

Avtorji prispevka:

Ana Jurše, Ekoremediacijski tehnološki center, Slovenija, [ana@ertc.si](mailto:ana@ertc.si)

Maja Zupančič Justin, Limnos d. o. o., Slovenija, [maja@limnos.si](mailto:maja@limnos.si)

Danijel Vrhovšek, Limnos d. o. o., Slovenija, [dani@limnos.si](mailto:dani@limnos.si)

Alenka Gabersčik, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Slovenija,  
[alenka.gaberscik@bf.uni-lj.si](mailto:alenka.gaberscik@bf.uni-lj.si)

Gregor Božič, Gozdarski inštitut Slovenije, Slovenija, [gregor.bozic@gozdis.si](mailto:gregor.bozic@gozdis.si)

## Vpliv slanosti odpadnih voda na učinek čiščenja rastlinskih čistilnih naprav in rasti topolov v peščenih filtrih

### Izvleček

Pereči problemi industrijske družbe so velika poraba vode in hkratno nastajanje velikih količin odpadne vode ter zviševanje potreb po pitni vodi. To stanje pelje v obvezno potrebo po zmanjševanju porabe vode in ponovni uporabi prečiščene vode za ohranitev čistih virov pitne vode in zdravega naravnega okolja. V okviru dveletnega raziskovalnega projekta »CLEARH2O – Multifunkcijski pristop k čiščenju komunalne in industrijske odpadne vode in scenariji ponovne uporabe vode« smo se osredotočili na iskanje primernih rešitev čiščenja odpadnih voda v prehranjevalni industriji, kjer se povišana slanost pojavlja kot pogost problem. Problema smo se lotili s pomočjo fitoremediacijskih tehnologij, ki v tem primeru kombinirajo čiščenje odpadnih voda in produkcijo biomase hitrorastočih lesnatih rastlin. Pilotni objekt je bil sestavljen iz vertikalnih rastlinskih čistilnih naprav (V-RČN), ki so bile zasajene z avtohtono vrsto navadnega trsa (*Phragmites australis*), in iz vertikalnih peščenih filtrov (V-FILTER), v katerih so bile posajene štiri vrste klonov topola (*Populus deltoides* Bart. cl. I-69/55 (syn. Lux), *Populus x canadensis* Moench cl. I-214, *Populus x canadensis* Moench cl. Guardi, *Populus alba* L. cl. Villa Franca), ti pa so izkazovali toleranco na povišano slanost. Cilj raziskave je bil ugotavljanje učinkovitosti čiščenja odpadnih voda z zmanjševanjem organskih obremenitev (BPK<sub>5</sub>) v pogojih povišane slanosti. Slanost vode je postopno naraščala od 1,4 do 11 mg/L v V-FILTER in od 4,32 do 30,0 mg/L NaCl v V-RČN do konca avgusta 2011. V času trimesečnega eksperimentalnega obdobja z dodano soljo je bil delež porabe vode v V-RČN (evapotranspiracija in asimilacija) 60,5 % dodane vode, medtem ko je v V-FILTER ta delež dosegel 55,5 %. Stopnja porabe vode se je s povečanjem slanosti vode zmanjševala, kar je bilo najbolj očitno v V-FILTER. V V-RČN, zasajeni s trsom iz neslanega okolja, je bilo v povprečju doseženo 40,1 % zmanjšanje KPK vrednosti, medtem ko smo v eksperimentalni V-RČN, zasajeni s trsom iz slanega okolja, dosegli 37,2 % zmanjšanje vrednosti KPK. Skupna nadzemna suha masa je v povprečju večja pri kontrolnih serijah (F-kontr in RČN-kontr) v primerjavi z eksperimentalnimi cisternami pri vseh topolih in trsah. V kontrolni obravnavi V-FILTER izraža *Populus x canadensis* Moench cl. I-214 za malensko višnji suho maso od preostalih klonov, v eksperimentalni F-FILTER pa izraža v vseh cisternah večjo maso *Populus alba* L. cl. Villa Franca.

Ključne besede: slanost, industrijske odpadne vode, vertikalne rastlinske čistilne naprave, vertikalni peščeni filtri, topol, ponovna uporaba vode, čiščenje odpadnih voda

# Effect of wastewater salinity on treatment performance of constructed treatment wetland and growth of poplars in sand filters

## Summary

*The reduction of water consumption is mandatory in the current age and the recycling of treated wastewaters is one of the most obvious and promising options in integrated water resources management. In this view a two-year research project "CLEARH2O - Multifunctional approach to municipal and industrial wastewater treatment and water reuse scenarios" has been applied, where we focused on intensification of treatment processes in wastewater sector of food-processing industry with outflows with high salinity. A phytotechnological solution has been proposed, combining wastewater treatment and reuse for woody plants growth. A pilot experiment has been set-up, combining vertical constructed treatment wetlands (CWs) and vertical sand filters (VFs). Naturally growing *Phragmites australis* plants from two localities with different water salinity have been planted in CWs and cuttings of four poplar clones (*Populus deltoides* Bart. cl. I-69/55 (syn. Lux), *Populus x canadensis* Moench cl. I-214, *Populus x canadensis* Moench cl. Guardi, *Populus alba* L. cl. Villa Franca), with expressed salinity tolerance have been planted in VFs. The aim was to compare their role in wastewater treatment performance in terms of reduction of BOD<sub>5</sub> and their growth response on conditions with high salinity. The water salinity was gradually increased from 1.4 to 11 mg/L in VFs and from 4.32 to 30 mg/L of NaCl in CWs until the end of August 2011. During the three month experimental period with gradual salt addition, the portion of water used in the CWs (evapotranspiration and assimilation) resulted in 60.5% of added water, while VFs achieved 55.5% of water use. The degree of water use decreased with the increase of salinity what was more evident in VFs. The treatment efficiency of CWs, evaluated by COD reduction, was 40.1% on average in experimental CW planted with *Phragmites* from non-salt environment and slightly lower, 37.2% in experimental CW planted with *Phragmites* from salt environment. The VF-contr and CW-contr treatments exhibited on average greater aboveground woody dry mass for all *Populus* clones and *Phragmites* plants. Aboveground woody dry mass is on average greater in VF-kotr and CW-kotr compared to VF-exp and CW-exp. *Populus x canadensis* Moench cl. I-214 exhibited greater mean aboveground woody dry mass in VF-contr treatment compared with other *Populus* clones. *Populus alba* L. cl. Villa Franca exhibited greater mean aboveground woody dry mass in all VF-exp units.*

*Key words: salinity, industrial wastewater, vertical constructed treatment filter, planted salt filter, poplar, water reuse, wastewater treatment*

## 1 Uvod

Rastoče potrebe po vodi v svetu in stroga pravila na področju varstva okolja sta dva glavna izziva, s katerimi se srečujejo strokovnjaki za vodo pri urejanju rabe vode ter učinkovitem urejanju vodnih virov. Potrebe za namakanje in s tem povezani pritiski na vodne vire naraščajo, da bi zadovoljili rastočo rast pridelave hrane. Recikliranje odpadnih voda ter ponovna uporaba vode je razvijajoča se alternativna možnost, ki lahko doprinese k zmanjšanju pritiska na vire sveže vode. Aplikacija tako obdelane vode pa je odvisna od številnih različnih dejavnikov, kot na primer zakonska ureditev področja in politični, tehnični, ekonomski, okoljski ter socialni vidiki (Lazarova in Bahri, 2005). V času dvoletnega raziskovalnega projekta »CLEARH2O- Multifunkcijski pristop k čiščenju komunalne in industrijske odpadne vode in scenariji ponovne uporabe vode« smo se osredotočili na intenzivnost procesov čiščenja odpadnih voda v prehrambni industriji z značilnimi izpusti visoke slanosti. Uporabili smo fitoremediacijski tehnološki pristop, ki vključuje čiščenje

odpadne vode v kombinaciji s ponovno uporabo vode ob tvorbi lesne biomase.

## 1.1 Ozadje

Voda spada med obnovljive vire, v zadnjem času pa je vseeno opaziti povečano pomanjkanje vode, zaradi povečanih potreb, kot tudi klimatskih sprememb, ki ponekod vodijo v usihanje vodnih virov. Na tem mestu se kaže velika potreba po trajnostnejšem upravljanju z vodnimi viri na načine kot je zmanjševanje porabe in izgub ter učinkovitejše čiščenje odpadne vode z možnostjo njene ponovne porabe. Na drugi strani pa se srečujemo z omejenimi finančnimi viri za investiranje v zahtevne tehnološke postopke čiščenja odpadne vode. Zaželeni so torej enostavni pristopi, z nizkimi začetnimi kapitalnimi vložki, kot tudi enostavnim in finančno nezahtevnim obratovanjem in vzdrževanjem.

Odpadno vodo iz različnih sektorjev danes uspešno čistijo do normativov za iztok. Zaradi povečanih potreb se počasi povečuje tudi recikliranje vode. V našem projektu smo se osredotočili na odpadno vodo iz prehranske industrije. Tovrstne odpadne vode so visoko obremenjene z organskimi snovmi, ki so večinoma dobro razgradljive in manjšim deležem težje razgradljivih in strupenih snovi, ki jih je potrebno odstraniti v procesu čiščenja. Poleg tega se lahko pojavljajo visoka nihanja pH, količine vode in drugih onesnaževal, glede na trenutno proizvodnjo, kar narekuje potrebo po specifičnih čistilnih tehnikah. Zelo pogosta skupna problematika teh vod pa so povečane koncentracije soli.

Izsledki najnovejših raziskav potrjujejo, da lahko fitotehnologije (uporaba rastlin v čistilnih procesih) ponujajo učinkovito in okolju prijazno orodje za čiščenje kontaminiranih tal, sedimentov, onesnaženih industrijskih tal in onesnažene odpadne vode. Rastline s svojo stalno prisotnostjo pravzaprav ves čas prispevajo k izboljševanju stanja okolja, tudi brez naših posegov. Topoli in navadni trs so primerne rastline za fitoremediacijo v okoljih z visoko slanostjo (Shannon et al., 1999, Klomjek & Nitisoravut, 2005, Zalesny et al., 2007; Zalesny & Bauer, 2007; Calheiros, 2010). Topoli privzemajo različna onesnaževala, vključno s hranili (nitrat, amonij, fosfat), kovine, metaloide, petrokemijske spojine (goriva, topila), pesticide in topne radionuklide. Topol ima veliko sposobnost transpiriranja vode. S povečano transpiracijo se spiranje hranil v podtalnico s področja korenin zmanjšuje. Privzemanje hranil je močno povezano z velikim koreninskim sistemom z velikim deležem drobnih korenin, ki imajo manj kot 1 mm premera. Te drobne korenine privzemajo velike količine vode in hranil in nudijo življenjski prostor mikoriznim glivam (Licht & Isebrands, 2005). Za topole je znano, da lahko privzemajo od 20 do 50 kg vode na drevo na dan.

Ker s fitotehnološkim procesom težko odstranimo soli iz odpadne vode, je bil naš cilj usmerjen v čim večjo porabo odpadne vode za razvoj nove rastlinske biomase, ki jo lahko večnamensko izrabimo. Eden od ciljev raziskave je bil tako izbira najustreznejših rastlin, ki so prilagojene na pogoje povišane slanosti.

## 2 Metodologija

Raziskava je temeljila na oceni fitoremediacijskega potenciala čiščenja odpadnih voda s povečano slanostjo in visoko organsko obremenitvijo. Cilj je bil določiti najprimernejšo kombinacijo postavitve fitoremediacijskega sistema z več podenotami (cisternami), ki vključujejo rastlinsko čistilno napravo in vegetacijski filter zasajen z drevesi. Namen raziskave je bil doseči čim večjo učinkovitost čiščenja odpadnih voda ter učinkovito zmanjšanje količine odpadne vode. Namen zmanjševanja količine odpadne vode je bil v ponovni uporabi te vode za rast rastlinske biomase, ki jo je možno uporabiti v energetske in druge namene. Učinkovitost čiščenja odpadne vode smo spremljali s pomočjo učinkovitosti zmanjševanja vrednosti organskih obremenitev (KPK, BPK<sub>5</sub>). Primernost izbire posameznih rastlinskih vrst smo spremljali s pomočjo meritev dosežene biomase ter porabe vode v času rasti.

### 2.1 Lokacija in rastlinski material

Objekt raziskave predstavlja pilotni raziskovalni model, ki je bil postavljen v zunanjih prostorih Centralne čistilne naprave Ajdovščina (45°52'N, 13°54'E) v letu 2011 v času

rastne sezone. Mesto postavitve modela smo izbrali zaradi možnosti uporabe odpadnih in komunalnih voda iz primarnega usedalnika čistilne naprave.

## 2.2 Zgradba eksperimenta in obravnave

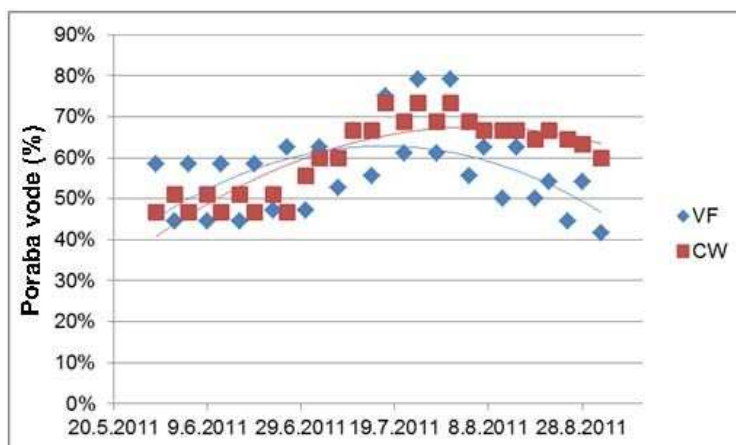
Pilotni objekt je bil sestavljen iz več enot, s čimer smo dosegli dovolj eksperimentalnih ponovitev. Pilotni objekt sestavljata dve eksperimentalni vertikalni rastlinski čistilni napravi (V-RČN), zasajeni z navadnim trsom (*Phragmites australis*) in tri eksperimentalne filtrirne grede (V-FILTER), zasajene s štirimi različnimi kloni topola (*Populus deltoides* Bart. cl. I-69/55 (syn. Lux), *Populus x canadensis* Moench cl. I-214, *Populus x canadensis* Moench cl. Guardi, *Populus alba* L. cl. Villa Franca), z izraženo toleranco na povišano slanost. Eksperimentalne grede smo polnili z razredčeno dotočno vodo komunalne čistilne naprave (iz primarnega usedalnika), kateri smo postopoma dodajali raztopino soli (NaCl). Kot kontrolni objekt smo vzpostavili dve gredi, prvo zasajeno s trstičjem (V-RČN\_kontr) in drugo zasajeno s topoli (V-FILTER\_kontr), v kateri nismo dodajali sol.

Navadni trs smo pridobili iz dveh lokacij z različno stopnjo slanosti: iz obstoječe rastlinske čistilne naprave v bližini CČN Ajdovščina in iz območja solin v Sečovljah. Namen izbora rastlin je proučiti stopnjo fitoremediacijske kapacitete dveh različnih ekotipov trstičja v odpadni vodi s povišano slanostjo. Potaknjence klonov topola smo pridobili iz topolovih klonov gojenih na Inštitutu za intenzivno lesno produkcijo Casale Monferrato, Italija (Unita di Ricerca per le produzioni Legnose fuori Foresta, Casale Monferrato, Italia). Gre za štiri vrste potaknjencev topolov z izraženo povišano stopnjo tolerance na slanost. V eksperimentalnih gredah smo jih uporabili z namenom ugotovitve njihovega fitoremediacijskega potenciala in stopnje rasti v pogojih povišane slanosti.

## 3 Rezultati

### 3.1 Poraba vode

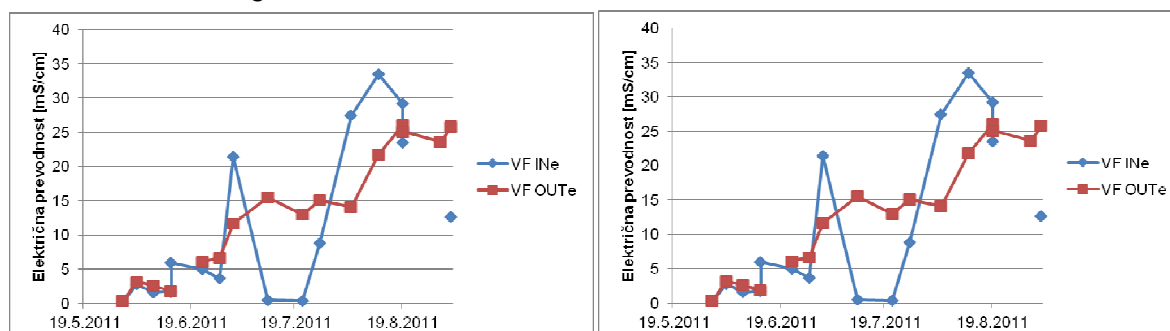
V času tri mesečnega eksperimentalnega obdobja z naraščanjem soli, je bila skupna poraba vode (evapotranspiracija in asimilacija v rastlinsko biomaso) 60,5% in 55,5% glede na skupno dodano količino vode za V-RČN in V-FILTER. Poraba vode je naraščala s povečanjem slanosti, kar je bilo bolj očitno v V-RČN. Odstotek porabljene vode se je spreminjal v času eksperimenta (slika 1, slika 2). V začetku eksperimenta, na primer pri nizki koncentraciji soli, se je poraba vode povečevala v obeh eksperimentalnih V-RČN in V-FILTER in dosegla maksimum pri obeh enotah ob koncu junija, ko je bilo 73% in 79% dotočne vode porabljene za transpiracijo in asimilacijo. Maksimum porabe vode je bil povzročen tudi z visoko transpiracijo v času visokih temperatur in sončnega sevanja. Kljub temu, da se je vroče vreme končalo v avgustu, je poraba vode upadla v obeh enotah, še posebej v V-FILTER. Zmanjševanje porabe vode je bilo zaradi povečevanja koncentracije soli, ki je omejevala rast rastlin. Največje zmanjševanje v porabi vode je bilo v V-FILTER, v primerjavi z V-RČN pa izkazujejo topoli večjo občutljivost na višanje koncentracije soli. Glede na navedbe Jing et. al. (2001) 2,3% koncentracija soli vpliva na rast makrofitov in posledično vpliva na učinek čiščenja v RČN. V njihovi raziskavi je večanje slanosti povzročilo popolno odmrtnje uporabljenih makrofitov v eksperimentu, kar so spremenili s ponovno zasadnjo z makrofiti odpornimi na slanost in s tem dosegli povečano učinkovitost sistema. Slednje lahko primerjamo z našim eksperimentom, kjer so trsi in topoli preživeli 3 % slanost.



Slika 1: Poraba vode v eksperimentalnem V-FILTER in eksperimentalnem V-RČN (VF-vegetacijski filter, CW-vertikalna rastlinska čistilna naprava)

### 3.2 Koncentracija soli in prevodnost

Električna prevodnost oziroma koncentracija Na in Cl ionov je naraščala z višanjem dodajanja soli mešanici vode na dotokih (V-RČN\_dot, V-FILTER\_dot) in iztokih (V-RČN\_izt, V-FILTER\_izt) v eksperimentalnih cisternah. Do zmanjševanja koncentracije Na in Cl ionov s tokom vode skozi cisterne tako ni prišlo (slika 2). Na dotokih je bilo na začetku eksperimenta opaziti povečano nihanje koncentracij soli, kar pripisujemo začetnemu nezadostnemu mešanju in raztapljanju soli. Koncentracija Cl ionov se je gibala na dotoku od 6,670 do 18,200 mg/L za V-FILTER in V-RČN.

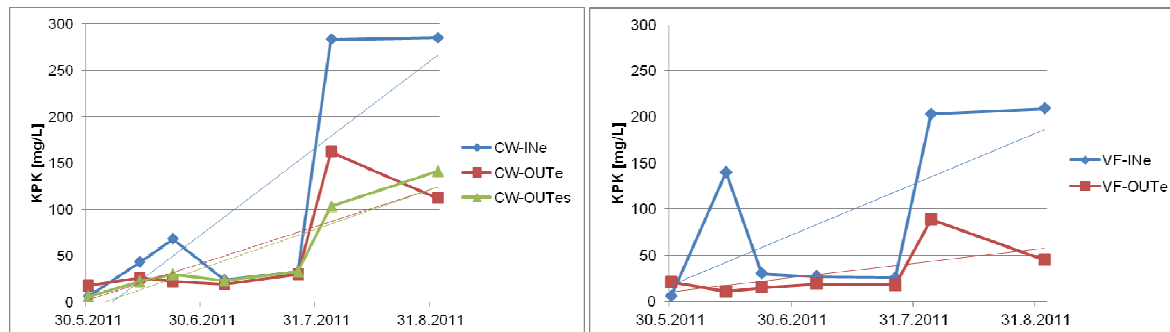


Slika 2: Električna prevodnost na dotokih in iztokih V-RČN (levo) in V-FILTER (desno) (CW INe – eksperimentalna RČN dotok, CW OUTe – eksperimentalna RČN s trsom iz neslanega okolja iztok, CW OUTes – eksperimentalna RČN s trsom iz slanega okolja dotok, VF INe – eksperimentalni FILTER dotok, OUTe – eksperimentalni FILTER, iztok)

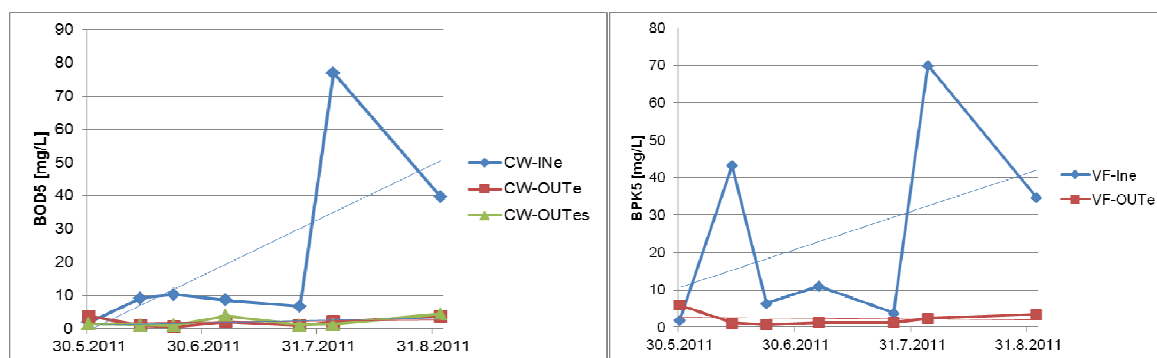
### 3.3 Parametra BPK<sub>5</sub> in KPK

Eksperimentalne enote so bile napolnjene z odpadno vodo iz primarnega usedalnih iz centralne čistilne narave ter rečene z vodo iz vodovoda. Struktura iztočne vode se je spreminjala glede na sezonske spremembe in kvalitete odpadne vode v centralni čistilni napravi. V poletnih mesecih, v času ko so bile manjše količine padavin in višje temperature, je prišlo do povečanja evapotranspiracije, ob tem pa je bila odpadna voda proti koncu eksperimenta bolj koncentrirana. To je pripeljalo do povečanja kemijske potrebe po kisiku (KPK) in biološke potrebe po kisiku (BPK<sub>5</sub>) na dotokih v vseh eksperimentalnih in kontrolnih enotah (slika 3 in 4). Podoben trend je bil opažen za suspendirane delce, dušikove in fosforjeve spojine. V eksperimentalnih enotah je bil KPK in BPK<sub>5</sub> na dotokih višji kot v kontrolnih. Slednje lahko razložimo s povezavo med celičnim materialom v času povečane osmolarnostjo raztopine pri višjih koncentracijah soli (Kinnecanone&Gaudy, 1968) ter z motnjami pri meritvah KPK v slani raztopini z Na in Cl ioni, ki lahko deformira rezultate. Oba

eksperimentalna sistema (V-RČN in V-FILTER) v glavnem kažeta učinkovito odstranjevanje KPK v različnih slanih razmerah (slika 3). Učinkovitost sistema je bila v povprečju med 40,1 in 37,2% za eksperimentalni V-RČN zasajenimi z trsom iz neslanega in slanega okolja. Eksperimentalni V-FILTER zasajen s topoli pa izkazuje višjo učinkovitost odstranjevanja, ki je v povprečju 56,2%, kar je v nasprotju z nizko porabo vode v primerjavi z trsom, vendar lahko povežemo z bolj finim substratom v V-FILTER cisternah.



Slika 3: KPK na dotokih in iztokih za V-RČN (levo) in V-FILTER (desno) (CW INe – eksperimentalna RČN dotok, CW OUTe – eksperimentalna RČN s trsom iz neslanega okolja iztok, CW OUTes – eksperimentalna RČN s trsom iz slanega okolja, VF INe – eksperimentalni V-FILTER dotok, VF OUTe – eksperimentalni V-FILTER iztok)



Slika 4: BPK<sub>5</sub> na dotokih in iztokih za V-RČN (levo) in V-FILTER (desno) (CW INe – eksperimentalna RČN dotok, CW OUTe – eksperimentalna RČN s trsom iz neslanega okolja iztok, CW OUTes – eksperimentalna RČN s trsom iz slanega okolja, VF INe – eksperimentalni V-FILTER dotok, VF OUTe – eksperimentalni V-FILTER iztok)

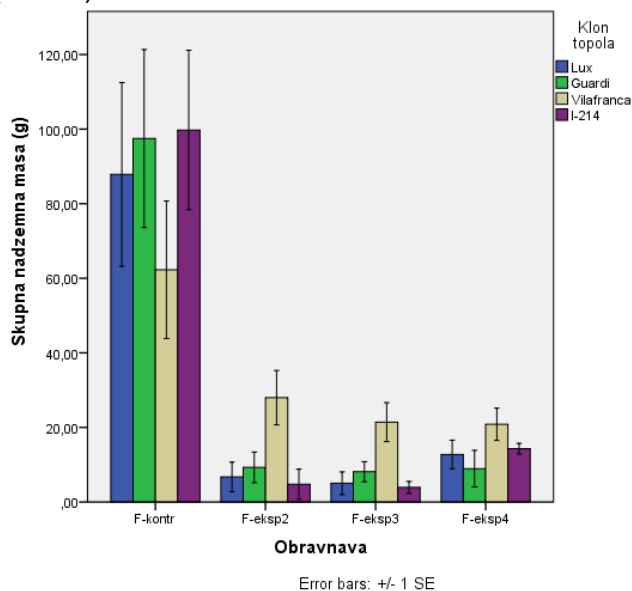
### 3.4 Skupna nadzemna suha masa in višina

Skupna nadzemna suha masa (stebel in vej) za trs in topole je bila ločena v dve skupini rezultatov in sicer za kontrolno in eksperimentalno obravnavo. Kontrolna obravnava, tako v sistemu V-RČN kot v sistemu V-FILTER, je izkazovala večjo skupno nadzemno suho maso trsa in topolov, v primerjavi z eksperimentalnimi obravnavami obeh sistemov (slika 5). V primerjavi srednjih vrednosti nadzemnih suhih mas med štirimi vrstami topolov v ločenih obravnavah, doseže *Populus alba* L. cl. Villa Franca največje vrednosti v vseh eksperimentalnih obravnavah z največjo maso v F-eksp2. Klon *Villa Franca* doseže v eksperimentalni obravnavi najmanjše mase suhih nadzemnih delov izmed vsemi vrstami topolov. *Populus x canadensis* Moench cl. I-214 izkazuje največjo srednjo suho maso v F-kontr, medtem ko v eksperimentalni obravnavi F-eksp2 in F-eksp3 doseže najnižjo suho nadzemno maso.

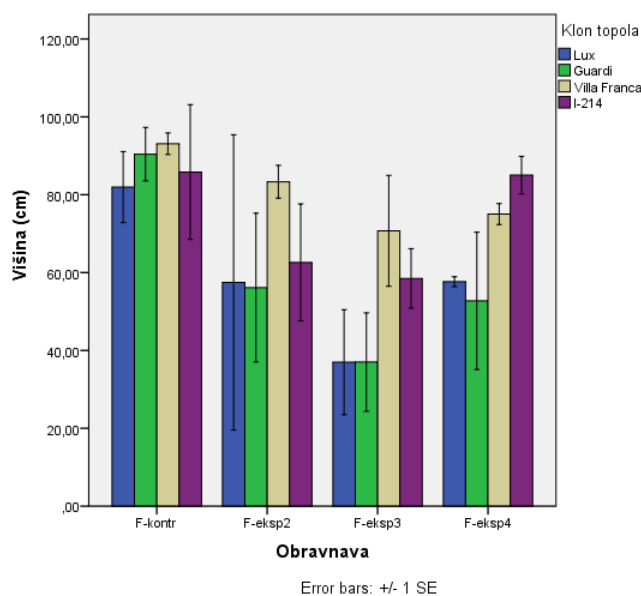
Najvišje višine glavnega poganjka so bile dosežene v kontrolni obravnavi. Najvišji povprečni poganjek je dosegel klon *Populus alba* L. cl. Villa Franca (slika 6). Najnižja višina glavnega

poganjaka je bila v obravnavi F-eksp3, kjer imata *Populus deltoides* Bart. cl. I-69/55 (syn. Lux) in *Populus x canadensis* Moench cl. Guardi najnižji poganjek.

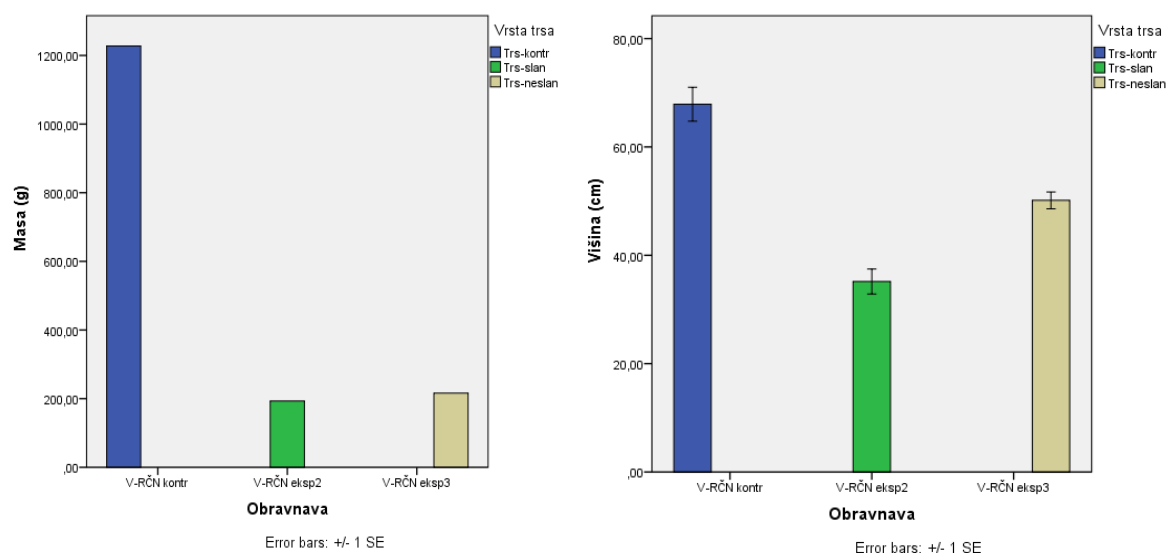
Pri sistemu V-RČN so bile dosežene največje suhe nadzemne mase pri kontrolni obravnavi, kjer je bila v rezultatih upoštevana skupna nadzemna suha masa vseh rastlin v tej cisterni (slika 7). Tudi pri višinah najvišjega poganjka trsa je najvišjo višino dosegel trs v kontrolni cisterni, medtem, ko je trs iz neslanega okolja dosegel višjo višino glavnega poganjka, kot trs iz slanega okolja (slika 7).



Slika 5: Primerjava srednjih vrednosti nadzemne suhe mase in višine dreves za vsako kombinacijo vrste klonov (*Populus deltoides* Bart. cl. I-69/55 (syn. Lux), *Populus x canadensis* Moench cl. I-214, *Populus x canadensis* Moench cl. Guardi, *Populus alba* L. cl. Villa Franca) in obravnav



Slika 6: Srednje višine (cm) štirih vrst klonov topola (*Populus deltoides* Bart. cl. I-69/55 (syn. Lux), *Populus x canadensis* Moench cl. I-214, *Populus x canadensis* Moench cl. Guardi, *Populus alba* L. cl. Villa Franca)



Slika 7: Primerjava srednjih vrednosti nadzemne suhe mase glede trsa iz eksperimentalne in dveh eksperimentalnih cisterne (levo) in primerjava srednjih vrednosti višin najvišjega poganjka trsa iz kontrolne in dveh eksperimentalnih cistern (desno)

#### 4 Razprava in zaključki

Vpliv soli na delovanje mehanizmov pri zaviranju rasti rastlin ter poškodb tkiva so v glavnem razdeljeni v dva procesa: (1) vpliv na način pretoka vode v rastlini, zaradi povečanja topnosti soli, katera upočasni privzem vode in hranil, razen če rastlina uspešno prilagodi svoj notranji osmotski potencial; (2) specifična toksičnost ionov, pri čemer se ioni soli akumulirajo v občutljive dele tkiv in zmotijo metabolizem ter služijo kot sprememba v dodelitvi ionov in ustaviti privzema pomembnih hranil (Allen et. al., 1994). Rastline se na povečano slanost odzovejo v zelo jasnih trendih. Najprej pride do zmanjšane rast in povečane salinizacije substrata. Fotosinteza in stomatalna prevodnost sta lahko tudi zmanjšana zaradi povečane slanosti (Golombek in Ludders, 1990), ob tem pa prihaja tudi do nižjega vodnega potencial rastline (Javanshah in Ewell, 1993; Maas, 1993). Odziv je lahko zelo hiter (izražen v urah ali dnevih), preden koncentracija ionov pride do visokih vrednosti in začno vplivati na osmotski potencial (Munns in Termaat, 1986).

V tej raziskavi sta bili uporabljeni dve vrsti navadnega trsa, iz slanega in neslanega okolja. Pričakovati je bilo, da bo učinek čiščenja večji v V-RČN sistemu, kateri je bil zasajen s trsom iz slanega okolja. Glede na rezultate po končani raziskavi, takšne hipoteze ne moremo potrditi saj ni bilo izražene značilne razlike v učinku med obema cisternama (sistemoma). Trs iz neslanega okolja je izkazoval večjo odpornost na povišano slanost, s tem, da se večja odpornost kaže v malenkost večji odstranitvi BPK<sub>5</sub> in KPK, v primerjavi s trsom iz slanega okolja. Trs iz slanega okolja je imel motnje v adaptaciji v začetnem obdobju eksperimenta, ko še ni bilo dodane soli ter v zmanjševanju koncentracije hranil iz dodane odpadne vode iz centralne čistilne naprave. Učinek čiščenja odpadne vode s povišano slanostjo se lahko poveča z dodajanje halofitskih bakterij ali z zasadnjo rastlinskih čistilnih naprav z halofiti. Kljub temu, da navadni trs ni halofit, je v naši raziskavi učinek čiščenja na enakem nivoju kot v eksperimentu Calheiros et. al. (2010), kjer je bil učinek čiščenja v RČN zasajene z halofiti (58-60% KPK in 60-70% BPK<sub>5</sub>). Koncentracija soli v tem eksperimentu Calheiros et. al. (2010) je bila nižja (električna prevodnost 16 mS/cm) od našega eksperimenta (električna prevodnost 124 in 340 mS/cm za V-RČN in V-FILTER).

Preizkušanje V-RČN in V-FILTER zasajene z navadnim trsom in kloni topola za obravnave odpadnih voda z povišano slanostjo, kaže učinkovito odstranjevanje organskih onesnažil z vidika KPK in BPK<sub>5</sub>, kljub zmanjšani učinkovitosti čiščenja zaradi povišane slanosti. V tem sistemu ni prišlo do zniževanja koncentracije soli v dotočnih vodah. Dosegli pa smo relativno velik privzem vode, ki ga lahko s pravilno izbiro rastlin še povečamo. Specifičen odziv in prilagajanje topolov na stres zaradi salinizacije še ni bil dodobra raziskan (Neuman et. al.,

1996). Produkcija biomase ponavadi narašča z količino dodajanja vode. Negativni učinki na tkiva rastlin in kakovost odpadnih voda, je potrebno predhodno upoštevati, preden se vzpostavi sistem čiščenja odpadnih voda s povišano slanostjo, kot vir namakanja (Neuma et. al., 1996). Suha nadzemna masa je pomembna zaradi določanja učinka povečane slanosti na prirast ter zaradi nadaljnje uporabe te suhe biomase v primeru nadaljevanja raziskave. Rezultati kažejo, da je v nadalje smiselno postaviti filtrirni sistem z drevesno vegetacijo kot začetni čistilni sistem, ki mu sledi RČN zasajena s trsom.

## Literatura in viri

Allen, J.A., Chambers, J.L., Stine, M., 1994. Prospects for increasing the salt tolerance of forest trees: a review. *Tree Physiology*, 14. 843-853.

Brown, J.J., Glenn E.P., Fitzsimmons, K.M., Smith, S.E. 1999. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. *Aquaculture* 175, 255–268.

Calheiros, C.S.C., Teixeira, A., Pires, C., Franco, A.R., Duque, A.F., Crispim, L.F.C., Moura, S.C., Castro, P.M.L. (2010) Bacterial community dynamics in horizontal flow constructed wetlands with different plants for high salinity industrial wastewater polishing. *Wat. Res.* 44, 5032-5038.

Golombek, S.D., Ludders P., 1990. Gas exchange of *Ficus carica* in response to salinity. V: van Beusicher, M.L. (Ed), *Plant Nutrition- Physiology and Applications*. Kluwer Academic, Netherlands. 487-493.

Isebrands, J.G., Karnosky, D.F. 2001. Environmental benefits of poplar culture. In: Dickmann, D.I., Isebrands, J.G., Eckenwalder, J.E., Richardson, J. (Eds.), *Poplar Culture in North America, Part A*, Ch 6. NRC Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa, pp. 207- 218.

Javanshir, K., Ewell K., 1993. Salt resistance of bald cypress. V: Leith. H., Al Masoom, A. (Eds.), *Towards the Rational Use of High Salinity Tolerant Plants*, Vol. 2. Kluwer Academic, Netherlands. 285-291.

Jing, S.R., Lin, Y.F., Lee, D.Y., Wang, T.W. 2001. Using constructed wetland systems to remove solids from highly polluted river water. *Water Sci. Technol.* 1, 89–96.

Justin, M.Z., Zupančič, M., 2009. Combined Purification and Reuse of Landfill Leachate by Constructed Wetland and Irrigation of Grass and Willows. *Desalination* 246, 157-168.

Justin, M.Z., Pajk, N., Zupanc, V., Zupančič, M., 2010. Phytoremediation of Landfill Leachate and Compost Wastewater by Irrigation of *Populus* and *Salix*: Biomass and Growth Response. *Waste Manage.* 30 (6), 1032–1042.

Kincannon, D.F., Gaudy, A.F., 1968. Response of biological waste treatment systems to changes in salt concentrations. *Biotechnol. Bioeng.* 10, 483–496.

Klomjek, P., Nitisoravut, S. 2005. Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions. *Chemosphere* 58, 585–593.

Lazarova V., Bahri A. 2005. *Water Reuse for Irrigation; Agriculture, Landscapes, and Turf Grass*. Boca Raton, CRS Press. 408 str.

- Licht, L.A., Isebrands, J. G., 2005. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. *Biomass and Bioenergy*. 28, 2. 203-218.
- Maas, E.V., 1993. Salinity and citriculture. *Tree Physiology* 12. 195-216.
- Munns, R., Termaat, A., 1986. Whole-plant response to salinity. *Aust. J., Plant Physiology* 13. 143-160.
- Neuman, D.s., Wagner, M., Braatne, J.H., Howe, j., 1996. Stress physiology-a abiotic. V: Stettler, R.F., Bradshaw Jr., H.D., Heilman, P.E., Hickley, T.M. (Eds.), *Biology of Populus and its Implications for Management and Conservation*, Part II, Ch 17. NRC Research press, National Research Council of Canada, Ottawa, 423-458.
- Shannon, M.C., Bañuelos, G.S., Draper, J.H., Ajwa, H., Jordahl, J., Licht, L. 1999. Tolerance of hybrid poplar (*Populus*) trees irrigated with varied levels of salt, selenium, and boron. *International Journal of Phytoremediation* 1, 273-288.
- Zalesny J.A., Zalesny Jr., R.S., Wiese H., A., Sextone B., Hall B., R. 2007. Sodium and chloride accumulation in leaf, woody, and root tissue of *Populus* after irrigation with landfill leachate. *Environmental pollution*, 1-9.
- Zalesny Jr., R.S., Bauer, E.O. 2007. Evaluation of *Populus* and *Salix* continuously irrigated with landfill leachate. I. Genotype-specific elemental phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation* 9, 281- 306.