

**UNIVERZA V LJUBLJANI  
ZDRAVSTVENA FAKULTETA**

# **OKOLJSKE TEHNOLOGIJE IN EKOREMEDIACIJE**



**doc. dr. Tjaša Griessler Bulc**

## **OKOLJSKE TEHNOLOGIJE IN EKOREMEDIACIJE - 1. IZDAJA**

---

© 2013, Univerza v Ljubljani, Zdravstvena fakulteta

Avtor: doc. dr. Tjaša Griessler Bulc

Recenzija: doc. dr. Darko Drev, doc. dr. Nataša Atanasova

Jezikovni pregled: Katjuša Knez, univ.dipl.slov.

Fotografija na naslovnici: *Močvirske rastline v poplavnem zadrževalniku Podutik*

Foto: Tjaša Griessler Bulc

Oblikovanje: doc. dr. Tjaša Griessler Bulc

© Tjaša Griessler Bulc 2013

Delo je avtorsko zaščiteno. Vsaka uporaba zunaj meja avtorskih pravic je brez pisnega soglasja avtorja nedopustna in kazniva.

Izdala: Univerza v Ljubljani, Zdravstvena fakulteta, Zdravstvena pot 5, Ljubljana

Elektronska izdaja

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

502.174(075.8)(0.034.2)

628.357.4(075.8)(0.034.2)

GRIESSLER Bulc, Tjaša

Okoljske tehnologije in ekoremediacije [Elektronski vir] / Tjaša Griessler Bulc. - 1. izd.  
- El. knjiga. - Ljubljana : Zdravstvena fakulteta, 2013

Način dostopa (URL): [http://www2.zf.uni-lj.si/images/stories/datoteke/Zalozba/Okoljske\\_tehnologije\\_in\\_ekoremediacije.pdf](http://www2.zf.uni-lj.si/images/stories/datoteke/Zalozba/Okoljske_tehnologije_in_ekoremediacije.pdf)

ISBN 978-961-6808-47-7 (pdf)

270116864

## Predgovor

Z onesnaževanjem okolja se soočamo in ga rešujemo že mnoga desetletja. Ponekod so bili narejeni veliki koraki, ki so pripomogli k izboljšanju stanja. Drugje onesnaževanje šele zaznavamo in je pot do sanacije še zaskrbljujoče dolga. Podobno se razvijajo tudi okoljske tehnologije. V razvitem svetu so okoljske tehnologije običajno tehnično visoko razvite, kjer ni več težko iz odpadne vode narediti pitno vodo. Pri izbiri teh tehnologij ima pogosto glavno vlogo ekonomski, manj tehnični dejavnik. V manj razvitem ali nerazvitem svetu pa se razvoj okoljskih tehnologij šele začne, zato so le-te običajno enostavne in stroškovno dostopne. Zato pomeni izraz »okoljske tehnologije« skoraj nepregledno množico tehnologij, ki se razvijajo vsak dan ter rešujejo zelo različne okoljske probleme. Iz tega razloga je nemogoče okoljske tehnologije obravnavati z naštevanjem in opisi, temveč je mnogo bolj pomembna razlaga osnovnih principov delovanja, ki je mnogim tehnologijam skupna.

Tehnologije so se razvile na osnovi razumevanja narave in njenih fizikalnih zakonov, zato se zdi smiselno, da učbenik poda enostavne principe delovanja na osnovi naravnih zakonitosti. Tehnologije, ki v osnovi posnemajo naravo, se imenujejo ekoremediacije in so osnova mnogim trajnostnim sanacijam okolja. Lahko se dopolnjujejo tudi z zahtevnimi tehnološkimi sistemi. Ne nazadnje se moramo z vsako tehnologijo približati naravi, saj jo le tako lahko zaščitimo pred kvarnimi učinki, pozdravimo in ji vrnemo njeno ravnovesje.

Učbenik uvodoma podaja pregled pomembnejših dejavnikov in procesov, ki so osnova nekaterim okoljskim tehnologijam in s tem sanacijam v okolju. Učbenik poleg tega na kratko pojasnjuje princip okoljskega inženirstva, kamor sodijo okoljske tehnologije, medtem ko bolj natančno podaja princip ekološkega inženirstva, na katerih temelji ekoremediacija ali zdravljenje okolja. Da bi bili ti principi še bolj razumljivi, učbenik natančno obravnava najbolj značilen primer ekoremediacije, to so rastlinske čistilne naprave, ki so osnova večini ekoremediacij, zato je razumevanje delovanja le-teh nujno pri nadaljnjem razumevanju osnov okoljskih tehnologij.

Področje onesnaženja okolja je zelo široko in ga učbenik ne more zajeti, zato učbenik osvetljuje le eno od področij onesnaženja, to je onesnaženje voda. Na tem področju je bil namreč narejen eden največjih korakov pri ozaveščanju, razvoju in uporabi okoljskih tehnologij. Prav tako učbenik sloni na predpostavki, da so študentje že usvojili osnovna znanja iz inženirstva ter ekologije s poudarkom na biogeokemijskih krogih. V ločenih poglavjih učbenika so razloženi principi hidrologije, hidravlike, kinetike procesov in kroženja snovi, z ustreznimi enačbami ter osnove pri postavljanju ekoremediacij ter vzdrževanju, ki so plod dolgoletnih izkušenj avtorice pri oblikovanju in gradnji številnih rastlinskih čistilnih naprav in ekoremediacij v Sloveniji, na Hrvaškem in v Italiji. Učbenik ima zato tudi praktično vrednost, ki je zlasti pomembna za bodoče sanitarne inženirje. Ker je področje onesnaženja okolja in okoljskih tehnologij izrazito široko, je za boljše razumevanje potrebno vsebine učbenika dopolnjevati tudi z drugimi učbeniki in viri na področju okoljskih tehnologij. Nekaj pomembnih virov lahko študentje najdejo v poglavju uporabljene literature.

Za nastanek učbenika se zahvaljujem vsem, ki so mi kakorkoli pomagali, posebej pa se zahvaljujem doc. dr. Darku Drevu, doc. dr. Nataši Atanasovi, dr. Aleksandri Krivograd Klemenčič, prof. dr. Borisu Komparetu, ter Klari Jarni. Zahvaljujem se tudi vsem študentom, ki so s svojimi pripombami, radovednostjo, odzivom na predavanja, s svojimi seminarji ter znanjem na izpitu vplivali na vsebino učbenika. Bodoče generacije študentov pa prosim za nove predloge, ki lahko izboljšajo predstavljene vsebine.

## KAZALO

<b>1</b>	<b>UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OSNOVNI EKOLOŠKI POJMI.....</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>OKOLJSKI IN EKOLOŠKI INŽENIRING.....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>EKOREMEDIACIJE.....</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1</b>	<b>RAZVOJ METODEDE ČIŠČENJA Z MOČVIRSKIMI RASTLINAMI.....</b>	<b>18</b>
<b>5.2</b>	<b>RAZVOJ RASTLINSKIH ČISTILNIH NAPRAV .....</b>	<b>19</b>
<b>5.3</b>	<b>NOSILCI ČIŠČENJA V RČN .....</b>	<b>20</b>
5.3.1	Medij.....	20
5.3.1.1	Hidravlične lastnosti medija .....	20
5.3.1.2	Fizikalne značilnosti medija v RČN .....	22
5.3.1.3	Kemijske značilnosti medija.....	23
5.3.1.4	Biološki vplivi na medij v RČN .....	25
5.3.2	Mikroorganizmi .....	26
5.3.2.1	Vrste mikroorganizmov in njihove potrebe.....	26
5.3.2.2	Razmnoževanje in rast mikroorganizmov v RČN .....	28
5.3.2.3	Vpliv mikroorganizmov na procese v RČN .....	28
5.3.3	Močvirske rastline .....	29
5.3.3.1	Uporaba in vloga različnih močvirskih rastlinskih vrst.....	29
5.3.3.2	Navadni trst (Phragmites australis – najpogosteje uporabljen helofit v RČN .....	30
<b>5.4</b>	<b>HIDROLOGIJA, HIDRAVLIKA IN KINETIKA PROCESOV V RČN.....</b>	<b>36</b>
5.4.1	Hidrologija .....	36
5.4.1.1	Evapotranspiracija .....	36
5.4.1.2	Padavine.....	37
5.4.1.3	Hidrološke spremenljivke .....	38
5.4.1.4	Mašenje sistema.....	40
5.4.1.5	Masna bilanca .....	41
5.4.1.6	Spreminjanje koncentracije onesnaževal ob prehodu skozi sistem.....	42
5.4.1.7	Vloga biofilma pri zmanjšanju onesnaženja.....	43
<b>5.5</b>	<b>KROŽENJE SNOVI V RČN .....</b>	<b>44</b>
5.5.1	Ogljik.....	44
5.5.2	Neraztopljene snovi.....	44
5.5.3	pH, kisik, temperatura .....	45
5.5.4	Kroženje dušika .....	46
5.5.4.1	Kroženje dušika v povezavi z mikroorganizmi .....	46
5.5.4.2	Vloga rastlin pri kroženju dušika.....	47
5.5.5	Kroženje fosforja .....	49
5.5.5.1	Vloga medija .....	49
5.5.5.2	Vloga rastlin.....	50
5.5.6	Kroženje kovin in njihova strupenost.....	51
5.5.6.1	Kroženje kovin v povezavi z mikroorganizmi .....	51
5.5.6.2	Kroženje kovin v povezavi z medijem .....	52
5.5.6.3	Kroženje kovin v povezavi z močvirskimi rastlinami .....	54
5.5.7	Organske snovi.....	54
<b>5.6</b>	<b>VRSTE RASTLINSKIH ČISTILNIH NAPRAV.....</b>	<b>55</b>
5.6.1	RČN s prosto vodno površino.....	55
5.6.2	Sistemi z vertikalnim podpovršinskim pretokom.....	57
5.6.3	Hibridni sistemi .....	59
<b>5.7</b>	<b>OBLIKOVANJE IN IZGRADNJA RČN.....</b>	<b>60</b>

5.7.1	Osnovni princip čiščenja v RČN.....	60
5.7.2	Vzdrževanje.....	65
5.7.3	Doba delovanja.....	65
5.7.4	Stroški postavitve.....	66
<b>5.8</b>	<b>TRSTNE KOMPOSTNE GREDE.....</b>	<b>72</b>
5.8.1	Izgradnja trstne kompostne grede.....	73
5.8.2	Polnjenje kompostne grede.....	73
5.8.3	Evapotranspiracija v trstni kompostni gredi.....	74
<b>6</b>	<b><i>PRILOGA</i>.....</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b><i>LITERATURA</i>.....</b>	<b>81</b>

# 1 UVOD

Nesorazmerja med naravo in družbo imajo za posledico slabšanje kakovosti vodotokov, pitnih virov, jezer, podtalnice in izvirov. K temu največ prispevajo naselja ter industrijske, kmetijske, energetske dejavnosti, ki z nenadzorovanimi ali s slabo prečiščenimi izpusti odpadne vode obremenjujejo površinske vode in zmanjšujejo njihovo samočistilno sposobnost.

Resne posledice prekomernega onesnaženja so zahtevale obsežne sanacije, zlasti najbolj občutljivih območij. Slovenija je na ta način doživela gradnjo mnogih čistilnih naprav, sanacij degradiranih okolij, revitalizacij vodotokov, trajnostnih zapiranj odlagališč odpadkov in veliko sprememb na zakonodajnem področju. Pri tem so se izgradile številne okoljske tehnologije in uporabile ekoremediacije.

## 2 OSNOVNI EKOLOŠKI POJMI

Za lažje razumevanje okoljskih tehnologij ter nadaljnjih principov inženirstva pri sanacijah okolja je potrebno povzeti osnovne ekološke pojme.

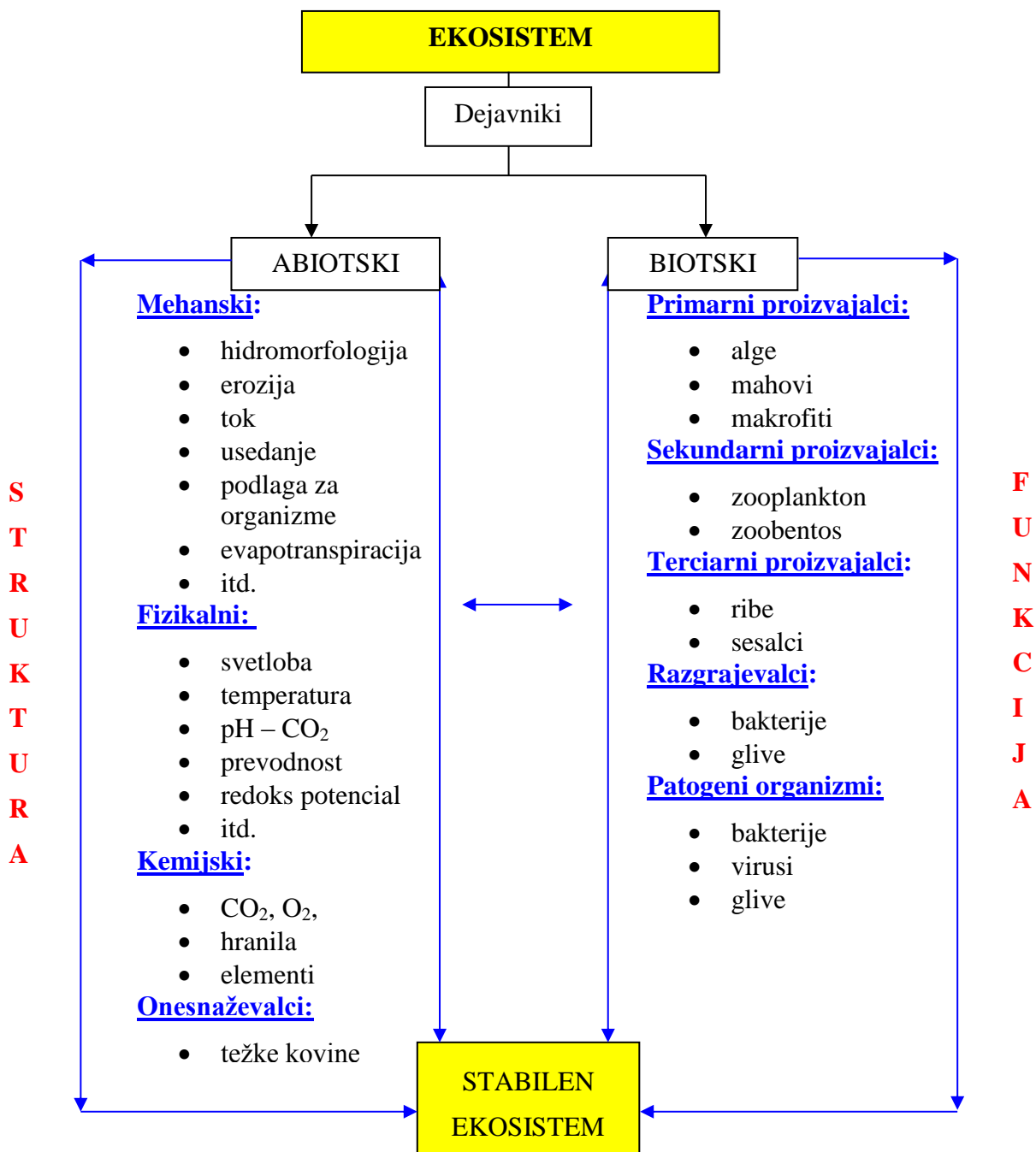
**Ekologija** je veda v znanosti, ki obravnava specifične interakcije med organizmi in živimi ter neživimi dejavniki. Ekologija je torej raziskovanje odnosa organizma ali skupine organizmov do njegovega okolja.

Pri obravnavanju onesnaževanja in sanacije okolja pogosto uporabljamo pojem ekosistem. Pojem **ekosistem** lahko pojasnimo na več načinov:

- Ekosistem je naravna enota, kjer obstaja **ravnovesje** med neživimi (abiotskimi) in živimi (biotskimi) dejavniki okolja.
- Ekosistem je naravna **samoorganizirana** ali **samouravnavana ekološka enota**, kjer obstaja dinamično ravnovesje med življenjskim okoljem in življenjsko združbo oziroma populacijo organizmov, ki naseljuje določeno področje.
- Ekosistem je biotska in funkcionalna enota sistema, ki je sposoben **trajnostnega obstoja** in vključuje vse biološke in nebiološke parametre tega sistema. Je običajno odprt sistem, kjer prihaja do izmenjave snovi in energije.
- **Ekosistem = biocenoza + biotop**  
**Biocenoza** predstavlja življenjsko združbo, ki jo določa biotop. Predstavlja združbo organizmov, ki naseljujejo skupen življenjski prostor, katerih vrstni sestav in številčnost določajo zunanji dejavniki.  
**Biotop** predstavlja življenjski prostor, kjer delujejo dejavniki okolja.
- Ekosistem je ciklični sistem, kjer se biotski in abiotski dejavniki neprestano izmenjujejo preko **biogeokemijskega kroga**, kjer se beseda **bio** navezuje na žive organizme, **geo** se navezuje na vodo, zemljo, zrak ter beseda **kemijsko** na kemijsko sestavo zemlje.

Vsak ekosistem ima svoje optimalne pogoje, pri katerih je v nekakšnem dinamičnem

ravnotežju. Seveda ima vsak ekosistem tudi spodnjo in zgornjo mejo tolerance, ki ga opredeljuje zgradba in funkcija ekosistema. Vsaka sprememba kot posledica delovanja na zgornjo ali spodnjo mejo tolerance, bodisi zaradi naravnih ali človeških vplivov, poruši ekološko ravnotežje. Posledica tega je spremenjen ekosistem z drugačno zgradbo in funkcijo, kar pomeni, da ekosistem degradira v neko drugo dinamično ravnotežje. Zaradi tega je potrebno že pri samem načrtovanju posegov v naprej predvideti, kakšne spremembe bodo nastale v ekosistemu in kakšne so ekološke tolerance posameznega posega. S pravnimi ukrepi lahko toleranco ekosistema celo povečamo, npr.: povečamo zadrževanje vode, samočistilno sposobnost in biodiverzitetu oziroma zaščitimo ogrožene vrste in življenjski prostor. Razumeti moramo, da mnoge procese v ekosistemi ne razumemo, kaj šele predvidimo. Zato je pri blaženju posledic nujno najprej dodobra spoznati zgradbo in funkcijo ekosistema kot kaže slika 1 in šele nato določiti vrsto in velikost posega.



Slika 1: Struktura in funkcija ekosistema.

Pri tem moramo upoštevati načela trajnostnega razvoja (Our Common Future, 1987). Pri varovanju določenih ekosistemov in s tem celotnega okolja pred onesnaženjem imata pomembno vlogo tako **okoljsko inženirstvo** kot tudi **ekološko inženirstvo**. Pomen obeh je pojasnjen v naslednjem poglavju.

### 3 OKOLJSKI IN EKOLOŠKI INŽENIRING

Pri sanacijah v okolju in s tem povezanimi inženirskimi principi ter tehnologijami se pogosto srečujemo z dvema pojmom inženirstva, in sicer z:

- **Okoljskim inženirstvom**
- **Ekološkim inženirstvom**

Razliko med obema pristopoma je med prvimi podal prof. dr. William Mitsch iz Univerze v Ohio v Združenih državah Amerike, ki je kot ekološki inženir in ekosistemski ekolog postavil osnove ekološkega inženirstva in s svojimi raziskavami na področju ekologije močvirij in njihove obnove ter ekološkega modeliranja pomembno prispeval k razumevanju osnovnih principov ekološkega inženirstva, ki se že dalj časa učinkovito uveljavlja po vsem svetu.

**Okoljsko inženirstvo** predstavlja povezavo med znanostjo in inženirskimi principi za izboljšanje okolja (zraka, vode, zemeljskih virov), tako da zagotavlja človeku zdravo vodo, zrak, naselitev in prostor za druge organizme s tem, da zdravi onesnažena območja.

Na področje okoljskega inženirstva sodijo **okoljske tehnologije**.

Primeri tehnologij s področja okoljskega inženirstva: mehanske in biološke čistilne naprave, čistilne naprave za čiščenje dimnih plinov, naprave za recikliranje odpadkov, nanotehnologija, biotehnologija, pri čemer je pomembno, da uporabljamo najboljše razpoložljive tehnologije (BAT = best available technology).

**Ekološko inženirstvo** predstavlja povezavo med ekologijo in inženirskimi principi za oblikovanje ekosistemov, kjer se povezujeta družba in njeno naravno okolje za dobrobit obeh, v skladu z načeli trajnostnega razvoja (Mitsch, 1991, Kangas, 2004).

Na področje ekološkega inženirstva sodijo **ekoremediacije**, ki zajemajo ukrepe brez uporabe tehnologij in ukrepe z uporabo tehnologij.

Zato ločimo:

**Ekoremediacije brez uporabe tehnologij**, kot so revitalizacije vodotokov, sonaravna močvirja za blažitev onesnaženja, zasaditve obrežnih pasov za zaščito jezer, oblikovanje vegetacijskih pasov ob kmetijskih zemljiščih za zaščito pred spiranjem onesnaženja s kmetijskih zemljišč v drenažne jarke in vodotoke, zasaditev odlagališča s hitro rastočimi drevesi itd.

**Ekoremediacije z uporabo tehnologij** ali **ekotehnologije**, kot so rastlinske čistilne naprave, zasajeni zadrževalniki za odpadno vodo, eko plavalni bazeni, lagune, zelene strehe, akvaponike (gojenje rib in zelenjave v zaprtem sistemu) itd.



Okoljsko inženirstvo je znan pojem, ki obravnava tehnologije za varovanje okolja in sanacijo degradiranega okolja, medtem ko je pojem ekološkega inženirstva, ki izhaja iz naravnih procesov, manj znan. Kljub temu pa je zanimivo, da začetki ekološkega inženirstva segajo dva tisoč let nazaj, ko so kitajski filozofi začeli raziskovati harmoničen odnos med vesoljem (Tian), zemljo in njenimi viri (Di) ter družbo oziroma ljudmi (Ri) (Yan, Wang, 1991).

Sanitarno inženirstvo, ki se ukvarja predvsem z varovanjem človeka, se tako povezuje tako z okoljskim kot z ekološkim inženirstvom.



Slika 2: Ekoremediacija; zasaditev odlagališča komunalnih odpadkov Barje z gostim sestojem hitrorastočega topola.

V nadaljevanju je podrobneje pojasnjen pomen ekološkega inženirstva in razlika v primerjavi z okoljskim inženirstvom.

Ekološko inženirstvo si lahko enostavno predstavljamo z naslednjim zapisom:

Ekološko inženirstvo = ekologija + inženirstvo
--

Enostavna definicija ekološkega inženirstva je »uporaba ekoloških principov« znotraj naravnih ali grajenih sistemov, ki posnemajo naravne sisteme za doseganje inženirskih ciljev (Teal, 1991). Cilj ekoloških inženirjev je torej, da na okolje delujejo s pomočjo uporabe le majhne dodatne energije za nadzor nad ekosistemi, saj le-te že v veliki meri poganja energija iz naravnih virov (Odum s sod., 1963).

Cilji ekološkega inženirstva so:

1. Obnova ekosistemov, ki so bili znatno prizadeti zaradi človekove dejavnosti, kot so onesnaževanje okolja ali drugi kvarni posegi v okolje, s ciljem, da se ekosistem povrne v stanje, ki je vsaj približno enako njegovemu stanju pred motnjo ali posegom.
2. Razvoj novih trajnostnih ekosistemov, ki imajo ekološko vrednost in vrednost za človeka, kot so na primer nove zelene površine parkov v mestih, obrežne vegetacije ob vodotokih, zasaditev odlagališča s hitro rastočimi drevesi.

V preglednici 1 so podane osnovne razlike med ekotehnologijo, ki sodi k ekološkemu inženirstvu, in biotehnologijo, ki sodi k okoljskemu inženirstvu, za lažje razumevanje razlik med obema inženirskima principoma. Pri tem najboljše razpoložljive tehnologije (BAT) uporabljamo na obeh področjih.

Preglednica 1: Primerjava ekotehnologije in biotehnologije.

<b>Značilnost tehnologije</b>	<b>Ekotehnologija</b>	<b>Biotehnologija</b>
Osnovna enota	ekosistem	Celica
Osnovna načela	ekologija	genetika; biologija celice
Nadzor	funkcije, organizmi	genetska struktura
Oblikovanje	samooblikovanje, uporaba samoorganizacije z nekaj človekove pomoči	oblikovanje s pomočjo človeka
Biotska raznovrstnost	zavarovana	spremenjena
Vzdrževanje in stroški razvoja	zmerni	veliki
Osnovna energija	sončna	različna goriva

Osnovni princip delovanja ekološkega inženirstva temelji na tem, kako sta sistem ali družba organizirana (Preglednica 2). Cilj ekološkega inženirstva je namreč vzpostavitev samoorganizacije, kar pomeni, da sistem deluje sam od sebe in ne potrebuje zunanje pomoči; podobno kot v naravnih ekosistemih. Namen ekološkega inženirstva je, da tak sistem ustvarimo in nato prepustimo, da deluje samostojno. Način takega delovanja lahko razumemo na primeru zasaditve obrežnega pasu ob jezeru za preprečevanje onesnaženja z brežin in z zalednimi vodami. Razvoj tega obrežnega pasu potem, ko smo ga ustvarili, ne uravnavamo več, temveč ga prepustimo delovanju abiotskih in biotskih dejavnikov jezera. Enako velja za sonaravna močvirja ali revitalizacijo vodotokov. Seveda pa je pri bolj tehnoloških sistemih včasih nemogoče, da bi ekosistem povsem prepustili samoorganizaciji in je potreben zunanji nadzor ali vsiljena organizacija.

Preglednica 2: Razvrstitev sistemov glede na tip organizacije (prirejeno po Pahl-Wostl, 1995).

<b>Značilnost</b>	<b>Vsiljena organizacija</b>	<b>Samoorganizacija</b>
Nadzor	vsiljena od zunaj centraliziran nadzor	vsiljena od znotraj razpršen nadzor
Togost	togo omrežje	fleksibilno omrežje
Potencial za prilagajanje	majhen potencial	velik potencial
Uporaba	konvencionalno inženirstvo	ekološko inženirstvo
Primeri	stroj avtoritarna družba kmetijstvo	organizem demokratična družba naravni ekosistem

Načela ekološkega inženirstva so:

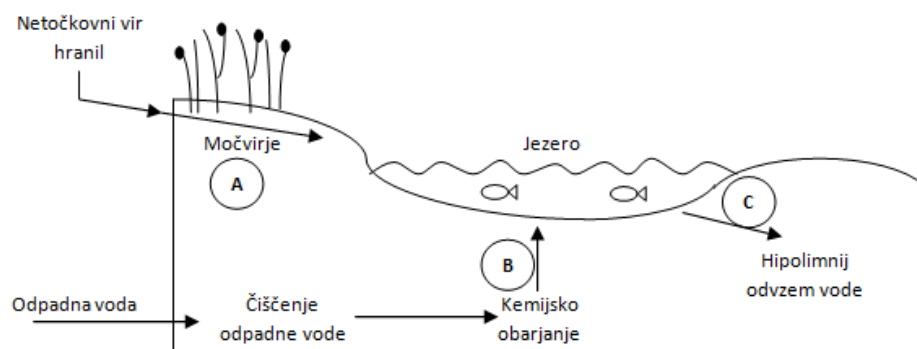
1. Ekosistemska struktura in funkcija sta določeni s funkcijami, ki poganjajo sistem.
2. Energija za delovanje ekosistema in prostor za skladiščenje snovi sta omejena.
3. Ekosistemi so odprti sistemi, kjer prihaja do izgub energije in snovi.
4. Upoštevanje dejavnikov, ki so omejujoči za ekosistem (na primer: svetloba, voda, hranila), je pomembno pri preprečevanju onesnaževanja ali pri obnavljanju ekosistemov.
5. Ekosistemi imajo nekaj homeostatične zmogljivosti, kar pomeni, da uravnavajo oziroma blažijo večja odstopanja na vhodu.
6. Oblikovanje pulzirajočih sistemov, če je to le mogoče (na primer: pulzno dodajanje hranil, vode v ekosistem).
7. Ekosistemi so sistemi, ki se sami oblikujejo in organizirajo.
8. Procesi ekosistemov imajo značilno časovno in prostorsko lestvico, ki ju je potrebno upoštevati pri upravljanju z okoljem. Ekosistem torej potrebuje za svoj razvoj določeno površino in čas.
9. Biotska raznovrstnost mora pri ohranjanju sposobnosti samooblikovanja ekosistema imeti primarno vlogo.
10. Ekotoni oziroma prehodna območja ekosistemov so za ekosisteme enako pomembna, kot so membrane za celice.
11. Sklapanje ali povezovanje različnih ekosistemov je potrebno uporabiti, kjer je to mogoče.
12. Ekosistem ima zgodovino razvoja in jo je potrebno upoštevati (npr. od puščave do gozda).
13. Ekosistemi in vrste so najbolj ranljivi na svojih geografskih mejah.
14. Ekosistemi so hierarhični sistemi in so deli večjih območij ali pokrajin.
15. Fizikalni in biološki procesi so interaktivni. Pomembno je poznati tako fizikalne kot biološke interakcije v ekosistemu in jih ustrezno uporabiti.
16. Ekotehnologija zahteva celovit pristop, ki združuje vse medsebojno sodelujoče dele in procese ekosistemov, kolikor je to le mogoče.
17. Podatki v ekosistemih so shranjeni v njihovih strukturah.

Primeri pristopov v ekološkem inženirstvu za kopenske in vodne ekosisteme podaja Preglednica 3.

Preglednica 3: Primeri pristopov v ekološkem inženirstvu.

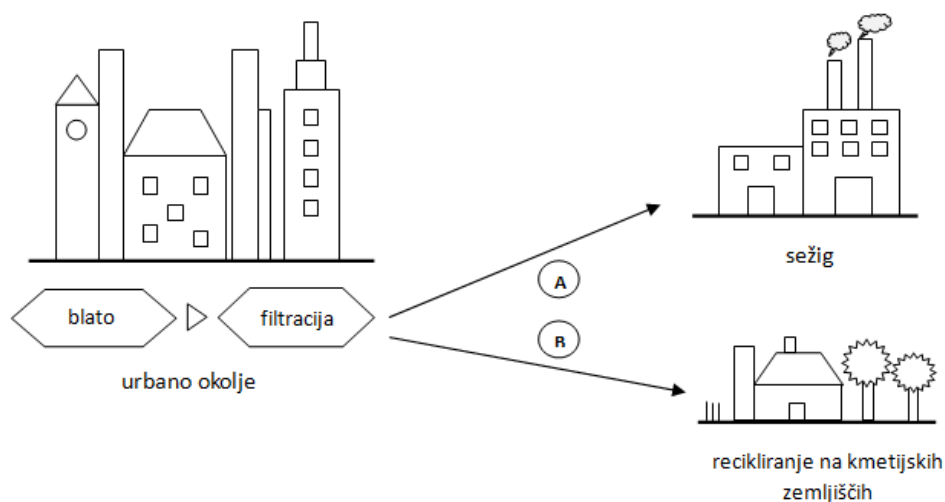
<b>Ekološko inženirstvo</b>	<b>Primeri na kopnem</b>	<b>Primeri v vodi</b>
Ekosistemi se uporabljajo za reševanje problemov onesnaževanja.	ekoremediacija	močvirje za odpadne vode, rastlinske čistilne naprave
Ekosisteme oponašamo ali posnemamo za zmanjševanje ali reševanje okoljskega problema.	obnova gozdov	nadomestno močvirje, ekoremediacije, revitalizacije rek
Izvedba obnove ekosistema se izvede takoj po motnjah.	obnova rudniških zemljišč	obnova jezer
Obstoječe ekosisteme spreminjamo na ekološko prijazen način.	selektivno izsekavanje lesa	biomanipulacija
Ekosisteme uporabljamo za našo korist brez uničevanja ekološkega ravnovesja.	trajnostni kmetijski ekosistemi	akvakulture, hidroponika, akvaponika

Pri reševanju ali zmanjševanju problema onesnaževanja lahko uporabimo tako okoljske kot ekološke tehnologije, kot kaže Slika 3, kjer lahko jezero varujemo pred onesnaženjem s pomočjo močvirskega ekosistema za zmanjševanje razpršenega (netočkovnega) onesnaženja s kmetijskih površin, konvencionalne čistilne naprave za čiščenje odpadne vode in kemijskega obarjanja (npr fosforja kot dejavnika eutrofikacije jezera) ter spuščanja vode iz jezera na nivoju hipolimnija (anoksično območje, bogato s hranilnimi snovmi).



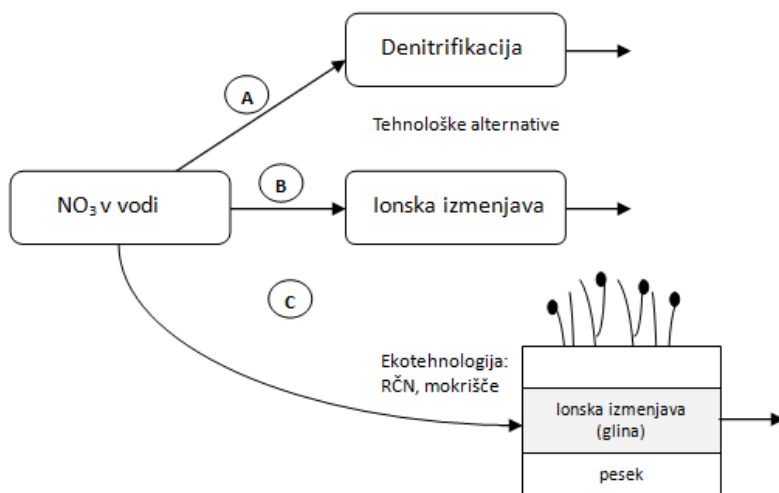
Slika 3: Zaščita jezera pred onesnaženjem z uporabo okoljskih in ekoloških tehnologij.

Različne načine zaščite in obnove okolja z uporabo okoljskega ali ekološkega inženirstva prikazuje Slika 4, kjer se lahko odločamo med A-možnostjo: obdelava in sežig blata iz čistilne naprave, ali B-možnostjo: obdelava in uporaba blata na kmetijskih zemljiščih.



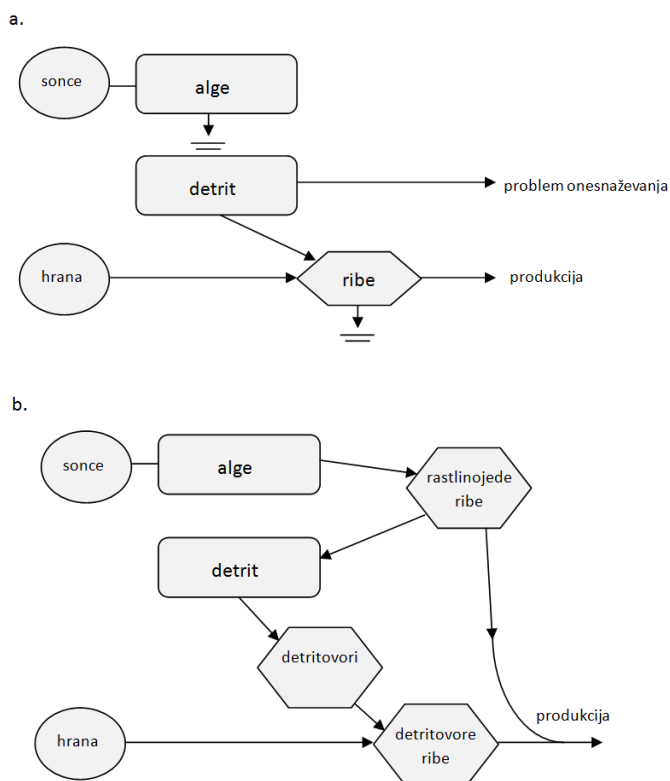
Slika 4: Različne možnosti obdelave blata iz čistilnih naprav v mestih.

Primer uporabe različnih pristopov za odstranjevanje nitratov iz vode prikazuje Slika 5, kjer lahko uporabimo različne okoljske tehnologije (denitrifikacija, ionska izmenjava) ali ekotehnologije (RČN).



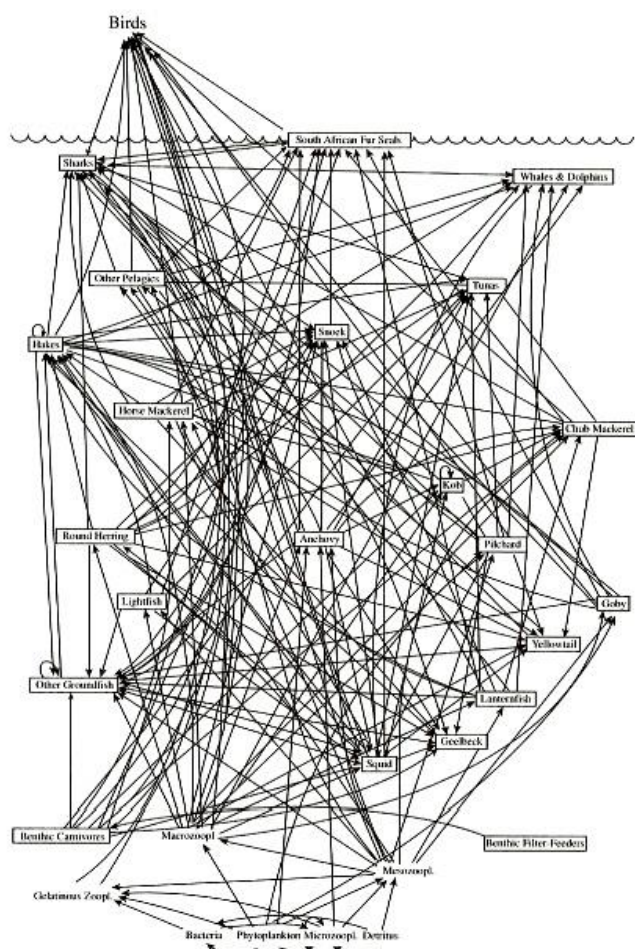
Slika 5: Možnosti odstranjevanja s pomočjo okoljskih ali ekoloških tehnologij nitratov iz vode.

Posnemanje ekosistemov za namene zmanjšanja onesnaženja je možno na več načinov. Slika 6 prikazuje, kako lahko z uvedbo novega trofičnega nivoja (rib) v ekosistemu rešimo problem onesnaženja z detritom (ostanki odmrlih rastlinskih in živalskih organizmov), s čimer povečamo produkcijo ekosistema (a), s povečano kompleksnostjo prehranjevalnih verig (uvedba rastlinojedih rib, ki se prehranjujejo z detritom) lahko še bolje izkoristimo odvečna hranila in tako zmanjšamo onesnaženje (b).



Slika 6: Reševanje problema onesnaženja z detritom z uvedbo novega trofičnega nivoja (rib) v ekosistemu.

Ekosistemi so seveda lahko izjemno kompleksni z medsebojnimi povezavami med vrstami, kot kaže Slika 7, ki jo je podal Kangas leta 2004 in je še najbolj podobna umetniški sliki. Razumevanje povezav pa omogoča uporabo pri inženirskih rešitvah pri varovanju okolja.



Slika 7: Prikaz kompleksnosti ekosistema (Kangas, 2004).

Razumevanje o razliki v ekološkem pristopu in pristopu brez upoštevanja ekološkega vidika, kljub že obstoječemu poglobljenemu znanju o ekologiji in inženirstvu, prikazuje tudi Preglednica 4.

Preglednica 4: Primerjava med ekološkim razumevanjem in delovanjem brez upoštevanja ekološkega vidika pri varovanju okolja.

<b>Ekološko razumevanje</b>	<b>Delovanje brez ekološkega vidika</b>
Odziv na zgodnje indikatorje motenj v okolju.	Čakanje na ekstremne, krizne razmere.
Ciklični, regenerativni odnosi, zapiranje snovnih tokov.	Linearni snovni tokovi.
Rast pod omejenimi dejavniki.	Neomejena rast.
Izkoriščanje sončne energije.	Odvisnost od fosilnih goriv in nuklearne energije.
Mutualizem – sožitje dveh ali več vrst.	Spodbujanje tekmovalnosti.
Funkcionalna raznovrstnost in	Poenostavljeni, visoko nadzorovani sistemi

kompleksnost.	(odvisni in nestabilni).
Bogata raznovrstnost specialistov, generalistov.	Poudarjena vrednost le nekaj specialistov in njihovih vlog.
Različne vloge znotraj združbe.	
Večina virov se uporablja za vzdrževanje.	Poudarek na produkciji.
Pomembnost časa in prostora (edinstvenost).	Univerzalnost dogodkov (vsi, povsod ...).
Postopna koevolucijska (pomen medvrstnih odnosov) strukturna sprememba z občasno ustvarjalnostjo.	Hitre spremembe z nekaj prednostmi in veliko izgubami.

Na področju uporabe ekološkega inženirstva (Bergen in sod., 2001) ločimo:

1. Oblikovanje ekoloških sistemov kot alternativa človeško ustvarjenih/energetsko potratnih sistemov za zadovoljevanje različnih človeških potreb (npr. rastlinske čistilne naprave za čiščenje odpadnih voda).
2. Obnova poškodovanih ekosistemov in zmanjševanje razvojnih aktivnosti.
3. Upravljanje, izkoriščanje in ohranjanje naravnih virov.
4. Vključevanje družbe in ekosistemov v grajena okolja (npr. v krajinsko arhitekturo, urbanistično načrtovanje in urbano vrtnarstvo).

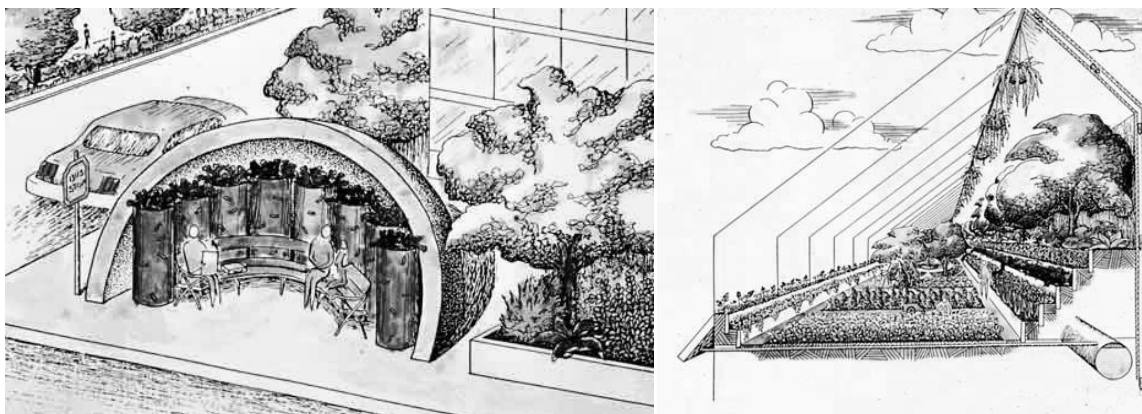
Glavni gradniki ekološkega inženirstva:

1. *Samooblikovanje*  
Ekološko inženirstvo vključuje dane oblikovne kapacitete samega ekosistema.
2. *Varovanje ekosistemov in biotske raznovrstnosti*  
Ekološki inženir je odvisen od številčnosti in raznovrstnosti vrst in ekosistemov → varovanje okolja.
3. *Vir energije je sonce*  
Energija za vzdrževanje in delovanje ekosistema prihaja neposredno ali posredno od sonca. Zanašanje na tehnološke vire energije je ustrezno manjše.
4. *Sožitje z naravo*  
Razvoj družbe se razvija skupaj oziroma z upoštevanjem narave.

Rešitve ekološkega inženirstva imajo naslednje značilnosti:

1. Problemi se rešujejo „pri viru nastanka“ (begin-of-pipe).
2. Upošteva se načelo trajnosti: problemi se ne zamikajo v času in se ne prestavijo na drug prostor.
3. Ekološko inženirstvo ustvarja ekološke, ekonomske in družbene koristi (koncept win-win).
4. Uporaba obnovljivih virov energije in surovih materialov.
5. Spodbujanje decentralističnih rešitev.
6. Spodbujanje vključevanja in sodelovanja lokalnega prebivalstva.

Da bi zadovoljil zahteve po trajnosti, ekološki inženiring sledi osnovnim konceptom samooblikovanja, samoorganizacije, samovzdrževanja, samozadostnosti in sistemske integracije, kot prikazuje Slika 6.



Slika 8: Ekološka mesta kot živ stroj (povzeto po Eco-Cities to Living Machines: Principles of Ecological Design (Todd in Todd, 1994).

Na Sliki 8 lahko sledimo načelu oblikovanja tehnologije živih strojev (living machine technology) z upoštevanjem sledečih načel:

1. Raznovernost mineralov
  - Vključuje magmatske, sedimentne in metamorfne kamnine za zagotavljanje osnove za kompleksno biokemijo.
2. Zalognik hranil
  - Zagotavlja hranila v dostopnih oblikah z namenom vzdrževanja uravnoveženega kroženja.
3. Strmi gradienti
  - Povezava podsistemov z zelo različnimi fizikalno-kemijskimi pogoji.
4. Visoka izmenljiva sposobnost
  - Maksimalno povečanje stične površine biofilma v odpadni vodi.
5. Periodične in naključno pulzirajoče izmenjave
  - Pulziranje fizikalno-kemijskih pogojev vodi do robustnih prilagoditev.
6. Celično oblikovanje in struktura mezokozmosov
  - Zagotavlja delno avtonomijo na majhni ravni v kontekstu večje ravni z uporabo celic kot oblikovnih enot.
7. Minimalno število podsistemov
  - Vključiti je potrebno vsaj manjše število povezanih podsistemov za spodbuditev stabilnosti.
8. Mikrobne združbe
  - Spodbujanje mikrobne raznovernosti, ker ima ta odločilno vlogo pri končni učinkovitosti.
9. Izkoriščanje fotosinteze
  - Uporaba sončne energije kot energetskega vira z vključevanjem fotosinteze.
10. Raznovernost živali
  - Vključevanje različnih živalskih vrst z različno funkcijo.

Uporaba ekološkega inženiringa je možna:

1. V naravnem okolju
  - Obnova naravnih pokrajin: močvirij, rek, obalnih območij.
2. V antropogenem okolju
  - Obnova regij: ekoregij, ekovasi.



- Preoblikovanje transportnih sistemov (kolesarjenje), bivalnih enot (eko hiše), turizma (ekoturizem).
  - Ekološko preoblikovanje kmetijstva in gozdarstva.
3. Na tehnološkem področju
- Pridobivanje energije (sončna energija).
  - Nove tehnologije in ukrepi za varčevanje z energijo.
  - Proizvodnja surovih materialov (obnovljivih virov).
  - Preoblikovanje industrijskih procesnih verig (zapiranje snovnih zank).

Primer uporabe ekološkega inženirstva, ki posega tako v naravno kot v antropogeno okolje in hkrati posnema naravne sisteme ter jih dopolnjuje s tehničnimi ukrepi, predstavljajo postopki ekoremediacije, ki so predstavljene v naslednjem poglavju.

## 4 EKOREMEDIACIJE

Vodna direktiva je uvedla novosti pri upravljanju z vodami, ki temelji na povodjih kot naravnih geografskih in hidroloških enotah. Zato postajajo različne okoljske in ekološke tehnologije za izboljšanje ekološkega stanja voda razvojno in tržno izjemno zanimive.

V okviru ekoloških tehnologij, ki so razložene v prejšnjem poglavju, v ospredje stopajo tudi ekoremediacije, ki krepijo naravno ravnovesje okolja z izkoriščanjem naravnih procesov v naravnih in deloma tudi v umetnih vodnih ekosistemih za zagotavljanje boljšega izkoriščanja vodnih virov, za odstranjevanje škodljivih učinkov onesnaževanja in za ohranjanje biološke raznovrstnosti.

Ekoremediacija je torej pojem, s katerim označujemo uporabo naravnih sistemov in procesov za obnovo in zaščito okolja. Namen uvajanja ekoremediacij je na novo ustvariti razmere, ki so značilne za naravne ekosisteme, to je raznolikost biotopov in ohranjanje ekosistemskega ravnotežja.

Med ekoremediacije sodijo:

- rastlinska čistilna naprava (RČN),
- stranski rokav za dodatno čiščenje vodotoka,
- vegetacijski jarki,
- vegetacijski pasovi,
- blažilno območje,
- sonaravno močvirje,
- revitalizacija struge,
- zadrževalnik in laguna za čiščenje odpadnih voda,
- akvaponika,
- hidroponika,
- pasivne tehnologije za ločevanje in čiščenje vode in podobno.

Ločimo glavne funkcije ekoremediacij:

- zadrževanje vode in kompenzacija hidravličnih viškov,
- zmanjševanje erozijskih pojavov,
- sedimentacija delcev,
- čiščenje odvečnih hranilnih in strupenih snovi,
- ohranjanje in povečevanje biodiverzitete,
- ustvarjanje novih habitatov in podobno.

Ekoremediacije vključujejo različne vrste remediacij. Ločimo:

- **bioremediacijo**

Bioremediacija poteka s pomočjo mikroorganizmov (bakterije, glive) in se uporablja za odstranjevanje onesnaževal v tleh.

- **fitoremediacijo**

Fitoremediacija je metoda za zaščito in sanacijo onesnaženih sedimentov in kontaminiranih zemljin z neposredno uporabo različnih rastlin in z njimi povezanih mikroorganizmov. Fitoremediacija vključuje procese, kot so fitotransformacija, fitostabilizacija, fitoekstrakcija, rizofiltracija, fitovolatilizacija, fitostimulacija ter rizosferna bioremediacija.

Med bolj perspektivne metode sanacije oz. remediacije onesnaženih sedimentov s težko razgradljivimi snovmi sodi fitotransformacija. Uporabnost te metode se kaže na področju petrokemije, skladišč, razlitja naftnih derivatov in za čiščenje industrijskih in komunalnih odlagališč ter čiščenje pesticidov in gnojil za potrebe kmetijstva. Privzem skozi korenine je predvsem odvisen od sposobnosti akumulacije, transpiracije, koncentracije onesnaževal in od vitalnosti same rastline. Po translokaciji organskih snovi lahko rastlina shrani le-to tekom lignifikacije ali izpari med transpiracijo, se metabolizira in spremeni v manj strupeno obliko ali mineralizira do CO<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O. Rizosferna bioremediacija je fitoremediacijska metoda rizosfere, ki omogoča učinkovito razgradnjo onesnaževal v sedimentu. Za podobne primere se lahko uporabljajo tudi rastline s sposobnostjo hiperakumulacije, kot je fitoekstrakcijska metoda za akumulacijo, npr. težkih kovin. V primeru čiščenja kovin je predmet številnih raziskav rizofiltracija, ki je kombinacija zgoraj naštetih metod (odpadki urana). Oblika fitoremediacije, ki danes še posebej stopa v ospredje, so blažilna območja za izboljšanje kvalitete tal ter povečevanje biodiverzitete. Različne študije nakazujejo, da so ta območja, ki so posajena z rastlinami na robnem območju emisij, sposobna z akumulacijo zadržati tudi do 13 g N/m<sup>2</sup>/dan in do 9 g P/m<sup>2</sup>/dan. Taki tehnobiološki sistemi so sposobni letnega prirasta tudi v količini 14,4 t na hektar. Čeprav so blažilna območja v okviru fitoremediacije v bolj ali manj načrtni uporabi že po celem svetu, se najbolj načrtno z njimi ukvarjajo v skandinavskih državah (zlasti na Švedskem), na Danskem ter v ZDA, kjer je tudi postavljenih največ testnih površin. Raziskave so namenjene zmanjševanju policikličnih aromatskih ogljikovodikov (PAH), polikloriranih bifenilov (PCB), kovin (svinec, kadmij, cink, arzen, krom, selen), pesticidov, amoniaka, fosfatov, nitratov z uporabo številnih rastlin (vrbe, trave, vodne rastline ter značilni "hiperakumulatorji", kot so npr. sončnice). Raziskave so pokazale, da se metoda lahko uspešno uporabi za remediacijo zemljin, vodnih zadrževalnikov (Černobil – kontaminacija z uranom), v okviru blažilnih območij v Amani (ZDA), za čiščenje nitratov in atrazina pri spiranju s kmetijskih površin (Iowa, ZDA), v obliki umetnih močvirij za čiščenje različnih onesnaževal, npr. trinitrotoulena (TNT) v Tennessee (ZDA).

Pri fitoremediacijskih metodah so v uporabi različne rastilne iz rodu Brassica, z zadostno hitrostjo rasti in biomase ter druge vrste gorčic (Indian mustard), ki je sicer kopna rastlina, a sposobna vezave težkih kovin iz vode. Med kovine absorbirajo rastline sodi *Streptanthus polygaloides*, vrsta gorčice, ki uspešno odstranjuje vsebnosti nikla v tleh. Predstavniki rodu *Thlaspi* (družina križnice, Brassicaceae) so prav tako znani po uspešnem zmanjševanju vsebnosti kovin v tleh, kamor sodijo gorčica, sončnica, fižol, oljna repica, repa, kakor tudi vrste iz rodu trav. To so tako imenovani hiperakumulatorji, katerih tkivo lahko vsebuje od 1000 do 10 000 ppm določene težke kovine. Prednost fitoremediacijske metode se kaže tudi v tem, da na ta način postane zgornji del zemljin ponovno uporaben in hkrati znatno zmanjšamo količine zemljine, ki jo moramo zaradi onesnaženosti nekje odložiti ali obdelati s kemijskimi in tehnološkimi postopki. Fotoremediacija težkih kovin tako prispeva k zmanjšanju onesnažene zemljine.

Ekoremediacije sodijo torej med tiste ekološke metode in tehnologije, v nadaljevanju ekotehnologije, ki so po svoji zgradbi enostavne, energetske varčne in težijo k izkoriščanju naravnih zakonitosti (tok vode s pomočjo gravitacije). Pogosto jih štejemo med pasivne sisteme, saj enako kot naravni procesi potrebujejo, da dosežejo svoje polno oziroma zrelo delovanje dalj časa kot tehnološke rešitve, njihovi učinki pa so razvidni šele po enem ali več letih (revitalizirana reka, zasajeno odlagališče, rastlinska čistilna naprava razvije zrel sestoj vegetacije šele v enem ali dveh letih). Pri sanacijah okolja, kjer je potreben hiter odziv in takojšnji učinki, pogosto niso primerne, lahko pa imajo pomembno vlogo po

izvedbi hitrega ukrepa zaradi svojih dolgoletnih, samočistilnih oziroma remediacijskih sposobnosti.

Ekoremediacije so pogosto cenovno dostopne, tako pri investiciji kot pri vzdrževanju, ki zahteva le nižje izobražen kader, a so učinkovite in primerljive s tehnološko bolj zahtevnimi sistemi. Na ta način lahko za sanacijo nekaterih območij dopolnjujejo okoljske tehnologije oziroma so mestoma ustrežnejše od bolj poznanih okoljskih tehnologij. Razlog je pogosto cena, vzdrževanje in lažje razumevanje procesov remediacije ter večnamenski učinek (na primer: poplavni zadrževalnik z elementi ekoremediacije lahko hkrati poveča čistilno funkcijo, biodiverzitetu in služi hkrati kot rekreacijski in učni objekt). Ekoremediacija se zato uporablja pri odpravljanju dolgotrajnih posledic v okolju, pri odstranjevanju posledic, npr. razpršenega onesnaževanja in sezonskega onesnaževanja zaradi turistične dejavnosti ter pri zaščiti naravovarstvenih območij in gospodarjenju z vodo na sušnih in poplavnih območjih.

Najbolj poznane ekoremediacije so dandanes rastlinske čistilne naprave, ki se v svetu, predvsem pa v mediteranskih državah, vse bolj uveljavljajo kot najbolj primerna tehnologija za čiščenje in ponovno uporabo komunalnih odpadnih voda manjših naselij (do 1000 PE), industrijskih odpadnih voda, površinskega odtoka z avtocestnih površin ter izcednih voda, zaprtih odlagališč komunalnih odpadkov.

Razumevanje strukture, funkcije in delovanja rastlinske čistilne naprave služi kot osnova za razumevanje večine ekoremediacij in nekaterih ekotehnologij oziroma novih zelenih tehnologij.

Z vpogledom v ekologijo in enostavne inženirske rešitve, ki so osnova za ustrezno delovanje ekotehnologij in ekoremediacij, pa se lahko približamo tudi zapiranju snovnih zank in viziji, da vsak odpadek spremenimo v nekaj uporabnega in tako prispevamo k trajnostnemu razmišljanju in delovanju pri sanaciji okolja in izboljševanju življenjskih razmer človeka.

*Slikovni prikaz ekološko nesprejemljivih posegov v okolje, ki jih lahko izboljšamo z ekoremediacijami*



Slika 9: Regulirana struga Jurčkovega grabna ob Jurčkovi cesti in Gradaščice, ki močno zmanjšuje samočistilno sposobnost vodotoka.



Slika 10: Ekoremediacijski jarek za čiščenje onesnaženega vodotoka.



Slika 11: Detajl ekoremediacije. Oblikovanje meandra z vrbovimi popleti na poplavnem zadrževalniku v Podutiku.



Slika 12: Detajl ekoremediacije. Gradnja pragov v vodotoku.



Slika 13: Ekoremediacija kot zadrževalnik odpadne vode zasajen z navadnim trstom (*Phragmites australis*) in vodno hijacinto (*Eichhornia crassipes*).



Slika 14: Ekoremediacija za čiščenje površinskega onesnaženja s kmetijskih zemljišč v melioracijskem jarku z iztokom v potok Lešnica v bližini Ormoža.

## 5 RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE

### 5.1 RAZVOJ METODE ČIŠČENJA Z MOČVIRSKIMI RASTLINAMI

Začetki čiščenja onesnaženih voda z močvirskimi rastlinami segajo v klasično Grčijo, kasneje, leta 1557, tovrstno čiščenje lahko zasledimo v Prusiji, kjer so ga uporabljali preko tristo let. Leta 1857 ga je angleška vlada razglasila za učinkovit način čiščenja mestnih odplak in za zaščito vodotokov. V osemnajstem stoletju so ga uporabljali v Parizu, Berlinu, Moskvi ter od leta 1870 tudi v ZDA (Kickuth, 1984).

Metode čiščenja z uporabo rastlin se med seboj razlikujejo. V Angliji so vodo čistili tako, da so jo spuščali preko zemeljske površine, kjer vloga rastlin ni bila posebej poudarjena. V tem času so dokazovali, da je čiščenje odvisno le od fizikalnih, kemijskih procesov in bakterij, medtem ko vloga rastlin ni bila pojasnjena oziroma je prevladovalo mnenje, da rastline ne morejo rasti v onesnaženi odpadni vodi. Kasneje so začeli intenzivneje raziskovati in graditi sisteme z uporabo nekaterih natantnih hidrofitov (prave vodne rastline kot na primer *Eichhornia crassipes*) in helofitov (močvirske rastline). Uporaba helofitov je bila pogostejša po uvedbi nove metode, ki jo je konec šestdesetih razvila dr. Kaethe Seidel na Max Planck Institutu v Nemčiji (Slika 15) in sicer z uporabo kombinacije peščene zemlje z visoko hidravlično prevodnostjo in različnih vrst makrofitov za čiščenje različnih vrst odpadnih voda (Seidel, 1953). Leta 1974 je dr. Reinhold Kickuth s sodelavci (1984) razvil v Nemčiji "metodo koreninske cone", ki predstavlja osnovo za večino RČN zgrajenih v zadnjem času. Pri tej metodi se voda pretaka skozi sistem v vodoravni smeri pod površino medija, s katerim je napolnjen bazen. V mediju se ustvarja zaradi razvoja koreninskega in rizomskega sistema ter mikroorganizmov določena struktura rizosfere, ki je pri čiščenju zelo učinkovita. Smradu in težav z razvojem insektov ni. Največjo težavo pri tem sistemu predstavlja mašenje, ki pa ga skušajo uspešno rešiti že vrsto let.

Konec osemdesetih so začeli na Max Planck Institutu razvijati novo metodo uporabe makrofitov, in sicer v sistemu z navpičnim tokom odpadne vode, ki je znana tudi pod imenom Krefeldov ali Seidelov sistem (Cooper, 1990). Ta metoda je bila učinkovitejša v povezavi z vodoravnim sistemom.

Vsak sistem ima določene prednosti in rezultati najnovejših raziskav kažejo, da je zaradi različnih snovi in nihanj vsebnosti teh snovi, ki se pojavljajo v odpadni vodi, daleč najbolj učinkovit sistem, sestavljen iz več različnih podenot (laguna, vodoravni sistem, navpični sistem, kompostna greda). Raziskava vsake posamezne enote pa je kljub temu nujna, da lahko predvidimo učinek celotnega sistema.



Slika 15: Fotografija dr. Käthe Seidel, začetnice razvoja rastlinskih čistilnih naprav (na desni strani (Wissing, 1995)).

## 5.2 RAZVOJ RASTLINSKIH ČISTILNIH NAPRAV

Ideja o možnosti čiščenja odpadnih voda se je v svetu začela intenzivneje razvijati šele v 60-ih oziroma 70-ih letih s poglobljenim raziskovanjem vloge naravnih močvirskih ekosistemov za izboljšanje kakovosti odpadnih voda. V kasnejših letih se je v raziskovanje vloge rastlin oziroma naravnih in umetnih močvirij vključilo mnogo raziskovalcev širom po svetu. Posledica tega je bila, da se je ideja čiščenja z močvirskimi rastlinami udejanjila v obliki različnih, ponekod zelo inovativnih umetnih močvirij oziroma RČN. Na osnovi tega je ameriška agencija za varovanje okolja (Environmental Protection Agency) leta 1988 izdala glavne smernice postavljanja RČN. V Nemčiji, na Danskem, v Italiji, Franciji, Avstriji, na Češkem deluje nekaj sto RČN. V Angliji, kjer obratuje veliko število naprav (500), je ta tehnologija priznana tudi s strani Water Industry od leta 1995. Severna Amerika in Kanada dosegata še višje številke, pri čemer je tej številki potrebno dodati še nekaj 100 RČN za čiščenje izcednih voda iz premogovnikov in večje število RČN za čiščenje odpadnih voda iz kmetijskih zemljišč in cest. RČN uspešno čistijo različne odpadne vode tudi v skandinavskih državah, v Aziji, Južni Ameriki, Novi Zelandiji in v Avstraliji.

V Slovenijo je ta ideja prodrla v drugi polovici 80 let. Nato je sledilo raziskovalno obdobje čiščenja odpadnih vod z RČN, v katerem so se pri prvih sistemih oprli na izkušnje nekaterih evropskih raziskovalcev (Kickuth, 1984; Clayton, 1988). V nadaljevanju so v Sloveniji, s pridobljenimi lastnimi izkušnjami, oblikovali novo tehnologijo, ki je ponujala sodoben način reševanja okoljskih problemov, še zlasti glede na opisane prostorske, demografske in vodnogospodarske značilnosti Slovenije (Vrhovšek in Bulc, 1995; Bulc, 2008). V Sloveniji je tako do leta 2013 postavljenih več kot 50 RČN. Največje število sistemov je namenjenih čiščenju komunalnih odplak, čiščenju odpadne vode iz prehrabeno-predelovalne industrije ter izcednih vod iz komunalnih odlagališč odpadkov, njihov razvoj pa poteka tudi na področju čiščenja odpadnih voda s cestišč in tretje stopnje čiščenja.

Danes so RČN enakovredne drugim čistilnim napravam. Opredeljene so v Uredbi o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav (UL RS 30/2010), kjer male čistilne naprave pomenijo naprave za čiščenje komunalne odpadne vode z zmogljivostjo čiščenja, manjšo od 2000 populacijskih ekvivalentov (PE). V primeru, da je mala čistilna naprava RČN, uredba navaja, da se v njej odpadna voda čisti z biološko razgradnjo in sicer z naravnim prezračevanjem s pomočjo rastlin z vertikalnim tokom.



## 5.3 NOSILCI ČIŠČENJA V RČN

### 5.3.1 Medij

Glavni nosilci čiščenja v RČN so medij, mikroorganizmi in močvirske rastlinske vrste (makrofiti).

#### 5.3.1.1 Hidravlične lastnosti medija

Neposredna vloga medija v koreninski coni je čiščenje s pomočjo fizikalnih in kemijskih interakcij ter posredna kot površina za naseljevanje mikroorganizmov in medij za rast močvirskih rastlin.

Hidrodinamika je eden od pomembnejših faktorjev pri oblikovanju in izgradnji RČN. Zaradi njene kompleksnosti pa se srečujemo ob postavljanju RČN z nemalo težavami.

Glavna osnova za oblikovanje takega sistema je izračun širine, dolžine in globine, pri čemer je pomembno, da iztok iz sistema dosega željene, z zakonom določene mejne vrednosti. Navadno je sistem prilagojen zahtevam za BPK<sub>5</sub>, če upoštevamo, da so ti sistemi namenjeni predvsem čiščenju komunalnih odpadnih vod. Druge kriterije uporabljamo, če je sistem namenjen čiščenju posebnih odpadnih voda, čeprav se v praksi pogosto uporablja osnovni izračun tudi pri projektiranju in oblikovanju namensko drugačnih RČN.

Površino RČN izračunamo s pomočjo naslednje enačbe:

$$A = Q_d (\ln C_o - \ln C_t) / K \quad (1)$$

A – površina RČN (m<sup>2</sup>)

Q<sub>d</sub> – povprečen dnevni pretok (m<sup>3</sup>/dan)

C<sub>o</sub> – povprečna dnevna vrednost BPK<sub>5</sub> na dotoku (mg/l)

C<sub>t</sub> – zahtevana povprečna dnevna vrednost BPK<sub>5</sub> na iztoku (mg/l)

K – konstanta (m/dan)

Značilne koncentracije BPK<sub>5</sub> v komunalni vodi ter zakonsko določene iztočne koncentracije so podane v prilogi.

$$K = k_T H n \quad (2)$$

k<sub>T</sub> – konstanta pri temperaturi T (1/dan)

H – globina sistema (m)

n – poroznost medija

Vrednost K je torej odvisna tudi od temperature v sistemu, pri kateri deluje RČN. Kljub različnim izračunom K vrednosti, se v hladnejših klimatskih pogojih za velikost RČN za 1 PE giblje okoli 4–5 m<sup>2</sup>/PE za komunalno odpadne vode.

Enostavnejša je Kickuthova enačba, ki pri izračunu enačbe uporablja za K vrednost 0,19 m/dan, kar pomeni 2,2 m<sup>2</sup>/PE za 200 mg BPK<sub>5</sub>/l na dotoku in 20 mg BPK<sub>5</sub>/l na iztoku s pretokom 180 l/dan.

$$A = Q_d (\ln C_o - \ln C_i) / 0.19 \quad (3)$$

Kickuthovo enačbo so prevzeli tudi Nemci v svojih smernicah, vendar je potrebno za večje sisteme zgraditi najprej testni sistem in ugotoviti dejansko površino.

Poleg površine in razmerja med dolžino in širino je hidravlična prevodnost ena od pomembnejših dejavnikov za oblikovanje RČN. Odvisna je od mešanice ter od homogenosti medija, kasneje pa se lahko spreminja zaradi spremljajočih dejavnikov delovanja RČN. Izrazimo jo s koeficientom hidravlične prevodnosti, ki je odvisen od matrike zrn (granulacija, oblika zrn, zavrtost por, specifična površina, poroznost) ter od lastnosti tekočine (gostota, viskoznost, temperatura).

Nekaj primerov koeficientov hidravlične prevodnosti za pogosto uporabljene frakcije v RČN prikazuje Preglednica 5.

Preglednica 5: Koeficienti hidravlične prevodnosti.

Vrsta zemljine	Koeficient prevodnosti $k_f$
prodec	$10^{-1} - 10^{-2}$ cm/s
debel pesek	$10^{-1} - 10^{-3}$ cm/s
droben pesek	$10^{-2} - 10^{-3}$ cm/s

Skozi zemljino se voda pretaka z določeno hitrostjo, ki jo pogojuje poroznost medija oziroma efektivna poroznost, saj del tekočine zaradi adhezije v porah pogosto miruje.

Hitrost nam podaja enačba:

$$v = Q / (nA_s) = q / n_{ef} \quad n_{ef} < n \quad (4)$$

$A_s$  – del prereza, skozi katerega poteka pretok

$n$  – poroznost medija

$n_{ef}$  – efektivna poroznost

$q$  – specifični pretok oziroma prostornina vode skozi enoto prereza v času

Poroznost določa gostoto materiala in jo določamo iz razmerja volumna por ( $V_v$ ) in celotnega volumna medija ( $V_v$ ).

$$n = V_v/V \quad (5)$$

Povprečna vrednost za fini pesek je 33 % in za grobo zrnati 45 %.

Neustrezna hidravlična prevodnost povzroča površinski tok, ki pomeni zmanjšano učinkovitost čiščenja. Z relativno visoko hidravlično prevodnostjo medija v RČN lahko dosežemo, da se površinski tok ne pojavlja, razen kadar želimo z njim preprečiti razvoj nezaželenih rastlinskih vrst (namerna preplavitev sistema).

Hidravlični zadrževalni čas lahko izračunamo tako, da volumen sistema delimo s pretokom v RČN ob upoštevanju poroznosti.

$$t = L W H n/Q \quad (6)$$

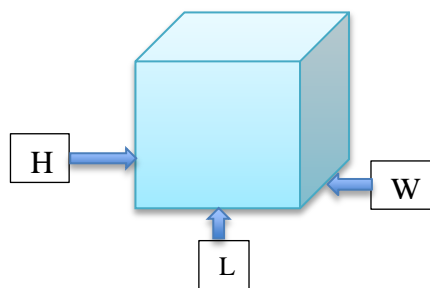
$Q$  – pretok ( $m^3$ /dan)

$n$  – poroznost medija

$L$  – dolžina sistema (m)

$W$  – širina sistema (m)

$H$  – globina sistema (m)



Z izračunanim zadrževalnim časom si pomagamo pri meritvah dejanskega zadrževalnega časa, na osnovi katerega sledimo dotočnim in iztočnim vrednostim pokazateljev onesnaženosti. Pri tem moramo upoštevati, da se povprečni pretok skozi sistem spreminja zaradi evapotranspiracije in padavin.

Kapilarni dvig je prav tako eden od pomembnih dejavnikov pri delovanju RČN, saj preprečuje prekomerno izsuševanje sistema ob visokih zračnih temperaturah in omogoča izmenjevanje aerobnih in anaerobnih pogojev v sistemu.

Kapilarni dvig se v različnih zemljinah močno razlikuje.

Vsi hidravlični parametri so neposredno odvisni od mešanice medija in kažejo, da je pri oblikovanju RČN izjemnega pomena pravilna izbira medija.

Značilnosti medija v RČN se oblikujejo s pomočjo fizikalnih, kemijskih in bioloških procesov, ki potekajo podobno kot v naravnih močvirjih. Pri načrtovanju in oblikovanju RČN je pomembno poznati osnove fizikalnih in kemijskih značilnosti močvirskih medijev, saj ravno te značilnosti izrazito vplivajo na končno učinkovitost čiščenja odpadne vode.

### 5.3.1.2 Fizikalne značilnosti medija v RČN

Difuzija kisika je v preplavljenih medijih skoraj 10 000-krat počasnejša kot v prezračenih zemljinah, zato po preplavitvi tudi dobro prezračenih medijev koncentracija kisika oziroma redoks potenciala hitro pade. Nižja koncentracija raztopljenega kisika povzroča akumulacijo organskih snovi v mediju, zlasti zaradi zmanjšane mikrobne aktivnosti in organske razgradnje. Medij v RČN je zaradi dinamike procesov razgradnje, sedimentacije,

filtracije, adsorpcije podvržen nenehnim spremembam in se zato precej razlikuje v novih RČN v primerjavi z RČN, ki so že dosegle zrelo stanje.

Najpogosteje uporabljene zemljine v RČN so mineralnega izvora (glina, ekspandirana glina, peščene naplavine, usedline) ter organskega izvora (šota).

### 5.3.1.3 Kemijske značilnosti medija

Sestava medija močno vpliva na filtracijo in sorpcijo. V splošnem frakcije gline in mivke omogočajo zaradi večje površine in manjše poroznosti večjo sorptivnost in boljšo filtracijo. Nizka hidravlična prevodnost teh zemljin pa povzroča mašenje sistema, zato je uporaba grušča in peska, kljub slabšim lastnostim sorpcije in filtracije, običajna. Hidravlična prevodnost se spreminja tudi tekom delovanja sistema z razvojem in odmiranjem korenin in rizomov, rastjo biofilma ter obarjanjem in akumulacijo odpadnih delcev.

Vrsto zemeljskih materialov lahko razberemo na podlagi velikosti zrn (Preglednica 6).

Preglednica 6: Premer zrn različnih zemeljskih materialov.

Drobljenec	Grušč	Drobir	Pesek	Glina
Premer zrna v mm	6–120	2–60	0,06–2	0,002

Za posamezne frakcije se odločamo na podlagi granulometrijske sestave, ki jo lahko razberemo iz sejalne krivulje. Položna krivulja pomeni mešan material, strma pa kaže, da je v materialu malo različnih frakcij.

Na podlagi izbire različnih frakcij s pomočjo sejalnih krivulj lahko pripravimo ustrezno dobro premešano mešanico. Različna razporeditev mešanic vzdolž RČN pomeni tudi različno hidravlično prevodnost, kar povzroča neenakomerno prehajanje vode skozi sistem. Posledica takega prehajanja vode je manjša učinkovitost čiščenja, kot jo lahko določimo na podlagi laboratorijskih meritev.

Neposreden mehanizem čiščenja s pomočjo ustreznega medija vključuje filtracijo suspendiranih delcev in patogenih bakterij, sedimentacijo suspendiranih delcev v praznih prostorih medija ter sorpcijo raztopljenih organskih snovi, patogenih bakterij, dušika, fosforja, težkih kovin ter obarjanje fosforja in kovin.

Posredna vloga medija se kaže kot medij za rast in razvoj rastlin ter površina za naselitev mikroorganizmov.

Vloga medija je pomembna predvsem za odstranjevanje fosfata, delno pa igra tudi vlogo pri zmanjšanju vsebnosti dušika v odpadni vodi. Vlogo medija pri zmanjšanju dušika so raziskovali na nezasajenih sistemih, kjer je pomembna predvsem fizikalna sedimentacija in postopno izmenjavanje nitrifikacije in denitrifikacije s pomočjo mikroorganizmov, kar privede do izgube dušika v plinski obliki. Izhajanje plina pa običajno poteka le, če je pH večji od 7,2.

V začetku razvoja RČN so v večini primerov kot medij uporabljali zemljo, ki zdaj, zaradi specifičnih lastnosti, služi le kot dodatek. Vsebnost zemlje v mešanici medija lahko igra pomembno vlogo pri čiščenju odpadne vode. Reaktivnost zemlje določata površina delcev in elektrostatična nabitost. Naboj različnih zemljin je povezan z velikostjo delcev in

vsebnostjo organskih snovi v zemlji. Večina zemljin ima negativni naboj na površini delcev, ki je odgovoren za elektrostatske vezi s pozitivno nabitimi kationi. Ti z ionsko vezjo povezani kationi na površini delcev se lahko zamenjajo z drugimi kationi. Tako poteka ionska izmenjava. Kapaciteta ionske izmenjave določa zmožnost zadrževanja kationov pri različnih zemljinah, ki pa se lahko močno razlikuje. Celotna kapaciteta elektronske nabitosti se deli na stalno in pH odvisno.

Vlogo dodajanja zemljine frakcije v mešanico medija lahko povzamemo z naslednjimi glavnimi procesi:

- ionska izmenjava,
- specifična adsorpcija in obarjanje,
- tvorba kovinskih kompleksov.

Dodajanje zemljine frakcije v mešanico medija močno znižuje hidravlično prevodnost in povzroča mašenje sistema. Mnogi načrtovalci RČN je zato ne uporabljajo. Vloga zemljine frakcije pa ni samo v procesu čiščenja, temveč tudi omogoča boljšo rast koreninskega in rizomskega sistema v globino, s čimer je celotna aktivnost rizosfere večja. Zato izbira frakcij z večjim premerom delcev ni priporočljiva.

Jasno je, da je izbira ustrezne mešanice medija ob upoštevanju hidravličnih lastnosti izjemnega pomena pri postavljanju RČN, vendar pa je izbira težka. Dobro poznavanje hidravličnih lastnosti določene mešanice medija je nujno, vendar pa se fizikalne in kemijske lastnosti sčasoma in v povezavi z drugimi nosilci čiščenja lahko tako močno spremenijo, da ne potrdijo pričakovane učinkovitosti čiščenja.

Kemijske značilnosti izbranega medija so predvsem odvisne od kemijske reaktivnosti površine delcev. Kemijsko reaktivnost določa površinski električni naboj, ki je mnogo večji pri glinenih kot pri organskih medijih.

a) ionska izmenjava

Pri izbiri medija je sposobnost kemijske vezave pomembna lastnost, bodisi da gre za tvorbo kemijskih vezi, fizikalnega raztapljanja ali ionsko izmenjavo. V RČN pogosto prisotne huminske snovi vsebujejo večje število hidroksilnih in karboksilnih funkcionalnih skupin, ki delujejo kot kationski izmenjevalci. Huminske snovi imajo tudi sposobnost tvorbe micelov z negativno nabito površino, na katero se vežejo protoni ali drugi pozitivno nabiti ioni. Miceli predstavljajo obliko liganda, ki lahko veže kovinske ione. Vezavo dvovalentnega kovinskega iona na ligand (L) ponazarja sledeča enačba:



Število ligandov na gram suhe snovi je določeno s številom kovinskih ionov, ki se lahko vežejo na popolnoma protonizirani vzorec, kar ustreza nosilnosti ionske izmenjave. Na vezavo kovinskega iona na ligand močno vpliva pH, saj prisotnost vodikovega iona premakne enačbo (7) proti ionski obliki kovine. Tako se na primer sorpcija za Cu zmanjša 45-krat, če pH preide iz 6,5 na vrednost 1,2. Na močvirski medij se vežejo tudi anionske skupine, kot je  $PO_4^{3-}$ . Fe in Al prisotna v mediju pomenita povečanje števila sorptivnih površin. Izsuševanje organskega materiala uničuje lastnosti visoko hidratiranih micelskih

struktur in s tem sorptivno sposobnost medija, kar moramo upoštevati pri izračunavanju hidravličnih obremenitev zlasti pri vertikalnih gredah RČN, kjer je kot medij prisotna šota.

#### b) reakcije oksidacije in redukcije

Močvirski ekosistem predstavlja ugodno okolje za kemijske pretvorbe zaradi prisotnosti različnih oksidacijskih stanj. Koncentracija prostega kisika z globino hitro upada v večini poplavljenih medijev kot posledica metabolizma mikroorganizmov, ki pretvarjajo organsko snov in kemijskih oksidacij reduciranih snovi. Padeč prostega kisika se odraža v naraščajočem negativnem redoks potencialu (U). Tako ima medij v močvirskih sistemih redoks potencial od  $-300$  mV do  $+700$  mV. Nitratna redukcija je običajno zaključena pri  $+220$  mV. Redoks potencial številnih močvirskih sistemov močno upada z globino medija, saj je glavni vir prostega kisika difuzija iz atmosfere v vrhno plast močvirja. Značilen gradient koncentracije raztopljenega kisika v močvirskem mediju kaže nekaj centimetrov tanko oksidirano površinsko plast faze medij/voda, pod njo pa plast z naraščajočimi reduciranimi pogoji. Globina slednje je odvisna od količine biološke in kemijske aktivnosti. Vertikalni redoks potenciali se spreminjajo v odvisnosti od razdalje od vira obremenitve sistema. V primeru, da je sistem pokrit z ledom, redoks potencial preskoči na mnogo nižje vrednosti, kar pomeni, da sulfatna in metanogena redukcija prevladujeta celo v zgornjih plasteh. Redoks potencial je v RČN značilno nižji kot v naravnih močvirjih, saj so RČN sistemi z visoko porabo kisika zaradi prisotnosti povečanih koncentracij ogljikovih in dušikovih spojin. Dogajanja, kot je obarjanje fosforja, lahko povzročijo tudi nenadno znižanje redoks potenciala, kar pojasni veliko spremenljivost v delovanju RČN.

#### 5.3.1.4 Biološki vplivi na medij v RČN

Biološke, kemijske in fizikalne značilnosti v močvirskem ekosistemu so izrazito soodvisne. Mikroorganizmi prispevajo k opaznemu porastu organskega ogljika v mediju, predvsem zaradi medsebojne tekmovalnosti za omejene, hitro spreminjajoče se vire energetske bogatih snovi. Njihova rast in odmiranje imata velik učinek na nadaljnji potek večine kemijskih snovi, prisotnih v sistemu. Poleg mikrobne združbe, močvirske rastline s svojo rastjo, odmiranjem korenin, rizomov in tvorbo odmrlega rastlinskega materiala prav tako vplivajo na spremembo strukture medija.

#### a) mikrobni procesi v mediju RČN

Mikrobni procesi imajo pomemben vpliv na kemizem večine močvirskih medijev. Pomembne pretvorbe dušika (N), žvepla (S), ogljika (C) ter železa (Fe) so posledica delovanja mikroorganizmov v odvisnosti od koncentracije določene snovi, redoks potenciala in pH medija.

#### b) makrofiti – močvirske rastline

Vpliv makrofitov na medij v RČN se kaže s spreminjanjem hidravlične prevodnosti in kemizma medija zaradi rasti korenin in rizomov. Odmrli rastlinski material prispeva organski C, N, P spojine na površino RČN sistemov v obliki celuloze, hemiceluloze, lignina, proteinov in fosfolipidov. Močvirske rastline omogočajo tudi prehajanje plinov iz ozračja v čistilni sistem ter obratno. S plini napolnjen erenhim zmanjšuje difuzijski upor plinov ter omogoča oksidacijo medija v neposredni bližini korenin in rizomov ter hkrati

povratno difuzijo ogljikovega dioksida (CO<sub>2</sub>), vodikovega sulfida (H<sub>2</sub>S) in metana (CH<sub>4</sub>) v ozračje. Koreninski sistem je poleg tega izjemnega pomena za fizikalne in kemijske pogoje v mediju. S prodiranjem korenin in rizomov skozi pore medija prihaja do fizikalnih premikanj delcev, zlasti finejših frakcij medija. Po odmrtnosti podzemnih delov makrofitov je medij prepleten z vlaknasto mrežo odmrlih korenin in rizomov, ki prispevajo k povečanju pornega volumna medija in s tem k stabilnosti hidravlične prevodnosti. Korenine in rizomi vplivajo tudi na kemizem sistema, saj prihaja v neposredni okolici koreninskega sistema do povečane izmenjave raztopljenih snovi, ki se lahko vgradijo v biomaso podzemnih ali nadzemnih delih rastlin in se z odmiranjem ponovno sprostijo v močvirski ekosistem. S tem se spreminja tudi kemizem medija.

Medij, ki napolnjuje RČN, se v mnogih pogledih razlikuje od sedimentov v naravnih močvirjih:

- 1) Povečana dejavnost številnih mikroorganizmov, gliv, alg, nevretenčarjev vodi k povečanju deleža detrita v RČN.
- 2) V RČN lahko prihaja do obarjanja kovinskih hidroksidov ali sulfidov, ki predstavljajo dodatek k mineralni sestavi medija.
- 3) Povečana vsebnost raztopljenih snovi se v RČN odraža kot povečana električna prevodnost.

V primeru uporabe naravnih medijev za izgradnjo RČN s podpovršinskim tokom bo sistem po približno 2 letih začel delovati kot zrelo močvirje. Nekateri nosilci biomase kot so steklo in drugi silikatni materiali, ki pomagajo odstranjevati elektrone, pa lahko pospešijo biokemijske procese.

Številne navedene procese v naravnem ali močvirskem ekosistemu ni moč nadzorovati, vendar pa jih je pri vsakem načrtovanju RČN potrebno predvideti in upoštevati, če želimo doseči pričakovano učinkovitost naprave.

## 5.3.2 Mikroorganizmi

### 5.3.2.1 Vrste mikroorganizmov in njihove potrebe

Učinkovito čiščenje odpadne vode s pomočjo RČN je močno odvisno od razpoložljive površine, ki jo za naseljevanje mikroorganizmov nudita medij in koreninski ter rizomski sistem močvirskih rastlinskih vrst. Le nekateri mikroorganizmi, ki se naseljujejo na teh površinah, so patogeni, večina pa igra pomembno vlogo pri pretvarjanju organskih in anorganskih snovi.

Mikroorganizmi vključujejo predvsem bakterije, viruse, plesni, alge, med katerimi bakterijam pripisujejo največji pomen pri razgradnji odpadnih voda. Bakterije sodijo v deblo *Protophyta*, razred *Schizomycetes* za človeka najpomembnejšima rodovoma *Eubacteriales* in *Pseudomonadales*.

Mikroorganizme ločimo glede uporabe različnih virov energije in na podlagi različnih področij, ki jih naseljujejo.

Glede različne izrabe energetskih virov ločimo:

- a) fototrofe, ki kot vir energije uporabljajo svetlobo in se delijo na:
  - fotolitotrofe (avtotrofe), kjer je vir ogljika CO<sub>2</sub>,
  - fotoorganotrofe (heterotrofe), kjer je vir ogljika organska snov.
  
- b) kemotrofe, ki dobivajo energijo s pomočjo oksidacijsko-redukcijskih procesov in se delijo na:
  - kemolitotrofe (avtotrofe), kjer je vir ogljika CO<sub>2</sub>,
  - kemoorganotrofe (heterotrofe), kjer je vir ogljika organska snov.

Glede različnih področij naseljevanja ločimo:

- a) suspendirane mikroorganizme,
- b) epifitske mikroorganizme,
- c) mikroorganizme na površini sedimentne plasti,
- č) mikroorganizme v interfazi zrak, voda.

Glede porabe kisika ločimo še:

- a) aerobne mikroorganizme, ki potrebujejo za svoje delovanje kisik in so odgovorni tudi za nitrifikacijo,
- b) anaerobne mikroorganizme, ki delujejo v odsotnosti kisika in so odgovorni za proces denitrifikacije.

Večina bakterij je kemoorganotrofna, zato za rast in razvoj potrebujejo vodo, minerale, molibden, mangan, kobalt, vitamine, vir ogljika in vir dušika.

Kemijske pretvorbe organskih in anorganskih snovi s pomočjo mikroorganizmov so v tesni povezavi z encimi kot biološkimi katalizatorji in so zato odvisne od dejavnikov v okolju. Med temi dejavniki so najpomembnejši temperatura, pH, koncentracija soli in količina raztopljenega kisika.

Ustrezna temperatura povzroča hiter porast aktivacijske stopnje toplotno občutljivih celičnih komponent oziroma povečano gibanje molekul, ki omogočajo hitrejšo rast mikroorganizmov. Najustreznejše temperaturno območje za delovanje mikroorganizmov je med 20 in 30 °C.

Aktivnost encimov se razlikuje, saj nekateri delujejo pri pH od 3 do 4, medtem ko so drugi aktivni v bazičnem območju (pH 11–12). Večini mikroorganizmov pa ustreza nevtralno območje pH.

Porast koncentracije NaCl poveča bakterijsko rast z naraščajočim ozmotskim pritiskom do optimalne točke. Previsoka koncentracija soli pa inhibira rast bakterij.

#### *Patogeni mikroorganizmi*

Zmanjšanje števila patogenih bakterij poteka na račun adsorpcije in sedimentacije na delcih medija, strupenost težkih kovin, antibiotikov, ki jih tvorijo rastlinske korenine in bakteriofagov.

Tako je odstranjevanje patogenih mikroorganizmov v sistemu RČN učinkovito, vendar pogosto ne dosega predpisane vrednosti, zato je potrebna končna dezinfekcija.



### *5.3.2.2 Razmnoževanje in rast mikroorganizmov v RČN*

V ustreznih pogojih, ki jih lahko ustvarimo v RČN, poteka razmnoževanje mikroorganizmov hitro. Pri razmnoževalni krivulji lahko ločimo lag fazo ali fazo adaptacije, log fazo ali fazo hitre rasti ter stacionarno fazo. Faza hitre rasti se lahko ustavi ob pomanjkanju kisika, hranilnih snovi ter akumulaciji strupenih snovi in kovin. Če primanjkuje tudi vir ogljika, lahko mikroorganizmi odmrejo.

Čas, ki je potreben, da se število celic mikroorganizmov podvoji, imenujemo regeneracijski čas in je odvisen od količine hranilnih snovi, temperature, pH in kisika. To moramo upoštevati pri pogojih, ki jih želimo ustvariti v RČN.

### *5.3.2.3 Vpliv mikroorganizmov na procese v RČN*

Večina organskih snovi se pretvori v CO<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O z aerobnimi bakterijami, ki so suspendirane v vodi ali pritrjene na površini medija ter koreninskega in rizomskega sistema rastlin. Tako glavno zmanjšanje organskih snovi in s tem zmanjšanje BPK<sub>5</sub> poteka na račun razgradnje ogljikovih organskih snovi, pri čemer mikroorganizmi porabljajo kisik. Zato je aktivnost teh organizmov povezana s sproščanjem kisika iz podzemnih delov rastlin.

Za razgradnjo dušikovih spojin so odgovorne heterotrofne amonifikacijske bakterije, ki oksidirajo organske snovi in sproščajo amoniak in kemoavtotrofne nitrificirajoče bakterije, ki oksidirajo amoniak do nitrita in nitrata. Pri tem obe skupini prav tako porabljata kisik.

Količina raztopljenega kisika je zato tisti dejavnik, ki lahko omejuje razgradnjo organskih snovi. Zato učinkovitost, s katero močvirne rastlinske vrste sproščajo kisik iz koreninskega sistema, in difuzija kisika iz zraka, neposredno vplivata na razporeditev aerobnih področij. Razporeditev kisika tako kaže, da obstajajo tudi anaerobna področja, kjer denitrificirajoče bakterije razgrajujejo nitrat, ki kot akceptor elektronov nadomešča kisik, pri čemer se tvori plin N<sub>2</sub>, ki uhaja iz sistema.

Razporeditev in neposredna bližina različnih skupin bakterij tako določa naravo in učinkovitost čiščenja.

Mikroorganizmi soustvarjajo fizikalne, kemijske in biološke pretvorbe ter na ta način spreminjajo sestavo vode v sistemu RČN. Med nosilci čiščenja odpadne vode so v RČN so najpomembnejše bakterijske združbe in glive.

Bakterije ločujemo po morfologiji, kemijskih značilnostih, prehranjevalnih navadah in metabolizmu.

Večina pomembnih kemijskih pretvorb, ki potekajo s pomočjo mikroorganizmov, je odvisna od encimskega delovanja. Pretvorbe so odvisne tudi od zunanjih dejavnikov, kot so temperatura, vsebnost raztopljenega kisika, pH in koncentracija kemijskih snovi. V RČN je mikrobna aktivnost bolj pomembna od velikosti združbe. Pokazatelji, ki se uporabljajo za ovrednotenje mikrobne aktivnosti, so povečane ali zmanjšane koncentracije raztopljenega kisika, amonijevega dušika in organskega ogljika.

### 5.3.3 Močvirske rastline

#### 5.3.3.1 Uporaba in vloga različnih močvirskih rastlinskih vrst

Različna učinkovitost RČN je povezana z uporabo različnih vrst močvirskih rastlin, ki se med seboj razlikujejo v razrasti podzemnega dela, občutljivosti na spremembe v okolju, v sposobnosti privzema hranilnih in strupenih snovi, produktivnosti ter drugih manj pomembnih lastnosti za delovanje RČN.

Pomembna vloga močvirskih rastlin v sistemu RČN je, da:

- so vključene v proces filtracije in adsorpcije suspendiranih in usedljivih snovi,
- zaradi difuzije kisika preko koreninskega sistema prezračujejo rizosfero ter s tem omogočajo oksidacijske procese ter razvoj aerobnih mikroorganizmov,
- nudijo površino za pritrjanje mikroorganizmov,
- s svojimi izločki (antibiotiki) zmanjšujejo število patogenih bakterij,
- povečujejo hidravlično prevodnost z razvojem ter odmiranjem bogatega prepleta rizomov,
- in korenin, ki tvorijo mikropore, privzemajo organske in anorganske snovi.

Pri izbiri rastlin moramo zato upoštevati njihovo prilagodljivost na spremembe in strupenost v okolju, odpornost na bolezni, veliko sposobnost privzemanja snovi, sproščanja kisika in visoke produkcije biomase z globoko razvitim koreninskim in rizomskim sistemom ter uspešne konkurence z drugimi rastlinskimi vrstami.

Uporabo močvirskih rastlin so začeli intenzivneje raziskovati leta 1967 (de Jong, 1978; Lawson, 1985).

Najpogosteje uporabljene močvirske rastlinske vrste v procesu čiščenja so vrste družine *Poaceae* z rodом *Phragmites*, *Juncaceae* z rodом *Juncus*, *Typhaceae* z rodом *Typha* (Slika 16), *Cyperaceae* z rodovi *Scirpus*, *Schoenoplectus* in *Carex*.



Slika 16: Rogoz (*Typha*)

Na življenje v poplavnih področjih so se te rastline prilagodile v glavnem z razvojem zračnega tkiva alierenhima, adventivnih korenin in lenticel, ki omogočajo prezračevanje podzemnih delov rastlin ter z različnimi metaboličnimi potmi. Močvirske rastline kljub

prilagoditvam na anoksične pogoje najbolj uspevajo v prezračeni pogojih, saj že malenkostna redukcija kisika lahko privede do glikolize, ki povzroči anaerobno respiracijo. Ob tem pride do povečanja koncentracije etanola, ki je pokazatelj pomanjkanja kisika. Etanol je za rastline strupen, vendar metabolične prilagoditve omogočajo preživetje. Sposobnost prezračevanja je pomembna tudi za rast aerobnih mikroorganizmov, ki s svojim metabolizmom potencialno nevarne snovi pretvorijo v nestrupene.

Uspešnost rasti rastlin je močno povezana tudi s pretokom vode skozi sistem, saj le-ta vpliva na količino kisika in razpoložljivost hranilnih snovi.

Sposobnost privzema anorganskih in organskih snovi v okolju se med različnimi vrstami razlikuje. Privzem poteka s pomočjo koncentracijskega gradienta, ki služi kot pokazatelj razpoložljivosti teh snovi v okolju. Tako so ugotovili, da je *Scirpus validus* najučinkovitejši za zmanjšanje N, P, K, Cl in fenola. *Schoenoplectus lacustris* pa je učinkovit za odstranjevanje težkih kovin. Za mnoge rastline (*Typha sp.*, *Glyceria maxima*) je omejujoč dejavnik količina dušika. Povečana koncentracija dušika v okolju omogoča privzem tudi drugih hranilnih snovi, kot je to na primer fosfor. Pri rodu *Scirpus* in *Juncus* so odkrili metabolično razgradnjo klorofenola, pentaklorofenola, cianogena, analina in drugih ogljikovodikov, ki poteka v podzemnem delu rastlin. Privzem je močno odvisen tudi od pH in oksidacijsko-redukcijskih reakcij, ki vplivajo na topnost strupenih kovin.

V splošnem rastline z visoko produkcijo lahko za določen čas privzamejo večjo količino hranilnih snovi. Dolgoročno je ta proces omejen, saj zlasti ob propadanju rastlin prihaja do sproščanja večjih količin teh snovi, ki jih lahko zaznamo na iztoku iz RČN.

Različna učinkovitost rastlinskih vrst pa je v povezavi tudi z razvojem celega vegetacijskega sestoja.

#### 5.3.3.2 Navadni trst (*Phragmites australis* – najpogosteje uporabljen helofit v RČN)

Navadni trst (Slika 17) je med vsemi vrstami najbolj uporabljen helofit in zato tudi najbolj raziskan. Je kozmopolitska zelo prilagodljiva vrsta z najobsežnejšimi rastišči v Evropi in je tipična rastlina nižin z izjemno visoko produktivnostjo, čeprav ga najdemo tudi do 3000 m nadmorske višine (Haslam, 1973).



Slika 17: Sestoj navadnega trsta na bregu reke Dragonje.

Trst tolerira široka območja vodnega režima in različne vrste medija, občutljiv pa je na kompeticijo na sušnih in evtrofnih predelih. Najbolj produktivna področja imajo nivo vode 50 cm nad površino ali 20 cm pod površino zemlje z rahlo kislim pH. Navadni trst ima visoko produkcijo, ki doseže tudi do 50 t/ha/leto nadzemne suhe teže oziroma 85 t/ha/leto celotne suhe teže. Rast in razvoj navadnega trsta sta odvisna od temperatur v okolju. Nizke temperature spomladi povzročajo zakasnel razvoj poganjkov, poleti pa zmanjšano rast. Poganjki so zelo občutljivi na zmrzal, ki je najbolj nevarna spomladi, vendar pa se poškodovani poganjek nadomesti z enim ali več stranskimi. S tem se gostota trsta poveča. Rast trsta je ob ugodnih temperaturah sprva zelo hitra, nato pa se upočasni. Med rastjo črpa hranilne snovi iz bogatih rizomskih rezerv. Obdobje največje rasti traja od dva do tri mesece, nato pa se rast po cvetenju, ki se navadno pojavi v avgustu, ustavi. Rast se zmanjša v sušnih, vetrovnih in senčnih pogojih ter ob povečani slanosti, ki ne sme presegati 2,1 % NaCl. Končna velikost in stopnja rasti sta odvisni od premera poganjajočega brsta, ki določa bazalni premer odraslega poganjka. Dejansko velikost določijo dejavniki v okolju. Velikost trsta dosega od 15 cm do 6 m (delta Donave) in preko 200 cm na Blejskem jezeru.

Gostota trsta prav tako določa produkcijo in se navadno giblje med 60 do 250 poganjkov/m<sup>2</sup>. Evtrofna voda poveča višino trsta do 50 cm, gostoto pa le od začetka, saj kasneje postanejo poganjki večji in redkejši. Pomembna je zasenčenost te rastline, ki zmanjša gostoto trsta iz 100 na 10 poganjkov in višino iz 1 do 0,75 m ter cvetenje od 10 do 0 %. Listne lamine ali ploskve lista so kratko živeče in so ob cvetenju zelene le na zgornji polovici stebela. Listni indeks, ki izraža listno površino, podano na površino tal, ob sestoji trsta je kljub temu visok in dosega vrednosti do 3,7 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> na Blejskem jezeru (Gaberšček-Kopušar in Martinčič, 1982). Potencialna stopnja rasti poganjkov v splošnem tako upada z nizkimi temperaturami, pomanjkanjem hranilnih snovi, slanostjo, kompeticijo, nepričakovano daljšo izsušitvijo, zmanjšano prezračevnostjo, boleznijo, zasenčenostjo in odpadnim rastlinskim materialom, ki prekrije površino tal v sestoji. Dobra lastnost odmrlega rastlinskega materiala pa je, da nudi zaščito pred ekstremnimi temperaturami.

K visoki produkciji prispeva tudi stopnja razvitosti rizomskega in koreninskega sistema. Ločimo tri glavne tipe stebela:

- Horizontalne rizome, ki omogočajo, da trst naseljuje nova področja in navadno sega do globine 100 cm. Iz njih izraščajo nerazvejane ali slabo razvejane korenine, ki segajo do globine 10 do 30 cm.
- Vertikalne rizome, ki rastejo navzgor od horizontalnih rizomov in so odgovorni za debeljenje trstnega sestoja. Iz nodijev ali kolenc teh rizomov poganjajo tanjše korenine, ki tvorijo goste koreninske mreže.
- Zračne poganjke, ki so čvrsti in neupogljivi. Vertikalni rizom požene prvo leto en zračni poganjek in do šest v drugem letu. V tretjem letu se število poganjkov zmanjša.

Intenzivna rast rizomov poteka poleti, v obdobju fotosintetske aktivnosti, medtem ko za korenine ločimo dve različni obdobji intenzivne rasti. Prva poteka spomladi in je povezana s površinskimi koreninami. Druga je povzročena z globoko prodirajočimi koreninami, ki se razraščajo jeseni iz horizontalnih rizomov. Rizomska in koreninska biomasa se spreminja od 2 do 5 kg/m<sup>2</sup>. Razmerje med nadzemnimi in podzemnimi deli suhe teže pa se giblje od 1,0 do 9,9 in je nižje v evtrofnih sestojih.

Spremenljiv hidrološki režim stimulira rast rizomov in korenin. Visoke temperature podzemno maso znižujejo. Podzemna biomasa predstavlja običajno do 50 % nadzemne biomase. Glavni privzem hranljivih snovi poteka do globine 0,5 m z razvejanimi

koreninami zgornjih rizomov, kjer se škodljive organske snovi lahko metabolizirajo. Hranilne snovi se jeseni prerazporedijo (translocirajo) iz stebel in listov v rizomski sistem, kjer se shranjujejo preko zime in omogočajo rast poganjkov v zgodnji pomladi. Tako se prerazporedijo elementi, kot so N, P, K, Mg, medtem ko Na, Ca, Fe, Mn ostanejo v odmirajočih listih. V vlažnih in evtrofnih področjih lahko pride do spiranja K, N, P, Mg iz listov še predno se le-ti prerazporedijo v rizomski sistem.

#### 5.3.3.2.1 Sposobnost sproščanja kisika pri navadnem trstu

Rizomski in koreninski sistem igra pomembno vlogo tudi pri prezračevanju rizosfere in je pri tej vrsti tudi najbolj raziskana (Armstrong, 1978; Brix, 1993). Kisik vstopa preko listov in prehaja vzdolž gradienta parcialnega tlaka po obsežno razvitem erenhimu do rizomov in korenin, kjer neporabljen kisik difundira v rizosfero. Lenticele ali prezračevalni kanali na nadzemnih delih omogočajo boljšo povezavo aerenhima ali zračnega tkiva, ki je značilen za vodne rastline z ozračjem. Aerenhim lahko zavzema celo 60 % notranjega prostora rastline. Kisik omogoča respiracijo podzemnih delov rastline ter oksidacijo fitotoksičnih metabolitov v mediju ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ , nižji alkaloidi, nižje maščobne kisline, etilen in reducirani ioni ( $\text{Mn}^{2+}$ )).

Količino sproščenega kisika v rizosfero vrednotijo od 0,02 do 47 g  $\text{O}_2/\text{m}^2/\text{dan}$ , saj se mnenja o količini kisika, ki difundira v rizosfero, razlikujejo. Difuzija kisika je odvisna od vrednosti difuzijskega koeficienta in premera erenhima. Na stopnjo sproščanja kisika vpliva tudi starost korenin oziroma propustnost povrhnjice. Zaradi staranja rastline prihaja v močno razvitem koreninskem sistemu namreč do večje porabe kisika ob večji respiratorni stopnji. V nekaterih primerih prenos kisika zadostuje samo za potrebe koreninskega sistema in ne za dodatno prezračevanje rizosfere, medtem ko se v drugih primerih RČN pojavlja presežek kisika, ki se sprošča v neposredni bližini koreninskega sistema. Pretok kisika skozi erenhim je večji, kot bi bil samo na osnovi difuzijskih procesov. Izkazuje se, da konvektni pretok, sprožen s temperaturnimi razlikami in vlažnostnimi gradienti delov rastline, vendarle omogoča večji prenos kisika do koreninskega sistema ter hkrati omogoča tudi razvoj daljših korenin. Notranji tok  $\text{O}_2$  v močvirski rastlini poteka s pasivno molekularno difuzijo kot posledica koncentracijskih gradientov znotraj erenhima in s konvektivnim tokom, ki poteka zaradi toplotnih sprememb plinov ob prehodu skozi notranjost rastline. Konvektni tok navadno povzročajo fizikalni dejavniki, kot sta temperaturna sprememba in izhlapevanje vode, kar povzroča spremembe v pritisku med notranjostjo rastlinskega tkiva in obdajajočim zrakom. Imenujemo ga tudi termalna transpiracija. Konvektni tok lahko povzroča tudi veter, tako da le-ta poteka tudi v odmrlih ali poškodovanih steblih, tako ponoči kot pozimi, ko je temperaturni gradient ali pritisk vodnih molekul zanemarljiv. Konvektni tok povzroča tudi razlika v topnosti med  $\text{O}_2$  in  $\text{CO}_2$ .

Glavna procesa, ki sta odgovorna za sproščanje kisika iz rizosfere, sta torej termalna transpiracija, ki pomeni termoozmotsko prehajanje kisika na podlagi temperaturnih razlik v rastlini in z razliko v tlakih povzročenimi s spremembo vlage. Kljub stalnemu konvektivnemu toku pa je njego vloga v primerjavi z difuzijo  $\text{O}_2$  manjšega pomena.

Največje sproščanje kisika poteka na apikalnem delu korenine in se z razdaljo od tega dela zmanjšuje. Neenakomerno sproščanje kisika iz korenine meritve sproščenega kisika še dodatno otežuje. Širok razpon izmerjenih količin sproščenega kisika je posledica različnih raziskovalnih tehnik in sezonske dinamike rastlin. Kljub različnemu ovrednotenju razpoložljivega kisika v rizosferi pa so si vsi edini (Gersberg in sod., 1989) na podlagi merjenja redoks potenciala, da prezračevanje rizosfere poteka in pomembno prispeva k

anorganski in organski oksidaciji in k mozaični razporeditvi aerobnih in anaerobnih področij v trstni koreninski rizosferi. K izmenjavi plinov prispevajo tudi posušena stebila, po katerih poteka pretok O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> in drugih plinov ter omogoča boljšo prezračevnost zemlje.

Preživetje močvirskih rastlin v poplavnem okolju pomeni torej ohranjanje ravnotežja med omejenimi količinami kisika in prilagoditvami rastline.

Zaradi fenotipske in genotipske različnosti vsebujejo močvirske rastlinske vrste različno vsebnost posameznih elementov. Sestava se lahko spreminja znotraj posamezne vrste tudi zaradi staranja, fizikalnih in kemijskih značilnosti okolja. Natančna analiza sestave in masnih bilanc je nujna v tistih sistemih, kjer s košnjo odstranjujejo hranilne snovi. V splošnem vsebuje združba različnih močvirskih vrst posamezne elemente v sledečem razmerju; C (41 %), kalij (K) (2,6 %), N (2,3 %), kalcij (Ca) (1,34 %), natrij (Na) (0,51 %), žveplo (S) (0,41 %) in P (0,25 %). Preostala biomasa vsebuje O, H in mikroelemente. S košnjo *Typha latifolia* lahko odstranimo največ 1200 kg N/ha in 375 kg P/ha. Visoka sposobnost privzemanja hranilnih snovi je zato navduševala številne raziskovalce in projektante RČN, vendar se stroški košnje in s tem vzdrževanja na ta način občutno povečajo. Brix (1994) ugotavlja, da bi za učinkovito čiščenje N in P le z močvirskimi rastlinami potrebovali 50 m<sup>2</sup>/PE z razliko od običajnih 2–3 m<sup>2</sup>/PE. Poleg tega z višanjem koncentracije hranil narašča rastlinska rast, ki pa se pri visokih koncentracijah hranil ustavi. Nadaljni privzem poteka z "luxury uptake" (luksuzni privzem) do stopnje, ko se začno pojavljati fitotoksični odzivi na izrazito visoke koncentracije hranilnih snovi.

Odmrli rastlinski material se tvori preko celega leta, vendar prihaja šele ob zaključku rastnega obdobja do močnega povečanja količine organskega materiala v RČN in s tem porabe kisika, pri čemer poplavnost sistema povečuje spiranje anorganskih in organskih snovi iz rastlinskega tkiva. Pri tem se posamezni elementi sproščajo v naslednjem vrstnem redu K > magnezij (Mg) > P > N > Ca. Seveda pa se razgradnja odmrlega rastlinskega materiala med posameznimi vrstami razlikuje glede na kemijsko sestavo in strukturo rastlinskega tkiva.

#### 5.3.3.2.2 Kompeticija

Navadni trst je uspešen v kompeticiji z drugimi rastlinami, ki so občutljive na spremenljiv vodni režim, pomanjkanje prezračevnosti, boleznih in zajedalcev. Zato so pomembne lastnosti za uspešno kompeticijo: sposobnost zasenčevanja, tolerantnost na zasenčevanje, tvorba odpadnega materiala, alelopatski izločki (alelokemikalije; maščobne kisline, lipidi, alifatske spojine, antibiotiki in p.), ki delujejo zaviralno na razvoj druge rastline, način razmnoževanja, rastna oblika, stopnja rasti in genetski potencial. Navadni trst lahko zaradi velike gostote in višine uspešno zasenčuje druge vrste, medtem pa je občutljiv na odpadni rastlinski material in na alelopatske izločke. Ti izločki zmanjšujejo tvorbo brstov, rast poganjkov ter povzročajo tanjšanje listov, kar se odraža v zmanjšani gostoti in višini. Trst oslabi tudi osuševanje rastnega medija, saj pride do razvoja zajedalcev in širjenja drugih rastlinskih vrst (*Glyceria maxima*, *Agrostis stolonifera*, *Urtica dioica*, *Epilobium hirsutum*, *Filipendula ulmaria*, *Typha sp.*, *Schoenoplectus lacustris*, *Salix cinerea*). Zato je pomembno, da v RČN ne pride do prekomernega izsuševanja medija in da širjenje drugih vrst pravočasno ustavimo.

### 5.3.3.2.3 Uporaba trsta

Trst nima večjega pomena, uporabljajo pa ga na Nizozemskem, Angliji, Skandinaviji in v delti Donave. Večinoma se uporablja v celulozni industriji, saj vsebuje 27–69 % celuloze, njegova uporaba pa je tudi širša. Trst se uporablja za prekrivanje hiš, kot podlaga za glinene omete v ekoloških hišah, ograje, brežine, steljo, polderje pri izsuševanju tal, zaščito pred vetrom in zmrzaljo v poljedelstvu ter v sintetični tekstilni industriji.

Močvirske rastline ali makrofiti so zaradi svojih lastnosti pomembni sestavni del RČN. Močvirske rastline utrjujejo površino sistema, omogočajo dobre pogoje za filtracijo, preprečujejo tvorbo erozijskih kanalov, mašitev, predvsem sistema z vertikalnim tokom vode, upočasnjujejo tok vode, pozimi pomenijo izolacijo, s svojo veliko površino omogočajo naselitev številnim mikroorganizmom, kar je povezano tudi s sproščanjem kisika ter asimilirajo hranilne snovi, kovine ter doprinesejo k okolju prijaznemu izgledu.

V eutrofičnih močvirjih je letni doprinos biomase makrofitov  $5000 \text{ g/m}^2/\text{leto}$ , ki ob koncu sezone zaradi propadanja skozi celo rastno sezono pade na  $2500 \text{ g/m}^2/\text{leto}$ . Vsebnost dušika v živi biomasi je v naravnih močvirjih ocenjena na 2 %, kar pomeni letni privzem  $100 \text{ g/m}^2$ , pri čemer se skoraj polovica ob propadu rastlin ponovno spere nazaj v vodo. V aerobnih pogojih in višji temperaturi je sproščanje še izrazitejše, pri čemer se P zaradi topnosti hitreje sprošča od N.

Raziskave čiščenja v RČN brez ali z močvirskimi rastlinskimi vrstami so pokazale, da je delovanje naprav v prisotnosti rastlin boljše, predvsem zaradi sposobnosti privzemanja hranilnih snovi. Učinkovito asimilacija snovi v rastlinsko tkivo pa poteka le v manj obremenjenih sistemih in je pomembna le za nekatera onesnaževala, kot so na primer dušikove, fosforjeve snovi, fenoli in težke kovine. Privzem v rastlinsko tkivo je temperaturno odvisen in je zato različen v različnih letnih obdobjih. Za druga onesnaževala so mikrobne, kemijske pretvorbe in fizikalni dejavniki pomembnejši.

Preglednica 7: Povzetek glavnih funkcij makrofitov v rastlinskih čistilnih napravah

Deli makrofita	Vloga pri čiščenju
Rastlinsko tkivo na zraku	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zmanjševanje svetlobe – zaviranje rasti fitoplanktona</li><li>• Vpliv na mikroklimo – izolacija v času zime</li><li>• Zmanjšanje moči vetra – zmanjšanje nevarnosti resuspenzije</li><li>• Estetski izgled</li><li>• Kopičenje zaloge hranil</li></ul>
Rastlinsko tkivo v vodi	<ul style="list-style-type: none"><li>• Filtracija – odstranitev večjih delcev</li><li>• Zmanjševanje hitrosti vodnega toka – povečana sedimentacija, manjša možnost resuspenzije sedimenta</li><li>• Povečanje aktivne površine za pritrjevanje mikroorganizmov</li><li>• Izločanje fotosintetiziranega kisika – povečanje aerobne razgradnje</li><li>• Privzem hranil</li></ul>
Rizomi in korenine v mediju	<ul style="list-style-type: none"><li>• Stabilizacija površine sedimenta – zmanjšanje erozije</li><li>• Preprečevanje mašenja medija v vertikalnih sistemih</li><li>• Sproščanje kisika povečuje razgradnje procese (nitrifikacija)</li><li>• Privzem hranil</li><li>• Izločanje antibiotikov</li></ul>

Poglobljeno razumevanje strukture in funkcije posameznih nosilcev čiščenja je osnova za načrtovanje in učinkovito delovanje sistemov RČN. Različne vrste mikroorganizmov delujejo v širokem območju fizikalnih in kemijskih pogojev. Zaradi različnosti vrst in niš, ki jih naseljujejo, lahko močvirski sistem deluje kot čistilni sistem.



## 5.4 HIDROLOGIJA, HIDRAVLIKA IN KINETIKA PROCESOV V RČN

### 5.4.1 Hidrologija

Je eden od pomembnejših faktorjev pri oblikovanju in izgradnji RČN, saj RČN navadno prekrivajo večje površine in so zato pod vplivom evapotranspiracije in padavin. Kroženje energije, ki povzroča evapotranspiracijo, kaže energetska bilanca (Kadlec, 1989):

$$Q_m + Q_{ai} = Q_e + Q_h + Q_s + Q_{ao} \quad (8)$$

$Q_m$  – neto radiacija

$Q_{ai}$  – vtok

$Q_{ao}$  – iztok

$Q_s$  – akumulacija

$Q_h$  – toplotne izgube

$Q_e$  – zgube zaradi izhlapevanja

#### 5.4.1.1 Evapotranspiracija

Izgube atmosfirske vode so posledica izhlapevanja vode iz zemljin ter transpiracije rastlin.

Morfološke in anatomske lastnosti navadnega trsta, kot sta velika listna površina in hitra fotosinteza, omogočajo veliko transpiracijo ( $7,5 \text{ l/m}^2/\text{dan}$ ), ki ob visokih temperaturah celo presega izhlapevanje na prosti vodni površini. Velika transpiracija namreč omogoča nemoteno fotosintezo tudi ob zelo visokih temperaturah ( $46 \text{ }^\circ\text{C}$ ), saj se listi ob tem hladijo in imajo celo do  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  nižjo temperaturo, kot je temperatura zraka.

Gosti sestoji močvirske vegetacije zmanjšujejo evaporacijo z zadrževanjem vlage in z zmanjševanjem vetra, vendar pa celotna evapotranspiracija opazno vpliva na obremenitve iztoka in kaže na potencialni vpliv rastlinske biomase na celotno delovanje RČN.

Evapotranspiracija (ET) namreč upočasni pretok vode, poveča kontaktni čas ter koncentracijo snovi v vodi. V obdobju suhega in vročega poletja se lahko evapotranspirira večina vode v sistemu RČN. Tako z merjenjem kontaktnega časa ne moremo dobiti dejanskega zadrževalnega časa, saj se pretok vode zaradi spreminjajoče se evapotranspiracije močno spreminja.

Evapotranspiracija je zaradi sončnega sevanja podvržena izrazitim dnevno nočnim nihanjem in sezonski dinamiki. Sezonska dinamika evapotranspiracije kaže vpliv sončnega sevanja in vegetacijske rastne sezone. Evapotranspiracija je v glavnem povečana od maja do septembra, največja pa je v juliju in avgustu. Po zaključku rastne sezone odmrli rastlinski material zmanjšuje evaporacijo.

Tako je evapotranspiracija lahko pomemben dejavnik za izgubo vode, kar večinoma vpliva na hidravlični zadrževalni čas in učinkovitost odstranjevanja onesnaževal. V vročem, sušnem sredozemskem podnebjju lahko evapotranspiracija povzroči pretirano izgubo vode iz RČN, zlasti če želimo prečiščeno vodo ponovno uporabiti (zalivanje, splakovanje stranišč, gašenje požarov). Poleg tega visoka evapotranspiracija povečuje koncentracije soli iz odpadne vode, kar bi lahko dodatno negativno vplivalo na ponovno uporabo vode. ET lahko negativno vpliva tudi na odlaganje soli v celicah korenin. Obrambni mehanizem rastlin je odpadanje starejših listov, kar povzroča vračanje snovi v odpadno vodo. Pri RČN v mrzlih klimatskih pogojih je evapotranspiracija močno zmanjšana, zato so površine RČN

večje oziroma so grajene tako, da imajo večjo hidravlično kapaciteto (večja globina, višje brežine, zadrževalniki).

Pri tem manjše RČN kažejo vpliv mikroklima na evapotranspiracijo, vendar še ni nihče določil, do katere velikosti sistema je ta vpliv prisoten. Jezerska evaporacija predstavlja osnovo za oceno evapotranspiracije RČN pri velikosti med 0,1 in 0,4 ha. Vendar z upadanjem gladine vode postanejo energetske bilance pomembnejše, tradicionalne metode za izračunavanje evapotranspiracije pa neustrezne. V času zime, ko je sistem pokrit z ledom ali snegom, je evaporacija zelo zmanjšana, vendar ne doseže ničelne vrednosti. Topljenje snega lahko povzroči tok vode preko ledu in s tem nekaj evaporacije, vendar to ne vpliva na odpadno vodo pod ledom.

Izračuni evapotranspiracije so pri sistemih s podpovršinskim tokom še nekoliko težji, saj pretok vodnih hlapov in toplote skozi gornjo plast medija drugačen kot v RČN z odprto vodno površino. Pri tem je pomembna tudi toplotna nosilnost samega sedimenta. Na podlagi poenostavljenih izračunov avtorja Kadlec in Knight (1996) navajata naslednje vrednosti evapotranspiracije:

RČN zasajena z rogozom (prodnati medij)  $ET = 1,128 \text{ mm/d}$  ( $12 < T(^{\circ}\text{C}) < 25$ )

RČN brez rastlin (prodnati medij)  $ET = 0,075 \text{ mm/d}$  ( $12 < T(^{\circ}\text{C}) < 25$ )

#### 5.4.1.2 Padavine

Za vodno bilanco imajo velik vpliv tudi padavine. Padavine imajo obratni učinek kot evapotranspiracija in povzročajo:

- razredčevanje snovi v odpadni vodi,
- povečanje pretoka ali celo povzročajo površinski tok,
- zmanjšanje časa zadrževanja.

Padavine zmanjšujejo koncentracijo pokazateljev onesnaženosti na iztoku, kar pa lahko zavede pri oceni učinkovitosti delovanja RČN.

Pretok in razpoložljivi porni volumen določajo zadrževalni čas in s tem možne interakcije med posameznimi snovmi v sistemu RČN. Močvirski ekosistemi izgubljajo vodo preko površinskega toka, načrtovanega iztoka in evapotranspiracije. Kljub temu imajo RČN bolj ali manj stalne hidrološke pogoje. Poleg tega predstavljajo RČN močvirske ekosisteme, katerih izgradnja in vzdrževanje je enostavno ter cenovno zelo ugodno. Zato so mnogi avtorji mišljenja, da je njihovo delovanje možno ponazoriti s preprostimi enačbami za hidravlične izračune. Zato navajajo za izračunavanje vodne nosilnosti močvirja, zadrževalnih časov in drugih hidroloških spremenljivk enačbe, na osnovi znanja iz drugih čistilnih sistemov. RČN ne predstavlja čistega vodnega okolja z enakomerno porazdelitvijo mikroorganizmov, temveč so RČN izrazito kompleksni ekološki reaktorji, ki zahtevajo poglobljeno razumevanje dinamike procesov in s tem pogojev, na osnovi česar je možno z izračuni danih hidravličnih enačb le predvideti njihovo delovanje, ne pa podati natančnih vrednosti, s katerimi bi bilo moč določiti učinkovitost njihovega čiščenja.

Osnovo vseh izračunov predstavlja določitev notranjih zalog vode v RČN. V RČN, kjer zaradi položenega vodoodpornega materiala ne prihaja do infiltracije, je možno dotočne in iztočne količine enostavno uravnati s pomočjo ventilov in redukcijskih cevi. V takem sistemu sta tako edina pomembna parametra vodne bilance, ki ju ni možno nadzorovati, padavine in evapotranspiracija. Podatke o padavinah lahko pridobimo iz bližnjih

meteoroloških postaj, zato je evapotranspiracija najtežavnejši parameter, ki se močno spreminja v odvisnosti od tipa sistema, združbe močvirske vegetacije in številnih zunanjih dejavnikov.

#### 5.4.1.3 Hidrološke spremenljivke

##### *Hidravlična obremenitev*

Simbol:  $q$

Enota: cm/d, m/d, m/leto

Definicijska enačba:  $q = Q/A$  (9)

A – površina sistema ( $m^2$ )

Q – pretok ( $m^3/d$ )

Hidravlična obremenitev ne upošteva načina porazdelitve vode v sistemu. Pri vertikalnih sistemih, ki imajo prekinjen tok, je hidravlična obremenitev enaka povprečnemu dotoku v določenemu času.

##### *Globina RČN*

Simbol:  $h, d$

Enota: m, cm

Definicijska enačba:  $h = L W H/A$  (10)

H – globina vode (m), W – širina grede (m), L – dolžina grede (m)

Izračun globine zahteva v velikih sistemih natančen posnetek dna močvirskega ekosistema v povezavi z oceno višine vodnega stolpca, saj so ugreznitve pogost pojav v RČN.

##### *Volumen vode (efektivni volumen)*

Simbol:  $V$

Enota:  $m^3$

Definicijska enačba:  $V = \varepsilon A H$  (11)

$\varepsilon$  – volumen vode = poroznost ( $m^3/m^3$ )

V – volumen med dnem sistema in vodno gladino ( $m^3$ )

Poroznost medija je težko določljiva. Za RČN se običajno giblje za mešanice peska in gramoza v vrednostih od 30 do 45 %. Med delovanjem RČN koreninski sistem makrofitov zapira pore določenih frakcij, kakor mašijo pore medija tudi akumulirane organske in mineralne snovi. Tako se začno pojavljati gradienti prehoda vode v vertikalni smeri, kakor tudi v horizontalni smeri. Pri tem koreninski sistem zapira predvsem pore v zgornjih plasteh, medtem ko se organske in mineralne snovi vsedajo predvsem na dno gred. Meritev pornega volumna je težavna in nedorečena, zato so uporabljene vrednosti pornega volumna predvsem teoretične. Poskusi z izsuševanjem so bili zaradi zadrževanja rezidualne vode neuspešni, dočim je polnjenje gred še nepreizkušena in neuveljavljena metoda.

### *Teoretični zadrževalni čas*

Simbol: t  
Enota: dan  
Definicijska enačba:  $t = V/Q = \varepsilon A H/Q$  (12)

Pri uporabi enačbe za izračunavanje zadrževalnega časa pogosto prihaja do očitne nejasnosti povezane z izbiro pretočne vrednosti. Mnogi avtorji uporabljajo za vrednost Q dotočni pretok, ne glede na meritve iztočnega pretoka, drugi izračunavajo zadrževalni čas s pomočjo povprečka med dotočnimi in iztočnimi vrednostmi (Kadlec in Knight, 1996). Poleg tega se teoretični izračun zadrževalnega časa izrazito razlikuje od dejanskega zadrževalnega časa, saj izračun temelji na postavki, da se v sistemu RČN enakomerno izmenjuje celotna vodna masa. To predstavlja veliko napako pri izračunavanju, kar se odraža v vrednostih dejanskega zadrževalnega časa, ki so bistveno manjše od izračunanih. Tako je razvidno, da v sistemih RČN resnično obstajajo področja, ki niso vključena v redno izmenjavo vodne mase.

Zvezo med teoretičnim zadrževalnim časom in hidravlično obremenitvijo kaže naslednja enačba:

$$q = \varepsilon H/t \quad (13)$$

Hidravlična obremenitev je obratno sorazmerna s teoretičnim zadrževalnim časom za podano globino grede RČN. Hidravlična obremenitev vključuje tudi stični čas med odpadno vodo in izbranim medijem.

### *Dejanska hitrost*

Simbol: v  
Enota: m/d  
Definicijska enačba:  $v = Q/(\varepsilon A)_c$  (14)

$(\varepsilon A)_c$  – površina por pravokotna na smer pretoka vode ( $m^2$ )

Dejansko hitrost merimo navadno s pomočjo barvila.

### *Teoretična hitrost*

Simbol: u  
Enota: m/d  
Definicijska enačba:  $u = Q/A_c$  (15)

$A_c$  – površina medija pravokotna na smer pretoka vode ( $A_c = W H$ ) ( $m^2$ )

Odnos med dejansko in teoretično hitrostjo kaže naslednja zveza:

$$u = \varepsilon v \quad (16)$$

### *Pretok vode skozi sistem*

Izračunavanje pretoka vode skozi porozni medij je relativno enostavno, v praksi pa so pri zagotavljanju podpovršinskega toka pogosto prisotne težave. Večina težav je posledica nepravilnega načrtovanja sistema, nekatere težave pa so posledica spremenjenih pogojev v sistemu. Poplavljen RČN s podpovršinskim tokom vode deluje kot sistem s površinskim tokom, ki je le nekoliko manj učinkovit, a še vedno dovolj, da naprava kljub preplavitvam relativno dobro deluje. Tako RČN kljub nekaterim napakam pri načrtovanju ali spremenjenih pogojih niso izgubile zaupanja uporabnikov.

RČN so dinamični sistemi, vendar z izračunavanjem povprečij postanejo spremembe v zadrževanju vode manj pomembne, kakor tudi periodične spremembe evapotranspiracije in padavin. Namreč jano je, da padavine povečujejo pretok, medtem ko ga evapotranspiracija zmanjšuje.

Z upoštevanjem globine dobimo naslednjo enačbo:

$$Q = v \varepsilon W H \quad (17)$$

Enačba izhaja iz Darcyjevega zakona (Smith R.E., 2002) in velja za laminarni tok. Voda v peščenem mediju ima značilno laminarni tok.

Hidravlična prevodnost za določen medij je odvisna od matrike zrn, kot je premer delcev, oblika delcev, poroznost, razporeditev delcev, zavrtost por, specifična površina, in od lastnosti tekočine, ki jo določa gostota, viskoznost in temperatura. Glede na izkušnje in pogoste napake pri izračunavanju hidravlične prevodnosti, je priporočljivo izmeriti hidravlično prevodnost pred vsako postavitvijo RČN.

#### *5.4.1.4 Mašenje sistema*

Mašenje sistema RČN s podpovršinskim tokom je nezaželeno, saj prihaja do preplavljanja, krajšanja zadrževalnega časa in s tem manjše učinkovitosti delovanja. Fin prah, ki ga vsebuje nespran medij, ali dodatni vnosi blata in zemeljske frakcije pri sajenju, močno poslabšajo hidravlično prevodnost medija v RČN. Vendar so to le začetne težave, saj RČN tudi sicer ne ohrani začetne prevodnosti zaradi premikanja delcev in zapolnitve por s koreninskim sistemom, organskim sedimentom, detritom in z biofilmom.

Mašenje se pojavlja predvsem v začetnem delu RČN, kjer prihaja tudi do 10-kratnega zmanjšanja začetne hidravlične prevodnosti. Mašenje na začetku grede je povezano predvsem s povečano mikrobno aktivnostjo in s tem povezanim biofilmom zaradi večje organske obremenitve tega dela.

S časom se hidravlična prevodnost po začetnem zmanjšanju umiri in ostaja enaka preko več let. Razlog za umiritev hidravlične prevodnosti so po mnenju Brix (1994) rast in odmiranje koreninskega in rizomskega sistema močvirskih rastlin, ki hkrati medij rahljajo in puščajo za seboj tubularne pore. Seveda pa je učinkovitost odvisna od vrste močvirske rastline in rasti pogojev, zato se pri načrtovanju RČN na to ne moremo zanašati.

Pri RČN, kjer odpadna voda doteka v grede na eni točki, se pogosto v začetnem delu sistema pojavljajo tudi slepe točke oziroma področja brez pretoka vode. Slepe točke so izrazitejše pri nizkih razmerjih med dolžino in širino sistema.

Večina obstoječih RČN ima ravno, ponekod nagnjeno dno. V primeru, da sistem deluje v območju laminarnega toka, brez večjih izgub vode v ozračje in zato pri stalnem vodnem nivoju, hidravlična prevodnost ni več funkcija razdalje od dotoka.

Občasne večje spremembe hidravlične prevodnosti napako še zvišujejo. Zato je osnovni cilj načrtovalcev RČN obdržati vodo pod površino sistema in hkrati zagotoviti koreninskemu sistemu močvirskih rastlin stalen stik z vodo.

#### 5.4.1.5 Masna bilanca

Splošno masno bilanco vode prikazuje naslednja enačba:

$$Q_i - Q_o + Q_c - Q_b - Q_{gw} + Q_{sm} + PA - E_t A = dV/dt \quad (18)$$

A – površina RČN (m<sup>2</sup>)

E<sub>t</sub> – stopnja evapotranspiracije (m/d)

P – padavine (m/d)

Q<sub>b</sub>, Q<sub>c</sub> – izgube, dotok vode preko brežin (m<sup>3</sup>/d)

Q<sub>gw</sub> – prehajanje vode v podzemlje/infiltracija (m<sup>3</sup>/d)

Q<sub>i</sub>, Q<sub>o</sub> – dotok, iztok odpadne vode (m<sup>3</sup>/d)

Q<sub>sm</sub> – stopnja taljenja ledu (m<sup>3</sup>/d)

T – čas (d)

V – porni volumen močvirja (m<sup>3</sup>)

Sezonske spremembe pretoka odpadne vode skozi sistem RČN so odvisne od spreminjanja padavin in evapotranspiracije tekom leta. Padavine in evapotranspiracija so časovno odvisne funkcije, ki povzročajo koncentriranje ali redčenje onesnaževal v odpadni vodi, ko le-ta prehaja preko sistema RČN. Obdobja obilnih padavin povzročajo redčenje onesnaževal ter hkrati vplivajo na zmanjšanje zadrževalnega časa, s čimer se učinkovitost čiščenja slabša.

Meritve kemijske sestave vode na dotoku in iztoku RČN je najobičajnejša metoda za ugotavljanje učinkovitosti delovanja RČN. Tovrstni način pa pogosto zavaja, zato je podajanje masne bilance posameznih snovi bolj primerno. Običajno je masno bilanco težko izračunati zaradi številnih pretvorb in prehajanj snovi iz medija v vodo ali ozračje. Biološki procesi se ponavljajo, zato so najboljše ocene podane skozi sledenje večih let, z upoštevanjem zadrževalnega časa.

Izračunavanje masnih bilanc:

*Vnos mase*

Simbol: M<sub>i</sub>

Enota: g/d, kg/d, kg/leto

Definicijska enačba: M<sub>i</sub> = Q<sub>i</sub>C<sub>i</sub> za dotok (19)

M<sub>o</sub> = Q<sub>o</sub>C<sub>o</sub> za iztok (20)

*Masna obremenitev*

Simbol: m<sub>i</sub>

Enota: g/m<sup>2</sup>/d, kg/ha/d, kg/ha/leto

Definicijska enačba:  $m_i = M_i/a = Q_i C_i/A = q_i C_i$  (21)

Enačba ne upošteva načina distribucije vode v sistemu.

*Stopnja zmanjšanja mase*

Simbol: JA  
 Enota: g/d, kg/d, kg/leto  
 Definicijska enačba:  $JA = M_i - M_o$  (22)

*Specifična stopnja zmanjšanja mase*

Simbol: J  
 Enota: g/m<sup>2</sup>/d, kg/ha/d, kg/ha/leto  
 Definicijska enačba:  $J = m_i - m_o = q_i C_i - q_o C_o$  (23)

*Zmanjšanje koncentracije v odstotkih*

Definicijska enačba: % zmanjšanja koncentracije snovi =  $100 (C_i - C_o)/C_i$  (24)

Tak izračun se najpogosteje uporablja v prikazovanju učinkovitosti delovanja RČN, vendar ne upošteva zadrževalnega časa, redčenja ali koncentriranja določene snovi zaradi padavin ali evapotranspiracije. To napako takega izračuna še povečuje.

*Zmanjšanje mase v odstotkih*

Definicijska enačba: % zmanjšanja mase =  $100 (M_i - M_o)/M_i = 100 (m_i - m_o)/m_i$  (25)

Enačba prav tako ne upošteva zadrževalnega časa, vendar je napaka izračuna manjša kot pri enačbi (21).

*5.4.1.6 Spreminjanje koncentracije onesnaževal ob prehodu skozi sistem*

Kemijske reakcije so v odvisnosti od reakcijskih konstant odgovorne za zmanjševanje koncentracije določenega onesnaževala ob prehodu skozi sistem RČN. Pri tem je izjemnega pomena dolžina časa zadrževanja določene snovi v sistemu, kar ponazarja sledeča enačba:

$dC/dt = -k_v * C^n$  (26)

C – koncentracija onesnaževala (g/m<sup>3</sup>)

k<sub>v</sub> – reakcijska konstanta (1/d)

t – reakcijski čas (d)

n – red reakcije, ki je odvisen od temperature, pH, hranil, kisika...

Pogosto se zmanjšanje onesnaženja poleg zgoraj navedenih enačb izraža tudi z naslednjo enačbo:

$J = k(C - C^*)$  (27)

C – koncentracija onesnaževala (g/m<sup>3</sup>)

C\* – rezidualna koncentracija onesnaževala (g/m<sup>3</sup>)

J – stopnja zmanjšanja koncentracije onesnaževala (g/m<sup>2</sup>/leto)

k – konstanta (m/leto)

Enačba velja na osnovi sledečih predpostavk:

- RČN deluje preko daljšega obdobja
- povprečni pretok se ne spreminja (padavine in evapotranspiracija sta v ravnovesju)
- infiltracija vode v talnico ni prisotna
- onesnaženje iz ozračja ni prisotno
- sistem je pravokotne oblike
- voda prehaja samo v smeri dotok/iztok, povratnega toka ni

Seveda pa je za vsak posamezen primer potrebno določiti vrednost konstante  $k$ .

Obdobja vročega vremena pospešujejo razgradnjo, medtem ko padavine dogajanja zavirajo. Preko daljšega obdobja delovanja se RČN spremeni v mnogih pogledih. Ekosistemske spremenljivke, kot je biomasa makrofitov ali koncentracije hranil, kovin ali drugih strupenih snovi v tkivih, se skozi čas spreminjajo predvsem v odvisnosti spremenljivk okolja, kot so količina padavin, intenziteta sončnega sevanja in temperaturne vrednosti. Spreminjanje delovanja je zlasti pomembno za izračunavanje povprečij vstopnih in iztopnih koncentracij onesnaževal oziroma učinkovitosti delovanja. Obdobja izračunavanja povprečij morajo biti zato dovolj dolga, zlasti ker spremembe pretoka močno vplivajo na zadrževalne čase snovi v sistemu RČN.

#### *5.4.1.7 Vloga biofilma pri zmanjšanju onesnaženja*

Prehajanje raztopljenih snovi k reakcijskim površinam, prisotnim v biofilmu, difuzija skozi plast vode do površin in nato vstopanje v kemijske reakcije v okviru biofilma, predstavlja nujno dogajanje za vsako posamezno raztopljeno snov v procesu čiščenja. Pri tem je v močvirskih sistemih izjemnega pomena specifična površina biofilma.

Specifična površina biofilma v RČN s podpovršinskim tokom se lahko izračuna na osnovi velikosti delcev medija.

Ob prisotnosti močvirske vegetacije se z odmiranjem rastlin dodatna površina za biofilm povečuje, tako da se vrednost specifične površine biofilma  $a_s$  giblje od 5 do 10. Specifična površina biofilma je tudi izrazito odvisna od letnih obdobj, tako da se vrednost pozimi zaradi večje količine odmrlega materiala poveča za približno 25 %, medtem ko se za enako vrednost poleti zmanjša. Glavno velikost specifične površine biofilma določata količina koreninskega sistema in vrsta medija. Gostota mikroorganizmov je na površini stebra navadnega trsta določena z vrednostjo  $0,6\text{--}11,7 \times 10^7/\text{cm}^2$ . Površina spranega medija nudi površino za razvoj biofilma, vendar pa ni nujno, da je vsa površina v resnici dejavna, še zlasti v zgornji plasti medija, nad nivojem vode. Vsa površina v sistemu RČN torej ni na voljo, zato je učinkovitost sistema v resnici manjša, kot jo podajajo izračuni. Z upoštevanjem koreninskega sistema in spreminjajoče se količine odmrlega rastlinskega materiala se napaka izračuna površine biofilma še povečuje. Omejujoča je tudi razpoložljivost ogljika in kisika, saj morata preiti s površine vode v gredi do površine delcev. Razdalja potovanja obeh reaktantov se lahko tako podaljša, da ne zadošča za preskrbo določenih področij v mediju, s čimer del površin postane nedejaven. Zaradi težavnosti pravih izračunov in preskromnih raziskav na tem področju, dandanes še nimamo podatkov o natančnem prehajanju snovi iz enega področja močvirskega ekosistema v drugega, kakor tudi ne za raztopljen kisik kot najpomembnejšega dejavnika čiščenja. Celoten model masnega prenosa vsebuje neznanke, tako vsebinsko kot matematično,



čeprav omogoča vedno večji vpogled v dejavnike, ki vplivajo na splošne zakone zmanjšanja onesnaženja.

## 5.5 KROŽENJE SNOVI V RČN

### 5.5.1 Ogljik

Procesi, odgovorni za kroženje ogljika, ki najpogosteje potekajo v različnih plasteh RČN, so v aerobnem območju dihanje in v anaerobnem območju fermentacija, metanogeneza, sulfatna redukcija, nitratna redukcija in redukcija Fe.

Anorganske oblike so prisotne v manjši meri, medtem ko organski ogljik zaradi rasti, odmiranja in razgradnje biomase predstavlja velik delež v rastlinah. Produkcija suhe teže nadzemne mase v evtrofičnih močvirjih dosega  $300 \text{ g/m}^2/\text{leto}$ , kar pomeni pri 41 % vsebnosti ogljika v suhi teži močvirskih rastlin  $1230 \text{ g/m}^2/\text{leto}$  oziroma  $34 \text{ kg/ha/d}$  produkcije ogljika, pri čemer se več kot polovica ogljika vrne nazaj v močvirski ekosistem.

Podatkov o delovanju RČN žal še ni dovolj za ovrednotenje kemizma snovi, zato je kemizem navadno predstavljen v obliki korelacij in regresijskih enačb. Taki izračuni pa so lahko varljivi, ker ne upoštevajo hidravlične obremenitve. Zato služijo le kot informativni podatek o delovanju načrtovane naprave. Za ovrednotenje delovanja RČN sledimo naslednjim spremenljivkam: koncentracija sledene snovi na dotoku in iztoku, pretočna vrednost, površina RČN, hidravlična obremenitev, masna obremenitev in stopnja zmanjšanja snovi ob prehodu skozi sistem, izražena v odstotkih zmanjšanja koncentracije snovi ali z zmanjšanjem mase snovi. Kroženje ogljika izražamo s KPK,  $\text{BPK}_5$  ali celokupnim organskim ogljikom, pri čemer je za RČN  $\text{BPK}_5$  najpogostejša vrednost.

Spremembo koncentracije  $\text{BPK}_5$  ob prehodu skozi sistem lahko sicer izračunamo, vendar pa so izračuni negotovi zaradi določanja konstante  $k$ , predvsem zaradi neenakomernih globlin, spreminjajoče se poroznosti in reakcijskih konstant.

Podana vrednost za  $k_v$  je prilagojena na osnovi znanja o bioloških načinih čiščenja z aktivnim blatom, vendar ne ustreza močvirskim ekosistemom, saj so zaradi večje aktivne površine biofilma vrednosti za RČN običajno višje. Iz tega sledi, da je za dinamiko procesov potreben drugačen model izračunavanja učinkovitosti čiščenja, ki pa je v razvoju.

### 5.5.2 Neraztopljene snovi

Ena od glavnih nalog RČN je učinkovito odstranjevanje neraztopljenih snovi. Te snovi se odstranjujejo s kompleksnimi procesi. Majhne hitrosti vode v prisotnosti ustreznega medija in močvirskih rastlin omogočajo učinkovito zadrževanje teh snovi v RČN. Prehajanje neraztopljenih snovi iz vode na medij je pomembno tako s stališča čiščenja kot s stališča nevarnosti mašenja sistema.

Procesi, odgovorni za čiščenje in produkcijo neraztopljenih snovi, so filtracija, kemijsko obarjanje in raztapljanje ter tvorjenje sedimenta. Te procese je težje ovrednotiti, vendar so pomembni, saj doprinesejo k rezidualnim koncentracijam neraztopljenih snovi. Kratkoročne meritve dotočnih in iztočnih koncentracij teh snovi kažejo, zaradi usedanja produkcije in ponovnega raztapljanja, velika nihanja. Pri zrelih RČN se v povprečju preko

daljšega obdobja sledenja kaže stabilnost vhodnih in izhodnih koncentracij raztopljenih snovi.

Kroženje raztopljenih snovi ne moremo točno določiti, zaradi česar obstajajo le ocene vrednosti  $C^*$  (reziduaklne koncentracije), ki se gibljejo od 4,9 do 7 g/m<sup>3</sup>. RČN s podpovršinskim tokom so zaradi številnejših mehanizmov odstranjevanja teh snovi in krajših poti usedanja delcev učinkovitejše od RČN s površinskim tokom odpadne vode. Procesi, kot so filtracija in raztapljanje, ne kažejo temperaturne odvisnosti.

### 5.5.3 pH, kisik, temperatura

Fizikalni in kemijski dejavniki izrazito vplivajo na vse biološke procese v RČN in obratno, mnogi biološki procesi soustvarjajo fizikalne in kemijske pogoje delovanja RČN. Pri tem so najpomembnejši abiotski dejavniki: temperatura, vsebnost kisika in pH. Temperatura se izrazito spreminja preko dneva, letnega obdobja in zemljepisne širine ter močno vpliva na številne kemijske in biološke procese v RČN. Kisik je zaradi omejene topnosti v vodi omejujoč dejavnik delovanja RČN. Vrednost pH je pomembna pri mnogih biokemijskih pretvorbah, saj vpliva na nastajanje ionskih in neionskih oblik kislin, baz, nadzira topnost številnih plinov in trdnih snovi ter prispeva k vsebnosti kationov v vodi in s tem k ionski izmenjavi v RČN.

pH vpliva tako na kemizem kot na biološke procese v RČN. Mnoge bakterije v procesu čiščenja niso sposobne delovati pri pH nižjem od 4 in višjem od 9,5. Denitrifikatorji delujejo najbolje pri pH od 6,5 do 7,5. Nitrifikatorjem najbolj ustreza pH enak ali večji od 7,5. Al fosfat se najbolje obarja pri pH 6,3, medtem ko se Fe fosfat najbolje obarja pri pH 5,3. pH zelo občutljivi so tudi Fe in Al hidroksidi. Amonijev ion se pretvarja v prosti amoniak pri pH nad 7 in pri višji temperaturi. Naboj fosforja je prav tako odvisen od vrednosti pH in s tem njegov kemizem. Organske snovi, predvsem huminske kisline, ki se odlagajo v RČN zaradi rasti, odmiranja in razgradnje močvirskih rastlin, so vir naravne kislosti močvirskih ekosistemov, ki omogoča nevtraliziranje vstopajočih bazičnih snovi.

Pred preplavitvijo sistema se pH medijev giblje od 3 do 10. Po preplavitvi sistema pH pade zaradi aerobne razgradnje, ki sprošča CO<sub>2</sub> v vodo. Začetni padec pH je le prehodni, ki mu sledi premik pH proti nevtralni vrednosti (6,7–7,2), ne glede na kislost ali bazičnost medija.

V okolju s kisikom je prevladujoča reakcija oksidacija ogljikovih in dušikovih spojin. Redukcija nitrata in sulfata poteka v anoksičnem ali rahlo anaerobnem okolju, medtem ko metanogeneza poteka v anaerobnih razmerah. Koncentracija raztopljenega kisika v RČN se spreminja v odvisnosti od temperature vode, topnih soli in biološke aktivnosti. Z večanjem slanosti se vsebnost raztopljenega kisika v odpadni vodi zmanjšuje.

Kisik vstopa v RČN preko listov močvirskih rastlin in prehaja vzdolž gradienta parcialnega tlaka po obsežno razvejanem aerenhimu do rizomov in korenin, kjer kisik, ki se ni porabil za respiracijo korenin, difundira v rizosfero. Kisik torej omogoča respiracijo podzemnih delov močvirskih rastlin ter oksidacijo fitotoksičnih metabolitov v mediju, kot so (Fe(OH)<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, nižji alkaloidi, nižje maščobne kisline, etilen, reducirani ioni (Mn<sup>2+</sup>)). Le nekaj mikronov stran od korenin in rizomov pa potekajo reakcije redukcije. Vmesni in končni produkti reakcij se med obema področjema izmenjujeta s pomočjo difuzije. Odmrta in odlomljena stebela prav tako tvorijo zračne poti za izmenjavo plinov. Tako kisik prehaja h koreninam, medtem ko se CO<sub>2</sub> in CH<sub>4</sub> vračata nazaj v ozračje.

Difuzija kisika iz ozračja v vodo je glavni mehanizem vnosa kisika v čistilni sistem. Korenine in rizomi postanejo s časom nepropustni za difuzijo kisika v rizosfero, dejaven ostane le apikalni del, zato prihaja do velikih razlik med meritvami sproščanja kisika v laboratorijskih raziskavah in v RČN.

Številni biokemijski procesi so temperaturno odvisni. Dnevno nihanje temperature vode v RČN je posledica nihanja sončnega sevanja, ki se spreminja glede na letno obdobje, hitrosti vetra, relativne vlage, zračnih temperatur in tipa RČN. Prisotnost suhe zgornje plasti medija pomeni za prehajanje toplote in izhlapevanje vode dodatno oviro in hkrati izolacijo v zimskih razmerah. Izolacijo pri nižjih temperaturah predstavlja lahko tudi led, sneg ali odmrli rastlinski material, tako da RČN deluje relativno učinkovito tudi v zimskem času. RČN lahko deluje tudi, če 10–30 cm zgornje plasti medija zamrzne. V takih primerih so grede globlje in dosegaajo od 0,8–0,9 m globine. Sistem lahko izoliramo tudi z namernim nastankom ledu, ki ga povzročimo z dvigom vodne gladine.

#### 5.5.4 Kroženje dušika

Pri zmanjševanju vsebnosti dušika sta najpomembnejši aktivnost mikroorganizmov in rastlinski privzem.

##### 5.5.4.1 Kroženje dušika v povezavi z mikroorganizmi

Dušik ima kompleksen biogeokemijski krog s številnimi pretvorbami, ki zavzemajo sedem različnih valentnih stanj (od  $5^+$  do  $3^-$ ). Pretvorba dušika je povezana z mikrobo aktivnostjo, ki je pod vplivom redoks stanja oziroma prisotnega kisika. Organski dušik se mineralizira do  $\text{NH}_4^+$ .  $\text{NH}_4^+$  je v reduciranem področju stabilen in se lahko adsorbira na površino sedimenta, kjer ga lahko zamenjajo Mn in Fe ioni ali pa ga uporabijo rastline in mikroorganizmi.

V področju s kisikom aerobne kemoavtotrofne bakterije (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*) oksidirajo amoniak do nitrita in nitrata. Poraba amoniaka v plasti, kjer je potekala nitrifikacija, povzroči, da amoniak ponovno difundira v to področje zaradi koncentracijskega gradienta. Nitrat je v reduciranem področju nestabilen in se hitro zmanjšuje na račun asimilacije, denitrifikacije in izpiranja. To ponovno povzroči difuzijski tok nitrata iz področja s kisikom v reducirano področje. Proces nitrifikacije povečujeta visoka temperatura in količina kisika ter pH med 8 in 9. Fenol, cianin in analin pa so za nitrifikacijske bakterije strupeni. V reduciranem področju poteka denitrifikacija s pomočjo anaerobnih bakterij (*Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Escherichia*, *Bacillus*, *Micrococcus*), ki reducirajo nitrat do  $\text{N}_2$ . Redoks potencial, pH, vsebnost vlage, zadostna količina vira ogljika in temperatura vplivajo na stopnjo nitratne redukcije. Tako je pri  $\text{pH} < 6$  denitrifikacija močno zavrta.

Postopni procesi mineralizacije, nitrifikacije in denitrifikacije so odgovorni za kroženje dušika. Izgubljanje dušika iz RČN se tako vrši preko denitrifikacije, izhlapevanja  $\text{NH}_3$ , difuzije skozi erenhimatske strukture in na račun izpiranja. Izhlapevanje amoniaka se poveča, če je pH enak ali večji od 7,5, ob visokih temperaturah in nizki zmogljivosti izmenjave kationov s frakcijo zemlje. Potek procesov pri kroženju dušika in učinkovitost čiščenja pa sta v tesni povezavi z obremenitvijo.

#### 5.5.4.2 Vloga rastlin pri kroženju dušika

Mnenja o prispevku rastlinskih vrst s pomočjo privzema dušika se v znanosti močno razlikujejo. V splošnem lahko zaključimo, da lahko privzem rastlin doprinese okoli 10 % k zmanjšanju vsebnosti dušika v odpadni vodi. Vloge rastlin ne priznavajo zlasti zato, ker prihaja v procesu razgradnje odmrlega rastlinskega materiala do spiranja elementov, ki ponovno povečajo onesnaženost odpadne vode na iztoku. Vloga rastlinskega privzema pa je enako nepomembna za zmanjšanje vsebnosti dušika v odpadni vodi, kot je proces izhlapevanja in izgubljanja partikularnega dušika, zato ostaja vloga mikroorganizmov najpomembnejša. Privzem dušika se giblje od 150 do 200 mg/m<sup>2</sup>/dan, čeprav ne smemo spregledati spiranja dušika nazaj v odpadno vodo ob koncu vegetacijske sezone. Na podlagi ovrednotenja posameznih nosilcev čiščenja s pomočjo biomase, lahko zaključimo, da rastline privzamejo okoli 50 % dotočnega dušika. Rastlinske vrste namreč tekmujejo za razpoložljiv dušik z nitrifikacijskimi in denitrifikacijskimi bakterijami, kar dokazuje tudi nizka vrednost anorganskega dušika (0,10 mg/l) v odpadni vodi. Pri tem je bistvenega pomena že prej omenjena obremenitev sistema, saj rastline učinkovito tekmujejo z mikroorganizmi le ob nizkih vrednostih. Vloga privzema pa je lahko po ocenah veliko višja in dosega 60 %, zato so trditve o majhnem prispevku rastlinskega privzema pogosto povezane z nedosledno izvedenimi meritvami.

Nadzor nad pretvorbami dušikovih spojin zaradi vpliva na kisikove razmere in strupenosti v vodnem okolju predstavlja največjo težavo in hkrati izziv v načrtovanju čistilnih sistemov. V RČN neprestano potekajo pretvorbe iz anorganskih oblik v organske in nazaj. Poleg tega različne oblike dušikovih spojin prehajajo od enega do drugega mesta s pomočjo fizikalnih mehanizmov, kot so usedanje delcev, difuzija raztopljenih oblik dušikovih spojin, vnos iz ozračja s padavinami in prahom, translokacija z močvirskimi rastlinami, odpadanje rastlinskih delov, izhlapevanje, sorpcija na medij, migracija organizmov. Pri kroženju amoniaka so najpomembnejši fizikalni mehanizmi: izhlapevanje, razgradnja rastlinske biomase ter adsorpcija na medij RČN. Izguba amoniaka s pomočjo izhlapevanja predstavlja v RČN približno 5–10 %. Pri razgradnji rastlinske biomase je pomembno oceniti čas, ki je potreben, da se iz odmrlega rastlinskega materiala začno sproščati dušikove spojine.

Poleg fizikalnih mehanizmov, ki so odgovorni za premeščanje dušikovih spojin, potekajo še naslednje pretvorbe, kot so amonifikacija (mineralizacija), nitrifikacija, denitrifikacija, fiksacija, asimilacija in anamoks (anarobna oksidacija amoniaka), kjer se amoniak pretvori v plinsko obliko dušika. Stopnja amonifikacije se v poplavnih pogojih zmanjša in je odvisna od pH in temperature. Temperaturni optimum se giblje od 40 do 60 °C, kar je izven območja delovanja RČN. pH optimum se giblje od 6,5 do 8,5. Nitrifikacija je dvostopenjski proces, kjer je tvorba nitrata omejena z dinamiko počasnejšega prvega koraka. Stehiometrično izračunana poraba kisika v procesu nitrifikacije je 4,6 g O<sub>2</sub>/g NH<sub>3</sub>-N, ki je zaradi prispevka nekaj O<sub>2</sub> in CO<sub>2</sub> ob sintezi celic v resnici nekoliko nižja (4,3 g O<sub>2</sub>/g NH<sub>3</sub>-N). Za učinkovito nitrifikacijo koncentracija raztopljenega kisika naj ne bi bila manjša od 2 mg/l. Nitrifikacija znižuje pH vode, saj se za vsak mg NH<sub>3</sub>-N/l sprosti 1,98 mola H<sup>+</sup>. Nitrifikacija najbolje poteka pri pH med 7,5–8,5 pri temperaturi od 3–5 °C. Proces nitrifikacije se ustavi pri pH < 6.

Združba nitrifikatorjev je v RČN številna, vendar biomasa združbe še ni bila povsem določena, ker so spremenljivke enačb za izračun nitrifikacije iz drugih čistilnih sistemov za RČN težko določljive predvsem zaradi:

- težko določljive specifične površine za naselitev nitrifikatorjev,
- pritrjene in ne suspendirane biomase,
- kompleksnosti nastajanja in pretvarjanja (mineralizacija, nitrifikacija, rastlinski privzem, propad in razgradnja močvirskih rastlin).

Načeloma je možno predvidevati stopnjo nitrifikacije le na osnovi podatkov o delovanju določene RČN. Na osnovi delovanja izbranih RČN je razvidno, da 0,05 g nitrifikatorjev/m<sup>2</sup> zadostuje za učinkovito delovanje RČN. Pri tem večina nitrifikatorjev naseljuje koreninski sistem močvirskih rastlin in ne medij RČN ter dosega vrednosti od 10<sup>3</sup>/g do 10<sup>4</sup>/g. Pri tem mora RČN delovati najmanj 6 mesecev, da se pogoji v sistemu ustalijo in omogočajo uspešno nitrifikacijo. Podobnost med nitrifikacijo in denitrifikacijo omogoča denitrifikatorjem prehajanje iz anaerobnega v aerobni metabolizem. Zaradi pojavljanja mikroskopskih anaerobnih področij znotraj biofilma poteka denitrifikacija v RČN tudi ob nizkih koncentracijah kisika.

Za učinkovito denitrifikacijo je zelo pomemben tudi zadostni vir C. Za denitrifikacijo 1 g nitrata je potrebno 2,47 g metanola ali drugega vira ogljika. Denitrifikacija je najučinkovitejša pri razmerju CH<sub>3</sub>OH : NO<sub>3</sub> = 2,5. Nitrat, ki se tvori v procesu nitrifikacije, difundira v anaerobna območja RČN, kjer vstopa v proces denitrifikacije. Denitrifikatorji so v RČN številčnejši kot nitrifikatorji, in sicer od 10<sup>5</sup>/g v jeseni in zimi ter 10<sup>6</sup>/g poleti in pomladi. Tako kot nitrifikatorji tako tudi denitrifikatorji naseljujejo predvsem koreninski sistem močvirskih rastlin. Nitratni privzem v rastlinsko biomaso je manj pomemben od privzema amoniaka, ki pa lahko postane pomemben v z nitratom bogatih vodah oziroma pri zmanjšanih koncentracijah amoniaka.

Denitrifikacija je temperaturno odvisen proces, saj temperatura pogojuje difuzijo nitrata v anaerobna območja RČN. Denitrifikacija najbolje poteka pri temperaturi med 33–50 °C, vendar lahko poteka tudi pri temperaturi manjši od 5 °C. Optimalni pH denitrifikacije je okoli 7, kar pomeni, da je nevtralno okolje RČN izredno ugodno za proces denitrifikacije. Stopnja denitrifikacije se zmanjša pri pH pod 6 in nad 8. Denitrifikacijo pospešuje prisotnost Mo in Se, ki imata vlogo pri encimskih procesih. Strupeni vplivi so redkejši kot pri nitrifikaciji.

Tako kot za nitrifikacijo izračunavanje stopnje denitrifikacije s pomočjo običajnih enačb drugih čistilnih sistemov za RČN ni primerno.

Fiksacija N<sub>2</sub> v RČN zaradi prisotnosti amonijevega dušika ne poteka ali je zanemarljiva v primerjavi z drugimi pretvorbami dušikovih spojin.

Asimilacija je povezana s številnimi procesi, ki pretvarjajo anorganske oblike dušika v organske za gradnjo biomase organizmov. Glavni asimilacijski obliki dušika sta amoniak in nitrat, pri čemer je amoniak zaradi svoje reducirane oblike pogostejši. Prisotnost amoniaka namreč zavira produkcijo nitrit in nitrat reduktaze. V odsotnosti amoniaka in pomankanja vira ogljika močvirske rastline privzamejo od 70 do 90 % celotne količine nitrata in je zato njihova vloga pogosto podcenjena.

Poleg rastlin poteka privzem in pretvorba amoniaka v aminokislino tudi s pomočjo avtotrofnih in heterotrofnih mikroorganizmov, pri čemer za vsakih 100 enot asimilirane C potrebujejo celice 10 enot N.

Večina biomase organizmov po določenem času odmre in se razgradi, kar je kritično za kroženje N oziroma odstranjevanje s pomočjo RČN. Del N se sprosti nazaj v odpadno vodo, del vstopi v aerobne in anaerobne procese ali se prerazporedi (translocira) v rizome in korenine. Ob propadu korenin in rizomov se sprosti še preostali del N.

C\* je za amoniak in nitrat enaka nič, za celokupni dušik pa je vrednost C\* ocenjena na 1,5 mg/l. Pri obremenitvah večjih od 20 mg/l celokupnega dušika je vrednost C\* zanemarljiva.

Za izračune dolgoročnega zmanjševanja koncentracije amonika s pomočjo RČN je možno le, ko postanejo spremembe dotočnih in iztočnih vrednosti zanemarljive in s tem razlike v zadrževalnih časih. Izkušnje z delovanjem RČN kažejo, da je možno dobro učinkovitost zmanjšanja N snovi doseči predvsem z:

- učinkovitim predčiščenjem,
- z veliko površino RČN ( $A > 5 \text{ ha}/1000 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

Dane enačbe izračunavanja učinkovitosti zmanjšanja N snovi sicer upoštevajo glavne dejavnike, ki vplivajo na pretvorbe N, vendar pa so pretvorbe tudi pod vplivom številnih nedoločljivih dejavnikov, ki jih pri izračunavanju težko upoštevamo. Zaradi težko predvidljivega delovanja so RČN pogosto večje kot to zahtevajo procesi.

#### 5.5.5 Kroženje fosforja

Pri kroženju ima najpomembnejšo vlogo medij in manjše rastline. Vrednotenja vloge mikroorganizmov pri vgrajevanju P v njihovo biomaso pa se med seboj razlikujejo.

##### 5.5.5.1 Vloga medija

Kroženje fosforja se v osnovi močno razlikuje od kroženja dušika. Fosfor se v zemljinah pojavlja s  $5^+$ -valenčnim stanjem, saj so druge oblike nestabilne. Kroženje fosforja je pod vplivom povezav med redoks potencialom, pH, Fe, Al, Ca ionov, ki so prisotni v zemljinah. Ob nizkih vrednostih pH se anorganski fosfor adsorbira na Fe in Al hidroksid in se obarja kot netopni Fe ali Al fosfat. Lahko se obarja tudi kot Ca fosfat, vendar samo v bazičnih pogojih. V reduciranih pogojih se  $\text{Fe}^{3+}$  reducira do  $\text{Fe}^{2+}$ , pri čemer se iz Fe fosfata sprošča fosfor. Tako lahko večja vsebnost Fe fosfata v zemljinah, ki jih uporabimo v sistemu, povzroči opazen porast koncentracije fosforja na iztoku. Proces sproščanja fosforja poteka tudi iz Al in Ca fosfatov v povezavi z različnimi vrednostmi pH. Poleg obarjanja pa je pomembna za zmanjšanje koncentracije P v odpadni vodi tudi površina adsorpcije na medij in rastlinsko tkivo. Pri adsorpciji je najpomembnejša izmenjava ligandov, kjer fosfat zamenja vodo ali hidroksilne skupine na površini Fe in Al hidroksida. Večina raziskav procesa odstranjevanja P kaže, da adsorpciji navadno sledi počasno obarjanje netopnega fosfata. Tako je za zmanjšanje vsebnosti fosforja zelo pomembna prisotnost Fe in Al oksidov ter hidroksidov,  $\text{CaCO}_3$ , organokovinskih kompleksov in vsebnost gline v mediju, ki ga uporabljamo v procesu čiščenja z RČN.

Učinkovitost zmanjšanja vsebnosti P je tudi močno odvisna od obremenitev s P in vrste odpadne vode. Pri  $5,0 \text{ g/m}^2/\text{leto}$  obremenitve s P sistemi delujejo s 65–95 % učinkovitostjo, medtem ko se je učinkovitost zmanjšala na 30–40 %, če so bile obremenitve večje kot 10–15  $\text{g/m}^2/\text{leto}$ . Adsorpcija na medij poteka počasi. Pri obremenitvi 5,0 mg P/l je po 24 urah adsorpcija le 35 %.

Začetna učinkovitost RČN pogosto dosega 90 %, vendar pa se medij že v 2–4 letih lahko nasiti s P do ravnotežja, ko je dotočna vrednost P enaka iztočni vrednosti P. Adsorpcijsko kapaciteto grušča ocenjujejo na 25 mg/kg, vendar pa so iztočne vrednosti za P vedno večje od pričakovanih zaradi spreminjajočega se zadrževalnega časa, ki je dejansko vedno krajši, kot je predvideno.

#### 5.5.5.2 Vloga rastlin

Dolgoročna vloga vegetacije je predvsem pretvarjanje anorganskega P v organski P, čeprav ima manjšo vlogo tudi rastlinski privzem. Povečanje vsebnosti P v nadzemnih delih rastlin so izmerili pri cvetočih poganjkih. Vrednosti prevzema P se običajno gibljejo med 30 do 40 mg /m<sup>2</sup>/dan, vendar pa je podobno kot za N pomembno spiranje P nazaj v vodo ob propadu rastlinskega materiala ob koncu jeseni. Spiranju se je možno izogniti s košnjo, ki podaljša sposobnost odstranjevanja P z RČN.

P, kot najbolj omejujoč mikroelement močvirskih ekosistemov, je povzročil, da se je v različnih ekosistemi razvil učinkovit mehanizem zadrževanja in kroženja P. Dotok odpadne vode ruši ravnotežje elementov v ekosistemu, zato je učinkovitost RČN odvisna od sposobnosti prilagajanja na nove razmere. Odstranjevanje P je težavna naloga vsake čistilne tehnologije in RČN pri tem niso izjema.

#### a) fizikalno kemijske pretvorbe P v RČN

Fosfor, ki vstopi v močvirski sistem, se pretvori iz organske v anorgansko obliko in tvori kemične komplekse z organskimi in anorganskimi ligandi, ki se adsorbirajo ali obarjajo v močvirskem ekosistemu. P tvori značilne komplekse z Al, Fe, Ca, Mg ioni v aerobnih predelih sistema, pri čemer se v kislem okolju P veže z Al in Fe in v bazičnem s Ca in Mg ioni. Reducirajoči pogoji povzročajo hidrolizo s Fe in Al vezanega P, redukcijo Fe fosfata, povečano raztapljanje Ca fosfata, mineralizacijo in s tem sproščanje P. Ob prisotnosti prostih sulfidov zaradi sulfat reducirajočih pogojev, se tvori Fe sulfid, s čimer je vezava P z Fe onemogočena. V anaerobnih predelih P tako postaja dosegljiv za močvirske rastline ali se odstrani iz sistema s pomočjo iztoka. V RČN potekajo torej mnoge pretvorbe P, med katerimi je dolgoročno pomembno le obarjanje oziroma vezava na medij. RČN so zato za zmanjševanje P najučinkovitejše v prvih letih delovanja, ko je medij s P še nezasičen. Adsorpcija na površino medija je torej odvisna od mnogih dejavnikov, kot so vsebnost Al, Fe, Ca, Mg ionov, velikosti delcev, poroznosti, redoks potenciala, pH, ionsko izmenjevalne kapacitete, aerobnih in anaerobnih pogojev, hidrologije in vsebnosti organske snovi, pri čemer je prisotnost Al oksidov najpomembnejši. Za učinkovito čiščenje je med P : Al potrebno doseči razmerje 0,4 : 0,7.

#### b) vgradnja v biomaso

V primerjavi s pretvarjanjem P, ima vgradnja P v mikroorganizemsko in rastlinsko biomaso le manjši pomen. Bakterije, kot so *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Aerobacter*, imajo v aerobnih pogojih sposobnost vgrajevanja P preko potreb celic, kar predstavlja 1–3 % celične suhe teže. P se s pomočjo encima polifosfatkinaze akumulira intracelularno v obliki polifosfatov, ki predstavljajo energetski vir in vir P. V anaerobnem okolju se zaradi privzema ogljikovih snovi in uravnavanja citoplazemskega pH, polifosfati hidrolizirajo, tako da se P ponovno sprosti. Koncentracije P v *Typha latifolia*, rastoče v naravnih močvirjih se gibljejo okoli 0,3 % suhe teže in do 0,5 % v RČN. Na ta način lahko rastline vgradijo v svoje tkivo 30–40 mg/m<sup>2</sup>/dan P. Tako se P kratkoročno odstranjuje s privzemom v rastlinsko tkivo, dolgoročno pa se sprošča nazaj v sistem.

Odstranjevanje P s košnjo je tako kot pri N možno, a je povezano z večjimi obratovalnimi stroški naprave.

Temperatura in sončno sevanje določata intenzivnost fotosinteze, zato sta oba dejavnika pomembna za odstranjevanje P, vendar se neposredni vpliv temperature na zmanjšanje P v RČN ne kaže.

C\* je v sistemih RČN enaka nič. Za k običajno upoštevamo vrednost 11,7 m/leto, ki je bila izračunana na podlagi več kot 90 delujočih RČN. Vrednost k se spreminja glede na strukturo, obliko in predvsem zrelost sistema. Zaradi močnega povečevanja rastlinske biomase v začetnih RČN, je privzem P v tem obdobju namreč izrazit in lahko doseže dvakratno vrednost povprečnega privzema zrele RČN, s čimer se poveča tudi vrednost k. Učinkovitost zmanjšanja vsebnosti P je močno odvisna tudi od obremenitve RČN s P in vrste odpadne vode. Pri 5,0 g/m<sup>2</sup>/leto obremenitve s P sistemi delujejo s 65–95 % učinkovitostjo, medtem ko le 30–40 % pri obremenitvah večjih od 10–15 g/m<sup>2</sup>/leto. Adsorbcija na medij poteka počasi. Pri obremenitvi 5,0 mg P/l je po 24 urah adsorbcija le 35 %.

#### 5.5.6 Kroženje kovin in njihova strupenost

Odstranjevanje kovin poteka s pomočjo mikroorganizmov, medija in rastlin.

##### 5.5.6.1 Kroženje kovin v povezavi z mikroorganizmi

Za normalno delovanje mikroorganizmov so potrebne nizke koncentracije kovin, kot so Mg, Mn, Ca, K, Fe, Co, Cu, Zn in Mo. Cu, Zn in Mo so sestavni deli encimov, Co je prisoten v vitaminu B<sub>12</sub>, medtem ko so Mg, Fe, Mn, Ca in K kofaktorji encimov.

Visoke koncentracije kovin v okolju so pogosto strupene za mikroorganizme in povzročajo zmanjšanje števila celic zaradi odmiranja, podaljševanje lag faze in spremembe morfologije celic. Sposobnost kovine, da vstopi v celično citoplazmo, je pomembno merilo njihove potencialne strupenosti. Podobnost v kemizmu med nujno potrebnimi in strupenimi elementi lahko povzroča akumulacijo strupenih kovin znotraj celice. Strupenost elementov je odvisna od dejavnikov v okolju in se odraža na različne načine. Ob pomanjkanju hranilnih snovi v okolju postane mikroorganizemska celica bolj dovzetna za strupene kovine.

Poznan je tudi vpliv pH, kjer nizka vrednost pH zmanjšuje strupenost s tem, da H<sup>+</sup> ioni tekmujejo s kovinskimi ioni za adsorpcijske površine mikroorganizmov. Pri visokem pH poteka obraten proces. Iz istega razloga zmanjšujejo strupenost tudi helatne spojine, ki vežejo kovinske ione.

Mikroorganizmi imajo različne sposobnosti prilagajanja na strupenost. Rezistenca mikroorganizmov na strupenost je pogojena z dvema mehanizmoma:

- povečana nepropustnost celične stene kot posledica tvorbe zunanje zaščitne plasti;
- biokemijska pretvorba kovine v netoksično obliko (redukcija, oksidacija, metilacija, obarjanje).

Za proces čiščenja odpadne vode je pomembna tudi sposobnost mikroorganizmov za privzem kovin, ki poteka na dva načina:



- privzem v celico, ki je odvisen od metabolizma. Nekateri potencialno strupeni kovinski ioni so nujno potrebni za delovanje mikroorganizmov kot mikronutrienti, vendar pa kljub specifičnosti tega aktivnega privzema lahko v celico vstopijo tudi drugi strupeni ioni,
- vezava kovinskih ionov v ekstracelularni material ali v celično steno. Vezava poteka kot neaktivna adsorpcija kovinskih ionov na nabite celične komponente in je podobna ionski izmenjavi.

Mehanizmi rezistence in aktivnega oziroma neaktivnega privzema kovinskih ionov pri mikroorganizmih tako igrajo pomembno vlogo pri čiščenju specifičnih odpadnih voda s pomočjo RČN. Pri tem pa moramo zagotoviti ustrezne pogoje za rast in razvoj mikroorganizmov.

#### 5.5.6.2 Kroženje kovin v povezavi z medijem

Kovine se lahko vežejo na glineno spodnjo plast, na silikatne minerale, tvorijo komplekse s karbonatnimi minerali, Mn, Fe hidroksidi in sulfidi.

Poleg vloge medija in mikroorganizmov igra vlogo tudi bioakumulacija kovin v rastline.

Soli, kisline, baze, makro in mikronutrienti imajo različno stopnjo pomembnosti za različne življenjske oblike v močvirskem ekosistemu. Soli, kisline in baze v vodi hitro disocirajo in tvorijo ione, ki lahko močno vplivajo na kemizem RČN. Poleg N in P sodijo med makronutriente C, O, H ter K, Na, Ca, Fe, Mg, S, Cl in Si. Med mikronutrienti so najpomembnejše težke kovine.

K, Cl, Na, Si in Mg so v močvirskih ekosistemih zelo mobilni elementi, katerih koncentracija ostaja zaradi nizkih potreb organizmov ob prehodu vode skozi sistem RČN, relativno stalna. K in Cl se zato pogosto uporabljata za sledenje procesov, kot je redčenje zaradi padavin ali koncentriranje snovi zaradi evapotranspiracije.

Številne kovine so za mnoge organizme v nizkih koncentracijah osnovnega pomena, v višjih koncentracijah, ki so pogoste v odpadnih vodah, pa pogosto strupene. Za živalske vrste so najpomembnejše kovine Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, V, Ti in Zn, medtem ko so za rastlinske vrste najpomembnejše B, Cu, Fe, Mn, Mo, Se, Zn, Ba in As. Za Cd, Hg in Pb niso odkrili pomembne metabolne funkcije. Kovine, ki so relativno strupene že pri nizkih koncentracijah, so Ag, Sb, As, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Ti in Zn. Ba je prav tako strupen, vendar je zaradi težke topnosti organizmom relativno nedosegljiv.

RČN omogočajo zaradi številnih reakcij visoko učinkovitost zmanjševanja kovin v odpadni vodi, ki poteka z naslednjimi glavnimi mehanizmi:

- vezava na medij, delce, topne organske snovi ter mikroorganizemsko in rastlinsko biomaso,
- obarjanje v obliki netopnih soli (sulfidi, oksihidroksidi),
- asimilacija v biomaso rastlin in mikroorganizmov.

Izhlapevanje v ozračje je redko z izjemo Hg in Se.

Višje koncentracije kovin so za mikroorganizme pogosto strupene oziroma inhibitorne, saj povzročajo spremembe v morfologiji celic, zmanjšanje števila celic zaradi odmiranja in podaljševanje lag faze. Podobnost v kemizmu med nujno potrebnimi in strupenimi elementi lahko povzroča akumulacijo strupenih koncentracij kovin znotraj celice. Ob pomanjkanju

hranilnih snovi v okolju postane mikroorganizemska celica bolj dovzetna za strupene kovine.

Mikroorganizemske celice so razvile zato mehanizme rezistence na strupenost, med katerimi sta najpomembnejša:

- povečana nepropustnost celične stene kot posledica tvorbe zunanje zaščitne plasti;
- biokemijska pretvorba kovine v nestrupeno obliko (redukcija, oksidacija, obarjanje, metiliranje, izhlapevanje).

Privzem kovin s pomočjo mikroorganizmov poteka na dva načina:

- privzem v celico, ki je odvisen od metabolizma. S pomočjo aktivnega privzema mikronutrientov lahko vstopajo v celico tudi strupeni ioni drugih kovin, kar zvišuje učinkovitost čiščenja kovin;
- vezava kovinskih ionov v ekstracelularni material ali v celično steno. Vezava poteka kot neaktivna adsorbcija kovinskih ionov na nabite celične komponente in je podobna ionski izmenjavi.

Mikroorganizmi so soudeleženi pri pretvarjanju kovin z naslednjimi procesi:

- tvorba močne kisline, kot je  $H_2SO_4$ , ki kovine raztaplja,
- tvorba organske kisline, ki raztaplja in hkrati metilira kovine, tako da tvorijo organokovinske komplekse,
- tvorba in obarjanje z hidroksidi in sulfidi,
- tvorba ekstracelularnih polisaharidov, ki tvorijo s kovinami kelate in s tem zmanjšajo njihovo strupenost,
- vezava Fe, Mn na površino bakterijske celice v obliki hidroksidov ali drugih netopnih soli,
- metiliranje, povzročanje hlapljenja kovin.

Mehanizmi rezistence in aktivnega oziroma neaktivnega privzema kovinskih ionov pri mikroorganizmih so tako pomembni pri čiščenju specifičnih odpadnih voda, kot so na primer izcedne vode iz odlagališč odpadkov in rudnikov. Pri tem pa moramo zagotoviti ustrezne pogoje za rast in razvoj mikroorganizmov.

V mediju poteka vezava kovin s pomočjo kationske izmenjave in tvorbe kelatov in je izrazito odvisna od vrednosti pH. Divalentne in trovalentne kovine se izmenjujejo s  $H^+$  ioni na kationskih izmenjevalnih površinah medija. Huminske kisline tvorijo vezi s kovinami. Obarjanje poteka s pomočjo sulfida, ki pa je odvisno od zadostnega vira sulfata in nizkega redoks potenciala. Tako obarjanje 1,0 mg/l Cd zahteva redukcijo 0,85 mg/l sulfata do sulfida. Pri visokih koncentracijah kovin v odpadni vodi je obarjanje povečano in pomembnejše od adsorbcije. Pri nizkih koncentracijah postane adsorbcija pomembnejša zlasti za Cd, Cr, Cu, Ni in Pb. Pri nevtralnem pH potekajo predvsem procesi, kot so adsorbcija, tvorba kelatov in ionska izmenjava, pri kateri se zaradi zamenjave kovinskega iona s  $H^+$  ionom, vrednost pH zniža in s tem učinkovitost procesov čiščenja. Učinkovitost čiščenja pade za 50 %, če se pH zniža iz 7,4 na vrednost 4,0. Tekmovalnost  $Cd^{2+}$  in  $Pb^{2+}$  za proste površine za ionsko izmenjavo s  $Ca^{2+}$  in  $Mg^{2+}$  ioni zmanjšuje učinkovitost čiščenja. Bakterije lahko pretvorijo reducirano Fe in Mn do oksidacijskih oblik. V tem kemijskem procesu je  $O_2$  prejemnik elektronov. Proces poteka hitreje v zakisanih pogojih.

### 5.5.6.3 Kroženje kovin v povezavi z močvirskimi rastlinami

Močvirske rastline so s svojim privzemanjem v rastlinsko tkivo pomemben nosilec čiščenja kovin v odpadni vodi, saj zasajene RČN kažejo mnogo večjo učinkovitost čiščenja kot nezasajene RČN.

Številne raziskave kažejo pri nizkih obremenitvah (10–100 µg/l) RČN enakomerno upadanje vsebnosti kovin kot so Zn, Cr, Cd, Cu preko daljšega obdobja delovanja RČN. V RČN se kovine odstranjuje v naslednjem vrstnem redu Cu > Fe > Zn > Mg > Mn.

### 5.5.7 Organske snovi

RČN, zaradi počasnosti procesov, pretvarjajo številne organske snovi, kot so metan, huminske kisline in celo alifatske ter poliaromatske ogljikovodike, ki pa se zaradi velike molekulske teže razgrajujejo relativno počasi. Ogljikovodiki se v RČN razgrajujejo z naslednjimi mehanizmi: izhlapevanje, fotokemična oksidacija, sedimentacija, sorpcija, biološka razgradnja (fermentacija, aerobno/anaerobno dihanje).

Med najpogostejšimi ogljikovodiki, ki se pojavljajo v odpadnih vodah, kot so izcedne vode iz komunalnih odlagališč odpadkov, so fenoli, atrazin ter pesticidi. Pesticidi so rezistentni na biološko razgradnjo ter lahko zaradi vsebnosti dušika močno inhibirajo nitrifikacijo. Prisotnost fenolov v zakisanem okolju močno zmanjša taksonomsko diverzitetu mikroorganizmov biofilma, kar lahko poslabša učinkovitost celotnega sistema.

V RČN se pesticidi, atrazin odstranjujejo predvsem s pomočjo sorpcije na medij, medtem ko se fenoli odstranjujejo predvsem s pomočjo asimilacije v koreninski sistem močvirskih rastlin in kažejo visoko stopnjo zmanjšanja, ki se pri dotočnih koncentracijah 400 mg/l giblje od 75–78 %.

Ne glede na visoko stopnjo nerazgradljivosti je v svetu razširjeno mnenje, da lahko mikroorganizmi razgradijo vsako snov naravnega izvora, predvsem s procesi, kot so mineralizacija, akumulacija in polimerizacija. Kljub temu so številni ksenobiotiki (halogenirani ogljikovodiki, halogenirani aromati, pesticidi, policiklični, klorirani aromatični ogljikovodiki (PAH), PCB, klorirani anilini, fenoli, pentaklorofenoli in druge podobne strupene snovi) zelo rezistentni na delovanje mikroorganizmov, ki so posledica naslednjih dejavnikov:

- molekularne strukture ksenobiotikov,
- težavnega vstopanja v celico,
- zaradi adsorpcije so molekule netopne ali mikroorganizmom nedostopne,
- nerazpoložljivost ustreznega prejemnika elektronov,
- neugodni okoljski dejavniki (temperatura, svetloba, pH, O<sub>2</sub>, vlaga, redoks potencial),
- pomanjkanje hranilnih snovi za rast mikroorganizmov,
- strupenost končnih produktov, ki je večja od ksenobiotikov.

V postopku čiščenja se ksenobiotiki običajno odstranjujejo s fizikalno-kemijskimi procesi, kot so sorpcija, izhlapevanje, kemijska oksidacija, fotokatalitična razgradnja in z mikrobnimi vodenimi procesi oziroma z biodegradacijo v aerobnem in anaerobnem okolju. Učinkovito čiščenje ksenobiotikov in drugih strupenih snovi naravnega izvora je izjemnega pomena, saj so pogosto mutageni in kancerogeni.

## 5.6 VRSTE RASTLINSKIH ČISTILNIH NAPRAV

Vrste RČN lahko razdelimo glede na prevladujoče makrofite:

1. Sistemi s prosto plavajočimi makrofiti.
2. Sistemi s potopljenimi makrofiti.
3. Sistemi z emergentnimi makrofiti.

RČN z emergentnimi makrofiti so lahko zgrajene na različne načine. V splošnem jih lahko razdelimo v štiri glavne skupine, glede na način pretakanja vode:

1. Sistemi s prosto vodno površino.
2. Sistemi s horizontalnim podpovršinskim tokom.
3. Sistemi z vertikalnim podpovršinskim tokom vode.
4. Hibridni sistemi.

RČN s podpovršinskim tokom vode nimajo proste vodne površine. Zaradi možnega mašenja poroznega medija je klasični sistem podpovršinskega toka omejen na čiščenje mehansko prečiščene vode z majhno vsebnostjo delcev. V primerjavi s površinskim tokom pa je stična površina vode, bakterij in medija pri teh sistemih bistveno večja.

Najpogosteje uporabljene vrste RČN so sistemi s horizontalnim in vertikalnim podpovršinskim tokom ter hibridni sistemi. V Evropi se najpogosteje uporabljajo RČN s pulznim vertikalnim tokom vode skozi sistem, predvsem za čiščenje visokih vsebnosti amoniaka, v Sloveniji pa horizontalni sistemi in hibridni sistemi.

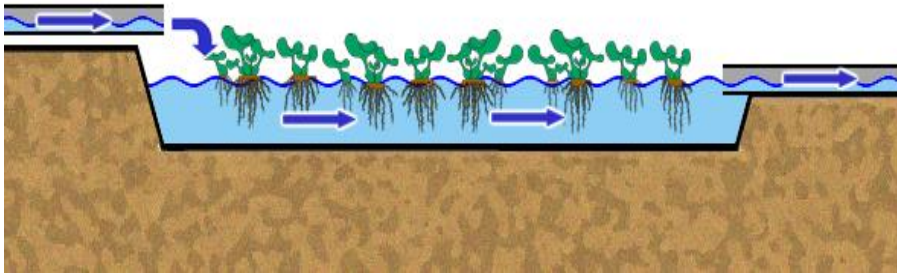
### 5.6.1 RČN s prosto vodno površino

To vrsto RČN sestavljajo za vodo neprepustna tla (glina ali folija), medij, voda, makrofiti oziroma višje vodne rastline, alge in mikroorganizmi. Uporabljeni medij je pogosto prst, ker nudi prosta mesta za tvorbo kompleksov kovin in vezavo fosforja. RČN s površinskim tokom vode so gosto zaraščene z globino vode manj kot 4 m. Rastlinski del predstavljajo prosto plavajoči oziroma natantni hidrofiti, kot so vodna leča, hijacinta, posajeni emergentni makrofiti, kot sta trst in rogoz, ter submerzni makrofiti, ki so večinoma povsem potopljeni v vodo.

Področje s submerzno vegetacijo je zaradi atmosferske difuzije kisika in fotosinteze aerobno. Tu potekajo hitre biokemijske reakcije, zato je učinkovito odstranjevanje organskih snovi ter zaradi prodora sončne svetlobe povečana učinkovitost odstranjevanja patogenih mikroorganizmov.

Področja z emergentnimi in plavajočimi rastlinami so v nekaterih primerih anaerobna, in sicer, kadar je v dotočni vodi povečana vrednost organske obremenitve in kadar prosto plavajoče rastline zavirajo difuzijo kisika v vodni stolpec. Odstranjevanje onesnaževal poteka večinoma preko procesov sedimentacije, adsorpcije, anaerobnih reakcij ter asimilacije v biomaso. V sistemu se učinkovito odstranjujejo suspendirane snovi, težke kovine, dušik, fosfor, BPK<sub>5</sub>. V RČN s površinskim tokom ni težav zaradi mašenja medija. Negativne lastnosti pri sistemih s prosto vodno površino so pojav smradu, komarjev in zamrznitev pri nizkih temperaturah, zato so ti sistemi uporabni predvsem v območjih s toplejšo klimo.

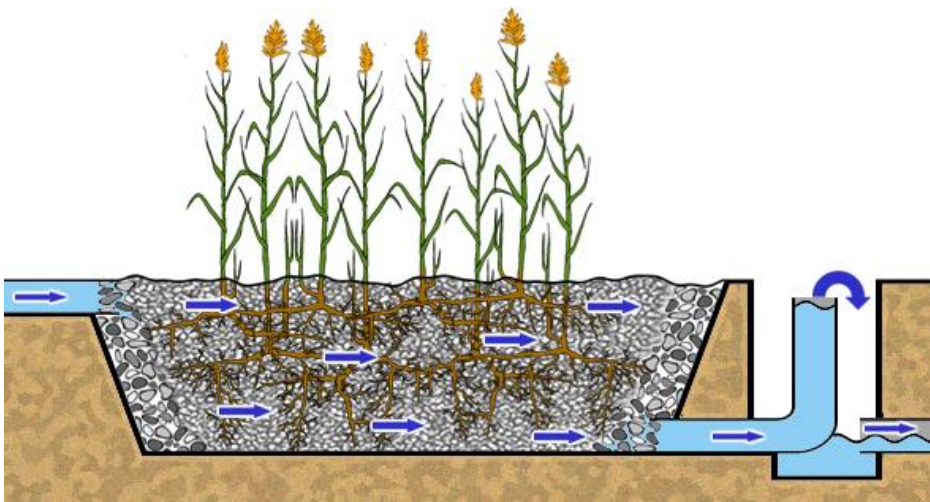
Najpogostejši so sistemi z vodno hijacinto (*Eichornia crassipes*), pojavljajo pa se tudi sistemi z vodno lečo (*Lemna spp.*) ali drugimi prosto plavajočimi rastlinami. Nujno je redno odstranjevanje biomase. Te sisteme imenujemo tudi lagune.



Slika 18: Sistemi s horizontalnim podpovršinskim pretokom (povzeto po Kadlec, R. H., Knight, R. L., 1996).

Tehnologija čiščenja sloni na počasnem horizontalnem pretakanju vode pod površino medija. Na koncu grede se voda zbere in izteče skozi iztok. Med pretakanjem prihaja voda v stik z aerobnimi in anaerobnimi območji. Aerobna območja se pojavljajo v območju korenin in rizomov, ki sproščajo kisik v medij. Med pretakanjem se voda očisti s pomočjo aerobnih in anaerobnih bakterij ter fizikalnih in kemijskih procesov. Najpogosteje uporabljeni makrofiti so *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Scirpus lacustris*, *Carex sp.*, pa tudi *Iris pseudocorus*, *Sparganium erectum*, *Phalaris arundinacea*, *Glyceria maxima*. Ta sistem je učinkovit pri odstranjevanju neraztopljenih snovi, BPK<sub>5</sub>, KPK, težkih kovin, fekalnih bakterij in uravnavanju pH vrednosti. Pomanjkljivost sistema je slabša **Opomba:**

prezračenost medija oziroma nastajanje anaerobnih plasti pri dnu grede, kar se odraža v manjšem odstranjevanju dušika in fosforja. Fosfor tvori komplekse za Al, Fe, Ca in Mg ioni v aerobnih predelih sistema. V anaerobnem okolju pride do hidrolize s Fe in Al vezanega fosforja, do redukcije Fe fosfata, do raztapljanja Ca fosfata, mineralizacije in s tem sproščanja fosforja.

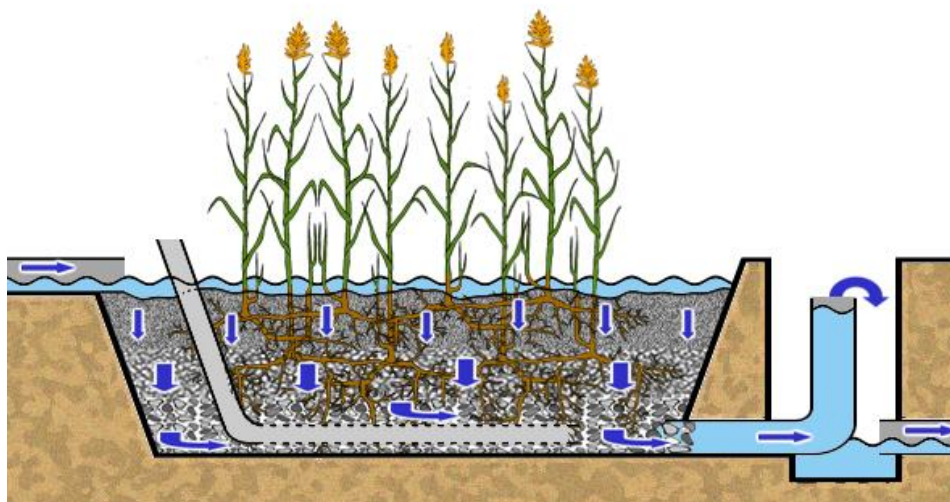


Slika 19: Shema sistema s horizontalnim podpovršinskim tokom vode (povzeto po Kadlec, R. H., Knight, R. L., 1996).

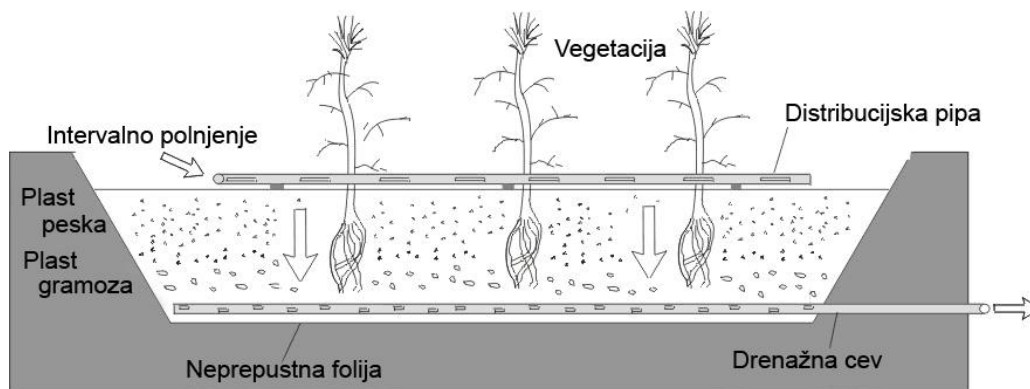
Oblikovanje horizontalnih RČN se v zadnjih letih za razliko od vertikalnih RČN ni veliko spreminjalo in se še zdaj uspešno uporablja širom Evrope in sveta (Bulc in Zupančič, 2007; Bulc, 2006; Bulc in Šajn-Slak, 2003; Bulc in sod., 2003).

#### 5.6.2 Sistemi z vertikalnim podpovršinskim pretokom

Principi čiščenja so enaki kot pri sistemih s horizontalnim podpovršinskim pretokom. Drugačna pa je zgradba in način polnjenja gred z odpadno vodo. Na Sliki 20 je prikazana običajna oblika vertikalne RČN. Dotok je prekinjen v določenih intervalih in povzroči preplavitev celotne površine medija v gredah. Voda se nato počasi preceja skozi medij in se zbira na dnu sistema s pomočjo drenažnih cevi. Pred naslednjim polnjenjem sistema se medij prezrači, kar omogoča vnos večje količine kisika. Ti sistemi se zato namenjeni nitrifikaciji oziroma drugim striktno aerobnim procesom (Langergraber in Haberl, 2001; Kayser in Kunst, 2005). Enostopenjski vertikalni sistem, ki vključuje le dve vzporedno vezani gredi za izmenično polnjenje, ima običajno vgrajeno 50–60 cm plast finega peska (0,06–4 mm) ali pa se zrnatost veča od površine proti dnu grede s specifično površino 1–5 m<sup>2</sup> na populacijski ekvivalent (PE). Polnjenje in praznjenje grede poteka v intervalu od 1 do 2 dni, nato sledi 4-dnevo do 8-dnevno mirovanje. Vertikalne grede so najpogosteje zasajene z navadnim trstom, ker ima gost in globok koreninski in rizomski sistem. V primerjavi s sistemi s horizontalnim pretokom je ta sistem mnogo bolj prezračen in zato bolj učinkovit pri odstranjevanju dušika in fosforja ter nižanju BPK<sub>5</sub>. Manjšo učinkovitost kaže pri odstranjevanju neraztopljenih snovi.

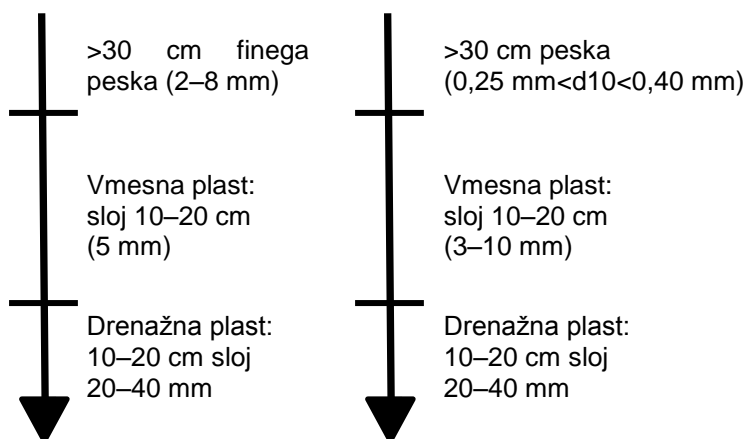


Slika 20: Shema sistema z vertikalnim podpovršinskim tokom vode (povzeto po Kadlec, R. H., Knight, R. L., 1996).



Slika 21: Shema sistema z vertikalnim podpovršinskim tokom vode s frakcijami peska in tokom vode (povzeto po Langergraber in Haberl, 2004).

V zadnjih 10 letih so v Franciji uspešno razvili in implementirali dvostopenjski vertikalni sistem RČN za čiščenje komunalne odpadne vode brez mehanskega predčiščenja (Molle in sod., 2005). Prva stopnja je namenjena čiščenju mulja in deloma organskim snovem, medtem ko v drugi stopnji poteka zmanjševanje organske snovi in nitrifikacija. Slika 20 prikazuje velikost frakcij posameznih plasti peska od površine medija proti dnu gred. V osnovi je oblika dvostopenjskega sistema podobna enostopenjskemu sistemu.



Slika 22: Prikaz plasti peska v dvostopenjskem sistemu za čiščenje surove odpadne vode.

Vsaka stopnja ima vzporedno obratujoči gredi, običajno 3 grede na prvi stopnji in 2 grede na drugi stopnji. Vsaka od gred na prvi stopnji prejme v času polnjenja celotno organsko obremenitev. Polnjenje traja običajno 3 do 4 dni, nato sledi faza počitka, ki je dvakrat daljša od polnjenja. Izmenjujoče faze polnjenja in počivanja so izjemnega pomena za nadzor nad rastjo pritrjene biomase na filtrirni medij, za vzdrževanje aerobnih pogojev znotraj filtrirnih plasti in za mineralizacijo organske usedline, ki se nabira zaradi suspendiranih delcev, ki se zadržujejo na površini gred prve stopnje. Iz prve stopnje odpadna voda steka v drugo stopnjo, kjer se čiščenje zaključuje, predvsem nitrifikacija.

Specifična površina, potrebna za tovrstni sistem, znaša 1,2 m<sup>2</sup> za PE na prvi stopnji in 0,8 m<sup>2</sup> za PE na drugi stopnji, kar v povprečju znaša 2 m<sup>2</sup> za PE.

Mulj ali blato, ki se tvori na površini gred prve stopnje, omejuje infiltracijo, a izboljšuje porazdelitev vode in dopolnjuje biološko aktivne plasti. Mineralizacija organskih snovi

povzroča tvorbo okoli 1,5 cm plasti mulja letno. Če višina mulja preseže 20 cm, ga je potrebno odstraniti, kar se običajno zgodi v obdobju od 10 do 15 let. Odstranjen mulj se, če ustreza zakonodajnim določilom, lahko uporabi na kmetijskih površinah.

### 5.6.3 Hibridni sistemi

Vse pogosteje se uporabljajo hibridni sistemi, ki vključujejo tako sisteme s horizontalnim kot vertikalnim pretokom. Tako se izkoristi prednost vsakega sistema in se hkrati izogne osnovnim pomanjkljivostim. V horizontalnih gredah se učinkovito odstranijo neraztopljene snovi, v vertikalnih gredah, ki so bolj aerobne, pa se zmanjšajo vrednosti BPK<sub>5</sub> in dušika. Za učinkovito zmanjševanje fosforja je potrebno zagotoviti ustrezen medij, ki ima sposobnost kemijske vezave fosfata.



## 5.7 OBLIKOVANJE IN IZGRADNJA RČN

Za načrtovanje in izgradnjo RČN obstaja že vrsta navodil in zato lahko najdemo zelo različne sisteme RČN, kjer so projektanti in izvajalci kombinirali različna navodila in znanja o RČN.

Leta 1976 je potekala prva konferenca o čiščenju z RČN. Leta 1990 je nastal prvi osnutek smernic pod vodstvom Paula Cooperja iz Velike Britanije (Cooper, 1990). Smernice so obravnavale sisteme s horizontalnim tokom vode, šele kasneje so nastale tudi smernice, ki so natančneje opredelile sisteme z vertikalnim tokom vode.

Smernice najdemo v državah, kjer je zgrajeno tudi večje število RČN (Italija, Danska, Velika Britanija, Združene države Amerike).

Glavni namen smernic je:

- ustrezno projektiranje in izgradnja RČN,
- upoštevanje različnosti med državami (podnebni pogoji),
- možnost nadaljnje uporabe prešičnene vode,
- promocija RČN.

Pregled obstoječih horizontalnih RČN kaže, da so v uporabi naslednji sistemi:

- osnutek po Kickuthu (1970), B.C.Wolvertonu (1980)
- Gersbergu (1980);
- drugi neodvisni načrtovalci, ki so izgrajevali RČN na podlagi podatkov iz literature, so Kadlec in Knight, 1996; Pucci in sod., 2005; Brix in Arias, 2005; Kadlec in Wallace, 2009; Hoffmann in sod., 2011 in drugi.

Kljub različnim izgradnjam so si RČN v osnovi podobne, razlikujejo pa se v vseh tistih podrobnostih, ki so posledica inventivnosti, različne vloge RČN ali pa nezadostnega razumevanja posameznih procesov. Tako lahko zasledimo različne vrste RČN z zelo različnimi površinami za PE, globinami, mešanici medija, nagibi dna, oblikami predčiščenja in različnimi močvirskimi rastlinami (navadni trst) ali vrtninami (paradižnik). Glavna osnova za oblikovanje takega sistema je povsod izračun širine, dolžine in globine glede na obremenitev dotočne odpadne vode. Pri tem biološka kinetika vpliva na volumen, lastnosti rastlin vplivajo na globino in hidravlične povezave določajo obliko sistema.

### 5.7.1 Osnovni pricip čiščenja v RČN

Odpadna voda se iz postopka predčiščenja ali primarnega čiščenja s pomočjo razdelilnega sistema razliva po in skozi medij in nadaljuje pot skozi sistem pod površino medija. Tu prihaja v stik z rizosfero, ki jo sestavljajo korenine in rizomi, medij in mikroorganizmi. V tem delu poteka glavno čiščenje. Odpadna voda se nato s pomočjo drenaže zbere na koncu sistema v iztok. Nivo vode se v RČN uravnava s pomočjo spreminjanja pretoka na dotoku in iztoku. Zaradi vgradnje hranilnih snovi v biomaso rastlin, RČN poleg druge ali sekundarne stopnje čiščenja, vključuje tudi tretjo ali terciarno stopnjo čiščenja.

#### *Predčiščenje*

RČN brez predhodnega ali primarnega čiščenja se pogosto soočajo s predčasnimi težavami mašenja, ki povzroča površinski tok, s tem pa je povezana manjša učinkovitost čiščenja ter težave z razvojem insektov in smradu. Navadno uporabljamo za predčiščenje usedalnike,

kot so dvoetažni usedalniki (emšer, Imhoffov usedalnik), zadrževalnike, greznice, filtre, aeracijske bazene, lagune.

#### *Površina*

Površina je najbolj težaven dejavnik pri oblikovanju RČN. Za horizontalne sisteme RČN jo običajno izračunavamo s pomočjo Kickuthove enačbe, vendar se zaradi spreminjajoče se vrednosti za K, pogosteje uporablja  $5 \text{ m}^2$  na enoto populacijskega ekvivalenta. Danes je, na podlagi mnogih raziskav in postavitve tovrstnih RČN, uveljavljen izračun, da za 1 PE potrebujemo  $2\text{--}2,5 \text{ m}^2$  za horizontalne RČN, medtem ko za vertikalne RČN potrebujemo  $1,5\text{--}5 \text{ m}^2$  (Preglednica 8).

RČN zavzemajo v povprečju za mnoge uporabnike še vedno preveliko površino, zlasti v državah z visoko ceno zemljišča, zato je cilj mnogih držav, da zmanjšajo potrebno površino na  $1 \text{ m}^2$ . Največ tovrstnih raziskav poteka v Franciji, kjer so razvili tudi drugačen sistem RČN brez predčiščenja, s čimer se približujejo cilju, da za 1 PE potrebujejo le  $1\text{--}2 \text{ m}^2$  površine.

Preglednica 8: Značilna povprečna površina izgrajenih RČN z horizontalnim in vertikalnim tokom vode glede na državo.

Vrsta RČN	Horizontalna RČN	Vertikalna RČN
Enota	$\text{m}^2/\text{PE}$	$\text{m}^2/\text{PE}$
Slovenija	2,5	2,3
Avstrija	5,4	5
Danska	3,8	5
Italija	2,3	1,5

#### *Razmerje med dolžino in širino*

Večina začetnih horizontalnih RČN je imela veliko razmerje med dolžino in širino (10 : 1), vendar je zaradi večje specifične obremenitve preseka sistema in pospešenega mašenja prihajalo do površinskega toka. Vendar pa za pojav površinskega toka pogosto ni krivo razmerje med dolžino in širino, temveč je posledica neustreznega hidravličnega oblikovanja z nezadostnim hidravličnim gradientom. Zato so načrtovalci začeli graditi RČN z manjšim razmerjem. Razmerje se je zmanjšalo na 0,15 oziroma od 0,17 do  $0,4 \text{ m}$  širine/PE. V splošnem imajo sistemi z gruščem višje razmerje, kohezivni zemeljski pa nižje. Vertikalne RČN so pravokotnih oblik. Kljub podanim razmerjem je vendarle potrebno najti pravo razmerje za vsako RČN posebej, saj večja širina omogoča zmanjšanje površinskega toka, medtem ko ozki in dolgi sistemi zmanjšajo neenakomerni prehod vode skozi sistem.

#### *Globina*

Globina sistema je odvisna od razpoložljive površine, izbire rastlinskih vrst in od hidravličnega gradienta, ki pomeni nagib sistema. Globina sistema se giblje od  $0,3\text{--}1,2 \text{ m}$ , vendar pa je najpogosteje uporabljena globina za horizontalne RČN  $0,6 \text{ m}$  ter  $1 \text{ m}$  za vertikalne RČN. Pri manjših globinah lahko namreč prihaja do zamrzovanja ali do velike evapotranspiracije, medtem ko na večjih globinah koreninski in rizomski sistem oslabi.

Globino sistema je potrebno prilagajati tudi vrsti medija, saj v zelo gruščnati mešanici korenine in rizomi ne prodrejo globlje kot do globine 20–30 cm.

#### *Brežine*

Sistem je obdan z brežinami, ki so vsaj 0,2–0,5 m nad površino sistema in omogočajo počasno polnjenje z rastlinskim odpadnim materialom, pulzno ali občasno poplavljanje bodisi zaradi boljšega vnosa kisika ali za namene zaviranja rasti nezaželenih rastlinskih vrst.

#### *Naklon*

Površina sistema je brez naklona, kar olajšuje preplavljanje za preprečevanje razširjenja nezaželenih rastlinskih vrst ter zmanjšuje možnost za pojav površinskega toka. Naklon dna je ponekod prisoten in se pri različnih RČN giblje od 0–10 %, bolj pogosto od 0 do 3 %. Vertikalne RČN nimajo naklona. Po letu 2000 se RČN gradijo običajno brez naklona dna.

#### *Hidravlična obremenitev*

Za oblikovanje se navadno uporablja povprečna količina dnevnega pretoka, ki jo moramo pred izvedbo natančno izmeriti. Pretok se spreminja zaradi nihanja količine odpadne vode in padavin, kar pomeni spremembo hidravlične obremenitve sistema. Sistem moramo oblikovati tako, da prenese nihanje hidravlične obremenitve brez sprememb v učinkovitosti delovanja in pojava površinskega toka. Količina vode v mediju vpliva tudi na velikost, obliko, zgradbo rizomov, na nivo horizontalnih rizomov in posledično na dolžino vertikalnih rizomov. V horizontalnih RČN je dotok odpadne vode stalen, medtem ko je dotok na vertikalne RČN običajno pulzen, v razmiku od 12 do 24 ur, kar omogoča boljše prezračevanje sistema in s tem intenzivnejšo nitrifikacijo. Hidravlična obremenitev, ki tako pomeni stopnjo pretoka na enoto površine sistema, se za sistem, ki vsebuje zemljo, giblje od 2–9 cm /dan, medtem ko se za sistem z gruščem in peskom giblje od 5–16 cm /dan.

#### *Nivo vode*

Nivo vode v sistemu mora biti pod površino medija (2–10 cm) razen ob preplavitvi sistema ob pulznem polnjenju vertikalne RČN, da se ne soočamo s težavami smradu, razvojem alg in insektov ter z manjšo učinkovitostjo. Nivo vode občasno spreminjamo bodisi zaradi boljšega razvoja korenin in rizomov ali povečane evapotranspiracije ter poplavljanja.

#### *Oblikovanje dotoka*

Dotok moramo oblikovati tako, da se dotočna voda razporeja preko cele širine (horizontalna RČN) ali površine (vertikalna RČN) sistema in da je možno spreminjati pretok. Dotočne cevi morajo imeti možnost čiščenja, kadar prihaja do mašenja. Voda v horizontalni RČN se iz dotočne cevi izliva v 0,5 m širok pas grobega kamenja premera 16–32 mm, ki olajšuje enakomerno razporejanje dotočne vode po celem preseku sistema in zadržuje usedljive snovi, s čimer preprečuje prehitro mašenje medija, ali s kapljanjem po površini peska ali mivke v vertikalnih sistemih.

#### *Oblikovanje iztoka*

Voda se na koncu RČN izteka v drenažno cev, ki je položena na dno sistema. V horizontalni RČN je iztočna cev navadno položena v 0,5 m širok pas kamenja kot na dotoku premera 16–20 mm. Drenažna cev je povezana s polno iztočno cevjo, ki mora omogočati spreminjanje nivoja vode v napravi. Izvedba uravnavanja pretoka mora

omogočati dvig nivoja vode 20 cm nad površino medija in spuščanje do dna. Čiščenje cevi mora biti enostavno, kakor mora biti tudi enostavno vzorčevanje v revizijskih jaških.

#### *Ukrepi za povečano prezračevanje*

Vsebnost raztopljenega kisika je tako v samem sistemu kot na iztoku možno povečati:

- s spreminjanjem nivoja vode, ki vzpodbuja prodor korenin v globino,
- z dotokom vode, ki je v stiku z zrakom,
- s površinskim tokom na RČN, kjer poteka površinsko prezračevanje,
- z vzporednimi sistemi RČN, ki omogočajo izmenično polnjenje z odpadno vodo,
- z mehanskim prezračevanjem na dotočnem in iztočnem delu RČN,
- z recikliranjem odpadne vode,
- z uporabo vertikalnih sistemov,
- z izbiro tistih močvirskih rastlinskih vrst, ki imajo visoko produktivnost podzemne biomase, sposobnost globokega prodiranja v mediju, visoko tolerančnost na specifične in strupene snovi v odpadni vodi in pri katerih je bil ugotovljen konvekcijski tok kisika v rizosfero kot posledica temperaturnih in vlažnostnih razlik.

#### *Vodotesnost*

Za vodotesno oblikovanje posteljice RČN se lahko uporablja zemlja s hidravlično prevodnostjo večjo od  $10^{-9}$  m/s, glina ali 10 mm polietilenska folija. Pri tem je najbolj zanesljiva uporaba folije, ki pa jo moramo s filcem in posteljico iz mivke zaščititi pred mehanskimi poškodbami in preveriti vodotesnost pred polnitvijo z medijem.

#### *Medij*

Na začetku razvoja RČN so bile pogosto težave povezane z uporabo medija z nizko hidravlično prevodnostjo (prst). V zadnjem času je najpogosteje uporabljena hidravlična prevodnost medija v horizontalnih RČN  $10^{-3}$  m/s, najpogosteje uporabljen material pa je grušč, v vertikalnih pa  $10^{-4}$  m/s, najpogosteje uporabljen medij pa pesek finejših frakcij s premerom 0–6 mm. V svetu lahko zasledimo tudi uporabo odpadnega materiala za medij, kot je odpadna keramika, pepel (Pulverised Fuel Ash), vendar pa se moramo prej prepričati da ob uporabi takega medija ne prihaja do spiranja nezaželenih snovi oziroma težkih kovin. Fizikalno-kemijske lastnosti medija lahko namreč močno vplivajo na splošno delovanje sistema. Fizikalne lastnosti (kot so poroznost, hidravlična prevodnost in velikost ter razporeditev delcev) vplivajo na hidravlično učinkovitost, vodno bilanco, evapotranspiracijo (ET), kar je kritična sestavina dobrega oblikovanja sistema. Slaba hidravlična učinkovitost vodi do nelinearnega toka vode, kar zmanjša učinkovitost delovanja. Fizikalno-kemijske lastnosti medija, kot sta mineralna sestava in specifična površina, narekujejo adsorpcijsko zmogljivost. Predelani mediji, kot so ekspandirana glina ali organski mediji (šota) ali lahki agregati, imajo visoko specifično površino v primerjavi s konvencionalnimi mediji (npr. rečni prod) in se uspešno uporabljajo v RČN za povečanje in ohranjanje visoke ravni želenih procesov in učinkovitosti delovanja. Čeprav je uporaba naravnih in alternativnih medijev zelo razširjena, so njihove fizikalno-kemijske lastnosti zelo spremenljive, in jih je treba presoјati od primera do primera. Izbira medijev v veliki meri temelji na tehnoloških vidikih, njihovi ceni in razpoložljivosti. Zamašitev je naveden kot eden od glavnih pomanjkljivosti RČN.

### *Organska obremenitev*

Prekomerna obremenitev z organskim materialom povzroča mašenje in s tem manjšo učinkovitost, zato mora biti manjša od 112 kg BPK<sub>5</sub>/ha /dan.

Na celotno učinkovitost takih sistemov odločilno vplivajo mikrogradienti, ki jih dopolnjujejo s pretokom opredeljeni makrogradienti, povezani s koncentracijo hranil, velikostjo delcev, pH, temperaturo, vlažnostjo in drugimi dejavniki, kot so na primer različni tipi medija.

### *Razvoj sestoja*

Za čiščenje se uporabljajo različne vrste močvirskih rastlin, pri tem pa je daleč najpogosteje uporabljen navadni trst.

Razširjenje trsta poteka na tri načine (z rizomskimi deli, stebelnimi poganjki in semeni). Izkušnje kažejo, da je sajenje s pomočjo stebelnih poganjkov uspešno, medtem ko je uporaba rizomskih delov manj učinkovita. V zadnjem času se najbolj uveljavlja uporaba semen, saj je tako razvoj hitrejši, gostota večja, sestoj enakomernejši in možnost razvoja drugih nezaželenih rastlinskih vrst manjša. Zaradi stroškov priprave semen se še vedno pogosto uporabljajo stebelni poganjki in rizomi. Gostota sajenja je za rizomske dele 2 rizoma /m<sup>2</sup> in za stebelne poganjke 4–5 poganjkov/m<sup>2</sup>.

Sadimo lahko od marca do konca oktobra, vendar je najboljši čas v maju in juniju. Sejanje poteka najkasneje do konca avgusta. Če sadimo jeseni, je običajno potrebno sestoj spomladi zgostiti z dosajanjem. Paziti moramo, da ne sadimo v času, ko obstaja nevarnost zmrzali.

### *Razširjanje nezaželenih rastlinskih vrst*

Spomladi lahko hitrejši razvoj drugih kompetitorskih vrst zavira rast navadnega trsta predvsem zaradi zasenčevanja. V tretjem vegetacijskem obdobju trst navadno preraste druge vrste, vendar pa je potrebno zaradi učinkovitosti čiščenja zdrav in čvrst sestoj razviti čimprej, zato si pomagamo pri odstranjevanju nezaželenih rastlinskih vrst s poplavljanjem in ročnim pletjem. Poplavljanje je učinkoviteje spomladi, medtem ko moramo jeseni počakati, da poženejo prvi poganjki in da jih ne zalijemo z vodo. Možna je tudi uporaba herbicidov, ki pa lahko poleg drugih vrst poškodujejo tudi trst.

### *Košnja*

S košnjo lahko podaljšamo dobo delovanja RČN, ker zmanjšamo obremenjenost s težkimi kovinami, ki se nahajajo v listih in listnih nožnicah ter hranilnimi snovmi. Košnja navadno poteka novembra, decembra in januarja. Slaba stran košnje je, da s tem odstranimo ves odpadni sloj rastlinskega materiala, s čimer sestoj izpostavimo zmrzali. Mnenja o potrebi izvajanja košnje se razlikujejo, saj je večina hranilnih snovi v zimskem času shranjena v rizomskem delu rastline. Zato večina strokovnjakov meni, da je košnja priporočljivo izvajati le občasno. Običajno kosimo manjše RČN, medtem ko RČN s površino več ha (ZDA) zaradi visokega stroška košnje ne kosimo.

V primeru, da RČN čisti na primer industrijske ali izcedne vode, je potrebno opraviti analizo koncentracij snovi v rastlinski biomasii in pokošen rastlinski material obravnavati kot nevaren odpad. Ker večina npr. težkih kovin ostaja v koreninskem sistemu, pa so taki primeri redki.

### 5.7.2 Vzdrževanje

RČN ne zahteva posebnega vzdrževanja, dokler se zmogljivost medija ne zasiti. Horizontalni sistem praviloma ne potrebuje električne energije, ker se voda pretaka na podlagi gravitacije, medtem ko za vertikalno RČN potrebujemo zaradi pulznega dotoka črpalke. Poznamo tudi primere, ko RČN zaradi povečanega vnosa kisika tudi prisilno prezračujejo ali zaradi dviga temperature ogrevajo. Pomembno je občasno čiščenje dotočnih in iztočnih cevi, spreminjanje pretokov glede na iztočne vrednosti in glede na veljavno zakonodajo vzorčenje in analizo odpadne vode na dotoku in iztoku. V jesenskem času pa izvajamo košnjo močvirskih rastlin, da odstranimo vgrajene hranilne in strupene snovi ter tako preprečimo ponovno vračanje hranil v odpadno vodo ter polepšamo izgled RČN v spomladanskem času, ko se začne razvoj novih rastlinskih poganjkov.



Slika 23: Terenska oprema za monitoring rastlinske čistilne naprave.

### 5.7.3 Doba delovanja

Glavni omejitveni dejavnik pri delovanju RČN predstavlja mašenje, ki povzroča zlasti pri horizontalnih RČN površinski tok in zmanjša zadrževalni čas. Zamašitev pogosto zmanjšuje hidravlično prevodnost do te mere, da prepreči normalno delovanje in je pogosto vzrok zamuljenja površine medija. S tem se zmanjšuje učinkovitost čiščenja, dokler ne dosega več zelenih vrednosti.

Dejavniki, ki povzročajo zamašitev, vključujejo kopičenje suspendiranih trdnih organskih in anorganskih snovi in razvoj mikrobne biomase.

Ugotovljeno je bilo, da mašenje znatno omeji življenjsko dobo medija, ki je ocenjena na 15–25 let. Beauchamp in sodelavci (1988) pa je postavil cel sistem za ovrednotenje življenjske dobe, katerega rezultat je bil 100-letna doba delovanja (Conley in sod., 1991). Številka je verjetno pretirana, vendar pa kaže, da življenjska doba ni dejavnik, na podlagi katerega se ne bi odločili za izgradnjo RČN.

Dolgoletne izkušnje spremljanja delovanja vertikalnih RČN kažejo, da lahko prihaja tudi do mašenja vertikalnih gred RČN. Mašenje površin vertikalnih filtrov, ki je posledica številnih procesov, povzroča zmanjšanje infiltracijske kapacitete površine medija. Ker razgradnja organskih snovi in predvsem nitrifikacija potrebujejo aerobne pogoje, lahko mašenje kritično omeji prenos kisika in povzroči izjemno hiter padec učinkovitosti čiščenja. Mašenje učinkovito zmanjšamo, če izgradnja in velikost primarnega usedalnika zagotavlja,

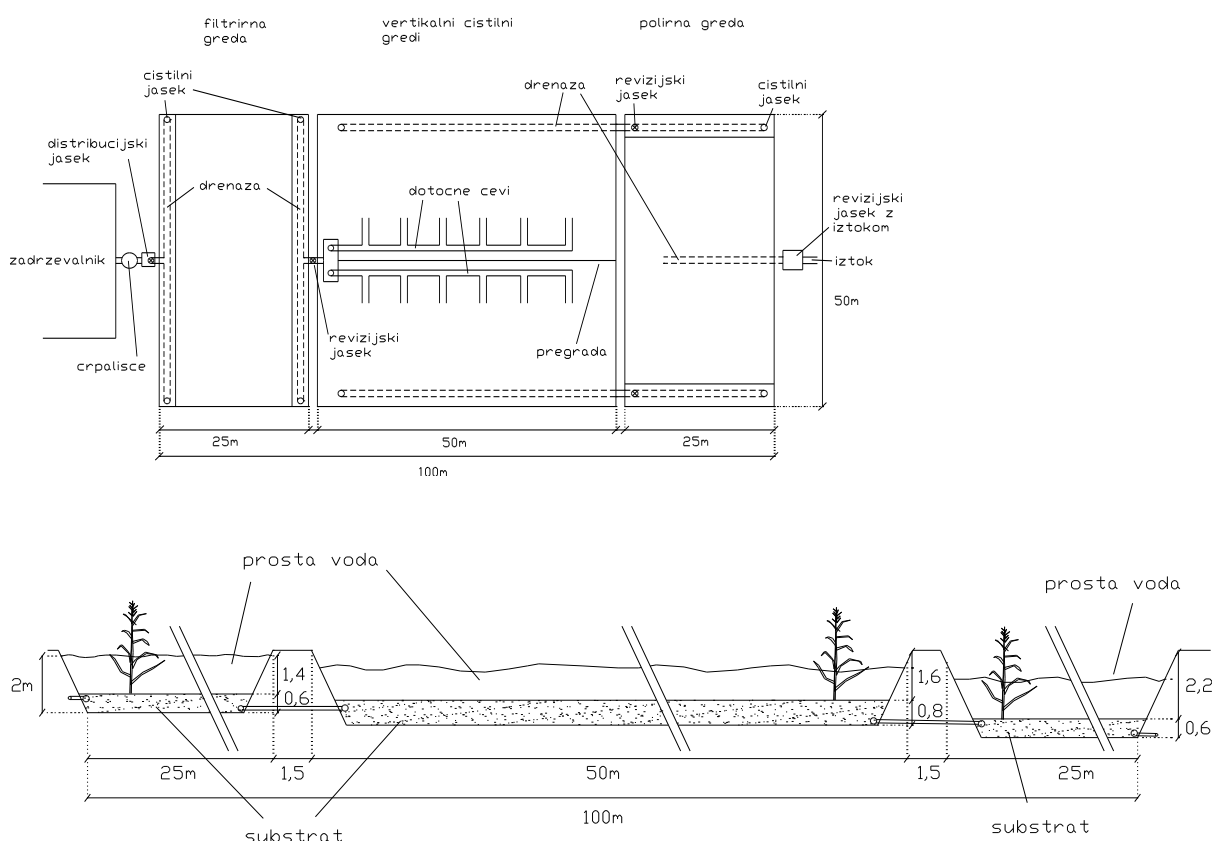
da povprečna koncentracija suspendiranih snovi po usedanju ne presega 100 mg/l in da koncentracija KPK ne presega 20 g/m<sup>2</sup>/d. Kljub temu se izkazuje, da je mehansko predčiščenje z izjemo Francoskih sistemov, ozko grlo pri oblikovanju in uporabi vertikalnih RČN (Langergraber in sod., 2003; Cooper in sod., 2005; Kayser in Kunst, 2005).

Pred gradnjo zato praviloma ocenimo pogoje za obnovo ali zamenjavo poroznega medija, pri čemer je potrebno upoštevati vrsto in s tem povezano učinkovitost predčiščenja, sestavo odpadne vode, način prezračevanja (aktivno ali pasivno prezračevanje) in temperaturo okolja.

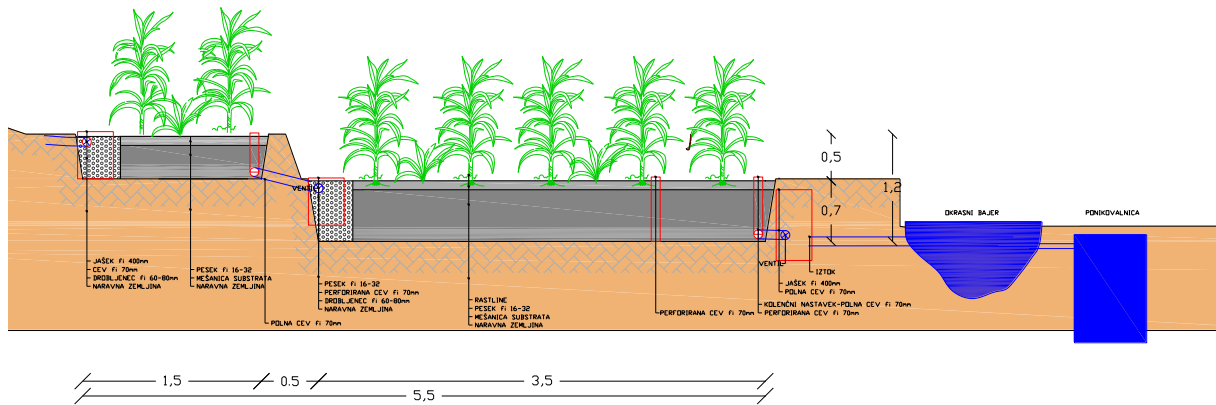
V splošnem pa je znano, da je vzdrževanje RČN načeloma enostavno in da so naprave robustne z veliko pufersko kapaciteto. Menjava medija je v osnovi primeljiva z vzdrževanjem električnih in strojnih delov drugih naprav.

#### 5.7.4 Stroški postavitve

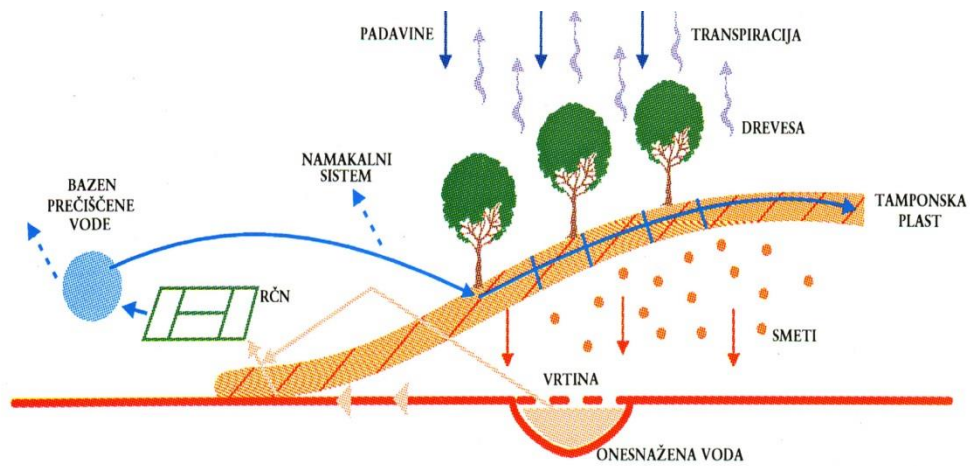
Stroški izgradnje sistema so večinoma odvisni od površine in volumna, ki ga potrebujemo, ter od tehnične izvedbe že prej opisanih sestavnih delov RČN.



Slika 24: Tloris in prečni prerez hibridne rastlinske čistilne naprave.



Slika 25: Primer načrtovanja hibridne rastlinske čistilne naprave z bajerjem za ponovno uporabo vode.



Slika 26: Prikaz RČN za čiščenje izcedne vode, ki se vrača za zalivanje nasada topolov na odlagališču (arhiv Limnos).



*Slikovni prikaz faz izgradnje rastlinske čistilne naprave*



Slika 27: Izkop in polaganje filca za zaščito folije.



Slika 28: Polaganje vodotesne folije.



Slika 29: Sajenje močvirskih rastlin.



Slika 30: Delujoča rastlinska čistilna naprava z zrelem sestojem navadnega trsta.



Slika 31: Primer izgradnje RČN za individualno hišo.

*Slikovni prikaz različnih rastlinskih čistilnih naprav*



Slika 32: Horizontalna rastlinska čistilna naprava za čiščenje izcedne vode iz odlagališča komunalnih odpadkov Ljubevč pri Idriji.



Slika 33: Hibridna rastlinska čistilna naprava za komunalno odpadno vodo v Svetem Tomažu.



Slika 34: Hibridna rastlinska čistilna naprava za izcedne vode na odlagališču komunalnih odpadkov Barje, Ljubljana.



Slika 35: Hibridna rastlinska čistilna naprava za izcedne vode na odlagališču komunalnih odpadkov Ormož.



Slika 36: Hibridna rastlinska čistilna naprava za odpadne vode iz tekstilne industrije.



Slika 37: Rastlinska čistilna naprava za čiščenje padavinskega odtoka z avtoceste Ljubljana–Celje na odseku Hudinja.



Slika 38: Rastlinska čistilna naprava z vertikalnim tokom vode za čiščenje komunalne odpadne vode Mørke, Denmark (Carlos Arias, 2002).

## 5.8 TRSTNE KOMPOSTNE GREDE

Pri izgradnji RČN lahko kot dodatek uporabimo tudi trstne kompostne grede za kompostiranje mulja iz usedalnikov za predčiščenje. V trstnih kompostnih gredah, ki so grajene podobno kot RČN, pa lahko kompostiramo mulj tudi iz klasičnih čistilnih naprav kot je to pogost primer v Nemčiji in na Danskem (Slika 37; Nielsen, 2005). Le-te pretvorijo mulj do visoko kvalitativnega proizvoda, ki se lahko uporablja v kmetijstvu. Na ta način se izognemo strošku odvoza mulja in dodatni obdelavi na ustrezni lokaciji ali odvozu v sežigalnico.



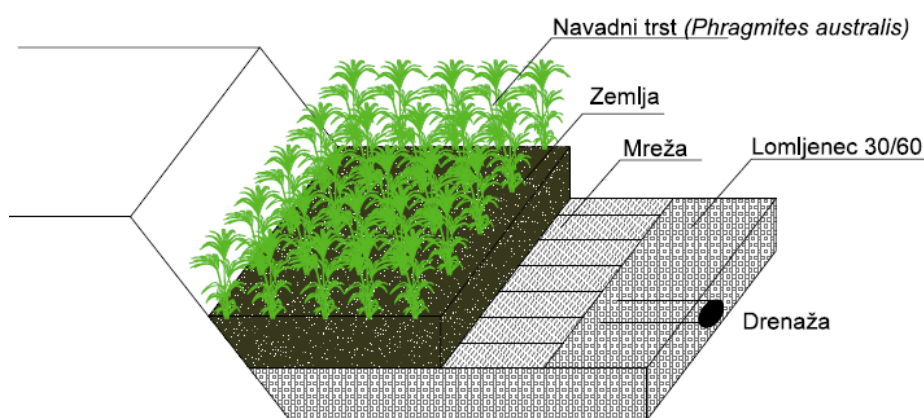
Slika 39: Trstne kompostne grede v Rudkøbingu na Danskem (Steen Nielsen).

Prednost kompostiranja pred drugimi postopki za odstranjevanje organskih odpadkov je v tem, da s kompostiranjem pridobimo material, s katerim je lažje ravnati in ga skladiščiti, kot to velja za mulje čistilnih naprav. Pri pripravi komposta lahko naletimo na nezaželene težave, ki zmanjšujejo uporabnost komposta. Najpogostejši tovrstni problemi so prisotnost težkih kovin, strupenih in težko razgradljivih ali nerazgradljivih organskih snovi v kompostu, patogenih mikroorganizmov in širjenje neprijetnih vonjev v bližini kompostarn.

Izsuševanje in kompostiranje tekočih organskih odpadkov poteka v kompostni gredi predvsem zaradi izcejanja odpadne vode preko drenažnega sistema in evapotranspiracije, ki običajno dosega 40 %. Pri izsuševanju ima pomembno vlogo aktivno privzemanje vode s pomočjo bogato razvitega koreninskega in rizomskega sistema močvirskih rastlin, ki poteka intenzivno tudi v globljih plasteh kompostne grede. Izsuševanje je tako zaradi odvajanja vode s pomočjo korenin in rizomov učinkovitejše kot pri običajnih sušilnih sistemih brez vegetacije, kjer poteka le evaporacija s površinske plasti. Začetni volumen tekočih organskih odpadkov se tako zmanjša za 80–90 %. Tekom izsuševanja se suha organska snov v mulju poveča od 20 do 40 %, kar je predvsem posledica oksidacijskih in redukcijskih procesov ter sposobnosti oddajanja kisika preko koreninskega in rizomskega sistema močvirskih rastlin, kar omogoča učinkovitejšo razgradnjo s pomočjo mikroorganizmov. Poleg teh procesov poteka tudi asimilacija hranilnih snovi ter deloma težkih kovin v rastlinsko tkivo. Metoda kaže tudi visoko učinkovitost pri zmanjšanju pokazateljev fekalnega onesnaženja. Na osnovi omenjenih procesov se tekoči organski odpadki pretvarjajo v kakovostnejši kompost, ki ga je možno na osnovi analize težkih kovin nadaljnje uporabiti.

### 5.8.1 Izgradnja trstne kompostne grede

Trstna kompostna greda mora biti vodotesna. Vodotesnost praviloma zagotovimo s polietilensko folijo debeline 2 mm. Na dnu grede je položena drenaža in nasuta plast peska s premerom 30–60 mm. Organsko blato se na sistem dodaja tedensko glede na razpoložljive količine mulja. Po zahtevani stopnji kompostiranja oziroma, ko se greda napolni, se kompost izprazni. Odpadna voda, ki se izceja iz kompostne grede, se s pomočjo črpalke vrača v usedalnik za predčiščenje odpadne vode. Trstna kompostna greda je, kot to pove že samo ime, zasajena z navadnim trstom. Močno razvejan koreninski in rizomski sistem, velika površina listov omogoča visoko transpiracijo, medtem ko gibanje stebel v vetru pospeši evaporacijo vode iz mulja.



Slika 40: Prerez kompostne grede.

### 5.8.2 Polnjenje kompostne grede

Način polnjenja je lahko eden od težjih opravil na začetku delovanja kompostne grede. Vsekakor je potrebno počakati, da so poganjki navadnega trsta dovolj razviti in da jih polnjenje ne poškoduje. Premočan pritisk pri brizganju svežega mulja v kompostno gredo lahko povzroči, da sveži mulj privzdigne staro skorjo komposta in z njo celo vegetacijsko plast, kar onemogoča dobro zakoreninjenje trsta in s tem zadostno prezračevanje. Zato je najustreznejše, da mulj počasi meži v kompostno gredo, se tako enakomerno porazdeli in ne povzroča privzdigovanja starih, že posušenih plasti. Seveda je polnjenje odvisno tudi od vremenskih razmer, zato je potrebno polnjenje prilagajati padavinam. Količina mulja, ki ga vnašamo v kompostno gredo, se giblje od 10–20 cm/tedensko v poletnem obdobju, to je od maja do oktobra vsako leto. Potem, ko je sestoj navadnega trsta že dovolj razvit, se lahko kompostna greda polni tudi v zimskem času.

Glavni dejavnik za dobro delovanje kompostne grede je učinkovito izsuševanje oziroma izguba vode svežega mulja. Vodne razmere nam kažejo vnos vode s svežim muljem in padavinami na eni strani ter iztok vode preko drenaže in vode, ki se je izgubila s pomočjo evapotranspiracije, na drugi strani.

### 5.8.3 Evapotranspiracija v trstni kompostni gredi

Transpiracija in evaporacija igrata pri trstnih kompostnih gredah najpomembnejšo vlogo. Morfološke in anatomske lastnosti trsta, kot sta velika listna površina in hitra fotosinteza, omogočajo veliko transpiracijo (7,5 l/m<sup>2</sup>/dan), ki ob visokih temperaturah celo presega izhlapevanje prostih vodnih površin. Velika transpiracija omogoča namreč nemoteno fotosintezo tudi ob zelo visokih temperaturah (46 °C), saj se listi ob tem hladijo in imajo celo do 8 °C nižjo temperaturo, kot je temperatura zraka. Transpiracija je v glavnem povečana od maja do septembra, največja pa je v juliju in avgustu.

Zato je razumljivo, zakaj trst igra tako pomembno vlogo pri izsuševanju mulja. Pri tem so meritve transpiracije izredno pomembne. V obdobju polnjenja grede se preko transpiracije v ozračje povrne približno 10 mm/d vode.

Pri gostem sestoju trsta je zasenčenje tal veliko, tako da pride do dna le 10 % celotne svetlobe. V sestoju se zato razvije posebna mikroklima, katere značilnosti so:

- povečana vlaga,
- brezvetrje.

Evaporacija je zato v primerjavi s prosto vodno površino močno zmanjšana in znaša v najvišji točki razvoja trsta le 30 % evaporacije glede na prosto vodno površino.

Na začetku vegetacijske dobe je evaporacija večja od transpiracije, nato zaradi aktivnega oddajanja vode trsta, transpiracija prevlada. Za vodno bilanco je pomembno, da trst zaradi svojega globoko razvitega koreninskega in rizomskega sistema, privzema vodo iz globljih plasti. S tem se kaže pomembna razlika z drugimi postopki kompostiranja, saj v nezasajenih površinah prihaja do oddajanja vode le iz zgornjih plasti, zaradi česar kompost običajno mešamo.

V procesu izsuševanja, biokemijskih procesov ter zmanjšanja pornega volumna se celotni volumen mulja praviloma zmanjša za 85 %. Od tega se 40 % vode zaradi evapotranspiracije izgubi v ozračje, preostali del tekoče faze pa se preko drenažnega sistema vrne v usedalnik in od tu v rastlinsko čistilno napravo.

Preglednica 9 kaže običajne vrednosti izbranih parametrov v mulju kompostne trstne grede.

Preglednica 9: Primer analize nekaterih parametrov v mulju po polnjenju v kompostno trstno gredo.

Meritve	KPK mg/l	BPK <sub>5</sub> mg/l	NH <sub>4</sub> -N mg/l	NO <sub>3</sub> -N mg/l	PO <sub>4</sub> -P mg/l
1	226	46	26	91	2
2	193	12	42	76	0,2
3	141	9	50	101	0,2
4	81	2	54	13	0,2

Izuševanje mulja je zaradi njegove visoke sposobnosti zadrževanja vode v splošnem težavno in nezadovoljivo. Postopek kompostiranja tekočih organskih odpadkov v kompostni gredi pa predstavlja možnost predelave tovrstnih odpadkov na licu mesta.

Kompost običajno izpraznimo iz trste kompostne grede po 10 letih. Končni produkt kompostne grede moramo pred nadaljnjo uporabo analizirati glede prisotnosti patogenih

mikroorganizmov. Kompost ima porozno strukturo z vonjem po zemlji. V primeru, da kompost ne vsebuje prekoračenih vrednosti nedovoljenih parametrov, ga je možno uporabiti za vrtnarjenje in urejanje krajine kot na primer za urejanje brežin in odlagališč.



## SIMBOLI

<b>Simbol</b>	<b>Opis</b>	<b>Enota</b>
Q	pretok skozi sistem	m <sup>3</sup> /d
A	površina sistema	m <sup>2</sup>
q	hidravlična obremenitev	m/d
t	čas	d
V	volumen vode v sistemu	m <sup>3</sup>
Q <sub>i</sub>	vhodni pretok odpadne vode	m <sup>3</sup> /d
Q <sub>o</sub>	izhodni pretok odpadne vode	m <sup>3</sup> /d
h	globina	m
ε	poroznost medija	
C <sub>i</sub>	koncentracija onesnaževal na dotoku	mg/l
C <sub>o</sub>	koncentracija onesnaževal na odtoku	mg/l
LR <sub>i</sub>	koncentracija onesnaževal na dotoku	
LR <sub>o</sub>	koncentracija onesnaževal na iztoku	
Q <sub>c</sub>	prispevna stopnja odtoka	m <sup>3</sup> /d
Q <sub>b</sub>	izguba	m <sup>3</sup> /d
Q <sub>gw</sub>	infiltracija v podtalnico	m <sup>3</sup> /d
Q <sub>sm</sub>	stopnja taljenja snega	m <sup>3</sup> /d
P	padavine	m/d
ET	stopnja evapotranspiracije	m/d
k	koeficient površinske hitrosti odstranjevanja	m/dan
k <sub>t</sub>	konstanta pri temperaturi T	l/da
Θ	temperaturni korekcijski faktor	

## SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

**Absorpcija** – vpijanje ali raztapljanje ene snovi v drugi, npr. absorpcija plina v kapljevini.

**Adsorbpcija** – fizikalna ali kemijska površinska vezava plinov na snov v trdnem agregatnem stanju.

**Anamoks** – anarobna oksidacija amoniaka, kjer se amoniak pretvori v plinsko obliko dušika.

**Biološki filter** – prostor, v katerem so vzpostavljeni pogoji za masovno kolonizacijo bakterij, ki razgradijo amoniak do nitratov.

**Celostni dušik** – je vsota skupnega Kjedahlovega dušika (organski in amoniakov dušik) nitratni in nitritni dušik.

**Celostni fosfor** – je vsota skupnih ortofosfatov, kondenziranih fosfatov in anorganskega fosfata.

**Darcyjev zakon** – obravnava tok vode skozi porozen medij. Leta 1856 je znanstvenik Henry Darcy opisal pretok vode skozi zasičena homogena tla (Smith R.E., 2002).

**Ekoton** – med dvema ekosistemoma je navadno ožje ali širše prehodno območje (ekoton) s posebnimi ekološkimi razmerami.

**Emergentni makrofiti** – ukoreninjene višje rastline, ki rastejo na stalno ali občasno poplavljenih tleh.

**Emergentni makrofiti** – ukoreninjene višje rastline, ki rastejo na stalno ali občasno poplavljenih tleh.

**Evapotranspiracija** – celotno izhlapevanje z rastlinami poraslega območja. Vključuje izhlapevanje vode s površine in iz tal ter aktivno oddajanje vode skozi listne reže.

**Helofiti** – močvirske rastline, katerih del rastline se trajno razvija nad vodo. V času poletne suše pa lahko uspevajo dalj časa tudi na suhem, zato jih imenujemo tudi amfibijske.

**Hidrofiti** – prave vodne rastline, pravi makrofiti ali vrste, ki so stalno v vodi.

**Hoemostaza** – vzpostavljanje ravnovesja.

**Imhoffov usedalnik, Emšer** – dvoetažni usedalnik sestavljen iz dveh komor (zgornja in spodnja), ki sta medsebojno povezani. Zgornja je namenjena sedimentaciji, spodnja pa anaerobni presnovi.

**Koevolucija** – je vzajemno evolucijsko spreminjanje sobivajočih vrst v združbi, ki so povezane z medvrstnimi odnosi, in je proces, ki ga poganja naravni izbor. Čeprav evolucijo usmerjajo tako abiotski kot biotski dejavniki okolja, se je izkazalo, da je koevolucija, ki zajema biotski del dejavnikov, najpomembnejši ekološki in genetski proces, ki oblikuje biodiverzitetu Zemlje.

**Lag faza** – rast mikrobnе populacije. Čas od inokulacije do prve delitve celic imenujemo lag faza.

**Mezokosmos** – razikovalno orodje, s katerim podvržemo nadzoru naravne dele ekosistema

**Najboljše razpoložljive tehnologije** – pomeni »best available technology« (BAT). Zahteva po BAT tehnologijah se je prvič pojavila v Direktivi 96/61/ES z dne 24. septembra 1996 o celovitem preprečevanju in nadzoru onesnaževanja in se nadaljuje v njenih izpopolnjenih verzijah. BAT je pri tem mišljen predvsem iz vidika onesnaževanja okolja. Ko govorimo najboljših razpoložljivih tehnologijah, govorimo v veliki meri o okoljskih tehnologijah, torej o okoljskem inženirstvu.

**Nitrifikacija** – oksidacija amoniaka (iz odmrlih živalskih in rastlinskih organizmov) v dušikovo kislino oziroma v nitrate.

**Obarjanje** – proces, s katerim se s spremembo topnosti (npr. z dodajanjem ustreznih kemikalij) iz raztopine izločijo raztopljene snovi, ki izpadejo kot oborina. Oborina se od matične raztopine loči z usedanjem ali filtriranjem.

**Oksidacija** – kemijska reakcija, pri kateri prihaja do oddajanja elektronov ali oksidacije.

**Plavajoči makrofiti** – neukoreninjene rastline, ki živijo prosto v vodi ali na vodni površini.

**Populacijska enota** – enota, s katero se izrazi hidravlično zmogljivost čistilne naprave. 1 PE je enak 150 l/dan oziroma 60 g BPK<sub>5</sub>/dan.

**Potopljeni makrofiti** – ukoreninjene rastline pod vodno gladino.

**Preprninski pokrov** – zemljina in humus.

**Redukcija** – kemijska reakcija, pri kateri prihaja do prejetja elektronov ali redukcije.

**Sediment** – s svojega nastanka premaknjena preperrnina.

**Sedimentacija** – gravitacijsko usedanje trdnih delcev.

**Trajnostni razvoj** – po definiciji Svetovne Komisije za Okolje in Razvoj pomeni »zadovoljiti trenutne potrebe, ne da bi pri tem ogrožali zadovoljevanje potreb prihodnjih generacij« (Our Common Future, 1987).

**Zemlja ali prst** – zgornji del preperrnine.

**Zemljina** – gline, melji, peski, grušči

## 6 PRILOGA

Mejne vrednosti emisij iz malih komunalnih čistilnih naprav (Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav, UL RS 30/2010):

KPK 150 mg/l

BPK<sub>5</sub> 30 mg/l

Za posamezno MKČN pa se lahko v okoljevarstvenem dovoljenju določi tudi nove parametre in njihove mejne vrednosti (celotni dušik = 15 mg/l, učinek čiščenja celotnega dušika = 70 %, celotni fosfor = 2 mg/l in učinek čiščenja celotnega fosforja = 80 %).

Pri oblikovanju RČN običajno upoštevamo značilne fizikalne in kemijske parametre:

SS (suspendirane snovi)	600 mg/l (35 - 45 kg/dan)
KPK (kemijska poraba kisika)	cca 350 - 500 mg/l
BPK <sub>5</sub> (biokemijska poraba kisika)	cca 200 - 250 mg/l
NH <sub>3</sub> (amoniak)	20 - 30 mg/l
celokupni dušik	40 - 60 mg/l
NO <sub>2</sub> (nitrit)	0,05 - 0,2 mg/l
NO <sub>3</sub> (nitrat)	cca 0,2 mg/l
maščobe	15 - 30 mg/l

### Primer načrtovanja RČN za 25 PE:

Sistem RČN sestavljajo naslednji objekti in naprave:

- Filtrirna greda (F-RČN)
- Čistilna greda (Č-RČN)

TIP NAPRAVE	dolžina	širina	globina	površina	volumen	efektivni volumen
	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i> <sup>2</sup>	<i>m</i> <sup>3</sup>	<i>m</i> <sup>3</sup>
<b>F - RČN</b>	4	4,5	0,5	18	9	2,7
<b>Č - RČN</b>	10	4,5	0,7	45	31,5	9,45
<b>SKUPAJ</b>	<b>14</b>	<b>4,5</b>	<b>1,34</b>	<b>63</b>	<b>6,4</b>	<b>12,15</b>

Pri projektiranju naprave so uporabljene naslednje osnove:

#### IZHODIŠNI PARAMETRI

PROJEKTIRANI PARAMETER	enota	PROJEKTIRANA VREDNOST
Specifična poraba vode	l/preb./dan	150
Dnevna poraba vode	m <sup>3</sup> /dan	3,75
Konični pretok	m <sup>3</sup> /h	0,25
Organska obremenitev	g BPK <sub>5</sub> /osebo/dan	60
Dnevna organska obremenitev	kg BPK <sub>5</sub> /dan	0,6
Organska obremenitev	mg BPK <sub>5</sub> /l	400

#### OBREMENITEV DOTOKA

PARAMETER	Obremenitev dotoka pri Q <sub>srednji</sub>	
	v mg/l	v kg/dan
suspendirane snovi	600	2,25
KPK	400	1,5
BPK <sub>5</sub>	300	1,125
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	30	0,1125
celokupni dušik	60	0,225
NO <sub>2</sub>	0,2	0,00075
NO <sub>3</sub>	0,2	0,00075
maščobe	30	0,1125

#### PROCESNI PARAMETRI

PROCESNI PARAMETER	enota	PROJEKTIRANA VREDNOST
Zadrževalni čas (RČN)	h	96

## 7 LITERATURA

- Armstrong, W., 1978. Root aeration in the wetland environment. Chapter 9. in D. D. Hook and R. M. M. Crawford (Eds.), *Plant Life in Anaerobic Environments*. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science. str. 269–297.
- Beauchamp, D., 1988. The Root Zone Method of Wastewater Treatment: *A Technology Assessment*. School Civ. Environ. Eng., Cornell Univ., Ithaca, N. Y., 227 str.
- Bergen, S. D., Bolton, S. M., Fridley, J. L., 2001. Design principles for ecological engineering. *Ecological Engineering*, 18, str. 201–210.
- Brix H., Arias, C.A., 2005. Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage. *Wat. Sci. Tech.*, 51 (9), str. 1–9.
- Brix, H., 1993. Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates. *Constructed wetlands for water quality improvement*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, USA, str. 391–398.
- Brix, H., 1994. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 29 (4), str. 71–78.
- Bulc T., Vrhovšek D., Šajn-Slak A., 2003. The use of constructed wetland for wastewater treatment in sensitive areas. *J. water supply: res. technol.*, AQUA (Online), str. 1–7.
- Bulc T., Šajn-Slak, A., 2003. Performance of constructed wetland for highway runoff treatment. *Wat. Sci. Tech.*, 48 (2), str. 315–322.
- Bulc, G. T., Zupančič-Justin, M., 2007. Sustainable solution for landfill leachate with a use of phytoremediation. V: Velinni, Albert A. (ur.). *Landfill research trends*. New York: Nova Science Publishers, str. 103–139.
- Bulc, G. T., 2006. Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment, *Ecological Engineering*, 26, str. 365–374.
- Bulc, G. T., 2008. Vloga rastlinskih čistilnih naprav v prihodnosti = The role of constructed wetlands in the future. V: Razinger, J. (ur.). *Ekoremediacije : sredstvo za doseganje okoljskih ciljev in trajnostnega razvoja Slovenije : zbornik*. Ljubljana: str. 33–51.
- Bulc G., T., Istenič D., Šajn-Slak, A., 2012. Ecosystem technologies and ecoremediation for water protection, treatment and reuse. V: Kumarasamy, Muthukrishnavellaisamy (ur.). *Studies on water management issues*. Rijeka: InTech, 2012, str. 193–218.
- Arias, C., Brix, H., Marti, E., 2005. Recycling of Treated Effluents Enhances Removal of Total Nitrogen in Vertical Flow Constructed Wetlands. *Journal of Environmental Science and Health*, 40, Taylor & Francis Inc., str. 1431–1443
- Clayton, R. C., 1988. Report on the ATV (Technical Association for Wastewater). *Seminar on Reedbed Treatment Systems*, 29–30 Sep., Nürnberg, FRG, 42 str.

- Conley, L. M., Dick, R. I., Lion, L. W., 1991. An assessment of the root zone method of wastewater treatment. *WPCF Res. J.*, 63 (3): str. 239–247.
- Cooper, D., Griffin P., and Cooper P., 2005. Factors affecting the longevity of sub-surface horizontal flow systems operating as tertiary treatment for sewage effluent. *Wat. Sci. Tech.*, 51 (9), str. 127–135.
- Cooper, P.F., 1990. European Design and Operation Guidelines for Reed Bed Treatment Systems. V: 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on "Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control", Cambridge, UK, 33 str.
- De Jong, Bucksteeg, K., Kraft, H., Haider, R., Rausch, F., de Jong, J., Ebeling, W., Geller, G., Hülstede, E., Schwedtke, P., Czinski, L., 1987. *Phflanzenklaranlagen*. Udo Pfriemer Buchverlag in der Bauerverlag GmbH, Wiesbaden Berlin, 148 str.
- Gabršič - Kopusar, A., Martinčič, A., 1982. Produktivnost vrste *Phragmites communis* Trin. na Blejskem jezeru. *Biol. vestn.*, 30, 1, str. 25–44.
- Gersberg, R. M., Lyon, S. R., Brenner, R., Elkins, B. V., 1989. Integrated wastewater treatment using artificial wetlands: a gravel marsh case study. Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater treatment*. Chelsea, MI: Lewis Publishers, str. 145–152.
- Haslam, S. M., 1973. Some aspects of the life history and autecology of *Phragmites communis*, *Trin. Pol. Arch. Hydrobiol.* 20, 1, str. 79–100.
- 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. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Sustainable sanitation - ecosan program, Eschborn, Germany, 36 str.
- Kadlec, R.H., Wallace, S.C., 2009. *Treatment Wetlands*. Second Edition. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 1016 str.
- Kadlec, R. H., Knight, R. L., 1996. *Treatment wetlands*. Boca Raton, Florida, USA, Lewis Publishers, CRC Press, Inc., 893 str.
- Kadlec, R.H., 1989. Hydrologic factors in wetland water treatment. *Constructed wetlands for wastewater treatment*. Lewis Publishers, Inc., Michigan, USA, 21 str.
- Kangas P. C., 2004. *Ecological Engineering. Principles and Practice*. Lewis Publishers. 452 str.
- Kayser, K., Kunst, S., 2005. Processes in vertical-flow reed beds—nitrification, oxygen transfer and soil clogging. *Wat. Sci. Tech.*, 51 (9), str. 177–184.
- Kickuth., R., 1970. Ökochemische Leistungen höher Pflanzen (Eco-chemical efficiency of higher plants). *Die Naturwissenschaften*, 57, 2, str. 55-61.
- Kickuth, R., 1984. The root zone method. Gesamthochschule Kassel - Universität des Landes Hessen, 12 str.

- Kompare, B., Atanasova N., Uršič, M., Drev, D., Vahtar, M., 2007. Male čistilne naprave na območju razpršene poselitve, Narodna univerzitetna knjižnica, Ljubljana, 57 str.
- Langergraber, G., Haberl, R., 2001. Constructed wetlands for water treatment. *Minerva Biotecnol* 13(2), str. 123–134.
- Langergraber, G., Haberl R., 2004. Application of Constructed Wetland Technology in EcoSan Systems. In: *Proceedings of the 4th IWA World Water Congress*, Marrakech, Morocco str. 19–24.
- Langergraber, G., Haberl, R., Laber, J., Pressl, A., 2003. Evaluation of substrate clogging processes in vertical flow constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 48 (5), str. 25–34.
- Lawson, G. J., 1985. Cultivating reeds (*Phragmites australis*) for root zone treatment of sewage. Institute of Terrestrial Ecology, Merlewood Research Station, Cumbria, 50 str.
- Molle P., Liénard A., Boutin C., Merlin G., Iwema A., 2005. How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. *Wat. Sci. Tech.*, 51 (9), str. 11–21.
- Nielsen, S., 2005. Sludge reed bed facilities: operation and problems. *Wat. Sci. Tech.*, 51 (9), str. 99–107.
- Odum, H. T., Siler, W. L., Beyers, R. J., Armstrong, N., 1963. Experiments With Engineering of Marine Ecosystems, *Publication of the Institute of Marine Science of the University of Texas*, let. 9, str. 374–403.
- Our Common Future, 1987. Report of the World Commission on Environment and Development, United Nations, str. 6.
- Pahl-Wostl, C., 1995. The dynamic nature of ecosystems: *Chaos and Order entwined*, Wiley, Chichester, 280 str.
- Pucci B., Masi F., Conte G., Martinuzzi N., Bresciani R., 2005. Linee guida Per la progettazione e gestione Di zone umide artificiali Per la depurazione dei reflui civili. ARPAT, Firenze, Italy, 95 str.
- Seidel, K., 1953. Pflanzungen zwischen Gewässern und Land. *Mitteilungen Max-Planck Gessellschaft*, str. 17–20.
- Smith R. E., 2002. Infiltration Theory for Hydrologic Applications. American Geophysical Union. Washington, 212 str.
- Teal, J. M., 1991. Contribution of marshes and salt marshes to ecological engineering. V: C. Etnier and B. Guterstam (Eds), *Ecological Engineering for Wastewater Treatment*. Bokskogen, Gothenburg, Sweden, str. 55–62.
- Todd N. J., Todd J., 1994. Eco-Cities to Living Machines: *Principles of Ecological Design*. North Atlantic Books, 224 str.



- Urbanc-Berčič O., Bulc G.T., Vrhovšek D., 1998. Slovenia. V: Vymazal J. (ur.), Brix H. (ur.), Coošer P. (ur.), Breen M. B. (ur.), Haberl R. (ur.). *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Leiden: Backhuys publishers, str. 241–250.
- Uredba o emisiji snovi pri odvajanju odpadne vode iz malih komunalnih čistilnih naprav, UL RS 30/2010.
- Vrhovšek, D., Bulc, T., 1995. The constructed wetland for secondary waste water treatment. *Hrvatske vode* (3) 13, Zagreb, Hrvaškam str. 357–362.
- Wissing, F., 1995. *Wasserreinigung mit Pflanzen*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 207 str.
- Wang, R., Yan, J., 1998. Integrating hardware, software and mindware for sustainable ecosystem development: Principles and methods of ecological engineering in China. *Ecological Engineering* 11, str. 277–289.
- Wolverton, B.C., 1980. Higher plants for recycling human waste into food, potable water and revitalized air in a closed life support system (*ERL report*), National Aeronautics and Space Administration, National Space Technology Laboratories, 30 str.