

LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND

Ökoloogia- ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Jürgen Sarjas

Biosöe mõju horisontaalvoolulise
pinnasfiltersüsteemi toimimise efektiivsusele

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

30EAP

Juhendajad:
Prof. Jaak Truu
PhD Kuno Kasak

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2017

Biosöe mõju horisontaalvoolulise pinnasfiltersüsteemi toimimise efektiivsusele

Tehismärgala, pinnasfilter, biosüsi

T270 Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

Varasemalt on täheldatud, et pinnasise vooluga tehismärgalades jääb tihti orgaanilise süsiniku vähesus denitrifikatsiooni protsessides läbiviimise peamiseks limiteerivaks faktoriks (Truu, et al., 2009; Saeed, et al., 2012). Biosöe lisamisega saab tõsta orgaanika sisaldust horisontaalvoolulistes pinnasfiltrites, et toetada denitrifikatsiooniprotsesside toimimist. Käesoleva töö eesmärk on uurida biosöe mõju horisontaalvoolulise (HF) pinnasfiltersüsteemi toimimise efektiivsusele ja taimekasvule kasutades kombineeritud vertikaal- ja horisontaalvooluliste pinnasfiltrite süsteemi. Katses on kolm HF pinnasfiltri paralleeli: biosöega; biosöega ja taimestatud; taimestatud. Töö käigus hinnati mõju TN, DN, TOC, DOC, TC, TIC, nitraadi ja fosfaadi kontsentratsioonide muutustele. Lisaks uuriti pH taseme, hapniku sisalduse ja biomassi kasvu muutusi. Tulemuste analüüsida võib järeldada: biosöe lisamine taimestatud horisontaalvoolulistesse pinnasfiltritesse parandab oluliselt lämmastiku eemaldamise efektiivsust; biosöe lisamine horisontaalvoolulistesse pinnasfiltritesse ei omanud olulist mõju fosfori eemaldamise efektiivsusele; biosöe lisamine horisontaalvoolulistesse pinnasfiltritesse suurendab märkimisväärselt taimekasvu.

Effect of biochar on wastewater treatment efficiency in horizontal subsurface flow constructed wetland.

CW, HSSF, biochar

T270 Environmental Technology, pollution control

Previous studies have shown that in subsurface flow wetlands denitrification is often hindered by lack of organic carbon (Truu, et al., 2009; Saeed, et al., 2012). Adding biochar to the system can support denitrification processes. The main goal of this study was to investigate the effect of biochar to the treatment efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetland. A VF-HF constructed wetland system was used and during the study the changes in TN, DN, TOC, DOC, TC, TIC, nitrate and phosphate concentration were assessed. The biomass growth, pH, electrical conductivity and O₂ concentration were also monitored. To conclude, the study

confirmed that biochar significantly improved the nitrogen removal efficiency in horizontal subsurface flow constructed wetland. Moreover, the biochar significantly increased plant growth in the horizontal flow filters. Surprisingly, there was no significant effect of biochar to the removal efficiency of phosphorous.

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Kirjanduse ülevaade	6
1.1. Tehismärgalad ja pinnasfiltersüsteemid reovee puhastamiseks	6
1.1.1. Vertikaalvoolulised pinnasfiltrid	6
1.1.2. Horisontaalvoolulised pinnasfiltrid.....	7
1.1.3. Hübriidsüsteemid	8
1.2. Puhastusprotsessid pinnasfiltersüsteemides.....	9
1.2.1. Fosfori eemaldamine.....	9
1.2.2. Lämmastiku	9
1.2.3. Orgaanilise aine	11
1.3. Erinevad filtermaterjalid tehismärgalapuhastites.....	11
1.3.1. Biosüsi	12
2. Materjal ja meetoodika.....	13
2.1. Katse ülesehitus.....	13
2.2. Veeproovide kogumine.....	14
2.3. Biomassi kogumine.....	15
3. Tulemused.....	16
3.1. Veeanalüüsid.....	16
3.1.1. pH.....	16
3.1.2. Hapnik.....	17
3.1.3. Lämmastik	18
3.1.4. Fosfaat.....	23
3.1.5. Orgaanilina aine	26
3.2. Biomassi analüüs	31
4. Arutelu.....	33
5. Kokkuvõte	35
Summary.....	37
Tänuõnad.....	39
Kasutatud kirjandus	40

Sissejuhatus

Üha suureneva rahvaarvuga maailmas, kus puhta vee vajadus ja kasutus kasvab iga päevaga on vaja uurida, kuidas saame vett pärast selle kasutamist puhastada, et loodusesse tagasijuhitud heitvesi ei kahjustaks sealset keskkonda. Looduses toimuvad iseeneslikud vee puhastuse protsessid koguaeg, kuid kui ökosüsteemi reostuse koormus läheb liiga suureks ei tule ökosüsteem sellega ise enam toime. Näiteks võib liiga toitainete rikka heitvee juhtimine loodusesse kaasa tuua veekogude eutrofeerumise. Et rakendada looduses toimuvad protsessid ühiskonna hüvanguks tööle peame looma neile võimalikud soodsad tingimused. Ühe sellise lahendusena on kasutusel võetud tehismärgalad, mis imiteerib looduslikke puhastusprotsesse, et luua võimalikult soodsad keskkonnad saastunud vee puhastamiseks. Kuna vee puhastamise vajadus ainult kasvab, siis on vaja juba olemasolevaid tehnoloogilisi lahendusi täiendada. Varasemalt on tehtud üksikuid katseid parandada horisontaalvoolulise pinnasfiltrite toimimise efektiivsust biosöe lisamisega (Gupta, et al., 2016).

Käesoleva töö eesmärk on uurida biosöe mõju horisontaalvoolulise pinnasfiltersüsteemi toimimise efektiivsusele ja taimekasvule. Töös käsitletud uurimisobjekt asub Nõo reoveepuhasti kõrval, Tartumaal.

1. Kirjanduse ülevaade

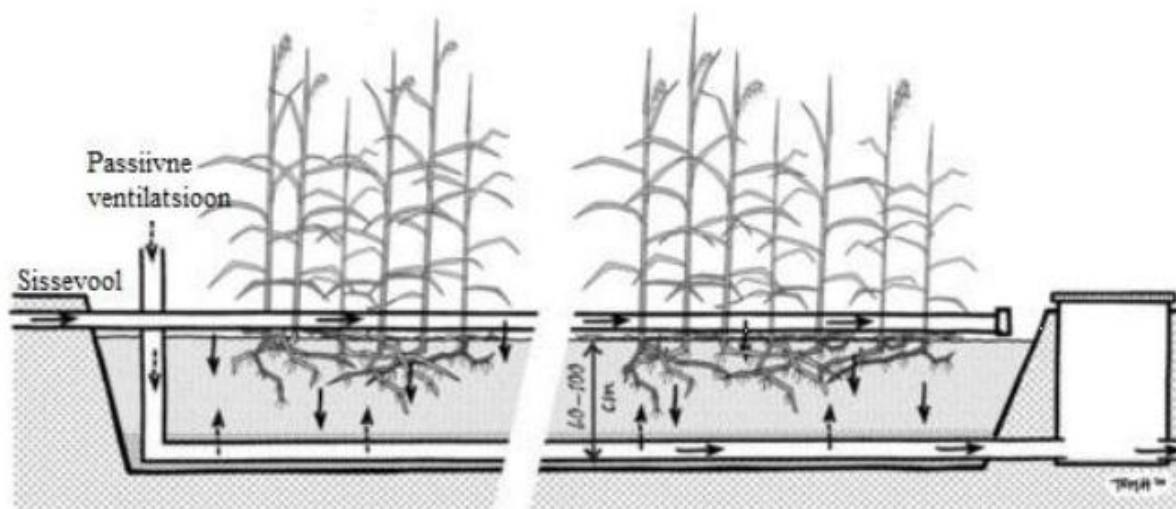
1.1. Tehismärgalad ja pinnasfiltersüsteemid reovee puhastamiseks

Tehismärgalade loomisel on aluseks võetud looduses toimuvad vee puhastumise protsessid ning need on kujundatud ja ehitatud nii, et soodustada looduses toimuvate protsesside toimumist veest reostuse eemaldamiseks. Looduslike lahendusi ära kasutatavaid süsteeme saab suures pildis jagada kaheks: vaba- ehk avaveelised süsteemid (*surface flow systems*) ning pinnasisesse vooluga süsteemid ehk pinnasfiltrid (*sub-surface flow systems*). Avaveelisi süsteeme jaotatakse seal kasutatavate taimede järgi: ujvtaimedega (*floating vegetation*) süsteemid või põhja kinnituvate taimedega (*sessile vegetation*) süsteemid. Pinnasfiltreid jagatakse tööpõhimõtte järgi horisontaal- ja vertikaalvoolulisteks pinnasfiltriteks (*horizontal and vertical sub-surface flow systems*) (Fondera, et al., 2013). Vee efektiivsemaks puhastamiseks on levinud hübriidsüsteemide loomine, kus kasutatakse vertikaal- ja horisontaalvoolulisi pinnasfiltreid ning avaveelisi süsteeme järgemööda (Vymazal, 2008).

Antud töö keskendub hübriidsüsteemi kuuluva horisontaalvoolulise pinnasfiltris biosöe kasutamise mõju uurimisele filtri puhastusefektiivuse võimele ja taimede kasvule.

1.1.1. Vertikaalvoolulised pinnasfiltrid

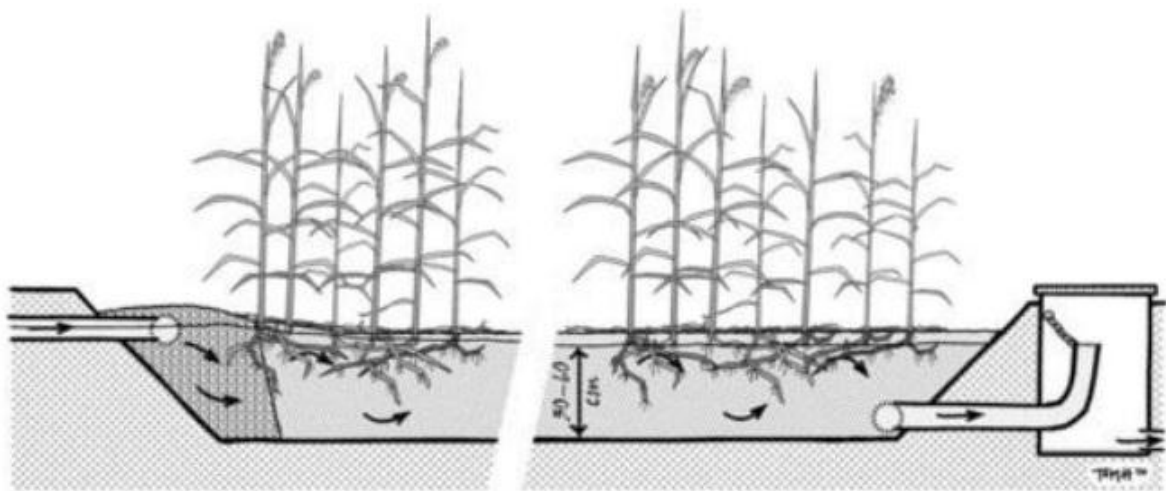
Vertikaalvoolulistes pinnasfiltrites (VF) (Joonis 1) juhatakse eelpuhastuse (septik) läbinud reovesi filtri pinnale ja see imbub raskusjõu mõjul läbi filtri pinna. Filtris olev mikroobikooslus kasutab vees olevaid toitaineid oma elutegevuseks. VF-ides kasutatakse erinevate hüdraulilise juhtivusega täitematerjale ja materjalide kihtide omadustega muudetakse vee voolukiirust (Noorvee, et al., 2007). VF filtrid on väga hästi aereeritud kuna filtrit läbides tõmbab vesi endaga kaasa hapnikku. Sellega tekib filtris soodne keskkond aeroobsete protsesside toimimiseks (nt. nitrifikatsioon) (Vymazal, 2007). Tänu VF võimele oksüdeerida ammooniumit vesilahustes, on neid näiteks kasutatud ka edukalt kõrge ammooniaagi sisaldusega reovete puhastamiseks (nt. prügilate nõrgvesi). (Kadlec, et al., 2009)



Joonis 1. Vertikaalvooluline pinnasfiltri sekeem (Fondera, et al., 2013).

1.1.2. Horisontaalvoolulised pinnasfiltrid

Horisontaalvoolulistes pinnasfiltrites (HF) (Joonis 2) läbib puhastatav vesi pinnasfiltri materjali horisontaalselt ja tavaliselt on filter taimestatud, sest varasemad uuringud on näidanud, et taimed soodustavad filtri veepuhastuse efektiivsust ja aitavad hoida pinnasfiltris toimuvad protsessid käimas ka madalatel välisõhu temperatuuridel (Kadlec, et al., 2009). Horisontaalvoolulistes pinnasfiltrites valitseb peamiselt anaeroobne keskkond, sest filtrid on pidevalt veega küllastunud. Sellest tulenevalt on HF filtrites soodustatud anaeroobsete puhastusprotsesside toimimine (nt. denitrifikatsioon) (Kadlec, et al., 2009). Aeroobset keskkonda leidub HF filtris veega küllastamata pinnakihi ja taimejuurte ümber (Vymazal, et al., 2009). HF filtrite kasutamine on laialt levinud sekundaarseks reoveepuhastamiseks (Kadlec, et al., 2009). Külmemates kliimades on HF filtritel suur eelis teiste märgala süsteemide ees, sest filtri pinnal on tavaliselt paarikümne sentimeetrine veega küllastamata kiht. See toimib isoleeriva kihina säilitades filtris toimuvate protsesside kulgemise ka madalatel välisõhu temperatuuridel. Talvekuudeks on võimalus isolatsiooni suurendamise eesmärgina katta HF filter multši kihiga ja koos taimede maapealse osale langenud lumekatte isoleeriva toimega on võimalik vältida filtri külmumine ka miinuskraadide juures (Kadlec, et al., 2009). HF filtritel on tulenevalt disainist suurendatud ummistumise risk ning vajavad töökorras hoidmiseks regulaarset hooldust (Noorvee, et al., 2007).



Joonis 2. Horisontaalvoolulise pinnasfiltri skeem (Fondera, et al., 2013).

1.1.3. Hübriidsüsteemid

Parema puhastusefektiivsuse saavutamiseks on laialt levinud erinevate pinnasfiltrite kombineerimine hübriidsüsteemiks (Vymazal, 2008). Tavaliselt läbib puhastatav vesi esimesena vertikaalvoolulise pinnasfiltri, kus toimub orgaanilise aine lagundamine, ammonifikatsioon ja nitrifikatsioon. Seejärel juhitakse vesi horisontaalvoolulisse pinnasfiltrisse, kus toimub peamiselt denitrifikatsioon ja fosfori sidumine filtermaterjalile ning toitainete sidumine taimede biomassi (Vymazal, 2007). Levinud on ka puhastatava vee edasine juhtimine läbi avaveelise tehismärgala, et saavutada veelgi tõhusam veepuhastus (Vymazal, 2009).

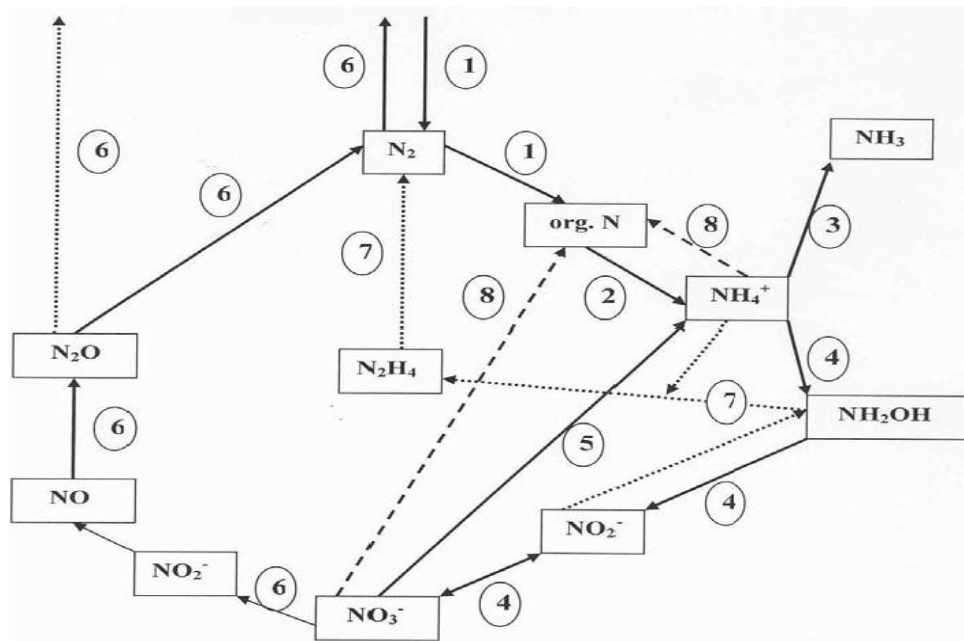
1.2. Puhastusprotsessid pinnasfiltersüsteemides

1.2.1. Fosfori eemaldamine

Fosfor esineb reovees peamiselt ortofosfaadina, polüfosfaadina ja orgaanilise fosforina (Kadlec, et al., 2009). Fosfor ei lahku pinnasfiltersüsteemist metaboolsete protsesside toimel vaid akumulereerub süsteemis (Noorvee, et al., 2007). Fosfori eemaldamine veekeskkonnast toimub peamiselt horisontaalvoolulises filtris, adsorptsiooni ja sedimentatsiooni ja ka vähesel määral taimede poolse sidumise teel. Pinnasfiltersüsteemist eemaldatakse fosforit juhul kui biomassi regulaarselt niidetakse (Vymazal, 2007). Pinnasfiltersüsteemides on edukas fosfori ärastus reoveest saavutatud spetsiaalsete filtermaterjalide väljatöötamisega nagu näiteks *Filtralite-P*® (Ádáma, et al., 2007). Lisaks tööstuse poolt välja arendatud spetsiaalsetele filtermaterjalidele on uuritud ka erinevaid jääkprodukte. Näiteks Eestis on uuritud hüdratiseerunud põlevkivi tuhaplatoosette mõju fosfori eemaldamisele horisontaalvoolulistes filtrites (Kõiv, et al., 2009; Kasak, et al., 2015; Kasak, 2016).

1.2.2. Lämmastiku eemaldamine

Lämmastik esineb reovees väga erinevates vormides ja ühendites. Kõige olulisemad anorgaanilised lämmastikühendid on: ammoonium (NH_4^+), nitrit (NO_2^-), nitraat (NO_3^-), gaasiline lämmastik (N_2) ja dilämmastikoksiidi (N_2O). Orgaanilist lämmastiku esineb looduses näiteks urea, aminohappete, amiinide, puriinide, ja pürimidiinide kujul (Kadlec, et al., 2009). Lämmastikringe on väga kompleksne süsteem ja reoveest eemaldamiseks peavad lämmastikühendid läbima mitmeid protsesse (Joonis 3) (Vymazal, et al., 2008; Truu, et al., 2009).



Joonis 3. Joonisel on näidatud peamised lämmastikringe protsessid. 1- lämmastiku bioloogiline sidumine, 2-ammonifikatsioon (mineralisatsioon) 3-ammooniumi volatilisatsioon, 4-nitrifikatsioon, 5-nitraadi ammonifikatsioon, 6-denitrifikatsioon, 7-ANAMMOX, 8-taimede ja mikroobide poolne sidumine (Vymazal, et al., 2008).

Vertikaalfiltrites toimub lämmastiku muundamine peamiselt mikroobide poolt läbiviidava nitrifikatsiooni protsessi abil. Nitrifikatsioon on kahe astmeline protsess, mille esimese astme käigus oksüdeeritakse ammoonium nitritiks ja teise astme käigus nitrit nitraadiks (Vymazal, et al., 1998). Horisontaalfiltris on lämmastiku puhastusefektiivsus peamiselt seotud denitrifikatsiooni, volatilisatsiooni, adsorptsiooni ja taimede poolt sidumisega (Vymazal, 2007). Kõige olulisem neist protsessidest on denitrifikatsioon, mis on mitmeastmeline nitraatlämmastiku redutseerimise protsess, mille käigus nitraat redutseeritakse pöördumatult molekulaarseks lämmastikuks või naerugaasiks (dilämmastikoksiid) (Noorvee, et al., 2007). Hübridsüsteemis toetab algselt aeroobne keskkond ning seejärel anaeroobne keskkond süsteemi üldist puhastusaktiivsust, sest vertikaalfiltri aeroobses keskkonnas oksüdeeritakse ammoniaak peaaegu täielikult ja lämmastikühendid jäävad horisontaalfiltris denitrifikatsiooni protsessidele jaoks soodsale kujule (Vymazal, 2007).

1.2.3. Orgaanilise aine vähendamine

Orgaaniliseks aineks loetakse tehismärgalades peamiselt heljuvaint ja lahustunud orgaanilisi ühendeid, mida mikroorganismid elutegevuseks kasutavad. Levinuimad orgaanilise aine sisalduse mõõtmise meetodid on keemilise (KHT) ja biokeemilise hapnikutarve (BHT) määramine. Üha enam eelistatakse orgaanilise aine sisalduse määramiseks otse süsiniku ühendite (TC, DOC, TOC, TIC) kontsentratsioonide määramist veeproovidest, kuna BHT määramine on ajamahukas ja KHT määramisel tekib elavhõbedat ja kroomi sisaldavaid ohtlike jäätmeid (Dubber, et al., 2010). Heljuvaine eemaldatakse tehismärgala süsteemides tavaliselt mehhaanilise setitamise teel, näiteks septikus, settetiikides või -basseinides. Kui heljuvaint ei eemaldata, siis võib see suurendada süsteemi ummistumise ohtu just eriti pinnasfilterüsteemides (Noorvee, et al., 2007). Heljuvaine eemaldamisel mängib suurt rolli ka puhastatava vee viibeaeg süsteemis. Mida pikem on viibeaeg, seda efektiivsem on heljuvaine eemaldamine (Rossia, et al., 2005). Hübriidsüsteemides toimub peamine lahustunud orgaanilise aine lagundamine VF filtrites, sest lahustunud orgaanilise aine aeroobne lagundamine on tunduvalt kiirem kui anaeroobne lagundamine (Noorvee, et al., 2007).

Kuna VF filtrites lagundatakse suur osa orgaanilisest ainest, siis muutub selle kogus HF filtrites denitrifikatsiooni limiteerivaks faktoriks. Et suurendada HF filtrites denitrifikatsiooni efektiivsust on võimalik lisada sinna täiendavat orgaanilist ainet näiteks biosöe näol (Gupta, et al., 2016). Lisatud biosöega tõstetakse orgaanilise aine sisaldust HF filtrites, et toetada seal toimuvad denitrifikatsiooni protsesse. Pinnasise vooluga tehismärgalades jääb tihti orgaanilise süsiniku vähesus nitrifikatsiooni-denitrifikatsiooni protsessides läbiviimise peamiseks limiteerivaks faktoriks (Truu, et al., 2009; Saeed, et al., 2012).

1.3. Erinevad filtermaterjalid tehismärgalapuhastites

Filtermaterjali valik on tehismärgalapuhasti projekteerimisel väga oluline, sest tulenevalt filtermaterjali omadustest muutuvad ka puhastusprotsesside toimimise efektiivsused (Kasak, 2016). Filtermaterjali valikul tuleb lähtuda puhastatava vee omadustest ja kaaluda milliste protsesside toimimise efektiivsust on vaja tõsta. On tehtud uurimusi erinevate looduslike filtermaterjalide nagu näiteks killustik, kruus, liiv ja turvas (Kängsepp, et al., 2008) ja ka tööstuslike materjalide nagu kergkruus, *Filtralite*® ja *Filtralite-P*® (Ádáma, et al., 2007;

Karabelnik, et al., 2012) sobivusest täitematerjalina kasutamiseks. *Filtralite*® ja *Filtralite-P*® on kergkruusad, mis välja töötatud eeskätt horisontaalvooluliste pinnasfiltrite tarbeks. Lisaks on uuritud tootmisprotsesside jääkide nagu näiteks tuha ja räbu kasutamist filtermaterjalidena (Karabelnik, et al., 2012; Vohla, et al., 2007).

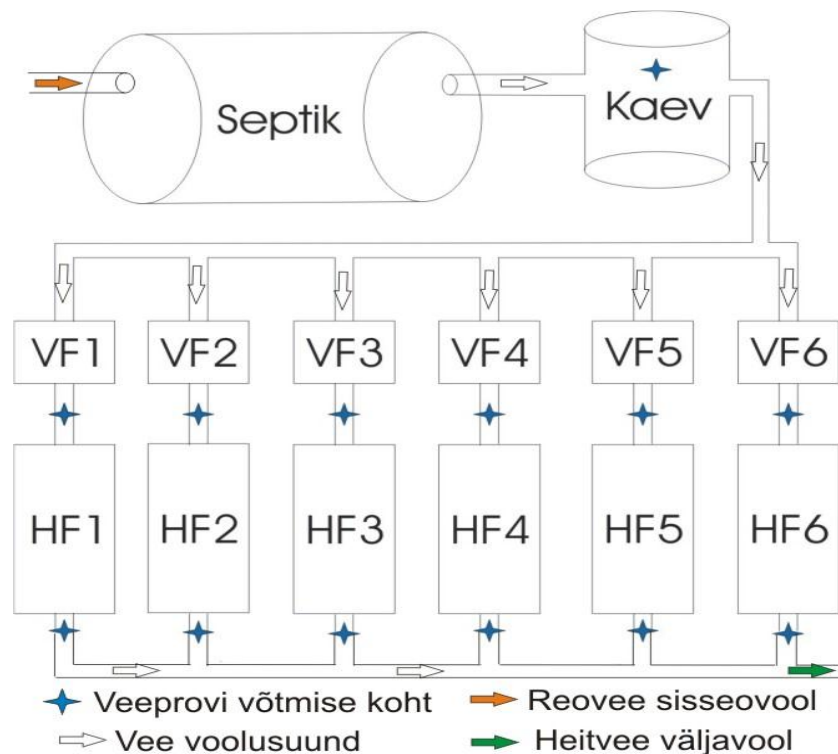
1.3.1. Biosüsi

Biosüsi on süsinikurikas tahke materjal, mida toodetakse biomassi kuumutamise ja hapnikuvaeses keskkonnas. Biosöe tootmisel jagatakse protsessid kaheks: kõrgel temperatuuril (>550 °C) kuumutamine ja madalal temperatuuril (<550 °C) kuumutamine. Kui lisada madalal temperatuuril valmistatud biosüti niiskesse pinnasesse, siis tõuseb pinnases oleva lahustunud süsiniku kontsentratsioon märgatavalt (Joseph, et al., 2010). Sellest tulenevalt on biosüti kasutatud pinnasfiltersüsteemides lahustunud orgaanilise aine sisalduse tõstmiseks, et toetada N ja P ärastusprotsesside läbiviimist. Varasemad katsed on näidanud, et mõõdukal määral biosöe lisamisel pinnasesse parandab see seal kasvavate taimede bioloogilist lämmastiku ja fosfori sidumist (Gupta, et al., 2016). Biosüsi toimib ka hea absorbendina ja on aktiivsöe kõrval enim kasutatud absorbent veekeskkonnas reostuse sidumiseks (Tan, et al., 2015). Biosöe tootmine on soodsam ja lihtsam võrreldes aktiivsöe tootmisega ning toorained, millest saab biosüti toota, on paremini kättesaadavamad (Tan, et al., 2015). On väidetud, et biosüsi ei paranda lämmastiku ühendite kättesaadavust pinnases, vaid parandab baariumi (B), kaaliumi (K), kaltsiumi (Ca), fosfori (P) ja tõenäoliselt ka molübdeeni (Mo) kättesaadavust ning tõstab pH taset (Rondon, et al., 2007). Kuid on vajalikud edasised uuringud kuidas eelmainitud elementide kättesaadavus turgutab taimed biomassi kasvu ja kas taimede biomassi kiirema kasvuga paraneb ka lämmastiku sidumine taimede biomassi.

2. Materjal ja meetodika

2.1. Katse ülesehitus

Käesolevas töös kasutatud katsesüsteem asub Nõo reoveepuhasti kõrval, Tartumaal. Katse ülesehitus on näha joonisel 4. Reovesi läbib kõigepealt 2 m³ mahuga septiku, milles reovee viibeaeg oli umbes kaks ööpäeva. Seejärel pumbatakse vesi vahekaevust vertikaalfiltritele (VF1-VF6) mõõtmetega 1x1x1 m ja ruumalaga 1 m³. VF filtrid on täidetud kihiti LECA kergkruusaga (0–0,2 m sügavusel osakeste diameeter 10–20 mm, 0,2–0,8 m sügavusel osakeste diameeter 2–4 mm, 0,8–1 m sügavusel osakeste diameeter 10–20 mm). Vertikaalfiltritest liigub vesi edasi horisontaalfiltritesse (HF1-HF6), mõõtmetega 0,6x0,6x1,5 meetrit (laius x sügavus x pikkus) ja ruumalaga 0,54 m³, mis on täidetud LECA kergkruusaga, mille osakeste diameeter oli 2–4 mm. Süsteemi hüdrauliline koormus on 60 L/d ja vee viibeaeg filtris umbes 2 päeva.



Joonis 4. Katsesüsteemi ülesehituse skeem. Joonisel on näidatud veeproovide kogumise kohad ja vee voolu suund süsteemis.

Katses olid horisontaalfiltrid jagatud paarikaupa, et tekiksid võrreldavad paralleelid. Horisontaalfiltritele HF1 ja HF2 lisati 10% filtri mahust biosütt. HF3 ja HF4 filtermaterjalile lisati 10% biosütt ning mõlemale filtrile istutati 10 elujõulist hundinuia taime (*Typha latifolia*) ning filtritele HF5 ja HF6 istutati samuti 10 elujõulist hundinuia taime (*Typha latifolia*). Hundinuiaid koguti Nõost umbes 10 kilomeetri kauguselt looduslikust elujõulisest populatsioonist. Enne ümberistutamist lõigati maha taimede maapealne osa ning juured pesti hoolikalt. HF filtrite taimestamine toimus 13.06.2016. Käesoleva eksperimendi läbiviimiseks kasutati lehtpuusütt *Premium Quality Charcoal*, mis on toodetud (95% lepast ja 5% kask, tamm, lõhmus või paju) Lätis (FILLE 2000, SIA). Süsteemil lasti 58 päeva (13.06.16-10.08.16) aklimatiseeruda ja mikroobikooslustel välja areneda. Katse käigus (10.08.2016 kuni 12.10.16) koguti perioodiliselt veeproovid vahekaevust (süsteemi sissevool), vertikaalfiltrite ja horisontaalfiltrite väljavooludest (Joonis 4). Vegetatsiooniperioodi lõpus (12.10.16) koguti taimestatud filtrites kasvanud maa-alune ja maapealne biomass. Biomassi kogumise täpsem metoodika on kirjeldatud peatükis 2.3.

2.2. Veeproovide kogumine

Katse käigus koguti periooditi veeproovid vahekaevust enne vertikaalfiltritele pumpamist ning vertikaal- ja horisontaalpinnafiltrite väljavooludest (Joonis 4). Kohapeal mõõdeti horisontaalfiltrites oleva vee pH tase, elektrijuhtivus, temperatuur ja hapniku sisaldus WTW Multi 3420 Set G seadmega. Laboris määrati veeproovide TN (üldlämmastik), DN (lahustunud lämmastik), TOC (üldorgaaniline süsinik), DOC (lahustunud orgaaniline süsinik), TC (üldsüsinik) ja TIC (üldanorgaaniline süsinik) kontsentratsioonid. Veeproovide analüüsimiseks kasutati autoanalüsaatorit Vario TOC Cube (Elementar GmbH, Saksamaa). Lisaks määrati nitraadi ja fosfaadi kontsentratsioon spektrofotomeetril DR2800 (Hach-Lange) töö koostaja poolt. Andmed korrastati ja lisati tabelisse.

2.3. Biomassi kogumine

Vegetatsiooni perioodi lõpus koguti taimestatud filtrites taimede biomass. Taimede biomassi kogumisel jagati iga taimestatud horisontaalfilter kolmeks osaks (Joonis 5). Proovid koguti eraldi filtri sissevoolu juurest, keskelt ja väljavoolu juurest. Taimede biomassi kogumisel eraldati alad üksteisest metallplaatidega ja seejärel koguti nii maapeale kui ka maa-alune biomass ainult vastavast alast. Seejärel viidi biomass laborisse, pesti veega puhtaks ning määrati igas alas kasvanud biomassi märgkaal. Kõikidest aladest võeti representatiivne kogus biomassi ning määrati selle märgkaal ning asetati toatemperatuurile kuivama kolmeks päevaks. Seejärel kuivatati representatiivsed proovid lõplikult kuivatuskapis 24 tunni jooksul 80 C° juures ja määrati iga proovi kuivkaal. Proovide kuivkaalu ja märgkaalu suhte järgi arvutati kogu biomassi kuivkaal. Tulemused korrastati ja lisati tabelisse.



Joonis 5. Taimeproovide kogumiseks jagati horisontaalpinnasfiltrid kolmeks võrdseks osaks.

2.4. Statistiline analüüs

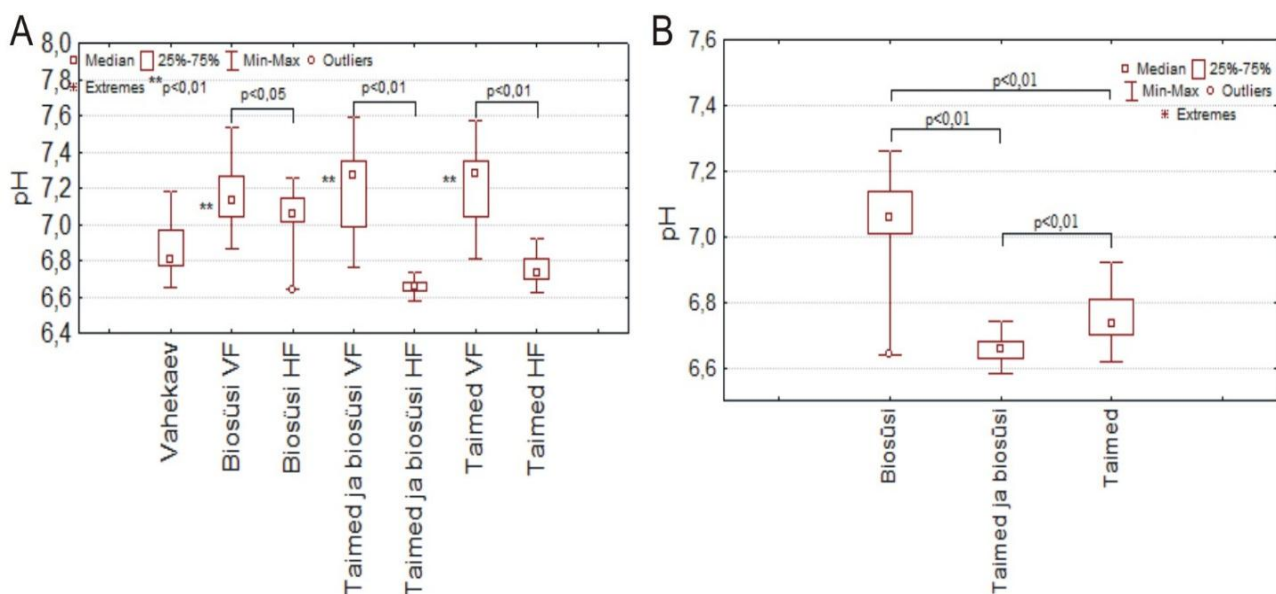
Kogutud andmed analüüsiti programmides MS Excel ja STATISTICA 10. Statistilise erinevuse usalduspiiride määramiseks teostati andmetega Mann-Whitney U-testid. Mann-Whitney U-test on null hüpoteesi mitteparameetiline statistiline test, mis näitab kas juhuslikult valitud väärtus esimesest väärtuste grupist on erinev juhuslikult valitud väärtusest teises väärtuste grupis. Statistilise erinevuse testide läbiviimiseks võeti kokku horisontaalvooluliste pinnasfiltrite paralleelid (Biosüsi - HF1 ja HF2, Taimed ja biosüsi - HF3 ja HF4, Taimed - HF 5 ja HF6). Joonistele märgiti ainult olulised statistilised erinevused koos vastavate usalduspiiridega. Olulisuse nivoo oli kõigil juhtudel $p < 0,05$.

3. Tulemused

3.1. Veeanalüüsid

3.1.1. pH

Pinnasesse või veekogusse juhitud vees on lubatud pH minimaalne tase 6,0 ja maksimaalne tase 9,0 (RT I, 16.12.2016, 6 Lisa 1). Enne VF-idele juhtimist oli vahekaevus mõõdetud pH mediaanväärtus 6,81, mis katseperioodil kõikus 6,65 - 7,18. VF-ide läbimisel oli märgata kõigis VF-ides olulist ($p < 0,01$) pH tõusu. Pärast VF-ide läbimist mõõdetud pH väärtused olid vahemikus 6,76 - 7,59. Kõikide HF filtrite puhul oli märgata olulist pH langemist (biosüsi $p < 0,05$; taimed ja biosüsi $p < 0,01$; taimed $p < 0,01$). Pärast HF-ide läbimist olid mõõdetu pH mediaanväärtused biosöega paralleelis 7,06 (min. 6,64; max. 7,26), taimede ja biosöega paralleelis 6,66 (min. 6,58; max. 6,74) ning taimedega paralleelis 6,74 (min. 6,62; max. 6,92). Statistiline analüüs näitas, et pärast kogu süsteemi läbimist oli taimestatud paralleelides pH oluliselt madalam, kui taimestamata paralleelis ($p < 0,01$) ning taimestatud ja biosöega rikastatud paralleelis veel omakorda oluliselt madalam, kui ainult taimestatud paralleelis ($p < 0,01$) (Joonis 6).

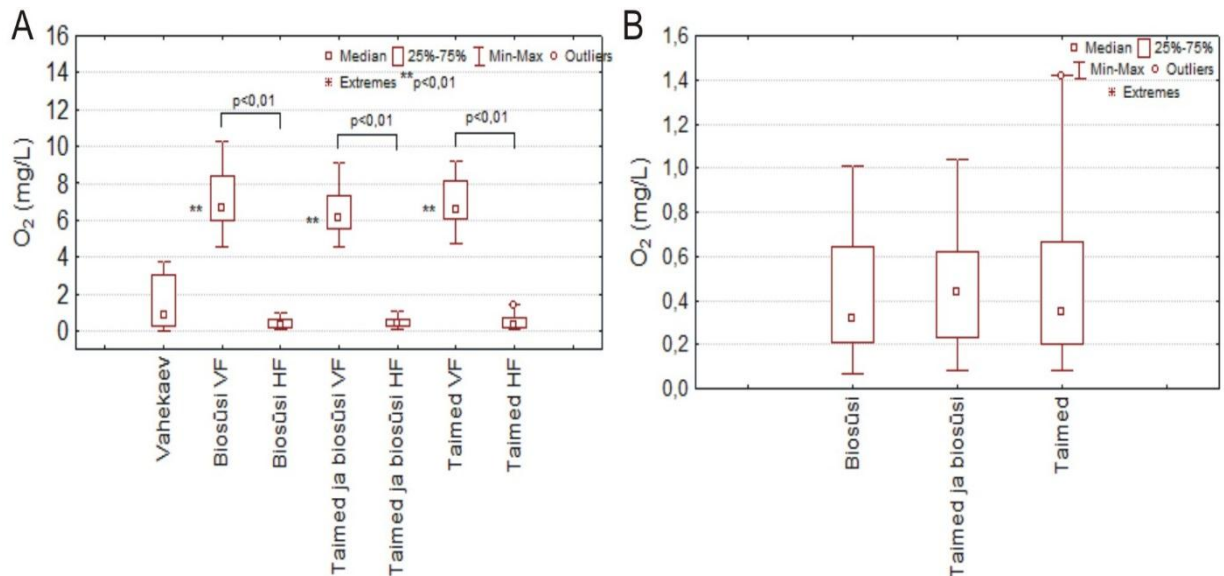


Joonis 6. **A** - pH väärtuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite pH väärtuste vahel. **B** - pH väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega.

3.1.2. Hapnik

Hapniku kontsentratsioonile loodusesse juhitava heitvee jaoks ei ole seaduses kehtestatud piirväärtusi. Hapniku kontsentratsioon on oluline uuritava keskkonna kirjeldamiseks. Kui hapniku kontsentratsioon vees jääb alla 2 mg/L, siis loetakse keskkonda anaeroobseks ja kui hapniku kontsentratsioon on üle 2 mg/L, siis loetakse keskkonda aeroobseks.

Mõõdetud hapniku kontsentratsioonid näitasid, et vahekaevus oli valdavalt anaeroobne keskkond. Hapniku sisalduse mediaanväärtus vahekaevus oli 0,82 mg/L (min. 0,03 mg/L; maks. 3,78 mg/L. Kolmel mõõtekorrall ületas hapniku kontsentratsioon vahekaevus 2 mg/L piiri. VF-ide läbimisel tõusis kõikide paralleelide puhul hapniku kontsentratsioon oluliselt ($p < 0,01$). VF-idest väljunud vee mõõdetud hapniku kontsentratsioonid jäid vahemikku 4,77 – 10,29 mg/L. Paralleelide vahelisel võrdlusel on näha, et VF-ides jäid hapniku kontsentratsioonid suhteliselt ühtlastele tasemele, vahemikku 4,77-10,29 mg/L ja oli igal mõõtekorrall valitses VF-ides aeroobne keskkond. HF-ide läbimisel langes kõikide paralleelide puhul hapniku kontsentratsioon oluliselt ($p < 0,01$). HF-ides mõõdetud hapniku kontsentratsioonide mediaanväärtused olid biosöega paralleelis 0,32 mg/L (min. 0,07 mg/L; max. 1,01 mg/L), taimede ja biosöega paralleelis 0,44 mg/L (min. 0,08 mg/L, max. 0,67 mg/L) ja taimedega paralleelis 0,35 mg/L (min. 0,08; max. 1,42 mg/L). HF-ides olevad kontsentratsioonid jäid suhteliselt ühtlasele tasemele, vahemikku 0,07-1,42 mg/l ja igal mõõtekorrall valitses HF-ides anaeroobne keskkond (Joonis 7).



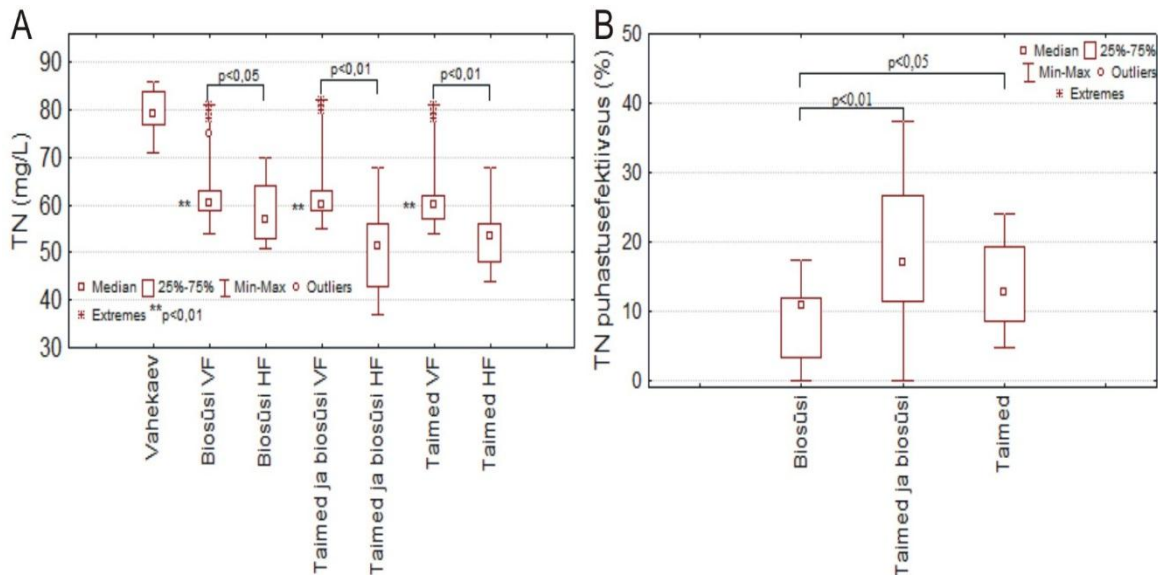
Joonis 7. **A** - Hapniku kontsentratsiooni väärtuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite hapniku kontsentratsioonide vahel. **B** - Hapniku kontsentratsiooni väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa.

3.1.3. Lämmastik

Lämmastiku puhul on seaduses määratud piirnormid heitvee loodusesse juhtimisel. Üldlämmastiku jaoks on need kehtestatud vastavalt reoveekogumisala reostuskoormusele. Töös on kasutatud piirnorme, mis vastavad reostuskoormusel 300-1999 ie. Sellele reostuskoormusele vastavad üldlämmastiku piirnormid loodusesse juhitas heitvees on 60 mg/l ja puhastusefektiivsuse peab olema vähemalt 30% (RT I, 16.12.2016, 6 Lisa 1).

Katse käigus mõõdetud üldlämmastiku (TN) kontsentratsioonide mediaanväärtus vahekaevus oli 79 mg/L, mis katseperioodil kõikus vahemikus 71-86 mg/L. VF-ide läbimisel langes kõikide paralleelide puhul TN kontsentratsioon oluliselt ($p < 0,01$). Pärast VF filtrite läbimist mõõdetud TN kontsentratsioonide väärtused olid vahemikus 54-82 mg/L. Kõikide HF-ide puhul oli märgata olulist TN kontsentratsioonide langemist (biosüsi $p < 0,05$; taimed ja biosüsi $p < 0,01$; taimed $p < 0,01$). Pärast HF-ide läbimist olid mõõdetud TN kontsentratsioonide mediaanväärtused biosöega paralleelis 57 mg/L (min. 51 mg/L; max. 70 mg/L), taimede ja biosöega paralleelis 51,5 mg/L (min. 37 mg/L; max. 68 mg/L) ning taimedega paralleelis 53,5 mg/L (min. 44 mg/L; max. 68 mg/L). HF-ide puhastusefektiivsuse mediaanväärtus oli biosöega paralleelis 10,8% (min. 0%; max. 17,3%), taimede ja biosöega paralleelis 16,9% (min. 0%;

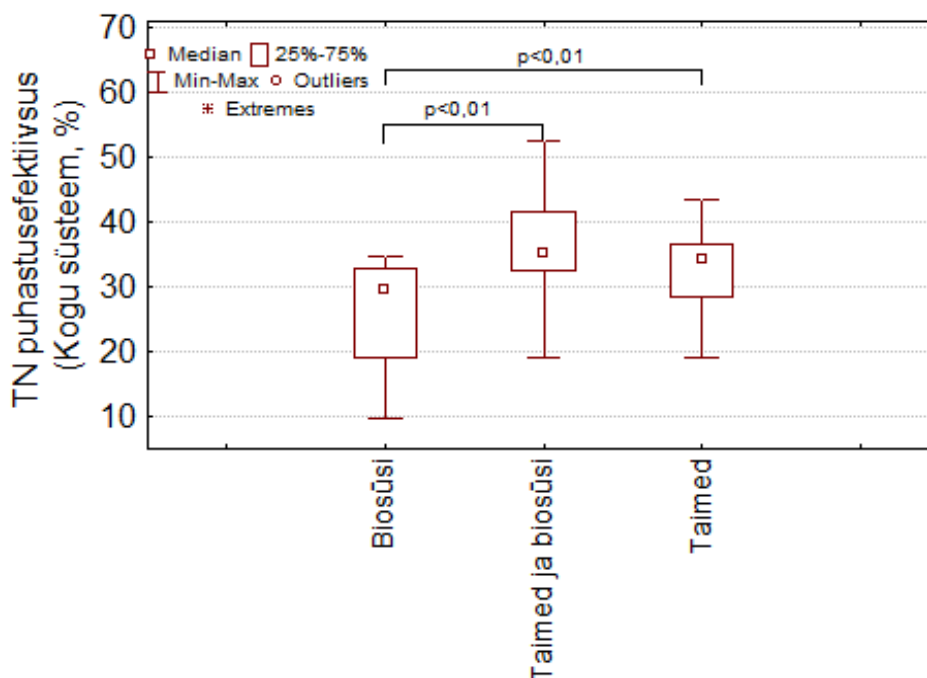
max. 37,3%) ja taimedega paralleelis 12,8% (min.4,8%; max. 24,1%). HF filtrite paralleelide puhastusefektiivsuste analüüsimisel selgus, et taimede ja biosöega paralleelis oli TN puhastusefektiivsus oluliselt kõrgem, kui biosöega paralleelis ($p<0,01$) ning taimedega paralleelis oluliselt kõrgem, kui biosöega paralleelis ($p<0,05$). Taimede ja biosöega paralleeli ja taimedega paralleelide vahel statistiliselt olulist erinevust ei esinenud (Joonis 8).



joonis 8. **A** - Üldlämmastiku kontsentratsiooni väärtuste jaotumine paralleelide kaupa statistiliste koos erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite üldlämmastiku kontsentratsioonide vahel. **B** - Üldlämmastiku puhastusefektiivsuse väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega.

Kogu süsteemi VF-ide ja HF-ide paralleelide kaupa kombineeritud puhastusefektiivsuste mediaanväärtused olid biosöega paralleelis 29,6% (min. 9,9%; max. 34,6%), taimede ja biosöega paralleelis 35,3% (min. 19,1%; max. 52,6%) ja taimedega paralleelis 34,3% (min. 19,1%; max 43,6%). Statistiline analüüs näitas, et pärast VF-ide ja HF-ide läbimist oli

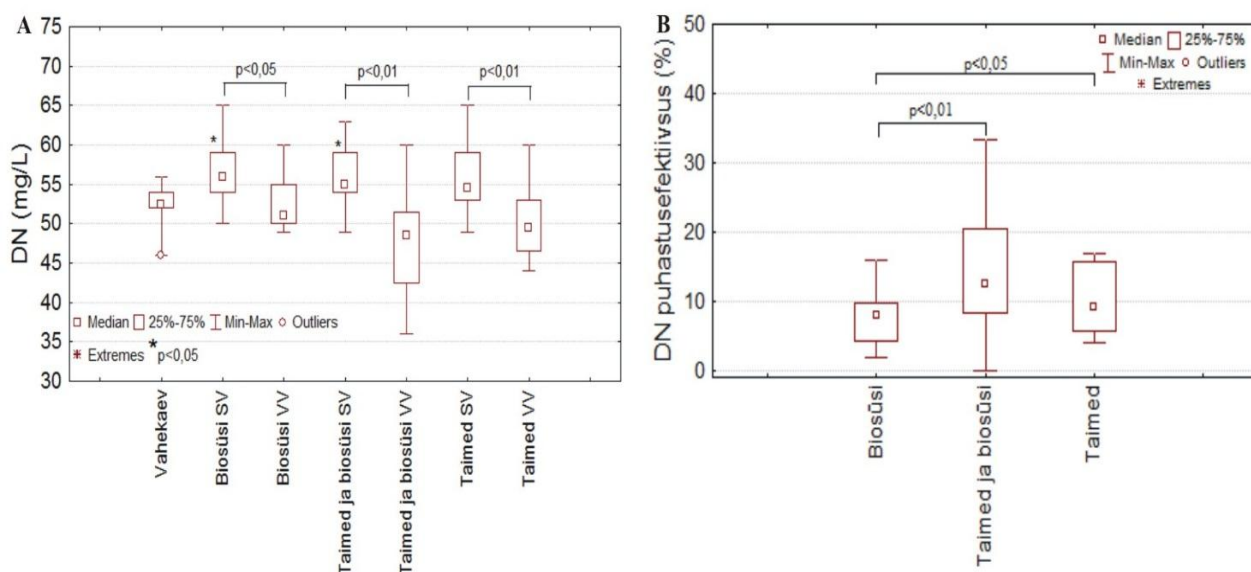
taimestatud paralleelides TN kontsentratsioon oluliselt madalam, kui mittetaimestatud paralleelis ($p < 0,01$) (Joonis 9).



Joonis 9. Kogu süsteemi üldlämmastiku puhastusefektiivsuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega.

Katse käigus mõõdetud lahustunud lämmastiku (DN) kontsentratsioonide mediaanväärtus vahekaevus oli 52,5 mg/L, mis katseperioodil kõikus vahemikus 46-56 mg/L. VF-ide läbimisel langes DN kontsentratsioon oluliselt ($p < 0,05$) ning mõõdetud DN kontsentratsioonide väärtused olid vahemikus 49-65 mg/L. Kõikide HF filtrite puhul oli märgata olulist DN kontsentratsioonide langemist (biosüsi $p < 0,05$; taimed ja biosüsi $p < 0,01$; taimed $p < 0,01$). Pärast HF-ide läbimist olid mõõdetud DN kontsentratsioonide mediaanväärtused biosöega paralleelis 51 mg/L (min. 49 mg/L; max. 60 mg/L), taimede ja biosöega paralleelis 48,5 mg/L (min. 36 mg/L; max. 60 mg/L) ning taimedega paralleelis 49,5 mg/L (min. 44 mg/L; max. 60 mg/L). HF-ide puhastusefektiivsuse mediaanväärtus oli biosöega paralleelis 7,6% (min. 1,9%; max. 10,7%), taimede ja biosöega paralleelis 15,3% (min. 0%; max. 33,3%) ja taimedega paralleelis 9,5% (min. 4,1%; max. 17%). HF filtrite paralleelide puhastusefektiivsuste analüüsimisel selgus, et taimede ja biosöega paralleelis oli DN puhastusefektiivsus oluliselt kõrgem, kui biosöega paralleelis ($p < 0,01$) ning taimedega paralleelis oluliselt kõrgem, kui biosöega

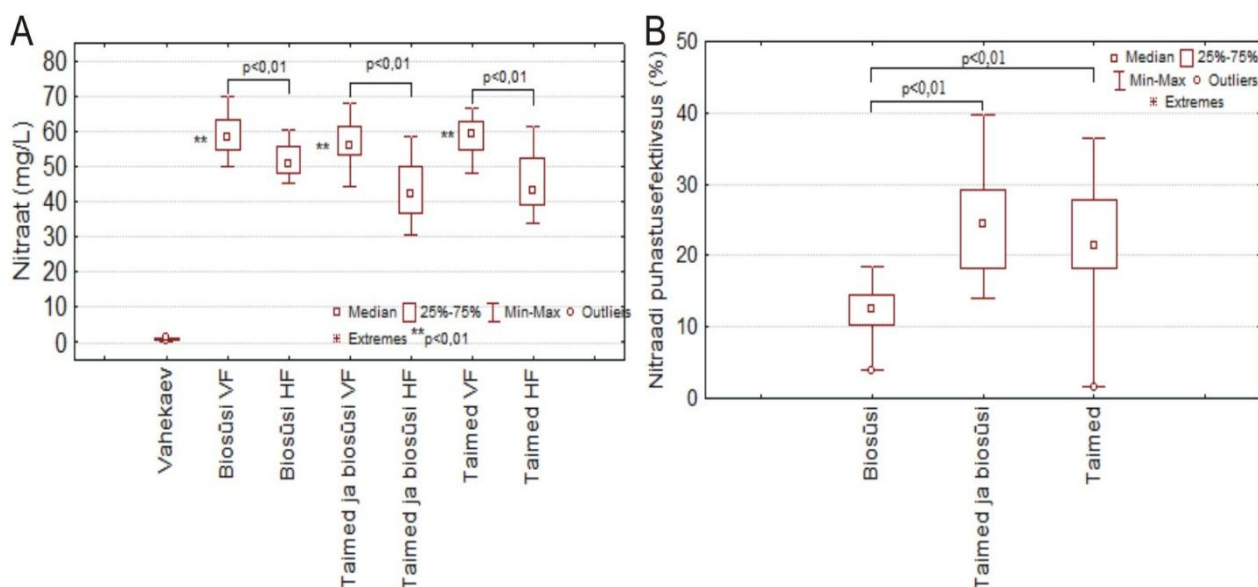
paralleelis ($p < 0,05$). Taimede ja biosöega paralleeli ja taimedega paralleelide vahel statistiliselt olulist erinevust ei esinenud (Joonis 10).



Joonis 10. **A** - Lahustunud lämmastiku kontsentratsioonide väärtuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite lahustunud lämmastiku kontsentratsioonide vahel. **B** - Lahustunud lämmastiku puhastusefektiivsuse väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega.

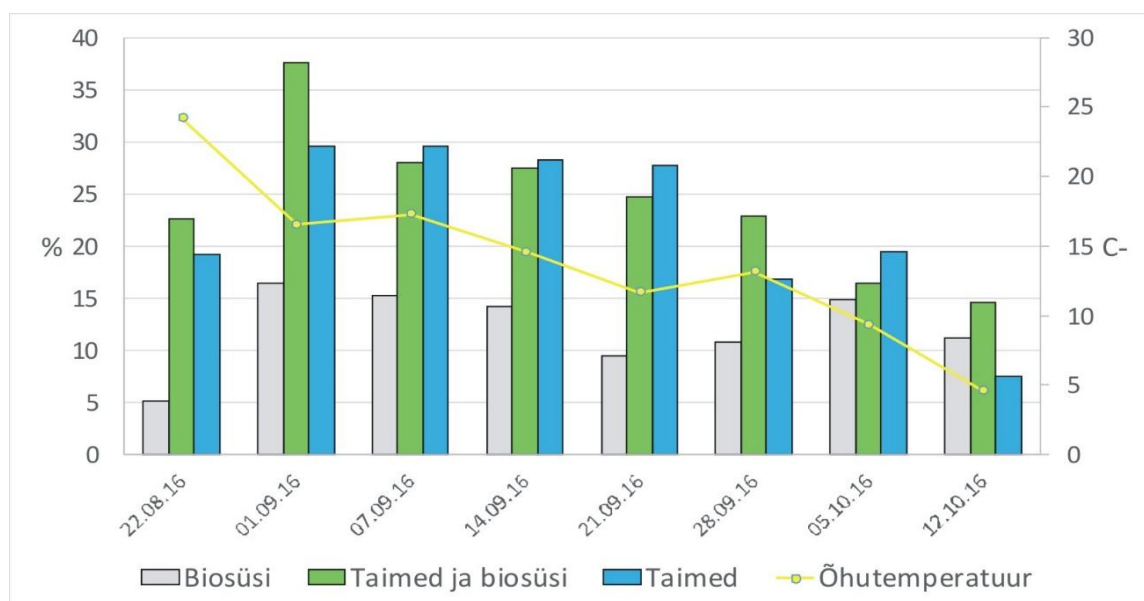
Katse käigus mõõdetud nitraadi kontsentratsioonide mediaanväärtus vahekaevus oli 0,9 mg/L, mis katseperioodil kõikus vahemikus 0,4-1,3 mg/L. VF-ide läbimisel tõusis nitraadi kontsentratsioon oluliselt ($p < 0,01$). Pärast VF-ide läbimist mõõdetud TN kontsentratsioonide väärtused olid vahemikus 44,4 - 68 mg/L. Kõikide HF filtrite puhul oli märgata olulist nitraadi kontsentratsioonide langemist ($p < 0,01$). Pärast HF-ide läbimist olid mõõdetud nitraadi kontsentratsioonide mediaanväärtused biosöega paralleelis 50,7 mg/L (min. 45 mg/L; max. 60,4 mg/L), taimede ja biosöega paralleelis 42,4 mg/L (min. 30,4 mg/L; max. 58,4 mg/L) ning taimedega paralleelis 43 mg/L (min. 33,8 mg/L; max. 61,4 mg/L). HF-ide puhastusefektiivsuse mediaanväärtus oli biosöega paralleelis 12,5% (min. 4%; max. 18,5%), taimede ja biosöega paralleelis 24,4% (min. 14,1%; max. 39,7%) ja taimedega paralleelis 21,5% (min. 1,6%; max. 35,2%). HF filtrite paralleelide puhastusefektiivsuste analüüsimisel selgus, et taimede ja biosöega paralleelis oli nitraadi puhastusefektiivsus oluliselt kõrgem, kui biosöega paralleelis ($p < 0,01$) ning taimedega paralleelis oluliselt kõrgem, kui biosöega paralleelis ($p < 0,01$).

Taimede ja biosöega paralleeli ja taimedega paralleelide vahel statistilist erinevust ei esinenud (Joonis 11).



Joonis 11. **A** - Nitraadi kontsentratsiooni väärtuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite nitraadi kontsentratsioonide vahel. **B** - Nitraadi puhastusefektiivsuse väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega.

Joonisel 12 on näha õhutemperatuuri olulist ($p < 0,05$) mõju nitraadi puhastusefektiivsusele. Mida madalamaks läheb temperatuur, seda madalam oli ka puhastusefektiivsus (Joonis 12).

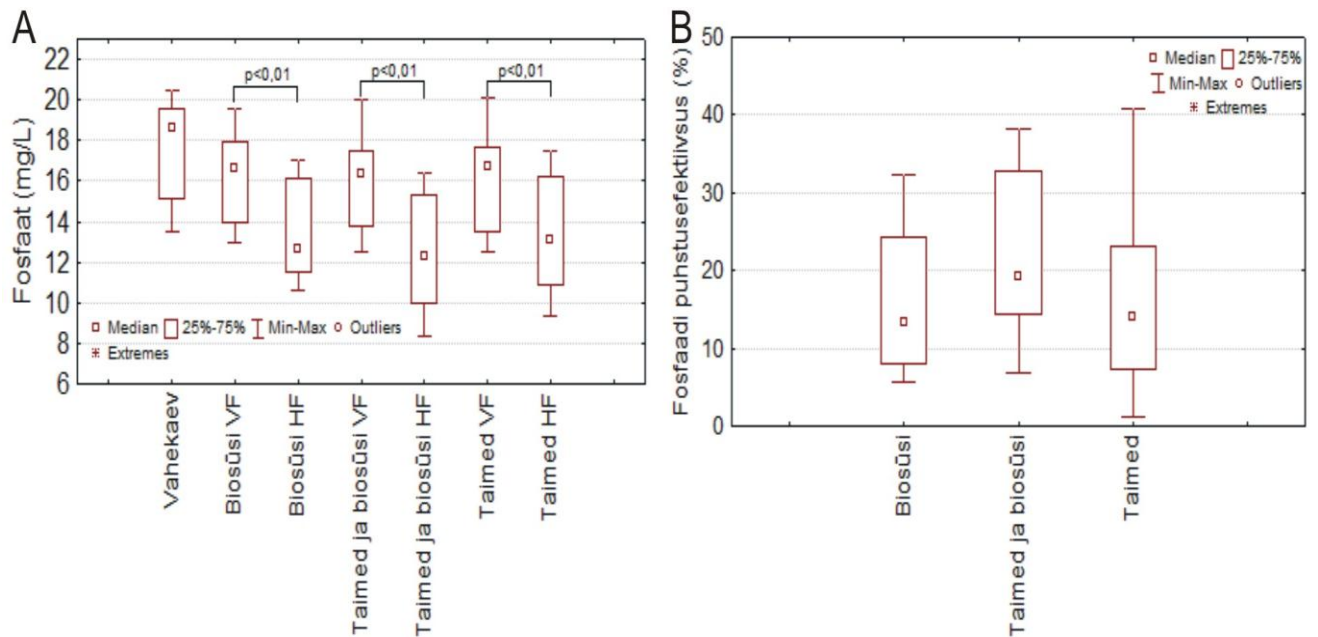


Joonis 12. Nitraadi puhastusefektiivsuse väärtused erinevates paralleelides ja proovi kogumise ajal olnud õhutemperatuur.

3.1.4. Fosfaat

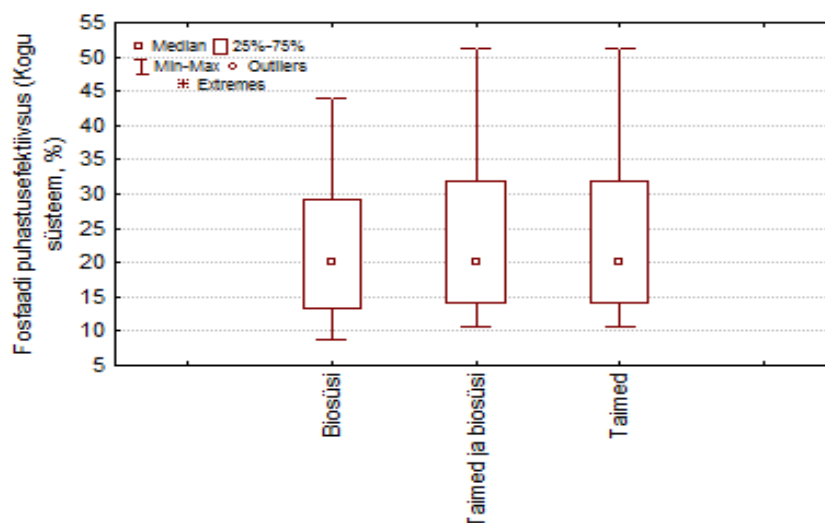
Fosfori puhul on seaduses määratud piirnormid heitvee loodusesse juhtimisel. Üldfosfori jaoks on need kehtestatud vastavalt reoveekogumisala reostuskoormusele. Töös on kasutatud piirnorme, mis vastavad reostuskoormusel 300-1999 ie. Sellele reostuskoormusel on üldfosfori vastavad piirnormid loodusesse juhitavas heitvees 2 mg/L ja puhastusefektiivsus peab olema vähemalt 70% (RT I, 16.12.2016, 6 Lisa 1).

Katse käigus mõõdetud fosfaadi kontsentratsioonide mediaanväärtus vahekaevus oli 18,6 mg/L, mis katseperioodil kõikus vahemikus 13,5-20,5 mg/L. VF-ide läbimisel kontsentratsioonide muutuses statistiliselt olulist erinevust ei esinenud. Pärast VF-ide läbimist mõõdetud fosfaadi kontsentratsioonide väärtused olid vahemikus 12,5 – 20,1 mg/L. Kõikide HF filtrite puhul oli märgata olulist fosfaadi kontsentratsioonide langemist ($p < 0,01$). Pärast HF-ide läbimist olid mõõdetud fosfaadi kontsentratsioonide mediaanväärtused biosöega paralleelis 12,7 mg/L (min. 10,6 mg/L; max. 17 mg/L), taimede ja biosöega paralleelis 12,3 mg/L (min. 8,4 mg/L; max. 16,4 mg/L) ning taimedega paralleelis 13,1 mg/L (min. 9,3 mg/L; max. 17,5 mg/L). HF-ide puhastusefektiivsuse mediaanväärtus oli biosöega paralleelis 13,5% (min. 5,6%; max. 32,4%), taimede ja biosöega paralleelis 19,2 % (min. 6,9%; max. 38,3%) ja taimedega paralleelis 14% (min. 1,1%; max. 40,8%). HF filtrite paralleelide puhastusefektiivsuste analüüsimisel selgus, et paralleelide vahel statistilist erinevust ei esinenud (Joonis 13).



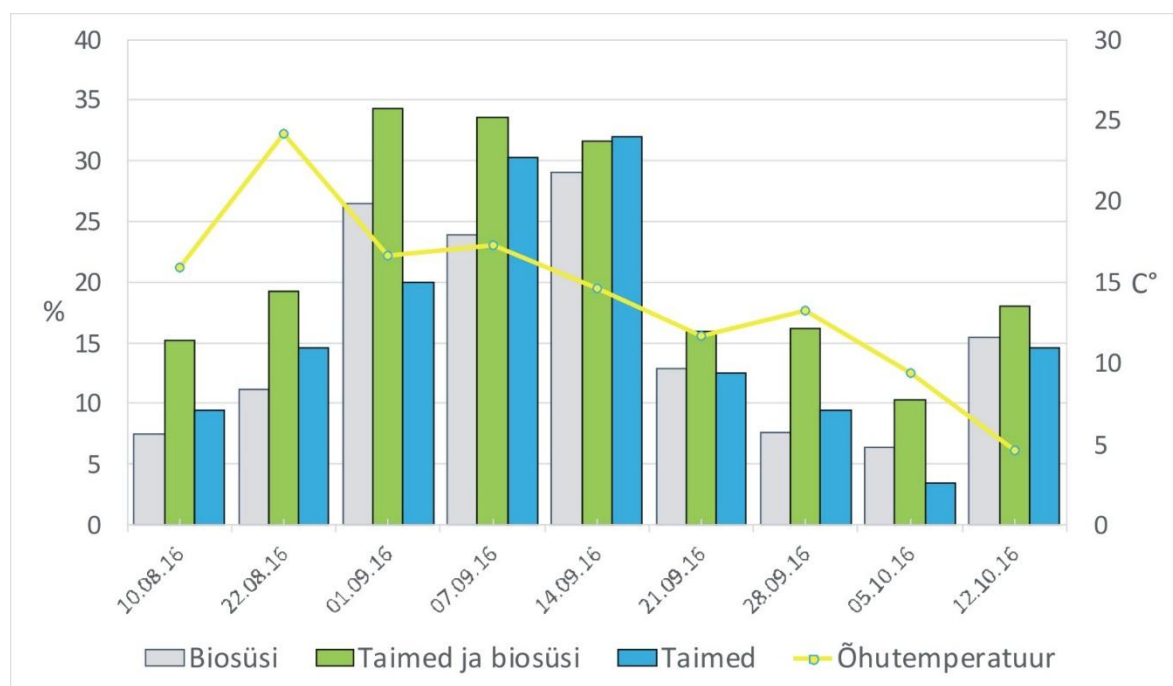
Joonis 13. **A** - Fosfaadi kontsentratsiooni väärtuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite fosfaadi kontsentratsioonide vahel. **B** - Fosfaadi puhastusefektiivsuse väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa.

Kogu süsteemi VF-ide ja HF-ide paralleelide kaupa kombineeritud puhastusefektiivsuste mediaanväärtused olid biosöega paralleelis 19,9% (min. 8,9%; max. 43,9%), taimede ja biosöega paralleelis 23,9% (min. 16,2%; max. 51,2%) ja taimedega paralleelis 20,1% (min. 10,7%; max 51,2%). Statistiline analüüs näitas, et pärast VF-ide ja HF-ide läbimist paralleelide puhastusefektiivsuste vahel olulisi erinevusi ei esinenud (Joonis14).



Joonis 14. Kogu süsteemi fosfaadi puhastusefektiivsuste jaotumine paralleelide kaupa.

Taimestatud filtrite puhul esinevad nõrgad positiivsed seosed puhastusefektiivsuste ja õhutemperatuuri vahel (taimed ja biosüsi $r^2=0,4$; $p<0,05$; taimed $r^2=0,3$; $p<0,05$). Kui õhutemperatuur langeb, siis langeb taimestatud HF filtrites puhastusefektiivsus ja kui õhutemperatuur tõuseb, siis paraneb ka HF filtrite puhastusefektiivsus (Joonis 15).

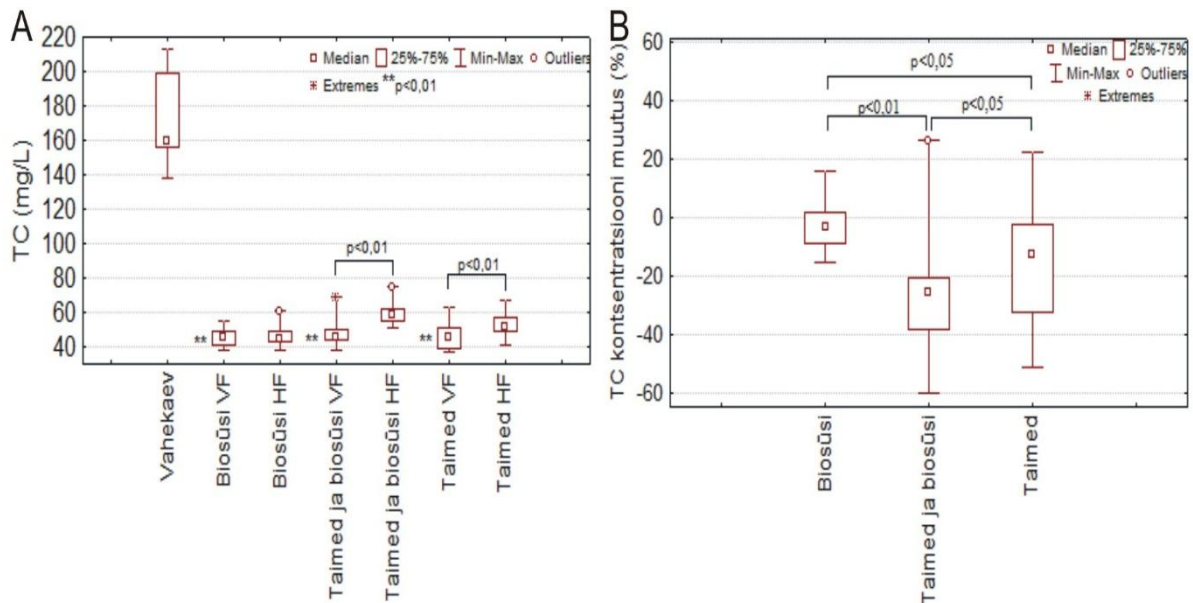


Joonis 15. Fosfaadi puhastusefektiivsuse väärtuste ajaline dünaamika erinevates paralleelides ja õhutemperatuur.

3.1.5. Orgaanilina aine

Kõikide süsiniku ühendite kontsentratsioonide muutuste puhul on näha, et enamuse süsiniku ühenditest on ära kasutatud VF-ides ja nende erineval kujul süsiniku ühendite kontsentratsioon VF-ist väljuvas vees on mitmeid kordi madalam kui VF-idesse sisse voolavas vees (Joonised 16, 17, 18, 19). Katse käigus lisati kahele HF-i paralleelile biosütt, mis koosneb peamiselt süsiniku ühenditest. TC, TOC ja TIC kontsentratsioonide puhul on tegu kontsentratsioonide muutustega, mitte puhastusefektiivsusega, sest biosöe lisamisega tõusis süsiniku ühendite sisaldus HF-ite väljavoolus (Joonised 16, 18, 19). DOC puhul on tegu puhastusefektiivsusega, kuna veeproovide tulemused näitasid, et HF-ide väljavoolus oli DOC tase madalam, kui HF-ide sissevoolus (Joonis 17).

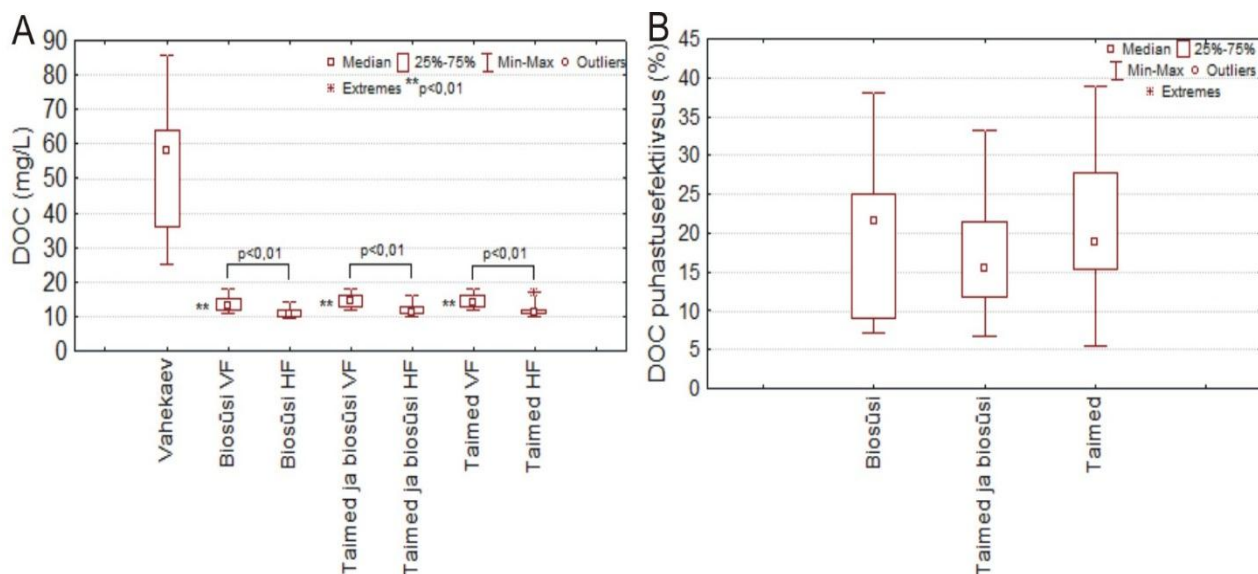
Katse käigus mõõdetud üldsüsiniku (TC) kontsentratsioonide mediaanväärtus vahekaevus oli 160 mg/L, mis katseperioodil kõikus vahemikus 138-213 mg/L. VF-ide läbimisel langesid kõikide paralleelide puhul TC kontsentratsioonid oluliselt ($p < 0,01$). Pärast VF-ide läbimist mõõdetud TC kontsentratsioonide väärtused olid vahemikus 37 – 69 mg/L. Taimestatud HF filtrite puhul oli märgata olulist TC kontsentratsioonide tõusu ($p < 0,01$). Biosöega paralleeli puhul statistilist erinevust ei esinenud. Pärast HF-ide läbimist olid mõõdetud TC kontsentratsioonide mediaanväärtused biosöega paralleelis 45 mg/L (min. 41 mg/L; max. 61 mg/L), taimede ja biosöega paralleelis 58,5 mg/L (min. 51 mg/L; max. 75 mg/L) ning taimedega paralleelis 52 mg/L (min. 41 mg/L; max. 67 mg/L). HF-ide kontsentratsioonide muutuse mediaanväärtus oli biosöega paralleelis -3,4% (min. -15,8%; max. 15,7%), taimede ja biosöega paralleelis -25,8% (min. -60,5%; max. 26,1%) ja taimedega paralleelis -12,8% (min. -51,3%; max. 22,2%). Negatiivsed väärtused väljendavad kontsentratsioonide protsentuaalset suurenemist. HF filtrite paralleelide puhastusefektiivsuste analüüsimisel selgus, et paralleelide kontsentratsioonide muutuste vahel statistiliselt olulisi erinevusi ei esinenud (Joonis 16).



Joonis 16. **A** – Üldsüsiniku kontsentratsiooni väärtuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite üldsüsiniku kontsentratsioonide vahel. **B** - Üldsüsiniku puhastusefektiivsuse väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega.

Katse käigus mõõdetud lahustunud orgaanilise süsiniku (DOC) kontsentratsioonide mediaanväärtus vahekaevus oli 58 mg/L, mis katseperioodil kõikus vahemikus 25-86 mg/L. VF-ide läbimisel langesid kõikide paralleelide puhul DOC kontsentratsioonid oluliselt ($p < 0,01$). Pärast VF-ide läbimist mõõdetud DOC kontsentratsioonide väärtused olid vahemikus 11 – 18 mg/L. Kõikide HF filtrite puhul oli märgata olulist DOC kontsentratsioonide langust ($p < 0,01$). Pärast HF-ide läbimist olid mõõdetud DOC kontsentratsioonide mediaanväärtused biosöega paralleelis 10,5 mg/L (min. 9,3 mg/L; max. 14 mg/L), taimede ja biosöega paralleelis 11 mg/L (min. 10 mg/L; max. 16 mg/L) ning taimedega paralleelis 11 mg/L (min. 10 mg/L; max. 17 mg/L). HF-ide puhastusefektiivsuste mediaanväärtus oli biosöega paralleelis 21,5% (min. 7,1%; max. 38%), taimede ja biosöega paralleelis 15,4% (min. 7,7%; max. 33,3%) ja taimedega paralleelis 18,8% (min. 5,6%; max. 38,9%). HF filtrite paralleelide puhastusefektiivsuste analüüsimisel selgus, et taimestatud filtrite võrdlusel biosöega filtritega

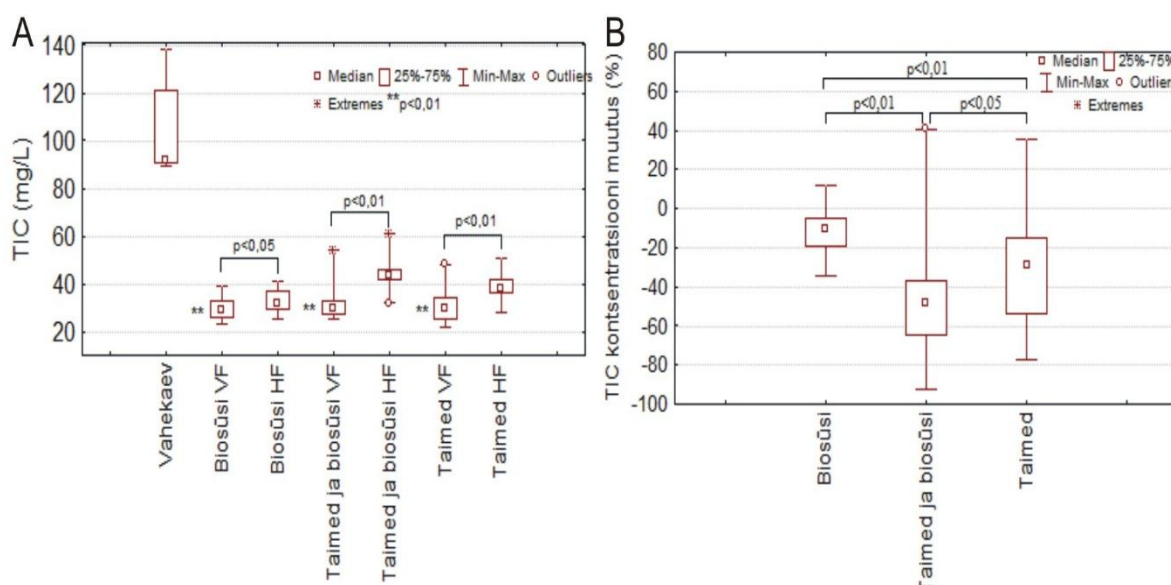
esines oluline erinevus ($p < 0,01$). Lisaks oli oluline erinevus taimede ja biosöega paralleeli ning taimedega paralleeli puhastusefektiivsuste vahel ($p < 0,05$) (Joonis 17).



Joonis 17. **A** - Lahustunud orgaanilise süsiniku kontsentratsiooni väärtuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite lahustunud orgaanilise süsiniku kontsentratsioonide vahel. **B** - Lahustunud orgaanilise süsiniku puhastusefektiivsuse väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega.

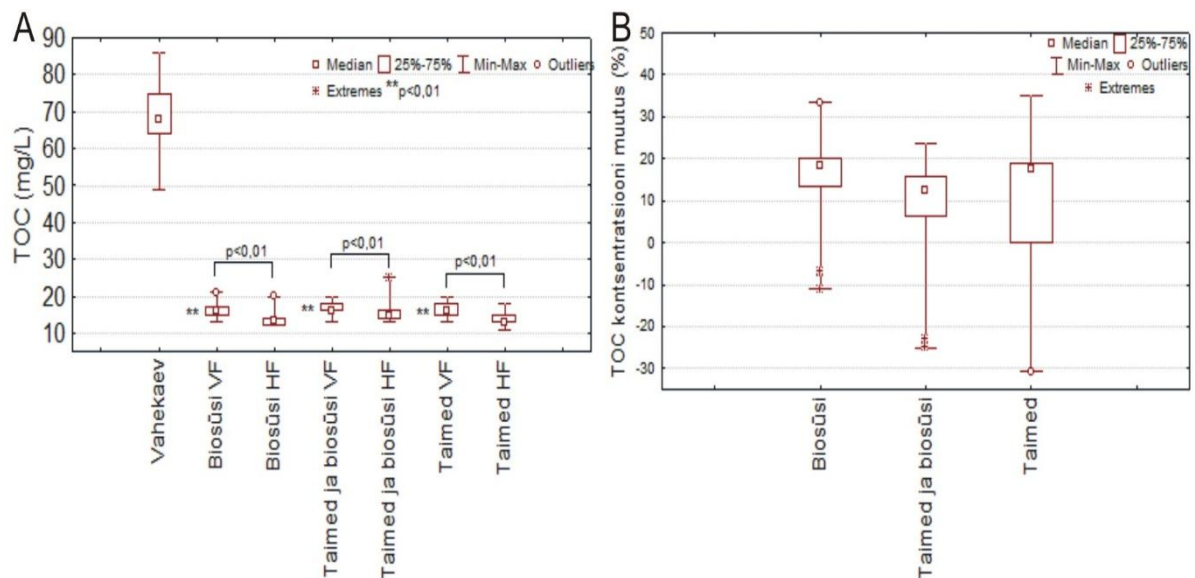
Katse käigus mõõdetud anorgaanilise süsiniku (TIC) kontsentratsioonide mediaanväärtus vahekaevus oli 92 mg/L, mis katseperioodil kõikus vahemikus 89-138 mg/L. VF-ide läbimisel langesid kõikide paralleelide puhul TIC kontsentratsioonid oluliselt ($p < 0,01$). Pärast VF-ide läbimist mõõdetud TIC kontsentratsioonide väärtused olid vahemikus 22-54 mg/L. Kõikide HF filtrite puhul oli märgata olulist TIC kontsentratsioonide tõusu (biosüsi $p < 0,05$; taimed ja biosüsi $p < 0,01$; taimed $p < 0,01$). Pärast HF-ide läbimist olid mõõdetud TIC kontsentratsioonide mediaanväärtused biosöega paralleelis 31,5 mg/L (min. 25 mg/L; max. 41 mg/L), taimede ja biosöega paralleelis 43,5 mg/L (min. 32 mg/L; max. 61 mg/L) ning taimedega paralleelis 38 mg/L (min. 28 mg/L; max. 51 mg/L). HF-ide puhastusefektiivsuste mediaanväärtus oli biosöega paralleelis -10,6% (min. -34,6%; max. 12,1%), taimede ja biosöega paralleelis -48,3% (min. -92%; max. 40,7%) ja taimedega paralleelis -29,2% (min. -68%; max. 35,6%). Negatiivsed väärtused väljendavad kontsentratsioonide protsentuaalset suurenemist. HF filtrite paralleelide kontsentratsioonide muutuste analüüsimisel selgus, et taimestatud paralleelide võrdlusele biosöega paralleeliga esines oluline erinevus ($p < 0,01$). Lisaks oli oluline erinevus

taimede ja biosöega paralleeli ning taimedega paralleeli kontsentratsioonide muutuste vahel ($p < 0,05$) (Joonis 18).



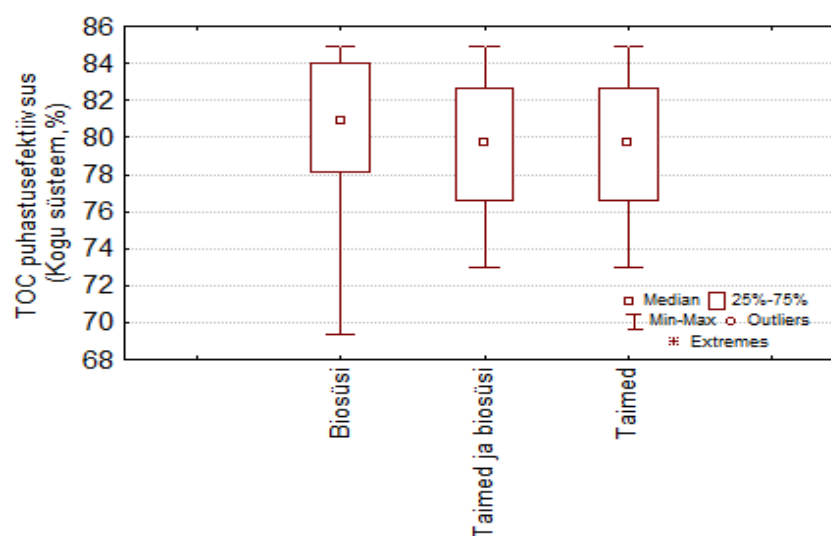
Joonis 18. **A** – Anorgaanilise süsiniku kontsentratsiooni väärtuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite anorgaanilise süsiniku kontsentratsioonide vahel. **B** – Anorgaanilise süsiniku puhastusefektiivsuse väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega.

Katse käigus mõõdetud üldise orgaanilise süsiniku (TOC) kontsentratsioonide mediaanväärtus vahekaevus oli 68 mg/L, mis katseperioodil kõikus vahemikus 49-86 mg/L. VF-ide läbimisel langesid kõikide paralleelide puhul TOC kontsentratsioonid oluliselt ($p < 0,01$). Pärast VF-ide läbimist mõõdetud TOC kontsentratsioonide väärtused olid vahemikus 13 – 21 mg/L. Kõikide HF filtrite puhul oli märgata olulist TOC kontsentratsioonide langust ($p < 0,01$). Pärast HF-ide läbimist olid mõõdetud TOC kontsentratsioonide mediaanväärtused biosöega paralleelis 13,5 mg/L (min. 12 mg/L; max. 20 mg/L), taimede ja biosöega paralleelis 14,5 mg/L (min. 13 mg/L; max. 25 mg/L) ning taimedega paralleelis 13 mg/L (min. 11 mg/L; max. 18 mg/L). HF-ide puhastusefektiivsuste mediaanväärtus oli biosöega paralleelis 18,2% (min. -11,1%; max. 33,3%), taimede ja biosöega paralleelis 12,5% (min. -25%; max. 23,6%) ja taimedega paralleelis 17,7% (min. -30,8%; max. 27,8%). Kontsentratsioonide muutuste positiivsed väärtused väljendavad puhastusefektiivsust ja negatiivsed väärtused kontsentratsioonide protsentuaalset suurenemist. HF filtrite paralleelide kontsentratsioonide muutuste analüüsimisel selgus, et paralleelide vahel ei esine olulisi erinevusi (Joonis 19).



Joonis 19. **A** - Orgaanilise süsiniku kontsentratsiooni väärtuste jaotumine paralleelide kaupa koos statistiliste erinevuste usalduspiiridega. Tärnidega märgitud statistiline erinevus vahekaevu ja VF filtrite orgaanilise süsiniku kontsentratsioonide vahel. **B** - Orgaanilise süsiniku puhastusefektiivsuse väärtuste jaotumine HF filtrites paralleelide kaupa.

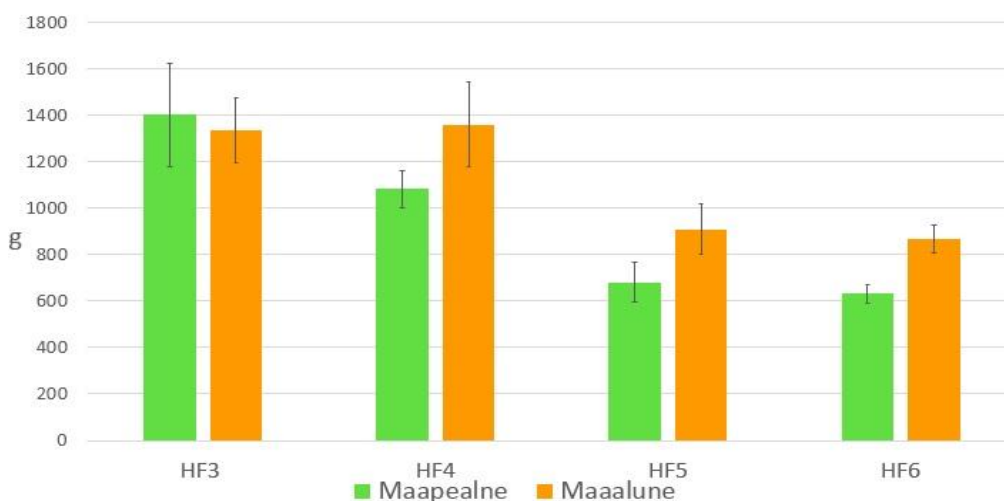
Kogu süsteemi VF-ide ja HF-ide paralleelide kaupa kombineeritud TOC puhastusefektiivsuste mediaanväärtused olid biosöega paralleelis 80,9% (min. 69,4%; max. 84,9%), taimede ja biosöega paralleelis 78,2% (min. 61,5%; max. 84,9%) ja taimedega paralleelis 79,7% (min. 73%; max 84,9%). Statistiline analüüs näitas, et pärast VF-ide ja HF-ide läbimist paralleelide puhastusefektiivsuste vahel olulisi erinevusi ei esinenud (Joonis20).



Joonis 20. Kogu süsteemi orgaanilise süsiniku puhastusefektiivsuste jaotumine paralleelide kaupa.

3.2. Biomassi analüüs

HF3-s kasvanud taimede biomassi kuivkaal oli kokku 2734 ± 185 g, HF4-s kasvanud biomassi kuivkaal oli kokku 2440 ± 148 g, HF5-s kasvanud biomassi kuivkaal oli kokku 1588 ± 104 g ja HF6 kasvanud biomassi kuivkaal oli kokku 1499 ± 65 g. Biosöega rikastatud HF filtrites kasvanud biomassi kuivkaal oli ligikaudu 5173 ± 169 g ja ilm biosöeta HF filtrites kasvanud biomassi kuivkaal oli ligikaudu 3087 ± 87 g, seega biosöega rikastatud HF-ides kasvanud biomasside kuivkaal on ligikaudu 1,7 korda suurem, kui biosöega mitte rikastatud HF-ides (Joonis 21).

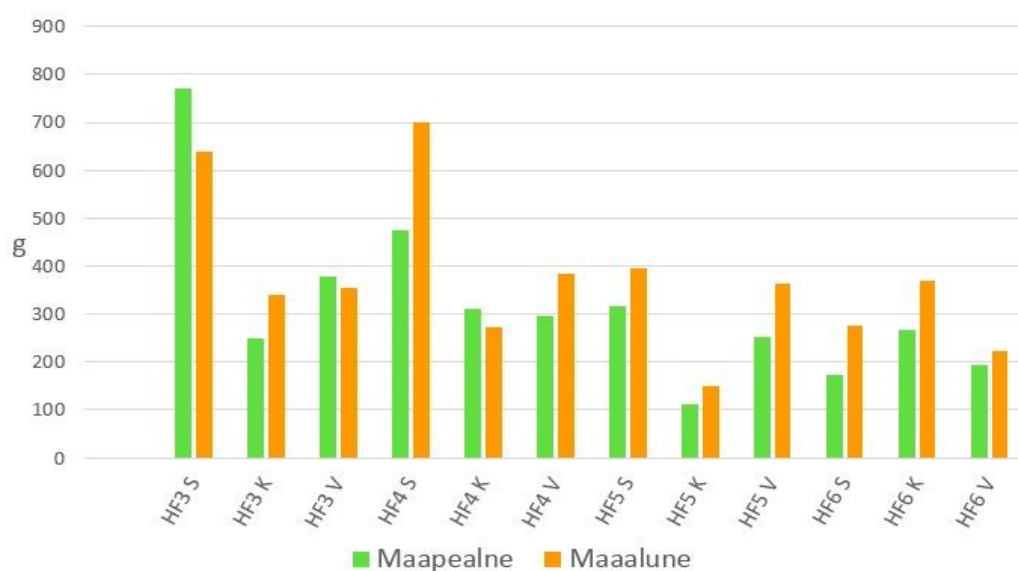


Joonis 21. Biomassi arvatud kuivkaalu jaotus taimestatud filtrite lõikes.



Joonis 22. Vegetatsiooni perioodi lõpul maapealse taimede biomassi silmaga märgatav kasvuvähe (punasega biosöega rikastatud filtrid ja kollasega biosöeta filtrid).

Lisaks on näha taimede biomassi koondumist pinnasfiltri sissevoolu osas. Biomassi kasvu hindamisel jagati filtrid kolmeks: sissevool (S), keskosa (K) ja väljavool (V) (Vt. Joonis 3) ning biomassi kaal määrati iga ala kohta eraldi nii maapealse kui -aluse osas. HF3-s kasvanud biomassi kuivkaalud olid: sissevoolu osas 1176 ± 113 g; keskosas 583 ± 18 g ja väljavoolu osas 680 ± 44 g. HF4-s kasvanud biomassi kuivkaalud olid: sissevoolu osas 1411 ± 66 g; keskosas 570 ± 44 g ja väljavoolu osas 733 ± 12 g. HF5-s kasvanud biomassi kuivkaalud olid: sissevoolu osas 711 ± 39 g; keskosas 263 ± 19 g ja väljavoolu osas 614 ± 55 g. HF6-s kasvanud biomassi kuivkaalud olid: sissevoolu osas 448 ± 52 g; keskosas 635 ± 52 g ja väljavoolu osas 416 ± 16 g (Joonis 23).



Joonis 23. Taimede biomassi kuivkaalu jaotus taimestatud pinnasfiltrite lõikes sissevoolu(S), filtri keskosa(K) ja väljavoolu(V) juures.

4. Arutelu

Hübriidmärglala süsteemis, kus reovesi läbib järjestikku VF filtrid ja HF filtrid, on üheks peamiseks HF filtrites denitrifikatsiooni limiteerivaks teguriks orgaanilise aine vähesus (Saeed, et al., 2012). Nii on ka käesoleva katse puhul, kus VF filtritesse sissevoolavas vees on orgaanilise aine sisaldus mitmeid kordi suurem, kus VF filtritest väljuvas vees. Filtri puhastusvõimet limiteerib süsiniku ja lämmastiku suhe, sest täielikuks lämmastiku denitrifikatsiooniks peaks see suhe jääma vahemikku 1,5-5 (Bernet, et al., 1996). Orgaanilise aine sisalduse tõstmiseks lisati neljale HF filtrile 10% ulatuses biosüüt. Katse tulemuste analüüs näitab, et üldsüsiniku sisaldus oli kõrgem kõigis paralleelides, ka ainult taimestatud HF filtrites, kuhu biosüüt ei lisatud. Taimed eritavad oma juurde kaudu pinnasesse orgaanilisi ühendeid ja see tõstab orgaanilise aine sisaldust taimestatud filtrites. Taimede ja biosöe koosmõjul oli orgaanilise aine sisaldus võrreldes teistes paralleelidega oluliselt kõrgem taimede ja biosöega filtrites. Lisasüsiniku olemasolu kajastub ka lämmastiku puhastuse efektiivsuses. Katse käigus kogutud veeproovide analüüsid näitavad oluliselt kõrgemat lämmastiku puhastusefektiivsust taimestatud HF pinnasfiltrites. Kõige kõrgem lämmastiku puhastusefektiivsuse mediaanväärtus saavutati taimestatud ja 10% ulatuses biosöega rikastatud HF pinnasfiltrites. Filtrite pH väärtuste analüüs näitas, et pärast kogu süsteemi läbimist oli taimestatud ja biosöega rikastatud paralleelis pH oluliselt madalam, kui teistes paralleelides. Nitrifikatsiooni protsesside käigus tarbitakse keskkonnast hüdrosiide, mille tõttu langeb keskkonna pH tase, seega intensiivse nitrifikatsiooni protsessidega kaasneb ka arvestatav pH langus (Saeed, et al., 2012). Soodsaim pH vahemik denitrifikatsiooni toimumiseks on 7-7,5 ja varasemad uuringud on näidanud et liiga kõrge pH väärtus ($\text{pH} > 8,0$) häirib oluliselt puhastusprotsesside toimumist tehismärgalas (Kasak, 2016). Kuna biosüsi on tuhasisalduse tõttu leeliseline, siis tõstab see pH taset HF filtrites (Gupta, et al., 2016). Taimestatud paralleelide puhul on näha et pH taset oleks võimalik veel tõsta, et saavutada soodsaim keskkond denitrifikatsioonile. On vaja läbi viia edasisi uuringuid, et välja uurida, milline oleks optimaalne biosöe kogus mida tuleks lisada taimestatud HF filtrile. Fosfaadi puhastusefektiivsuste võrdlemisel katse variantide vahel statistiliselt olulist erinevust ei avaldunud, mis on seletatav sellega, et peamised fosfori ärastusprotsessid tehismärgalas on adsorptsioon ja sedimentatsioon (Vymazal, 2007), mille toimumise tingimusi katse käigus ei muudetud. Kirjanduse andmetel ei muuda biosöe lisamine vertikaalfiltri

materjalile fosfori äratamise efektiivsust (Rozari, et al., 2016). Varasemates katsetes on edukas fosforiärastus tehismärgalades saavutatud spetsiaalsete fosforit hästi siduvate filtermaterjalide kasutamisega (Ádáma, et al., 2007). Kuigi biosüsi on hinnatud heaks absorbendiks veekeskkonnas kasutamiseks (Tan, et al., 2015), ei avaldunud antud katses biosöe absorbeerimise võime erilist mõju fosfori puhastusefektiivsusele. Siiski võib täheldada, et kõrgeim fosfori mediaan puhastusefektiivsus oli biosöega rikastatud ja taimestatud paralleelis. Seega võis lisatud biosöe kogus olla liiga madal, et avaldada olulist mõju fosfori eemaldamisel veest. Taimestatud vertikaalfiltrite puhul on näidatud, et biosöe lisamine filtermaterjalile vahekorras 1:1 suurendab oluliselt orgaanilise aine ja lämmastiku puhastusefektiivsust (Zhou, et al., 2017). Seetõttu on vaja teha edasisi uuringuid, et välja selgitada milline peaks olema biosöe HF pinnasfiltrile lisamise kogus, mis avaldaks mõju fosfori ärastusele tehismärgalas.

Suurem taimede biomass tehismärgalas peaks suurema juureeritiste koguse tõttu soodustama denitrifikatsiooni filtermaterjalis, samuti seotakse suurema taimede biomassi puhul rohkem lämmastikku taimede biomassi (Chen, et al., 2014). Pinnasfiltrites kasvanud taimede biomassi kuivkaalude võrdlused näitavad, et biosöe lisamine filtermaterjalile omas taimede kasvule soodsat mõju. Biosöega taimestatud HF filtrites kasvas katse käigus ligikaudu 1,7 korda rohkem biomassi. Lisaks oli märgata taimede koondumist filtrite sissevoolude lähedusse, mida võib seletada sellega, et sissevoolu juures on vees sisalduvate toitainete kontsentratsioon kõige kõrgem ja seega ka toitained taimedele kõige kättesaadavamad. Biosöe lisamise soodsat mõju taimekasvule mullas on täheldatud paljudes uuringutes (Kammann, et al., 2015). Katsetes on näidatud, et erinevate põllukultuuride juurestiku parameetrid (biomass, pikkus) suurenevad rohkem kui 30% biosöe lisamisel mulda (Gul, et al., 2016). On väidetud, et biosüsi ei paranda otseselt lämmastiku ühendite kättesaadavust pinnases, vaid parandab baariumi (B), kaaliumi (K), kaltsiumi (Ca), fosfori (P) ja tõenäoliselt ka molübdeeni (Mo) kättesaadavust ning eelmainitud elementide kättesaadavus turgutab oluliselt taimede kasvu (Rondon, et al., 2007), millega kaasneb ka taimede biomassi seotavate toitainete koguste suurenemine.

5. Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärk oli uurida biosöe lisamise mõju horisontaalvoolulise pinnasfilterüsteemi toimimise efektiivsusele. Töö raames läbi viidud katse toimus Nõo reoveepuhastusjaama kõrvale rajatud hübriid tehismärgala süsteemis. Katses jagati HF filtrid kolme rühma: esimeses variandis lisati filtermaterjalile 10% biosütt, teises variandis lisati filtermaterjalile 10% biosütt ning filtrile istutati taimed, kolmandas variandis istutati filtrile üksnes taimed. HF filtrite taimestamine toimus 13.06.2016 ja veeproove koguti süsteemist enne VF filtritele juhtimist ning pärast VF ja HF filtrite läbimist vahemikus 10.08.2016 kuni 12.10.16. Veeproovide võtmisel määrati kohapeal nende pH tase, elektrijuhtivus, temperatuur ja hapniku sisaldus. Laboris määrati veeproovide TN, DN, TOC, DOC, TC, TIC, nitraadi ja fosfaadi kontsentratsioonid, et hinnata pinnasfiltrite toimimise efektiivsust. Vegetatsiooniperioodi lõpus (12.10.16) koguti HF filtrites kasvanud taimede biomass ja määrati biomassi kuivkaal erinevates filtri osades.

Käesoleva magistritöö eesmärkideks seati:

- Selgitada välja, kas biosöe lisamine horisontaalvoolulistesse pinnasfiltritesse parandab oluliselt veest toitainete eemaldamise efektiivsust.
- Selgitada välja, kas biosöe lisamine horisontaalvoolulistesse pinnasfiltritesse suurendab märkimisväärselt taimede kasvu.

HF filtrite puhastusefektiivsuste analüüsimisel selgus, et taimestatud filtrites oli TN puhastusefektiivsus oluliselt kõrgem kui taimestamata variandis. Kuigi taimede ja biosöega variandi ning üksnes taimedega variandi vahel statistiliselt olulist erinevust ei esinenud, saavutati kõige parem TN puhastusefektiivsuse mediaan väärtus taimede ja biosöega filtrites. Suurt erinevust näitas HF filtrites kasvanud taimede biomassi kuivkaalude võrdlus. Biosöega rikastatud paralleelis oli taimede biomassi kuivkaal ligikaudu 1,7 korda suurem kui ilma biosöeta HF filtrites.

Katse tulemustest võib järeldada:

- Biosöe lisamine taimestatud horisontaalvoolulistesse pinnasfiltritesse parandab oluliselt lämmastiku ärastamise efektiivsust.
- Biosöe lisamine horisontaalvoolulistesse pinnasfiltritesse ei omanud olulist mõju fosfori eemaldamise efektiivsusele.

- Biosöe lisamine horisontaalvoolulistes pinnasfiltrites suurendab märkimisväärselt taimede kasvu.
- Hübriidsüsteemides, kus kasutatakse ka vertikaalvoolulisi pinnasfiltreid, aitab biosüsi tõsta horisontaalfiltrites lämmastiku ärastamise efektiivsust.

Summary

The main goal of this study was to investigate the effect of biochar to the treatment efficiency of the horizontal subsurface flow (HSSF) constructed wetland (CW) for wastewater treatment. The experimental site was located in the territory of the activated sludge treatment plant in the village of Nõo, in southern Estonia. All HSSF filters were filled with lightweight clay aggregates with a particle size of 2-4 mm. During the experiment, HSSF filters were divided into three groups: first group with 10% of biochar; second group with 10% of biochar and was planted with cattail (*Typha latifolia*); and third group was also planted with cattail. Water samples were collected from the inlet of vertical subsurface flow (VSSF) filters and from the outlet of VSSF (also an inflow to the HSSF filters) and HSSF filters over a period from 10.08.2016 until 12.10.2016. Temperature, pH, electrical conductivity and O₂ concentration were measured on the site using portable devices (WTW Multi 3420). Collected water samples were sent into the laboratory where TN, DN, TOC, DOC, TC, TIC, nitrate and phosphate concentrations were measured to assess the effectiveness of the system. At the end of the experiment, both aboveground and belowground biomass was collected for further analyses. The dry weight of biomass was determined in the laboratory.

The main objectives of this study were:

- To identify whether adding biochar to a HSSF CW improves the nutrient removal efficiency.
- To identify whether adding biochar to a HSSF CW improves vegetation growth.

The study showed that the removal of TN was significantly higher in planted filters than in unplanted ones. However, there was no significant difference in TN removal efficiency between the two planted variations. Although, a slightly higher median TN removal rate was observed in the second group amended with biochar. Plant biomass analyses showed that filter system with biochar provided significantly higher plant growth compared with the filter without biochar. The biomass in the variation amended with biochar weighted almost 1,7 times more than in the variation with no added biochar.

To conclude:

- Adding biochar to the planted HSSF filter improved the efficiency of nitrogen removal.

- Adding biochar to a planted HSSF filter greatly improves vegetation growth.
- In a hybrid CW system where aerobic VSSF filters are in use, adding biochar as an additional carbon source to HSSF filters, will improve the efficiency of nitrogen removal.

Tänuõnad

Sooviks tänada kõiki, kes aitasid kaasa minu magistritöö valmimisele, eriti oma juhendajaid prof. Jaak Truud ja PhD Kuno Kasakit oskusliku juhendamise ja meeldiva koostöö eest.

Lisaks avaldan tänu Mikk Espenbergile, Kristjan Oopkaupile, Marika Truule, Ivika Ostonen-Märtinile, Mae Urile, Margit Kõiv-Vainikule ja Tartu Ülikooli Ökoloogia- ja maateaduste instituudile.

Kasutatud kirjandus

Ádáma Kinga [et al.] (2007) Phosphorus retention in the filter materials shellsand and Filtralite P®—Batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater. *Ecological Engineering* 29 (2), lk 200–208.

Bernet N., Delgenes N. ja Moletta R. (1996) Denitrification by Anaerobic Sludge in Piggery Wastewater. *Environmental Technology* 17 (3), lk. 293-300

Chen Y. [et al.] (2014) Effects of plant biomass on nitrogen transformation in subsurface-batch constructed wetlands: A stable isotope and mass balance assessment. *Water Research* 63, lk. 158-167.

Dubber D. ja Gray NF. (2010) Replacement of chemical oxygen demand (COD) with total organic carbon (TOC) for monitoring wastewater treatment performance to minimize disposal of toxic analytical waste. *Journal of Environmental Science and Health.* 45 (12), lk 595-600.

Fondera Nat ja Headleyb Tom (2013) The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system. *Ecological Engineering* 51, lk. 203-211.

Gul S. ja Whalen J. K. (2016) Biochemical cycling of nitrogen and ohosphorus in biochar-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry* 103, lk. 1-15.

Gupta Prabuddha, Ann Tae-woong ja Lee Seung-Mok (2016) Use of biochar to enhance constructed wetland performance. *Environmental Engineering* 21, lk. 36-44.

Joseph S. D. [et al.] (2010) An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research* 48, lk. 501-515.

Kadlec Robert H. ja Wallace Scott D. (2009) *Treatment Wetlands: Second Edition*, 1016

Kammann Claudia I. [et al.] (2015) Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific Reports* 5.

Karabelnik Kristjan [et al.] (2012) High-strength greywater treatment in compact hybrid filter systems with alternative substrates. *Ecological Engineering* 49, lk. 84-92.

Kasak Kuno [et al.] (2015) Alternative filter material removes phosphorus and mitigates greenhouse gas emission in horizontal subsurface flow filters for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 77, lk. 242–249.

Kasak Kuno (2016) Greenhouse gas emissions and water treatment efficiency in subsurface flow filters using various substrates. *Tartu Ülikool, doktoritöö*

Kõiv Margit [et al.] (2009) Active Filtration of Phosphorus on Ca-Rich Hydrated Oil Shale Ash: Does Longer Retention Time Improve the Process? *Environmental Science and Technology* 43 (10), lk. 3809–3814.

Kängsepp Pille [et al.](2008) Leachate Treatment in Newly Built Peat Filters: A Pilot-Scale Study. *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands*, lk. 89-98.

Noorvee Alar [et al.] (2007) Kombineeritud pinnasfiltersüsteemide ja tehismärgaladepuhastite rajamise juhend. Tartu Ülikooli Tehnikainstituut, Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut Geograafia Osakond.

Rondon Marco A. [et al.] (2007) Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. *Biol Fertil Soils* 43 (6) lk. 699–708.

Rossia Luca [et al.] (2005) Stochastic modeling of total suspended solids (TSS) in urban areas during rain events. *Water Research* 39 (17), lk. 4188–4196.

Rozari P. de, Greenway M. ja Hanandeh A. El (2016) Phosphorus removal from secondary sewage and septage using sand media admended with biochar in constructed wetland mesocosms. *Science of the Total Environment* 123 (33), lk. 569-570.

RT I, 16.12.2016, 6 Lisa 1 Reovee puhastamise ning heit- ja sademevee suublasse juhtimise kohta esitatavad nõuded, heit- ja sademevee reostusnäitajate piirmäärad ning nende nõuete täitmise kontrollimise meetmed. Riigi Teataja.

Saeed Tanveer ja Guangzhi Sun (2012) A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flowconstructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operatingconditions and supporting media. *Journal of Environmental Management* 112, lk. 429-448.

Zhou X. [et al.] (2017) Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland. *Bioresource Technology*.

Tan Xiaofei [et al.] (2015) Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere* 125, lk. 70-85.

Truu Marika, Juhanson J. ja Jaak Truu (2009) Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands. *The Science of the Total Environment* 407 (13), lk. 3958-3971.

Vohla Christina [et al.] (2007) Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Science of the Total Environment* 380, lk. 66–74.

Vymazal Jan ja Kröpfelová Lenka (2009) Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience. *Science of the Total Environment* 407, lk 3911-3922.

Vymazal Jan [et al.] (1998) Removal mechanisms and types of constructed wetlands. Backhuys Publisher, lk. 17-66.

Vymazal Jan (2008) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: A Review. *Proceedings of Taal2007: The 12th World Lake Conference*, lk. 965-980.

Vymazal Jan ja Kröpfelová Lenka (2008) Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Raamat.

Vymazal Jan (2007) Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment* 380, lk. 48–65.

Vymazal Jan (2009) The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological engineering* 35, lk. 1–17.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Jürgen Sarjas,
(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Biosöe mõju horisontaalvoolulise pinnasfiltersüsteemi toimimise efektiivsusele“,
(lõputöö pealkiri)

mille juhendajad on Jaak Truu ja Kuno Kasak,
(juhendaja nimi)

1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.1. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus **23.05.2017**