlivanja mulja. Ako se očekuju velike varijacije dotoka, najpogodniji su postupci koji omogućuju egalizaciju hidrauličnog opterećenja.

Pri odabiru postupka prethodnog pročišćavanja potrebno je voditi računa o postupanju s nastalim muljem. U usporedbi s drugim (tehnički sofisticiranim) uređajima za pročišćavanje, u biljnim uređajima za pročišćavanje otpadnih voda nastaje samo primarni mulj (iz prethodnog pročišćavanja), koji odgovara mulju izdvojenom na prvom stupnju pročišćavanja na tehnološki sofisticiranijim uređajima, ali ne i sekundarni. Stoga su kod biljnih uređaja znatno manje količine mulja za odlaganje i daljnju obradu. No ako nije predviđena obrada mulja na lokaciji biljnog uređaja, potrebno ga je u pravilu odvoziti na daljnju obradu, primjerice na neki veći obližnji uređaj za pročišćavanje.

Postupci prethodnog pročišćavanja koji se najčešće primjenjuju kod biljnih uređaja jesu taloženje u septičkim tankovima, u taložnim lagunama i u Imhoffovim taložnicama [3]. Kod septičkih tankova i taložnih laguna uglavnom se odvija i anaerobna stabilizacija primarnog mulja. Na odabir svakog postupka utječe niz čimbenika, između ostalog veličina (opterećenje) uređaja i raspoloživi prostor. Taložne lagune se koriste kod većih kapaciteta uređaja i kada je na raspolaganju dovoljan prostor za njihov smještaj. Moguća je primjena i drugih uređaja s taloženjem mulja, kao što su tankovi s višestrukim pregradama (eng. *baffled tank*) te UASB (eng. *upflow anaerobic sludge blanket*) reaktori koji se, međutim, upotrebljavaju samo za veće uređaje [5].

Također, a posebno je to slučaj kod većih uređaja za pročišćavanje, mogu se uz prije opisane postupke taloženja koristiti rešetke (grube, fine i sita), a za mješovite kanalizacijske sustave i pjeskolovi/mastolovi [5]. Onda ti uređaji obično prethode procesu taloženja (septički tank, Imhoffov taložnik).

U posebnim se slučajevima može odustati od prethodnog pročišćavanja na lokaciji uređaja. Naime, mogu se upotrijebiti septički tankovi na pojedinim građevnim česticama kada se nakon izgradnje javne kanalizacijske mreže i dalje koriste postojeći uređaji. Uglavnom su za septičke jame za pojedina kućanstva manji utjecaji tuđih voda na prethodno pročišćavanje, a volumeni spremnika veći nego u slučaju centralnoga prethodnog pročišćavanja [1]. Isto vrijedi i za primjenu tlačne kanalizacije (kad se kućni priključak izvodi sa septičkim tankom) ili gravitacijske kanalizacije malih profila [4].

6. Oblikovanje biljnih uređaja

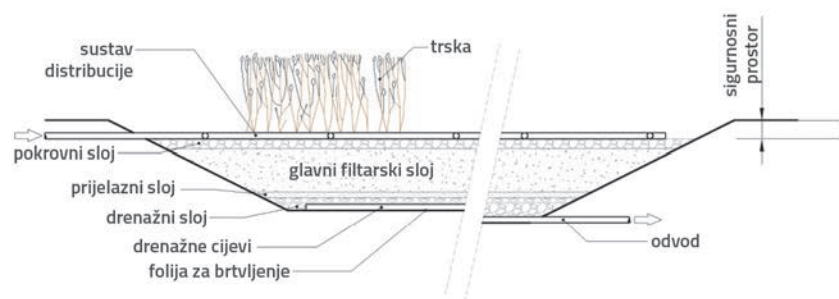
U Europi (ali i u Hrvatskoj) pretežito se primjenjuju biljni uređaji s potpovršinskim tokom. Kod tog tipa uređaja smjer tečenja otpadne vode može biti vertikalni ili horizontalni. Neovisno o smjeru tečenja, glavni su dijelovi biljnog uređaja: uljevni, središnji (filtarski) i izljevni dio [4]. Oblikovanje treba pridonijeti tome da otpadna voda po mogućnosti teče kroz cjelokupni filtarski sloj [1].

6.1. Biljni uređaj s vertikalnim potpovršinskim tokom

Kod biljnog uređaja s vertikalnim potpovršinskim tokom, otpadna se voda distribuira po površini filtarskog sloja, a potom vertikalno protječe kroz tijelo uređaja (odnosno supstrat). Često se, po uzoru na njemački naziv, rabi i izraz "vertikalni filter", slika 3. Za uobičajeni supstrat od pijeska radi se sljedeće oblikovanje vertikalnog filtra, prema [1]:

- sigurnosni prostor
- biljke
- pokrovni sloj
- glavni filtarski sloj
- prijelazni sloj
- drenažni sloj
- zaštitni sloj folije za brtvljenje
- folija za brtvljenje ili brtva od prirodnog materijala
- sloj za poravnanje od pijeska ili zaštitni sloj folije za brtvljenje.

Sigurnosnim se prostorom označava visina od gornjeg ruba spremnika do površine gredice. Osnovna namjena



Slika 3. Shematski prikaz oblikovanja vertikalnog filtra (modificirano prema [1])

je sprječavanje površinskog izlivanja iz gredice u slučaju smanjenog intenziteta procjeđivanja otpadnih voda (npr. uslijed kolmatacije ili zaleđivanja površine). Također omogućuje namjerno potapanje površine gredice radi uklanjanja korova. Najčešće su dovoljne visine od 20 do 30 cm.

Biljke održavaju propusnost tijela biljnog uređaja i dugoročno osiguravaju njegovu funkcionalnost. Manjim dijelom pridonose i poboljšanju učinka pročišćavanja.

Pokrovni sloj služi za zaštitu filtarske površine od ispiranja tijekom distribucije otpadne vode. Također služi i kao zaštita od emisije neugodnih mirisa (kada se pokrovnim slojem pokriva sustav distribucije). U većini slučajeva se koristi šljunak u sloju debljine 5 do 10 cm. Ističe se da oštrobridni materijal ili prevelike debljine sloja mogu ometati rast biljaka.

Procesi pročišćavanja otpadne vode pretežito se odvijaju u glavnome filtarskom sloju. Debljina tog sloja trebala bi iznositi minimalno 50 cm. Površina glavnoga filtarskog sloja treba biti ravna i horizontalna kako bi se postigla jednolika raspodjela otpadne vode i izbjeglo stvaranje lokvi na površini.

Između glavnoga filtarskog i drenažnog sloja se po potrebi postavlja prijelazni sloj da spriječi ispiranje finijeg materijala iz glavnoga filtarskog sloja u drenažni. Drenažni sloj služi odvođenju biljnog uređaja i istodobno omogućuje prozračivanje glavnoga filtarskog sloja s donje strane.

Oblik se biljnog uređaja za vertikalni filter može slobodno birati. Međutim, povoljniji su pravilniji oblici gdje je sustav distribucije, koji osigurava jednoliku distribuciju otpadne vode po cijeloj površini, ipak manje kompliciran.

Ako se koriste višeslojni filteri, valja imati na umu da na prijelazu slojeva s grubljim prema finijem materijalu, uslijed naglog povećanja otpora tečenju, može nastupiti pojačano filtarsko djelovanje. To može uzrokovati da se suspendirane tvari pretežno zadržavaju na toj površini i na tom mjestu mogu izazvati kolmataciju (začepljenje).

Za pogon vertikalnih filtera, zbog cikličke distribucije otpadne vode po površini gredice, najčešće je potrebna dodatna energija, odnosno uporaba crpki. Zbog takvog načina distribucije otpadne vode kod vertikalnih filtera se postiže dobar unos kisika, što u pravilu omogućuje dobru nitrifikaciju. No ukupno je uklanjanje dušika, bez dodatnih tehničkih mjera, relativno malo. Ukupno uklanjanje dušika moguće je poboljšati recirkulacijom već pročišćene otpadne vode, ili kombinacijom vertikalnog filtera s naknadnim horizontalnim filtrom.

6.2. Biljni uređaj s horizontalnim potpovršinskim tokom

Kod biljnog uređaja s horizontalnim potpovršinskim tokom se otpadna voda raspodjeljuje na uljevnom dijelu po jednoj stranici gredice te kroz filtarsko tijelo struji u horizontalnom smjeru, prema izljevnom dijelu. Često se, po uzoru na njemački naziv, rabi i izraz "horizontalni filter" (slika 4.). Oblikovanje se horizontalnog filtera sastoji od sljedećih dijelova, prema [1]:

- uljevni dio
- prijelazni sloj
- glavni filtarski sloj
- prijelazni sloj
- izljevni dio
- folija za brtvljenje ili brtva od prirodnog materijala
- sloj za poravnanje od pijeska ili zaštitni sloj folije za brtvljenje.

Slično kao i kod vertikalnog filtera, između gornjeg ruba biljnog uređaja i površine gredice trebao bi postojati sigurnosni prostor približne visine od 20 do 30 cm da bi se spriječio površinsko izlivanje spremnika zbog smanjene propusnosti i omogućavalo plansko potapanje gredice.

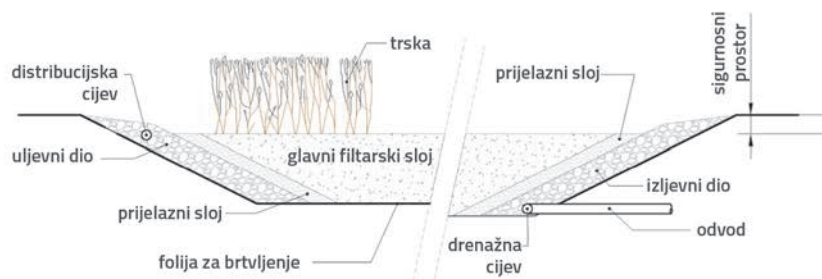
Biljke su bitan dio uređaja jer poboljšavaju učinak pročišćavanja i osiguravaju njegovu dugoročnu funkcionalnost.

Uljevni dio se sastoji od grubljeg materijala i ima funkciju jednolike raspodjele vode po dužini jedne stranice horizontalnog filtera. Promjenljivom granulacijom između ulaznog dijela i filtarskog tijela izbjegava se nagla promjena propusnosti koja pod određenim okolnostima može dovesti do kolmatacije.

Procesi pročišćavanja otpadnih voda uglavnom se odvijaju u glavnome filtarskom sloju. Otpadna voda kroz taj sloj treba protjecati ravnomjerno. Ovaj sloj mora osiguravati i dovoljno vrijeme zadržavanja otpadnih voda. Gornja bi površina filtarskog sloja trebala biti horizontalna kako bi se, po potrebi, omogućilo jednoliko potapanje filtera. Između filtarskog sloja i izlavnog dijela postavlja se prijelazni sloj. Namjena je tog sloja osiguravanje filtarske stabilnosti između različitih granulacija kako ne bi došlo do iznošenja finijih čestica kroz izlazni dio.

Izlazni dio služi za odvođenje horizontalnog filtera. U većini slučajeva se izvodi od šljunka na čije je dno položena drenažna cijev. Dno gredice treba postaviti u padu prema izlaznom dijelu kako bi se filtarski sloj mogao u cijelosti prazniti. Oblik horizontalnog filtera proizlazi iz potrebne površine ulaznog dijela

i duljine puta tečenja. Općenito bi ulazni poprečni presjek trebao biti što veći, tako da se distribucija otpadne vode najčešće provodi po duljoj stranici gredice. Duljina puta tečenja ovisi o filtarskom materijalu. U pravilu je pogon horizontalnih filtera moguć bez dodatne energije odnosno bez upotrebe crpki. Unos kisika u tijelo uređaja je nešto slabiji nego kod vertikalnih filtera, pa je stoga nešto slabija i nitrifikacija. No ukupno



Slika 4. Shematski prikaz oblikovanja horizontalnog filtera (modificirano prema [1])

uklanjanje dušika, zbog bolje denitrifikacije, u pravilu je veće negoli kod vertikalnih filtara. Uz odgovarajuće hidrauličko dimenzioniranje, horizontalni filtri se mogu koristiti i kod dotoka mješovitih voda.

6.3. Filtarski materijal (supstrat)

U biljnim uređajima procesi pročišćavanja otpadnih voda uglavnom se odvijaju u glavnom filtarskom sloju koji se mora sastojati od pogodnoga filtarskog materijala. Za odvijanje mehaničkih, bioloških i kemijskih procesa pročišćavanja potreban je dovoljno dug kontakt otpadne vode i filtarskog materijala. Stoga strujanje kroz filtarski materijal treba biti jednoliko i mora biti osigurano dovoljno vrijeme zadržavanja otpadnih voda [1].

Da bi se osiguralo jednoliko strujanje kroz filtarski materijal, on mora biti dovoljno propustan. U suprotnom će doći do nadzemnog tečenja. Uporabom grubljeg materijala postiže se visoka propusnost, ali je vrijeme zadržavanja otpadne vode kao i ukupna površina zrna manja. Površina zrna značajno utječe na razvoj mikroorganizama u filtru. Stoga je prilikom izbora pogodnog filtarskog materijala potrebno pomiriti suprotstavljene zahtjeve.

Uz kemijsku postojanost filtarskog materijala potrebno je voditi računa i o stabilnosti granulometrijskog sastava. Valja naime spriječiti premještanja finijih čestica u donje područje filtarskog materijala, što bi moglo uzrokovati pogoršavanje propusnosti. Okvirnu je procjenu propusnosti filtarskog materijala moguće obaviti na temelju granulometrijske krivulje. Međutim, za točniju bi ocjenu, po mogućnosti, trebalo provesti laboratorijsko ispitivanje propusnosti.

Osim svojstava filtarskog materijala, za hidrauličku je propusnost biljnog uređaja vrlo važna i njegova pravilna ugradnja. Također pri ugradnji supstrata treba izbjegavati zbijanje. U biljnim se uređajima za filtarski materijal odnosno supstrat uglavnom koriste šljunak i pijesak. U prošlosti su se upotrebljavali i vezani filtarski materijali, no danas se njihova uporaba ne preporučuje zbog velike opasnosti od začepjenja [4].

Šljunak posjeduje visoku hidrauličku propusnost, ali relativno malu reakcijsku površinu, pa time mali potencijal pročišćavanja. Uobičajene granulacije jesu primjerice 4/8 ili 8/16 mm. Stoga se upotrebljava tamo gdje se zahtijeva visoka hidraulička propusnost ($k_f > 10^{-3}$ m/s). U takvim je slučajevima potrebno konstrukcijskim mjerama osigurati dovoljno vrijeme zadržavanja otpadnih voda [1].

Za vertikalne i horizontalne filtre pretežito se koriste pijesci propusnosti $k_f = 10^{-3}$ do 10^{-4} m/s. Uobičajene su granulacije 0/2 i 0/4. Kako bi se smanjio sadržaj finih čestica preporučuje se uporaba ispranog pijeska [4]. Također se sugerira uporaba pijeska s pretežitim udjelom okruglih zrna. Pijesak je, zbog dovoljne hidrauličke propusnosti i visokog potencijala pročišćavanja, pogodan iza pročišćavanje otpadnih voda i za obradu mješovitih i oborinskih voda.

6.4. Dovod otpadne vode

Konstrukcija dovoda otpadne vode treba osigurati jednoliku distribuciju otpadne vode po volumenu biljnog uređaja kako bi filtarski materijal bio u cijelosti iskorišten.

6.4.1. Vertikalni filter

U vertikalnim filtrima otpadna se voda preko distribucijskoga cijevnog sustava raspodjeljuje po cjelokupnoj površini gredice. Distribucija se na te filtre obavezno provodi u intervalima (šaržama), odnosno isprekidano. Tada, između pojedinih intervala distribucije, u vertikalni filter može ulaziti i zrak. Količina otpadne vode koja se distribuira u jednom intervalu mora biti dovoljno velika kako bi se postigla jednolika raspodjela po cjelokupnoj površini gredice. Kod premalih količina, odnosno prečestim intervalima distribucije, može se dogoditi da otpadna voda ponire izravno ispod otvora na distribucijskim cijevima. Kako bi pogon sa šaržnom distribucijom dugoročno bio što učinkovitiji, najčešće se za dovod otpadne vode do vertikalnog filtra ugrađuju i koriste crpke. Drugim riječima, dotok otpadne vode do vertikalnog filtra najčešće je pod tlakom, čime se dodatno osigurava ravnomjernija raspodjela otpadne vode po površini filtra, kao posljedica ujednačenije raspodjele tlaka duž čitave mreže distribucijskih cjevovoda.

Pri odabiru promjera cjevovoda distribucijskog sustava treba voditi računa o volumenu cijevnog sustava i gubicima uslijed trenja. Također je potrebno osigurati dovoljan broj otvora za istjecanje, jednoliko raspodijeljenih po površini. Preporučuje se minimalni promjer otvora od 8 mm. Za distribucijski cijevni sustav pretežito se koriste plastične cijevi, rjeđe metalne. U izboru je materijala potrebno voditi računa o postojanosti prema ultraljubičastim zrakama i temperaturnim deformacijama. Radi zaštite od smrzavanja, distribucijski sustav treba oblikovati tako da po prestanku distribucije dolazi do samostalnog istjecanja otpadne vode. Svi vodovi u kojima može doći do zadržavanja otpadne vode moraju biti položeni ispod dubine smrzavanja.

6.4.2. Horizontalni filter

Kod horizontalnih filtara otpadna se voda bočno uvodi u glavni filtarski sloj (preko uljevnog dijela uz pomoć drenažne cijevi). Za razliku od vertikalnih filtara, distribucija otpadne vode se najčešće provodi kontinuirano, a tečenje je sa slobodnim vodnim licem. Veličina bočnog infiltracijskoga poprečnog presjeka ovisi o količini otpadne vode, propusnosti filtarskog materijala i hidrauličkog gradijenta u filtarskom tijelu.

Distribucija se ostvaruje preko uljevnog dijela od šljunka ili drobljenca. Prema glavnom filtarskom sloju obično se ugrađuje prijelazni sloj s postupno manjom granulacijom, da bi se izbjegla opasnost od začepjenja infiltracijske površine glavnoga filtarskog sloja.

6.5. Odvod otpadne vode

Konstrukcija odvoda otpadne vode služi za odvodnju, odnosno skupljanje pročišćene otpadne vode i njezino odvođenje izvan biljnog uređaja. U tu se svrhu izgrađuje odgovarajući drenažni sustav. Odvodnja vertikalnih filtara provodi se po dnu gredice izgradnjom drenažnog sloja od šljunka ili drobljenca u koji se polaže razgranati sustav drenažnih cijevi. U svrhu prozračivanja drenažnog sloja i omogućavanja ispiranja, krajevi drenažnih cijevi se vode iznad filtarske površine (taj se dio izvodi od punih cijevi). Kod horizontalnih se filtara izrađuje izljevni dio iz šljunka ili drobljenca, po čijem se dnu polaže drenažna cijev. Izljevni se dio treba protezati po cjelokupnoj širini gredice. Odvod iz gredice postavlja se na najdubljem mjestu kako bi se osiguralo potpuno pražnjenje. Također se radi ispiranja drenažne cijevi postavljaju iznad filtarske površine. Dno horizontalnog filtra se najčešće izvodi s padom u smjeru tečenja. Preporučuje se pad 0,5 do 2 %.

Kao i kod ulaznog dijela, prema izljevnom (drenažnom) sloju se izvodi prijelazni sloj s postupnim povećanjem granulacije od glavnoga filtarskog sloja. U pravilu se pri normalnom radu biljni uređaji ne stavljaju pod uspor kako bi se osiguralo slobodno istjecanje i potpuna odvodnja gredice. Ako je potrebno, uspor se može ostvariti pomoću vertikalne cijevi ili fleksibilnog crijeva, čiji se kraj može fiksirati na željenoj visini u izljevnom oknu. Potreba za usporom uglavnom se može javiti iz sljedećih razloga:

- radi borbe protiv korova i ubrzavanja rasta trske (najčešće kod vertikalnih filtara)
- radi postizanja duljeg vremena zadržavanja otpadne vode u gredici (kod horizontalnih filtara sa šljunčanim filtarskim materijalom)
- radi poboljšanja rasta odnosno opskrbe vodom trske (nakon njezine sadnje).

Nakon prestanka potrebe za usporom, treba paziti da se ispuštanje vode provodi polako kako bi se izbjeglo zbijanje filtarskog materijala [1].

6.6. Brtvljenje biljnih uređaja

Biljne uređaje potrebno je brtviti na dnu i bočnim stranama kako bi se:

- osiguralo kontrolirano protjecanje otpadne vode kroz filter
- spriječilo nekontrolirano procjeđivanje otpadne vode u podzemlje
- po potrebi osigurao kontrolirani uspor.

Brtvljenje može biti prirodno ili umjetno [1]. Ako je temeljno tlo od gline dovoljne debljine (50 do 60 cm) i nepropusnosti $k_f < 10^{-7}$ m/s, tada nije potrebno dodatno brtvljenje. Ako temeljno tlo nije odgovarajućih karakteristika, moguće je koristiti sljedeće postupke brtvljenja:

- mineralnim tvarima (glina, bentonit)
- plastičnim folijama
- betonom.

U pravilu se brtvljenje proteže i na sigurnosni prostor iznad gornje površine gredice kako bi se, prema potrebi, omogućilo plansko potapanje (da se spriječi rast korova pri puštanju uređaja u pogon). Ako se brtvljenje provodi plastičnim folijama, tada u području sigurnosnog prostora foliju treba zaštititi prikladnim pokrovom. Pretežito se koristi brtvljenje plastičnim folijama. Najčešće se koriste folije od polietilena, ali se mogu koristiti i folije od PVC-a i sintetičkog kaučuka.

Folija od polietilena treba biti otporna na UV zrake i prodiranje korijenja. Nastavljanje pojedinih folija provodi se zavarivanjem. Za biljne uređaje najčešće se upotrebljavaju folije debljine ≥ 1 mm (preporuka 2,0 mm). Međutim, s debljinom folije ne valja pretjerivati jer su deblje folije teže i manje fleksibilne, pa je i njihova ugradnja kompliciranija. U svakom slučaju, polaganje folija treba biti takvo da u njima ne nastaju dodatna naprezanja. Također je potrebno voditi računa o tome da je pri nižim temperaturama obrada i polaganje folija kompliciranija.

Podrazumijeva se da prodori za dovodne i odvodne cijevi kroz folije trebaju biti izvedeni vodonepropusno. Upravo su prodori cijevi često kritična točka u brtvljenju i stoga moraju biti izvedeni posebno pažljivo. Folije je potrebno zaštititi od oštećenja (npr. od oštih rubova kamena). Zaštita se može provesti izravnavajućim pješćanim slojem ili geotekstilom. Najčešća je zaštita geotekstilom, koja pojednostavljuje i polaganje folije, a može biti i zaštita od glodavaca. Po potrebi se za zaštitu od glodavaca može upotrijebiti i pletivo od žice. Preporuča se koristiti geotekstil i na unutrašnjoj strani, posebno ako se za drenažni sloj upotrebljava oštrobridni materijal [1].

Brtvljenje vodonepropusnim betonom koristi se rijetko jer je taj način obično najskuplji. Koristi se uglavnom kod neravnoga stjenovitoga temeljnog tla, kod kojeg bi inače bili potrebni deblji zaštitni i izravnavajući slojevi. U posebnim slučajevima, poput ograničenog slobodnog prostora za izgradnju pri čemu nema mjesta za smještaj pokosa nasipa zemljanih spremnika, kao alternativa se nudi izvedba plitkih armirano-betonskih spremnika od vodonepropusnog betona.

6.7. Biljke

Iako biljke u pročišćavanju otpadnih voda imaju tek podređenu ulogu (jer biološko pročišćavanje pretežno provode mikroorganizmi), ipak su one bitan sastavni dio biljnog uređaja. Njihov je najvažniji zadatak održavanje propusnosti filtarskog tijela, jer rastom korijenja i rizoma, kao i gibanja stabljika biljaka pod utjecajem vjetra sprječavaju začepljenje filtra. Osim toga, područje oko korijenja biljki povoljan je za rast i razvoj mikroorganizama.

U biljnim se uređajima mogu koristiti različite biljke, ali se ipak preporučuje odabir autohtone močvarne vegetacije [4]. Najčešće se upotrebljava trska te potom rogoz, oblič i dr. Posebno je pogodna trska koja je jedina močvarna biljka čije korijenje prodire dublje od 50 cm, a neosjetljiva je na promjenljive razine vode i opterećenja hranjivim tvarima. Trska tvori rizome koji se uglavnom šire horizontalno, ali je pri rastu moguće i potrebno stvoriti takve uvjete da se korijenje širi vertikalno u dubinu.

Nadzemni dio biljke može narasti do visine između 1 i 4 m. U za nju dobrim uvjetima (osunčana staništa i dobra opskrba vodom), trska dugoročno potiskuje druge biljke. Stoga mješovita sadnja s drugim vrstama biljaka u većini slučajeva nema smisla [1].

Trska ne zahtijeva redovitu košnju, jer mladice mogu izrasti kroz stelju. Međutim, ako je trska pregusta (kada otežava održavanje i kontrolu distribucijskog sustava), može se u razmaku od nekoliko godina obaviti košnja. Treba protežirati košnju u proljeće, prije izbijanja mladica. Alternativno se može kositi i u jesen kada bi stelju trebalo ostavljati na gredici kao zaštitu od smrzavanja tijekom zime.

Nakon sadnje potrebno je biljkama osigurati dovoljnu opskrbu vodom. Ako je pogon biljnog uređaja sezonski, opskrba je vodom moguća i recirkulacijom već pročišćene vode. Gusto izrasla trska može prebroditi sušna razdoblja u trajanju do šest tjedana.

Na biljnim gredicama dolazi do evapotranspiracije dijela otpadne vode. Zbog toga se ljeti mogu pojavljivati povećane koncentracije onečišćujućih tvari u pročišćenoj otpadnoj vodi, odnosno može doći do prividnog smanjivanja učinka pročišćavanja. U određenim okolnostima ispušt pročišćene vode može presušiti u cijelosti.

Ako je biljna gredica slabo opskrbljena vodom, može doći do povećanog rasta korova, posebno koprive kojoj pogoduje povećana količina hranjivih tvari. Osnova borbe protiv korova je stoga u dobroj opskrbi vodom (po potrebi i držanjem biljne gredice pod usporom u određenom trajanju). Korov je moguće uklanjati i plijevljenjem, ali pri kretanju po gredici postoji opasnost od oštećenja močvarnih biljki i zbivanja filterarskog materijala.

7. Osnovne konfiguracije biljnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda

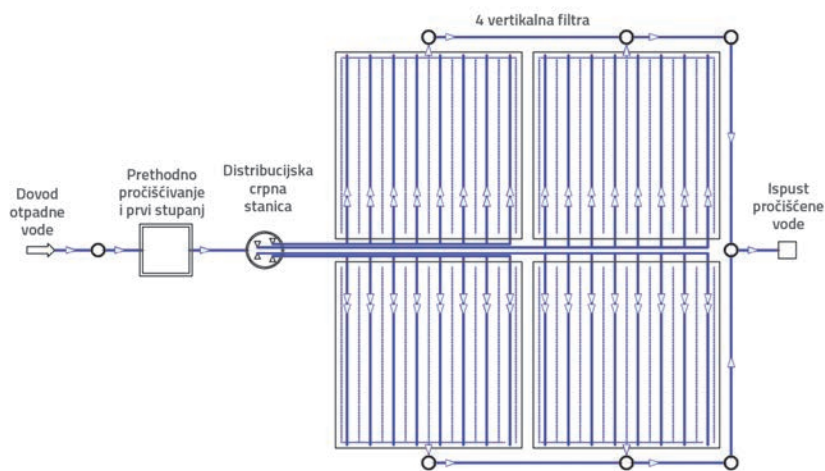
Prije je navedeno da se biljni uređaji uglavnom koriste u funkciji drugog stupnja pročišćavanja i da se u većini slučajeva, prije nego dospijevaju na gredice (tijela biljnog uređaja), otpadne vode podvrgavaju prethodnoj i/ili primarnoj obradi. Pojednostavljeno se može reći da se pri prethodnoj obradi provodi predtretman i prvi stupanj pročišćavanja, dok se u biljnim gredicama provodi "biološko" pročišćavanje otpadnih voda. Iz navedenog slijede i osnovne konfiguracije biljnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, kod kojih nakon građevina prethodnog pročišćavanja slijede biljne gredice i ispuštanje pročišćenih otpadnih voda u prijamnik. Za biološko pročišćavanje mogu se samostalno koristiti biljni uređaji s horizontalnim potpovršinskim tokom (horizontalni filtri) ili biljni

uređaji s vertikalnim potpovršinskim tokom (vertikalni filtri) ili pak njihova kombinacija (hibridni biljni uređaji). Vrlo je česta kombinacija vertikalnog filtra nakon kojeg slijedi horizontalni, a koja je posebno pogodna kada se postavljaju dodatni zahtjevi za kakvoću pročišćene vode (uklanjanje dušika). Osnovne konfiguracije prikazane su na slici 5. za horizontalni filter i na slici 6. za vertikalni filter.

Osim tih osnovnih konfiguracija, treba upozoriti i na jednu posebnu koja je razvijena i korištena od devedesetih godina prošlog stoljeća u Francuskoj i za koju se stoga rabi naziv "francuski sistem" [10]. U "francuskom sistemu" (Slika 7.) sirova se otpadna voda nakon prolaska kroz rešetku (ili čak bez prolaska kroz nju) distribuira na prvostupanj polja koja su oblikovana kao vertikalni filtri s ispunom od šljunka. Distribucija se obavlja distribucijskim cjevovodima promjera > 100 mm. Za razliku od klasičnih vertikalnih filtera, te distribucijske cijevi nemaju uzdužne rupe, već otpadna voda na polja izlazi na krajevima cjevovoda. Nakon prethodne obrade na prvostupanj poljima, otpadna se voda distribuira na drugostupanj polja također vertikalni filtri, ali sa supstratom od grubog pijeska. Preporučuje se prvi stupanj, dakle obradu sirove otpadne vode treba podijeliti na tri polja, na koja se otpadne vode distribuira u jedno polje u trajanju od tri do četiri dana, nakon čega miruje šest do osam dana, tijekom kojih se koriste ostala polja. Svrha je takvog rada kontrola rasta biomase i održavanje aerobnih

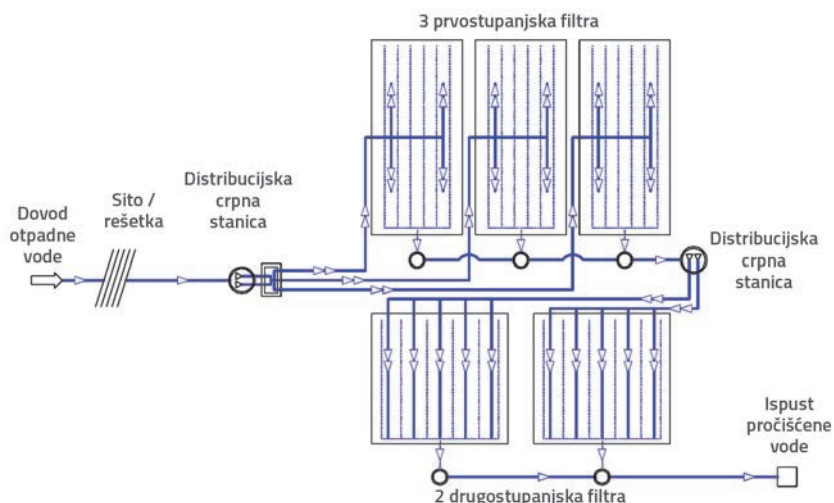


Slika 5. Konfiguracija biljnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda s horizontalnim filterima



Slika 6. Konfiguracija biljnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda s vertikalnim filterima

uvjeta u poljima. Drugi se stupanj obično dijeli na dva polja, a pogon je kao kod klasičnih vertikalnih filtara. Polja odnosno filtri zasađeni su trskom. Mulj se akumulira i mineralizira na površini prvostupanjskih polja (sloj mulja od gotovo 1,5 cm u godini). Mulj se uklanja svakih 10 do 15 godina, odnosno kada se akumulira sloj visine do 20 cm. Načelno se mulj može koristiti u poljoprivredi.



Slika 7. Konfiguracija biljnog uređaja prema "francuskom sistemu"

Učink pročišćavanja za KPK je približno 90 %, a za suspendiranu tvar 96 % i ukupni dušik 85 %.

Smatra se da "francuski sistem" ima velik potencijal za komunalne uređaje za pročišćavanje (pretežito kućanskih) otpadnih voda [5]. Jednostavan je i zahtijeva relativno malu površinu (približno 2,0 m²/ES). Takve uređaje potrebno je obavezno ograditi kako bi se ljudima spriječio nekontrolirani pristup. Iz tog je razloga taj sustav neprikladan za uređaje na razini pojedinih kućanstava. Naime postoji mogućnost da će doći u kontakt s otpadnim vodama u blizini kuća i vrtova te prouzročiti higijenske probleme. Osim toga, radi distribucije otpadnih voda, često je potrebno izgraditi dvije crpne stanice.

8. Pogon i održavanje biljnih uređaja

8.1. Redoviti pogon i održavanje

Za svaki biljni uređaj treba pripremiti odgovarajuće upute za rad koje sadrže detaljni i općerazumljivi prikaz potrebnih kontrola i održavanja kao i njihove učestalosti. Također moraju biti sadržane upute za mjere u mogućim izvanrednim okolnostima. Rad uređaja treba biti pod uvjetima za koje je uređaj projektiran, posebno u pogledu količina otpadnih voda i koncentracija onečišćenja. U suprotnom može dugoročno doći do poteškoća u radu [1].

Osim rutinske kontrole učinka pročišćavanja, u okviru kontrola koje provodi operater, općenito su dovoljne vizualne kontrole i

kontrole mirisa. Sve dok je pročišćena voda na odvodu iz biljnih gredica bistra i bez mirisa može se pretpostaviti uredan učinak pročišćavanja. Moguća blaga obojenost pročišćene vode može se zanemariti.

Same biljne gredice zahtijevaju vrlo malo održavanja. Održavanje tehničke opreme uglavnom je vezano za čišćenje crpki i distribucijskih vodova. Košnja trske obično je potrebna tek svakih nekoliko godina. Osim toga, nužni su radovi na održavanju građevina i uređaja prethodnog i prvog stupnja pročišćavanja, posebno onih za pražnjenje i odvoz mulja. Potrebno je, kao i kod svih drugih uređaja za pročišćavanje, održavati okoliš (npr. košnja trave i dr.).

U svrhu dokumentiranja pogona potrebno je voditi odgovarajući dnevnik, u koji se unose svi provedeni radovi i opažene posebne pojave, ali i rezultati analiza.

8.2. Zimski pogon

Načelno se kod svih uređaja za biološko pročišćavanje otpadnih voda biološki procesi pri nižim temperaturama odvijaju sporije. Tako i kod biljnih uređaja zimi učinak pročišćavanja može lagano opadati. No, bitno je da se ne pojavljuju smetnje u pogonu uslijed smrzavanja pojedinih dijelova uređaja. Što se tiče organske razgradnje, učinak pročišćavanja i pri nižim temperaturama ostaje stabilan. Nitrifikacija je ovisnija o temperaturi i smanjuje se u zimskom razdoblju.

Pri nižim temperaturama može zbog smrzavanja pojedinih dijelova uređaja doći do smetnji u radu. Opasnost od smrzavanja ovisna je o temperaturi otpadne vode, koja opet ovisi o veličini kanalizacijske mreže, vrsti kanalizacijskog sustava, duljini tečenja i dr. Ovisno o vrsti i veličini prethodnog i prvog stupnja pročišćavanja, dolazi do daljnjeg smanjivanja temperature (otvorena taložna laguna brže se hladi od zatvorenog septičkog tanka). Na temperaturu otpadne vode i pogon zimi bitan utjecaj imaju lokacija uređaja za pročišćavanje otpadnih voda, tj. nadmorska visina, utjecaj hladnog zraka ili eksponirani položaj u odnosu na vjetar.

Potrebno je voditi računa da su cjevovodi na lokaciji uređaja za pročišćavanje položeni ispod dubine smrzavanja ili da na područjima ugroženima od mraza ne dolazi do zadržavanja odnosno stajanja vode. Sustavi za distribuciju otpadnih voda, a po potrebi i dovodni cjevovodi, moraju biti tako izvedeni da nakon intervala distribucije otpadne vode dolazi do njihova samostalnog pražnjenja.

U biljnim gredicama uglavnom ne dolazi do smrzavanja jer se otpadnom vodom dovodi dovoljno topline. Zaštiti od smrzavanja pridonose mogući snježni pokrivi, ali i biljke odnosno stelja. Kod

vertikalnih filtara se na površini mjestimično može pojavljivati led, no otpadna se voda najčešće i dalje može procjeđivati (jer se na izlaznim točkama otpadne vode iz sustava distribucije uslijed topline led topi). Uz dovoljan sigurnosni prostor od približno 30 cm, ni pri smanjenom procjeđivanju nema opasnosti od izlivanja otpadne vode iz spremnika.

8.3. Razvoj neugodnih mirisa

Pri pročišćavanju otpadnih voda neugodni mirisi se ponajprije javljaju uslijed anaerobnih procesa truljenja. Na moguće emisije neugodnih mirisa utječe izbor postupka prethodnog i prvog stupnja pročišćavanja: kod pokrivenih i zatvorenih septičkih jama emisije neugodnih mirisa su manje nego kod otvorenih prethodnih taložnica.

Kod biljnih gredica u redovitom pogonu uglavnom ne postoje otvorene vodene površine, pa se najčešće ne pojavljuju nikakve emisije mirisa. U slučaju poremećaja pogona, onda kada se na površini gredica pojavljuju lokve s otpadnom vodom, može doći do razvoja neugodnih mirisa.

Kod vertikalnih filtara tijekom distribucije otpadnih voda može kratkotrajno doći do emisija neugodnih mirisa. Po potrebi se mogu smanjiti pokrivanjem distribucijskog sustava šljunkom, što međutim otežava održavanje i kontrolu. Neugodni mirisi minimiziraju se što je moguće bržim procjeđivanjem otpadne vode u filtarsko tijelo.

Koliko neugodni mirisi zaista predstavljaju neku smetnju, ovisi o subjektivnom osjećaju pojedinaca. Ako nema objektivne smetnje, emisije neugodnih mirisa su potpuno irelevantne. Određene protumjere su stoga svrhovite samo u blizini stambenih zgrada. Naprotiv, kod izdvojenih lokacija uređaja takve mjere mogu biti nepovoljne jer najčešće uzrokuju veće troškove, a dijelom i otežavaju održavanje.

8.4. Upotrebljivost

U vezi s rokom uporabe cjelokupnog uređaja za pročišćavanje treba razlikovati vrijeme uporabljivosti samih biljnih uređaja (biljnih gredica) i pripadnih tehničkih uređaja. Kod tehničkih uređaja, kao što su crpke, okna i cjevovodi, može se računati s uobičajenim razdobljima uporabljivosti, primjerice 25 do 40 godina za okna i 8 do 12 godina za crpke [1]. Uporabom dugovječnih materijala u svim područjima, na primjer za crpke, brtvene elemente filtara i drugo, može se povećati uporabljivost cjelokupnog uređaja.

Iskustva pokazuju da pravilno koncipirani i uredno vođeni uređaji tijekom duljega razdoblja rade bez ikakvog smanjenja učinka pročišćavanja. Dosadašnja svjetska iskustva pokazuju da je uporabljivost biljnih uređaja istovjetna drugim postupcima pročišćavanja (npr. minimalno 25 godina). Osnovni kriteriji za određivanje trajanja uporabljivosti biljnih uređaja jesu učinak pročišćavanja, propusnost filtarskog materijala i akumulacija tvari u filtarskom tijelu.

Učinak pročišćavanja u pogledu većine parametara ne opada u dugoročnom pogonu. Za razgradnju organskih tvari i uklanjanje dušika u pravilu se može utvrditi porast učinkovitosti. No, u pogledu vezivanja fosfata za filtarsko tijelo treba dugoročno računati s njegovim opadanjem. U većini se slučajeva za uobičajene kapacitete biljnih uređaja niti ne traži uklanjanje fosfata.

Funkcionalnost biljnog uređaja može biti ugrožena zbog začepijavanja (kolmatacije) filtarskog tijela. Kolmatacija se zapravo može ukloniti jednostavnim mjerama, tako da ne mora predstavljati ograničavanje korisnog razdoblja uporabe.

Mjere za izbjegavanje ili uklanjanje kolmatacije jesu poboljšanje prethodnog čišćenja, izbjegavanje visokih organskih opterećenja i optimizacija procesa razgradnje. Procesi razgradnje mogu se optimirati poboljšanjem opskrbe kisikom, na primjer odgovarajućim načinom pogona biljnih uređaja (u više linija) i korištenjem pauza u pogonu (isprekidano dotjecanje).

Ako se pojavila kolmatacija koju nije moguće ukloniti s pomoću duljih pauza u pogonu, tada se propusnost može uspostaviti uklanjanjem i izmjenom začepijenog sloja ili njegovim rahljenjem. U svakom slučaju, mora se ukloniti osnovni uzrok kolmatacije.

Kod vertikalnih se filtara sloj zahvaćen kolmatacijom najčešće nalazi na površini pa ga je moguće vrlo lako izmijeniti ili oljuštiti. U tu svrhu je dovoljna izmjena od maksimalno 10 - 15 cm, a izmjena cjelokupnoga filtarskog materijala nije potrebna.

Kod horizontalnih filtara se kolmatacija može pojavljivati na prijelazu iz ulaznog dijela u glavni filtarski sloj. Tendencija kolmataciji može se spriječiti postupnim prijelazom granulacije filtarskog materijala, a postojeća se može ukloniti rahljenjem tog sloja.

Kako je opterećenje otpadnih voda teškim metalima obično nisko, ne treba očekivati značajniju akumulaciju u filtarskom materijalu, pa zbog toga nije potrebna njegova zamjena. Akumulacija fosfata je najčešće vremenski ograničen proces, kod kojeg se filtarski materijal postupno zasićuje fosfatima. Ako zaista treba zadržavati fosfat, potrebno je za to izgraditi zasebne filtre.

9. Primjer izgrađenoga biljnog uređaja

Radi pobliže ilustracije svega izrečenog, slijedi kratak prikaz nedavno izgrađenoga biljnog uređaja za pročišćavanje otpadnih voda Kaštelir. Uređaj je projektiran i izgrađen u razdoblju od 2014. do 2016. godine u okviru Projekta zaštite od onečišćenja voda u priobalnom području 2. Primijenjen je hibridni biljni uređaj prema sustavu *Limnowet*. Nazivni je kapacitet uređaja 1900 ES (slika 8.).

Za prethodno pročišćavanje otpadnih voda i za prvi stupanj upotrebljava se automatska gruba rešetka (s razmakom štapova 2 cm) i Imhoffov taložnik ukupnog volumena 332,5 m³. Sastavni je dio te građevine i okno za smještaj potopljenih crpki za distribuciju prethodno istaložene otpadne vode na polja za filtriranje.



Slika 8. Situacijski prikaz biljnog uređaja Kaštelir

Biolško pročišćavanje provodi se u serijski povezanim biljnim poljima: za filtriranje, za čišćenje i za poliranje. Polja za filtriranje su realizirana u obliku dva paralelna polja, svako unutarnjih tlocrtnih dimenzija 39 × 23 m. Tečenje kroz polje je vertikalno. Polja za čišćenje realizirana su u obliku dva paralelna polja, također svako unutarnjih tlocrtnih dimenzija 39 × 23 m, ali je tečenje kroz polje horizontalno. Na kraju je izgrađeno jedno polje za poliranje, unutarnjih tlocrtnih dimenzija 47 × 27 m, slika 9. Tečenje kroz to polje je horizontalno. Polja su izgrađena kao plitki zemljani bazeni. Obodni nasip je izveden od gline iz iskopa. Brtvljenje je provedeno polietilenskom folijom debljine 1 mm, koja je zaštićena geotekstilom specifične težine 100 g/m² s gornje i donje strane. Polja su zasađena trskom. Također je izgrađeno jedno polje za ozemljavanje mulja (od planirana tri), na koje se povremeno precprpljuje mulj iz Imhoffovog taložnika. Polje je tlocrtnih dimenzija 12 × 20 m, dubine 2,1 m, od čega je visina od 1,5 m namijenjena višegodišnjem taloženju mulja. Zbog prostornih razloga, polja za ozemljavanje mulja projektirana su kao plitki armiranobetonski spremnici. Kako na širem području oko lokacije uređaja nema prikladnijeg prijamnika od podzemlja, izgrađeno je polje za poniranje

(drenažno polje) tlocrtnih dimenzija 29 × 24 m. Radi možebitne uporabe pročišćenih voda, izgrađen je podzemni armiranobetonski spremnik volumena 285 m³. Na lokaciji je izgrađena i manja upravna zgrada – prizemnica, tlocrtnih dimenzija 8 × 4 m, koja se sastoji od ureda, spremišta, prostorije za smještaj elektroarmara, garderobe i WC-a.



Slika 9. Biljni uređaj Kaštelir – pogled na polje za poliranje

Tijekom pokusnog rada biljnog uređaja Kaštelir (od 2. studenog 2015. do 31. svibnja 2016.) na mjeracima dozirnih crpki u Imhoffovom taložniku izmjerena je količina otpadne vode od 12.338 m³, odnosno prosječno 58,2 m³/d. Prosječno dnevno hidrauličko opterećenje bilo je manje od nominalnog (285 m³) jer je izgradnja kanalizacijske mreže i priključivanje korisnika i dalje u tijeku. Primijećeno je bitno povećanje hidrauličkog opterećenja tijekom kišnih događaja. Tako je maksimalno dnevno hidrauličko opterećenje zabilježeno 3. ožujka 2016. i iznosilo je 632 m³/d. To upućuje na značajno generiranje tuđih voda tijekom kišnih događaja, vjerojatno kao posljedica ilegalnih priključaka oborinskih voda, što se može tolerirati isključivo u uvjetima privremene prekapacitiranosti uređaja (kao posljedica nedovoljnog priključenja krajnjih korisnika). S povećanjem hidrauličkog opterećenja na uređaj bit će prijedno kontrolirati ilegalne priključke oborinskih voda, jer će u suprotnom uređaj raditi u uvjetima potkapacitiranosti i s brojnim problemima, između ostalog i s vjerojatno nedostatnom učinkovitošću pročišćavanja.

Tijekom pokusnog rada uzimano je 12 uzoraka otpadne vode i 12 uzoraka pročišćene vode. Ispitivanje uzoraka obavio je ovlaštenu laboratorij. Ispitivanjem su bili obuhvaćeni: suspendirana tvar, biokemijska potrošnja kisika (BPK₅) i kemijska potrošnja kisika (KPK_{Cr}). U tablici 3. su sažeti podaci o rezultatima ispitivanja. Svi pokazatelji kakvoće pročišćenih voda zadovoljavali su relevantne zakonske odredbe i propise.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja uzoraka otpadne vode

Pokazatelj [mg/l]	Sirova otpadna voda			Pročišćena otpadna voda		
	min.	maks.	sred.	min.	maks.	sred.
Suspendirana tvar	120	1070	542	2	10	7
KPK _{Cr}	129	1920	821	6	35	17
BPK ₅	49	1606	356	3	14	6

10. Zaključak

Biljni se uređaji danas upotrebljavaju u mnogim dijelovima svijeta. Štoviše, uobičajeni su u mnogim europskim razvijenim zemljama poput Njemačke, Austrije, Francuske, Italije i dr. Kao takvi, biljni uređaji su korišteni i u različitim klimatskim uvjetima. U pogledu klimatskih uvjeta, praktički nema nikakvih prepreka za primjenu biljnih uređaja u Hrvatskoj. Biljni uređaji se mogu koristiti u pročišćavanju različitih vrsta otpadnih voda. No, najčešća primjena je u pročišćavanju komunalnih otpadnih voda manjih naselja, odnosno manjih kapaciteta uređaja (do 2000 ES) i pročišćavanju otpadnih voda pojedinih kućanstava.

U Republici Hrvatskoj se Pravilnikom o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda (NN 80/13, 43/14, 27/15 i 3/16), između ostalog, propisuju granične vrijednosti emisija u svim pročišćenim ili nepročišćenim otpadnim vodama koje se ispuštaju u vode. Navedenim pravilnikom su u pravni poredak Republike Hrvatske prenesene i sve relevantne direktive Europske unije.

Pravilno projektirani, izgrađeni i održavani, biljni uređaji mogu udovoljavati uvjetima koji se postavljaju na granične vrijednosti emisija komunalnih otpadnih voda pročišćenih na uređaju drugog stupnja pročišćavanja (BPK5 ≤ 25 mg O₂/L; KPK ≤ 125 mg O₂/L; suspendirana tvar ≤ 35 mg/L). To znači da se biljni uređaji zapravo mogu koristiti za ispuštanje pročišćenih otpadnih voda u vode u osjetljivom području iz aglomeracija s opterećenjem manjim od 10.000 ES.

Uz odgovarajuće prilagodbe, biljni bi uređaji mogli udovoljavati i uvjetima koji se postavljaju za treći stupanj pročišćavanja. Primjerice, ako se zahtijeva uklanjanje dušika, može se primijeniti kombinacija vertikalnog filtra iza kojeg slijedi horizontalni filter, uz recirkulaciju otpadne vode. Pouzdano uklanjanje fosfora može se osigurati upotrebom zasebnoga adsorpcijskog filtra (nakon biljnih gredica), a moguća je i zamjena supstrata nakon iscrpljenja adsorpcijskog kapaciteta [5] ili zasebnim kemijskim obaranjem.

Biljni uređaji, u odnosu na druge postupke biološkog pročišćavanja (npr. aktivni mulj, prokaptinci, rotirajući okretni nosači i dr.) za svoj smještaj zahtijevaju bitno veću površinu. To može biti i ograničenje za njihovu primjenu, posebno u urbanom okruženju. Međutim, procjenjuje se da za uobičajene primjene biljnih uređaja (dakle za manja naselja udaljena od urbanih središta) pitanje potrebne površine ne bi trebalo biti presudno, tj. da je moguće osigurati potreban prostor za izgradnju. U takvim okolnostima mogu do izražaja doći druge komparativne prednosti biljnih uređaja, kao što su robustnost u pogonu, niski troškovi pogona, kao i manje količine mulja o čijem daljnjem odlaganju treba ipak voditi računa.

Cijena izgradnje biljnih uređaja u Hrvatskoj varira značajno, na primjer od 1800 HRK/ES do 12.700 HRK/ES [12]. Na cijenu izgradnje utječe niz čimbenika, poglavito geotehnički i topografski uvjeti, te potreba za dodatnim građevinama (armiranobetonski spremnici, pogonske zgrade i dr.) i elektrostrojarskom opremom (gruba rešetka, fina rešetka i dr.).

Iako se u Hrvatskoj o biljnim uređajima već dugo govori, a prvi je izgrađen prije petnaestak godina, njihova je primjena bila relativno slaba. To je na neki način bilo i razumljivo ako se uzme u obzir općenito slaba izgrađenost komunalnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda (s pripadajućim sustavima odvodnje). U takvim okolnostima, posebno u kontekstu članstva Europskoj uniji, prioritetno su planirani i izgrađivani uređaji kapaciteta veći od onih koji su uobičajeni za biljne uređaje. Daljnji su razlozi bili nepostojanje iskustva u projektiranju, gradnji i pogonu biljnih uređaja, ali i nepostojanje stručne literature na hrvatskom jeziku. Osim toga, može se pretpostaviti da biljni uređaji ni komercijalno nisu bili osobito zanimljivi jer se uz njih može plasirati relativno malo opreme, a tipizacija je praktički moguća samo za vrlo male nazivne kapacitete (na razini kućanstva).

No situacija se postupno mijenja. Na red dolaze i aglomeracije manje od 2000 ES, čime se potencijal za primjenu biljnih uređaja bitno povećava. Povećan je (i povećava se) broj izgrađenih uređaja kao i uređaja koji se nalaze u gradnji, a na taj se način prikuplja i iskustvo.

Prednosti biljnih uređaja, kao i opravdanost i racionalnost njihove izgradnje, sve se više promiče i prepoznaje u Hrvatskoj praksi. Razlog tome je i sve veći broj publiciranih radova. Ističe se *Priručnik za učinkovitu primjenu biljnih uređaja za pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda* [4]. Priručnik u sažetom obliku opisuje "dobru praksu" planiranja, projektiranja, izgradnje i održavanja biljnih uređaja za pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda. Upravo je i najveći broj biljnih uređaja u Hrvatskoj izgrađen nakon objavljivanja toga priručnika.

Stoga se može očekivati da će u sljedećim godinama primjena biljnih uređaja u Hrvatskoj još više rasti. U okviru komunalnih uređaja za pročišćavanje otpadnih voda njihova primjena će biti orijentirana ponajprije na manje kapacitete (do otprilike 2000 ES). U takvim uvjetima biljne uređaje karakterizira jednostavan rad, visoka učinkovitost pročišćavanja – u skladu sa zakonskim i podzakonskim propisima – i relativno niski troškovi izgradnje, pogona i održavanja.

Napomena: Fotografije i crteže u radu izradio je Emir Mešić, dipl. ing. građ., Hidroprojekt-ing d.o.o., Zagreb

LITERATURA

- [1] Geller, G., Höner, G.: *Anwenderhandbuch Pflanzenkläranlagen; Praktisches Qualitätsmanagement bei Planung, Bau und Betrieb*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg GmbH, 2003.
- [2] Tušar, B.: *Pročišćavanje otpadnih voda*, Kigen i Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [3] Nowak, J., Heise, B.: *DWA-Kommentar zum DWA-Regelwerk Naturnahe Abwasserbehandlung in Pflanzenkläranlagen und Teichkläranlagen*, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 2007.
- [4] Malus, D., Vouk, D.: *Priručnik za učinkovitu primjenu biljnih uređaja za pročišćavanje sanitarnih otpadnih voda*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2012.
- [5] Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., von Muench, E.: *Technology review of constructed wetlands; Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), Eschborn, 2011.
- [6] Bally, A., Bittner, K.: *Pflanzenkläranlagen - Die ökologische Alternative zur technischen Kleinkläranlage*, *Ingenieurbiologie/Genie Biologique*, 4 (2009), pp 80-85.
- [7] *In die Binsen; Ökologen propagieren Schilfbeete als alternative Kläranlagen - Patentrezept oder Scharlatanerie?* *Der Spiegel*, 40 (1988)
- [8] UN-HABITAT: *Constructed Wetlands Manual*, UN-Habitat Water for Asian Cities Programme Nepal, Kathmandu, 2008.
- [9] Zaninović, K. i dr.: *Klimatski atlas Hrvatske, 1961 - 1990, 1971 - 2000*, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb, 2008.
- [10] Molle, P., Boutin, C., Merlin, G.: *How to treat raw sewage with constructed wetlands: An overview of the French systems*, *Water Science & Technology*, 51 (2005) 9, pp 11-21.
- [11] Bahlo, K., Wach, G.: *Naturnahe Abwasserreinigung; Planung und Bau von Pflanzenkläranlagen*, Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg/Breisgau, 1992.
- [12] Vouk, D., Anić-Vučinić, A, Stanković, D.: *Primjena biljnih uređaja u Hrvatskoj*, *Hrvatska vodoprivreda*, 218 (2017), pp. 46-50