

adaptest



Kaasrahastanud
Euroopa Liit



Taaskasutusvesi akvapoonikas

Mait Kriipsalu
Priit Tamm
Härmo Hiimäe
Daaniel Maanas
Merrit Shanskiy
Merilin Noormets
Morten Poolakese
Vallo Kõrgmaa
Aser Sikk
Harald Kriisa



Sisukord

Sisukord	1
Sissejuhatus	3
Akvapoonika	3
Seadmestiku mõõtmestamine	5
Veepuhastussüsteem	6
Vee varumine	6
Seadmestik vee puhastamiseks	7
Vee desinfitseerimine	10
Akvapoonikasüsteem	11
Lähtevesi	16
Vee puhastamine	17
Kalakasvatus	20
Eksperiment	20
Ringlusvesi akvapoonikas	25
Kalatoodangu kvaliteedikontroll	26
Taimekasvatus	27
Taimeliigid	27
Biotõrje	28
Taimede lämmastiktootumise jälgimine	29
Taimse biomassi kvaliteet	31
Riskihinnangud	32
Keemiliste ohuteguritega seotud terviseriskid	32
Keemilised ohutegurid	32
Terviseriskide hindamine	32
Mikrobioloogiliste ohuteguritega seotud terviseriskid	39
Mikrobioloogilised ohutegurid akvapoonikasüsteemis	39

Terviseriskide hindamine	40
Mikrobioloogiliste ohuteguritega seotud riskide maandamismeetmed	42
Taaskasutusveel põhineva akvapoonika riskid.....	42
Ohtlike ainete sisaldused akvapoonilistes saadustes	43
Kalatoodangu riskide hindamine.....	49
Õppetunnid.....	51
Kokkuvõte.....	53
Tänuõnad.....	53
Viidatud kirjandus.....	54
Lisad.....	55

käigus ei pruugi olla tagatud. Kokkupuude nimetatud ainetega võib toimuda naha ja limaskestade kaudu, sisse hingamisel või juhuslikul alla neelamisel, põhjustades tervisekahju.

Töö eesmärkide saavutamisel tuli hinnata taaskasutusveel baseerivas akvapoonikasüsteemis mikrobioloogiliste ja keemiliste ohutegurite esinemist ning nendega seotud terviseriske ja välja pakkuda ennetusmeetmed riskide maandamiseks. Sademevee ja heitvee taaskasutamiseks töötlemist ja akvapoonikasüsteemi toimimist kujutatakse skeemil lisades 1 ja 2.



Joonis 2. Akvapoonikasüsteemi paiknemine Eesti maatilikooli veelaboris

Seadmestiku mõõtmestamine

Akvapoonikasüsteemi mõõtmised olenevad kala- ja taimekasvatuse mahust. Kuna vesi ringleb katkematult kalamahuti ja kasvuruumi vahel, tuleb saavutada tasakaal ühelt teiselt kanduvate taimetoitainete poolest. Tegu on katseseadmestikuga, mis pidi mahtuma Maaehituse ja veemajanduse õppetooli veelaborisse. Akvapoonikasüsteem mõõtmestati järgmiste parameetrite alusel:

- Kalamahuti seadistatava veetasemega kuni 1600 l (ringlusse võetud materjalist)
- Maksimaalne kalade biomass 24 kg
- Kalasööda kogus 240 g/d
- Kalasööda valgusisaldus 40–45 g/100 g
- Kalamahuti õhustamine 5–6 l/min
- Hüdrauliline viibeaeg (veevahetus) 80 min
- Vooluhulk laminaarsetitis 0,33 l/s
- Laminaarsetitis ülesvoolu kiirus 0,002 m/s
- Süvaveekultuuride hüdrauliline viibeaeg 4 h vannide korral või 0,2 h torude korral
- Arvutuslik vooluhulk kokku 0,048 l/s (2,88 l/min). Katsete käigus suurendatud kuni 0,3 l/s (18l/min), sest suurem vooluhulk andis taimedele kasvuhoo
- Akvapoonikasüsteemi kogumaht ~2200 l
- Veekadu akvapoonikasüsteemist (aurustumine, sette väljavool, taimede veevajadus) 20–30 l/d
- Pumba jõudlus $Q = 0,33$ l/s, $h = 4$ m
- heljuvtugimaterjaliga biokilereaktori (bioreaktor), maht 36 l, biokile pindala 22,1 m²

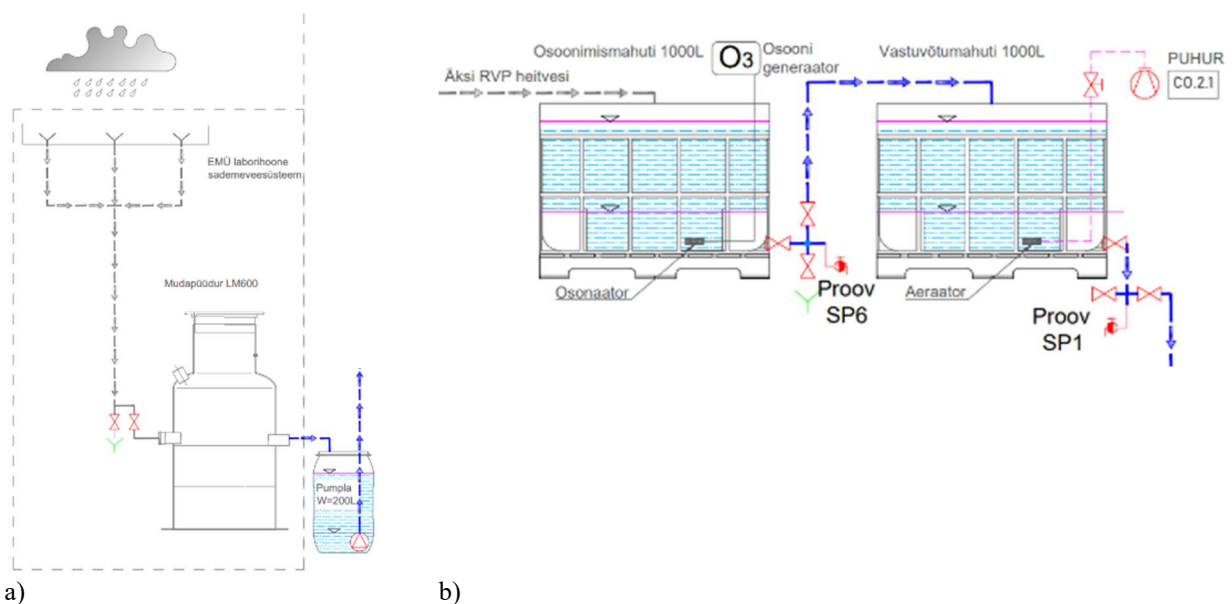
Veepuhastussüsteem

Vee varumine

Veepuhastusseadme juurde kuuluvad vastuvõtuvee ja taaskasutusvee mahutid koos õhupuhurite ja aeraatoritega. Mõlemad mahutid on IBC 1 m³ (ringlisse võetud materjalist). Taaskasutusvee mahutisse on paigaldatud taldrikaeraator ning ühendatud aereerimisõhu tootmiseks õhupuhuriga. Vastuvõtumahutisse on paigaldatud kolm tasemeujukit.

- II-astme pumba kuivkäigukaitse tasemeujuk.
- filtreeritud vee tasemeujuk, mille lülituse järgi käivitatakse lähtevee filtreerimine.
- veevõrguvee tasemeujuk, mille taseme järgi täidetakse taaskasutusveemahutit juhul kui sademeveet või heitveet vastuvõtumahutis ei ole.

Vee vastuvõtumahutid sademevee ja heitvee jaoks (joonis 3) on osa veetöötlusseadmestikust, sest vee eeltöötlemine algab juba seal. Puhuri töötamist ja lähtevee õhustamist juhitakse programmkella abil.



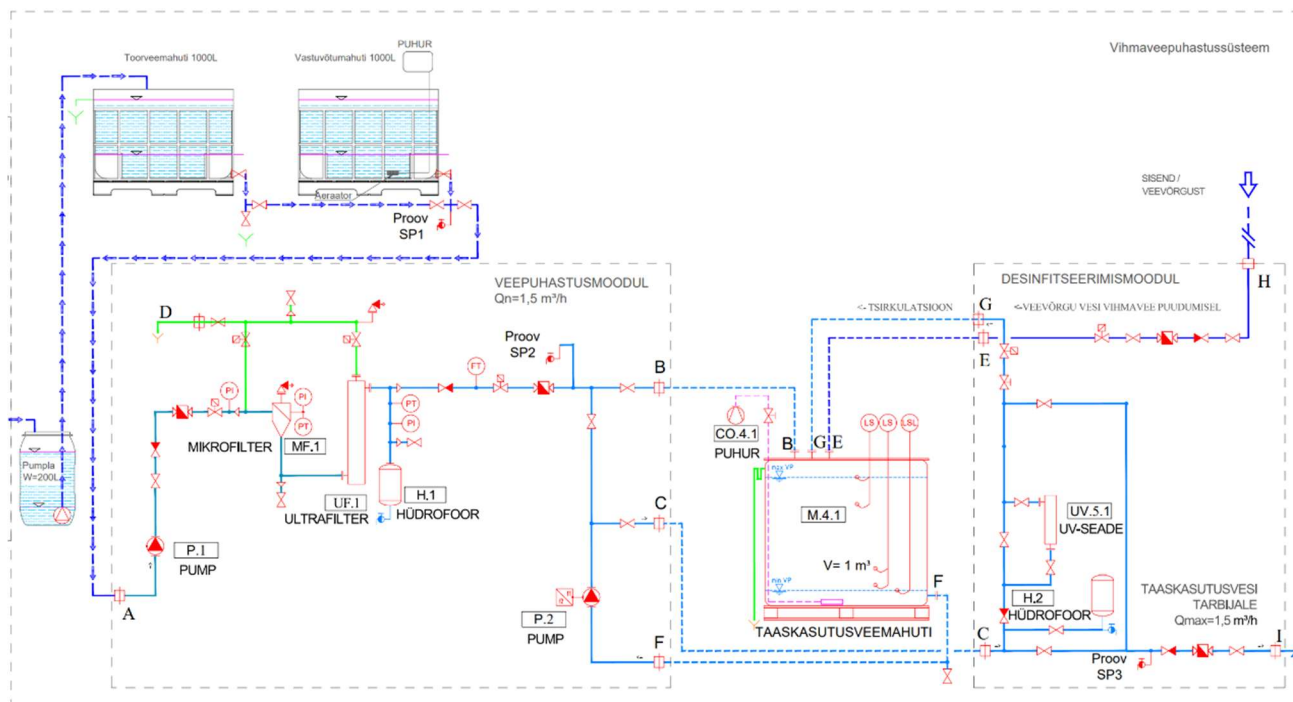
Joonis 3. Vee vastuvõtumahutid: a) sademevee vastu võtmine ja b) heitvee vastu võtmine

Seadmestik vee puhastamiseks

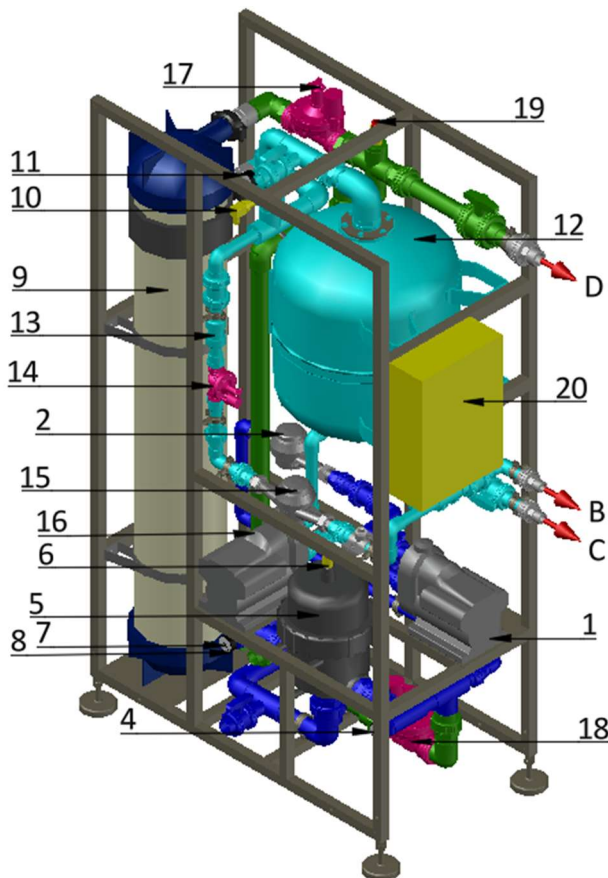
Veeötluseks valiti täisautomaatne ja käitamiseks võimalikult väikeseid kulutusi ning hooldust nõudev lahendus. Veepuhastusseade koosneb veepuhastusmoodulist ja desinfitseerimismoodulist. Tegemist on kahestmelise süsteemiga, mida juhitakse ühtse juhtimiskilbi abil. Veepuhastusseadet on võimalik kaugjälgida ning selle olulisi parameetreid on võimalik eemalt seadistada. Süsteem on ette nähtud automaatselt töötama ning selle komponendid on teiseldataval roostevas terasest raamil.

Vastuvõtumahutist pumbatakse vesi I-astme pumba abil veepuhastusmoodulisse (joonis 4). Veepuhastusmooduli sisendveet mõõdetakse veearvestiga, veevoolu kontrollitakse magnetklapi ning rõhku rõhulüliti abil. Veepuhastusmoodulis (joonis 5) juhitakse vesi läbi 130-mikroniliste pooridega mehaanilise ketasfiltri, mis eemaldab sisendveest mehaanilised osakesed. Mehaanilise ketasfiltri peale on paigaldatud õhuklapp. Edasi juhitakse vesi läbi 0.01–0.1 µm pooridega UF-membraani, milles vesi surutakse suure surve all läbi poolläbilaskva filterkanga. Hõljuvaine jääb membraani taha, vesi ja lahustunud ained lähevad membraanist läbi.

UF-membraani ja mehaanilise ketasfiltri tagasipesuks on 100 l membraanhüdrofoor, kuhu seadme töösükli käigus varutakse tagasipesuks vajaminev filtreeritud vesi. Tagasipesu toimub vastavalt juhtimissüsteemis seadistatud veemahule. Juhul kui vett ettenähtud mahus ei ole puhastatud, tehakse seadme tagasipesu vastavalt seadistatud aja järgi. UF-membraani ja mehaanilise ketasfiltri läbinud uhtevesi juhitakse kanalisatsiooni. Tagasipesu juhtimiseks on UF-membraani uhtveektorustikul ning mehaanilise ketasfiltri uhtveektorustikul magnetklapid, mida avatakse vastavalt seadistatud tagasipesurežiimile. Uhtveektorustikul on õhuklapp. Veepuhastusmooduli filtreeritud vee torustikule on paigaldatud veevoolulüliti, mis registreerib vee liikumist. Vee filtreerimist juhitakse veepuhastusmooduli väljundis asuva magnetklapi abil – kui magnetklapp on avatud, toimub taaskasutusvee tootmine. Filtreeritud vee kogust mõõdetakse veearvestiga.



Joonis 4. Veepuhastusmooduli skeem



- 1 I-astme pump (sisend)
- 2 Veearvesti (sisend)
- 3 Magnetklapp (sisend)
- 4 Manomeeter (sisend)
- 5 Mehaaniline ketasfilter
- 6 Õhuklapp
- 7 Manomeeter
- 8 Rõhuandur
- 9 UF-membraan
- 10 Rõhuandur
- 11 Manomeeter
- 12 Membraanhüdrofoor
- 13 Veevoolulüliti
- 14 Magnetklapp (töödeldud vesi)
- 15 Veearvesti (töödeldud vesi)
- 16 II-astme pump (filtreeritud vesi)
- 17 Magnetklapp (UF.1 tagasipesu)
- 18 Magnetklapp (MF.1 tagasipesu)
- 19 Õhuklapp (uhtevesi)
- 20 Elektri-automaatikakilp

Joonis 5. Veepuhastusmoodul

Veepuhastusmooduli väljundist juhitakse filtreeritud vesi läbi desinfitseerimismooduli taaskasutusveemahutisse. Taaskasutusveemahutis on ketasaeraator, mis võimaldab vett õhustada ja segada. Taaskasutusveemahutis paiknevad veetaseme ujukülid, millest üks on ette nähtud II-astme pumba kuivkäigukaitseks, teine mahuti veeõrguveega ning kolmas taaskasutusveega täitmise juhtimiseks.

Sademevee/heitvee puudumisel täidetakse vastuvõtumahutit ühisveevärgiveega. Olenemata sellest, et veevärgi vesi on puhas, juhitakse ka see läbi veepuhastusmooduli. Selliselt on välditud veepuhastusseadmes tõrgete tekkimine.

Veepuhastusseadme juhtimissüsteem võimaldab vastavalt vajadusele muuta seadme tööparameetreid, nt õhupuhurite töötüklid, taaskasutusvee desinfitseerimistükleid, seadme filtrite tagasipesu aega ja veekogust jne.

I-astme pump

I-astme pump on ettenähtud vastuvõtumahutist vee pumpamiseks läbi veepuhastusmooduli filtersüsteemi ning desinfitseerimismooduli taaskasutusvee mahutisse. Pumba tootja Delfin, mudel Ultima, $Q=2,8 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=30\text{mVs}$, maks 5000 p/min. Pumba tööd juhitakse sagedusmuunduriga. Rõhulüliti on Delfin WHE-5; 1,0–5,0 bar; 230V.

II-astme pump

II-astme pump on ettenähtud vee pumpamiseks taaskasutusvee mahutist akvapoonikasüsteemi või tsirkuleerimisrežiimis taaskasutusvee desinfitseerimiseks läbi UV seadme tagasi taaskasutusveemahutisse. Pumba kuivkäigukaitseks on taaskasutusveemahutis tasemeujuk. Pumba tehnilised andmed on samad, mis I-astme pumbal.

Mehaaniline ketasfilter

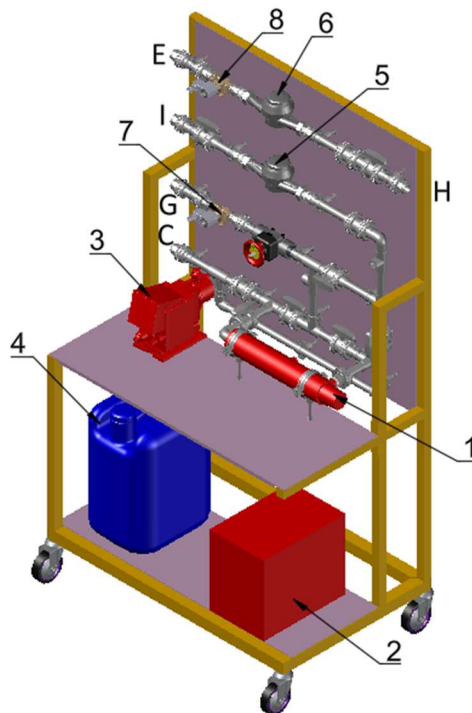
Mehaaniline ketasfilter on ettenähtud veest mehaaniliste osakeste eemaldamiseks. Filterelement koosneb tihedalt üksteise vastas asetsevatest ketastest. Tagasipesurežiimis juhitakse filtreeritud vesi hüdrofoorist vastupidiselt töösuunale filtriketaste vahelt tagasi ning kinnipüütud mehaanilised osakesed suunatakse koos tagasipesuveega kanalisatsiooni. Ketasfiltri tootja on Plastica Alfa, mudel 20535, korpuse materjal PP, filterelement 130 mikronit ja töö rõhk maks 8 bar.

UF-membraan

Ultrafiltratsiooni käigus eemaldatakse veest mineraalsed mikroosakesed, bakterid ja muud mikroorganismid. Ultrafiltratsioon põhineb membraanil, mille pooride suurus on 0,01 -0,1 μm . Membraani pooridest suuremad osakesed jäävad membraani pinnale pidama ning membraani pooridest väiksemad osakesed liiguvad läbi membraani. Ultrafiltratsiooniga on võimalik kinni pidada 99,9% mikroorganismidest, bakteritest ja viirustest. Membraani ummistumise vältimiseks pestakse seda regulaarselt läbi. Tagasipesu ajal liigub filtreeritud vesi vastupidiselt filtreerimissuunale läbi membraani ning selle käigus loputatakse välja membraani pinnale kogunenud osakesed ja juhitakse koos veega kanalisatsiooni. Seadme hoolduse käigus puhastatakse membraani keemiliselt, mis eemaldab membraani pooridesse kinni jäänud saaste ning taastab membraani filtreerimisvõime. UF-membraani tootja on Veolia, mudel ZW700B-10060, filtreerimispind 60 m², maksimaalne töö rõhk 5 bar, rõhulang <1 bar, töötemperatuur 40 °C.

Vee desinfitseerimine

Veepuhatusseade võimaldab vett desinfitseerida kolmel viisil: ultraviolett-töötusega, osoonimisega ja kloorimisega. Desinfitseerimismoodulile (joonis 6) on paigaldatud UV-seade, klooriühendite lisamiseksdosaatorpump, osoonigeneraator ning seadmete automaatseks töötamiseks vajalikud komponendid. Desinfitseerimismoodulist väljunud vesi juhitakse taaskasutusvee mahutisse, millest juhitakse vesi II astme pumbaga tarbijale. Mahutisse seisma jäänud vett desinfitseeritakse vastavalt seadistatud desinfitseerimistsüklile. taaskasutusveemahutisse on pandud aeraator, mida käitab puhur. Mahutites veetasemeujukite abil asuvaid seadmeid juhitakse.



- 1 UV seade
- 2 Osoonigeneraator
- 3 Dosaatorpump
- 4 Kemikaalimahuti
- 5 Taaskasutusvee veearvesti
- 6 Olmeveevarustuse veearvesti
- 7 Tsirkulatsiooni solenoidklapp
- 8 Olmeveevarustuse solenoidklapp

Joonis 6. Desinfitseerimismoodul

UV seade

Veepuhastusmooduli läbinud vee ja taaskasutusvee desinfitseerimiseks on ettenähtud UV seade, mis kahjustab vees leiduvaid baktereid, viiruseid ja muid mikroorganisme. UV-töötus põhineb ultraviolettkiirgusel, mida tekitab UV-lamp. Protsessi käigus juhitakse veepuhastusmoodulis filtreeritud või taaskasutusveemahutis seisnud vesi läbi UV-seadme, UV-kiirgus tungib mikroorganismidesse ja kahjustab nende sisemist ehitust ning nad kaotavad eluvõime. UV-seade ei eemalda veest mikroorganisme vaid püüab nende elutegevust. UV-seadme tootja on VGE Pro UV INOX, mudel 40-76, lambi võimsus 40 W ning lambi kasutusaeg 16 000 h.

Osoonigeneraator

Osoonigeneraator on ettenähtud osooni tootmiseks, mis hävitab mikroorganisme ja lagundab vees sisalduvat orgaanilisi ühendeid. Vee osoonimine aitab vett ette valmistada filterseadmes filtreerimiseks. Vee osoonimine on ettenähtud vastuvõtumahutis või eraldi eelsoonimismahutis ning osoonimise ajaks peatatakse seadme automaatne filtrite töö. Osoonigeneraatori tootja on PureAirPro, mudel CBT-6, võimsus 130 W ja osooni tootmine on reguleeritav 1,2 kuni 6 g/h.

Kemikaali doseerimine

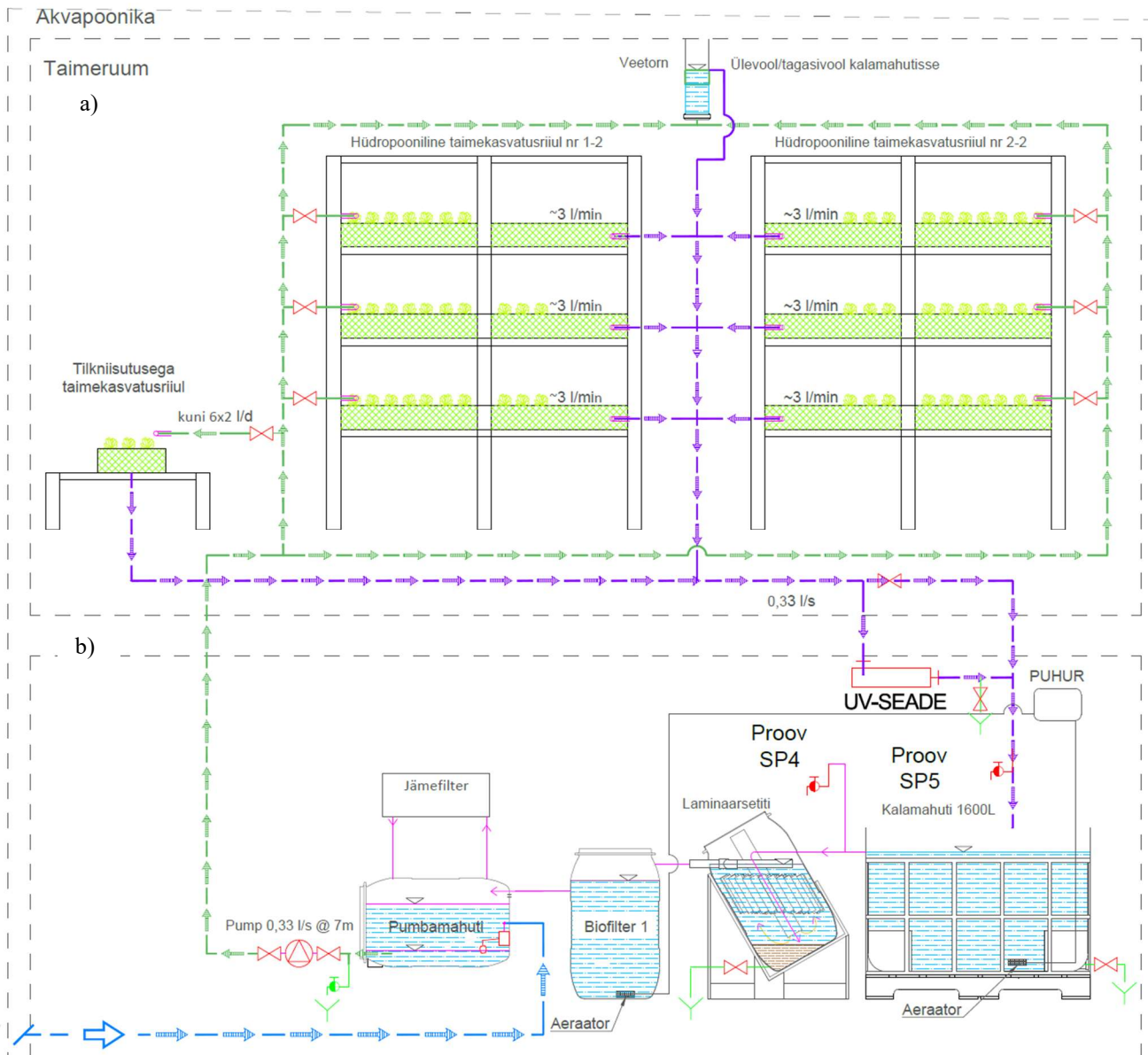
Taaskasutusveele desinfitseerimiskemikaali lisamine toimub dosaatorpumba abil. Doseerimine on ette nähtud töötama veearvesti impulsside järgi. Dosaatorpumba tootja on Grundfos, mudel DDC6-10, võimsus 19 W. Käesolevas töös akvapoonikasüsteemi regulaarset kloorimist vaja ei läinud. Kloorimine osutub vajalikuks siis, kui tehakse torustiku, mahutite ja vannide täielik läbipesu ja desinfitseerimine elusorganismide välja vahetamiseks, seadmestiku hooldusremondi korral või haiguspuhangu tõrjumiseks.

Akvapoonikasüsteem

Akvapoonikasüsteemis elavad ja kasvavad kalad ja taimed vees, mis ringleb kalamahuti ja taimeruumi vahel (joonis 7). Vesi peab olema teatud füüsiliste ja keemiliste omadustega, mistõttu kalamahutist väljuvat ja ka sinna sisenevat vett tuleb omakorda töödelda (joonised 8 kuni 12).

Vee temperatuur ja lahustunud hapniku tase vees peab olema kalaliigile sobiv. Lahustunud hapniku olemasolu vees on kriitilise tähtsusega kalade, aga ka taimede jaoks, kuna madalam lahustunud hapniku tase võib aidata kaasa taimehaiguste levimisele. Nii kalamahutis kui ka biofiltris kasutatakse peenmull-aeratsioonisüsteemi.

Kalade jaoks sobiv pH vahemik on 6,5–8,5. Kalakasvatusest taimekasvatusse juhitava vee pH mõjutab oluliselt taimede võimet toitaineid omastada. Eelistatav on madalama pH-ga keskkond. Taimeruumi õhutemperatuur peab olema taimeliigile sobiv.



Joonis 7. Akvapoonikamoodul: a) taimeruum ja b) kalakasvatus

Akvapoonikaseadmete keskne element on kalamahuti, mis valmistati keskkonnahoidu silmas pidades varem kasutuses olnud plasttorust (joonis 8). Kalamahuti on seadistatava veetasemega ja võimaldab hoida kuni 1600 l vett.

Kalamahutist väljuv vesi sisaldab kalade väljaheiteid, söödajääke jms, mis moodustab sette. Sete tuleb eemaldada, sest vastasel juhul settiks see torudesse ja taimekasvatussüsteemi ning põhjustaks ummistusi. Lahustumata hõljuvaine eemaldamiseks kasutati laminaarsetitit, mis on tõhus ja võtab vähe ruumi (joonis 9), ka laminaarsetiti valmistamisel on kasutatud varem kasutuses olnud mahutit ja torusid. Süsteemil on ka filter peene hõljuvaine eemaldamiseks (joonis 10), mida tuleb regulaarselt puhastada.

Hõljuvtugimaterjaliga biokilreaktor on mõeldud kalakasvatusevee bioloogiliseks töötlemiseks (joonis 11). Biokilreaktori täidisel kasvab biokile, mis lagundab orgaanilisi ühendeid ning muudab kaladele toksilise ammoniaagi ja nitritid ohutumaks ja taimedele omastatavateks nitraatideks. Selleks, et vesi saaks kõigi oma elementide vahel liikuda, on süsteemis tsirkulatsioonipump.



Joonis 8. Kalamahuti



Joonis 9. Laminaarsetiti

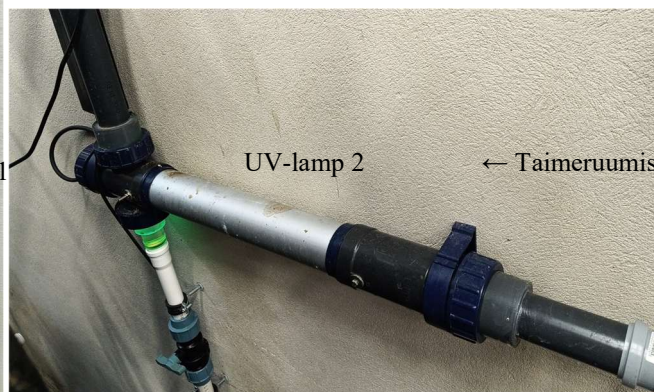
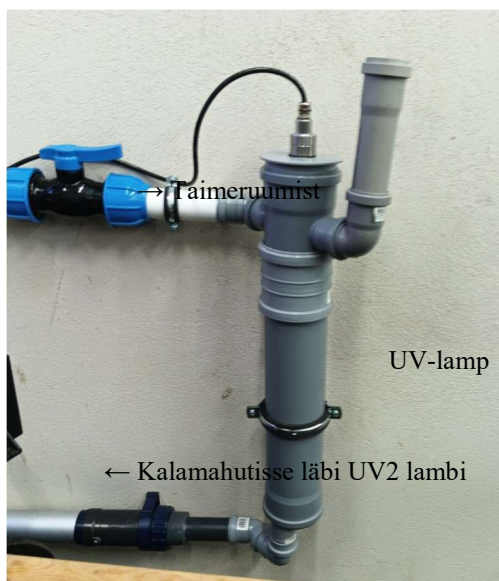


Joonis 10. Filter ja selle sisu



Joonis 11. Biofilter biokilekandjaga

Akvapoonika süsteemis on kaks järjestikku paigaldatud UV-lampi, mis on mõeldud vee desinfitseerimiseks enne kalamahutisse juhtimist (joonis 12). UV hävitab vees leiduvaid baktereid, viiruseid ja parasiite, aidates hoida vee mikrobioloogilisi omadusi stabiilsena.



Joonis 12. UV-lambid 1 ja 2 kalamahutisse siseneval veel

Akvapoonikasüsteemis ringleva vee omaduste jälgimiseks kasutati kaugjälgimisseadet OxyGuard, millel on hapniku-, süsihappegaasi-, pH-, redox- ja temperatuuriandurid. Lisaks OxyGuardile ehitati eraldi kaugjälgimissüsteem, mis võimaldas jälgida:

- taimeruumi temperatuuri ja õhuniiskust süsihappegaasi sisaldust, valgustite poolt antava valguse spektrit
- seadmeruumis paiknevate mahutite veetasemeid (vastuvõtumahuti, kalamahuti ja pumbamahuti)
- seadmeruumi õhutemperatuuri
- veepuhastusseadme, osoonigeneraatori ja ringluspumba hetkevõimsust
- akvapoonikasüsteemi juhitud taaskasutusvee kogust

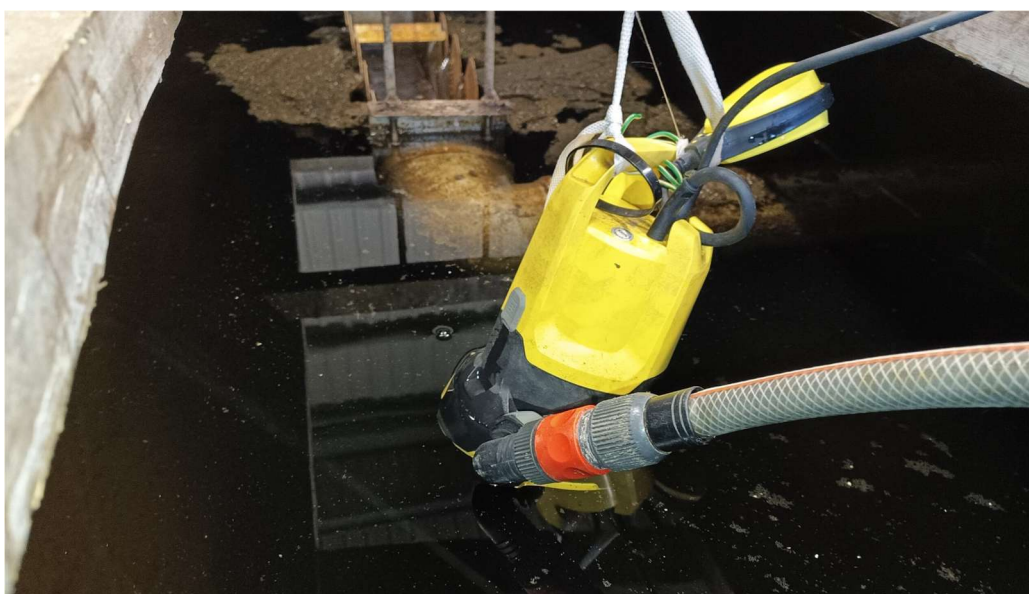
Hüdraulika labori katusel mõõdeti sademete hulka ja välistemperatuuri. Taimeruumi ja seadmeruumi jälgiti videovalve abil, mis võimaldas tuvastada avariiolukordi, nt lekkeid või kala välja hüppamist kalamahutist, ning olukorrale kiiresti reageerida.

Lähtevesi

Tavapäraselt kasutatakse põllumajanduses veevärgivett, veehoidla vett või võetakse vett otse veekogust. Kastmisvesi ei pea olema joogivee kvaliteediga. Taaskasutusvesi on hea kandidaat loodusliku vee asendamiseks nii kala- kui taimikasvatuse tarbeks. Eestis ei ole taaskasutusvee jaotussüsteemi olemas, mistõttu on eeldada, et iga tarbija rajab vee ringlusse võtmiseks oma süsteemi. Seda on käesolevas projektis matkitud. Kasutusele võeti kaks vett: sademevesi üliskooli laborihoone katusest (joonis 13) ja heitvesi Äksi olmeveepuhastist (joonis 14), mida haldab AS Emajõe Veevärk.



Joonis 13. Sademevee kogumine veelabori lamekatuselt



Joonis 14. Heitvee välja pumpamine Äksi reoveepuhasti järelsetitist

Mõlema vee omadused on muutlikud. Sademevesi on eeldatavalt puhas vaid siis, kui katus on puhas ja sellel ei ole tolmu, varist ega lindude elutegevuse jälgi. Reoveepuhasti väljavoolu heitvee omadused olenevad otseselt reoveepuhasti enese tööst, selle hooldamisest ning ilmastikuoludest. Projekti kestel tuli ette muda pundumist ja väljakannet järelsetitist ning talvel ka setiti veepinna külmumist.

Kuigi heitvett on saada igal ajal, siis mitte igas mahus. Süsteemi täitmiseks on vaja korraga palju vett, mis ei pruugi olla kohe saada, eriti väikepuhasti korral. Sademevett on aga vaid siis, kui sajab või kui lumi sulab. Suurimad väljakutsed on seega vee kvaliteet ja vee saadavus. Mõlemat vett tuli varuda, sest pidev veevarustus ei ole võimalik. Seisev vesi aga rikneb, mistõttu algab vee töötlemine juba kogumisel.

Vee puhastamine

Taaskasutusvee tootja peab vee vastu võtjale tagama vähemalt tabelis 1 näidatud parameetrid. Värske sademevee ja hästi töötava reoveepuhasti heitvee täiendava töötlemise korral on neid võimalik tagada hõlpsasti (tabel 2 ja 3). Paraku muutuvad vee omadused kogu aeg ning nende seiramine osutub taaskasutusvee tootjale pingutusi nõudvaks toiminguks.

Tabel 1. Taaskasutusvee põhiparameetrid EL 2020/741 järgi

Parameeter	EL 2020/741 Klass A	Heitvesi tarbijale: SP3
E. coli (no/100 ml)	≤ 10	0
BHT ₅ (mgO ₂ /l)	≤ 10*	< 3
Heljum (mg/l)	≤ 10	< 2
Hägusus (NTU)	≤ 5	< 0.5
Legionella (CFU/l)	< 1000	264

Sademevett peetakse tavaliselt looduslikult puhtaks ja kasutamisküpsaks ka ilma põhjaliku töötlemiseta. Siiski tuleb valmis olla selleks, et sademevee kvaliteet muutub ajas ja sõltub suurel määral lindudest, tegevuspaiga ümbruse heakorrast (tolm, tahm, liiklusreostus) ning temperatuurist – külmal ajal on probleeme vähem. Lindude pesitsusaja saabumisel riknes sademevesi kiiresti ning selleks tuleb valmis olla. Sademevee omadused vastuvõtumahutis, peale töötlemist ja vahetult enne tarbijale suunamist on tabelis 2.

Heitvee omadused hästi töötavas reoveepuhastis võivad olla nii head, et vett saab taaskasutusse suunata ka täiendava töötlemiseta ning vaid desinfitseerimise abil. Siiski tuleb olla valmis, et heitvesi tuleb üle puhastada. Peamiseks probleemiks osutus heitvees mikrobioloogilised parameetrid, mis õnnestus desinfitseerimise abil lahendada (tabel 3).

Olmereoveesi sisaldab jääke ühenditest, mida igapäevaelus ei mõõdeta, nt ravimijääke, olme- ja põllumajanduskemikaalide jääke jms. Nende esinemist kontrolliti ning seostati riskiteguritega (ptk Riskihinnangud).

Tabel 2. sademevee omadused vastuvõtumahutis, peale töötlemist ja vahetult enne tarbijale suunamist.

	Vastuvõtumahuti vee varumiseks						Vesi pärast filtreid (mikrofilter+ultrafilter)					Taaskasutusvesi tarbijale (akvapoonikasse)				
	15.01.25	11.02.25	04.03.25	14.04.25	02.06.25		15.01.25	11.02.25	04.03.25	14.04.25	02.06.25	15.01.25	11.02.25	04.03.25	14.04.25	02.06.25
Proovivõtu aeg	SP1	SP1	SP1	SP1	SP1	SP1	SP2	SP2	SP2	SP2	SP2	SP3	SP3	SP3	SP3	SP3
Elektrijuhtivus	ÄµS/cm	72	56	39	41	102	122	76	58	42	65	186	84	92	58	72
pH		7,9	7,7	7,2	7	6,9	8	7	7	6,6	6,1	7,8	7,6	7,6	7,4	6,9
Üldfosfor (P _{üld})	mg/l	0,1	0,2	0,1	0,27	0,59	< 0,1	0,15	< 0,1	0,24	0,41	0,11	0,19	0,1	0,23	0,24
Üldlämmastik (N _{üld})	mg/l			0,7	1,7	11			0,57	1,2	7			0,88	1,2	4,8
Ammoonium (NH ₄ ⁺ -N)	mgN/l	0,012	0,03	0,04	0,1	6,7	0,1	0,19	0,039	0,026	1	0,017	0,097	0,17	0,029	0,41
Biokeemiline hapnikutarve (BHT7)	mgO ₂ /l	< 3	< 3	< 3	3,1	8,7	4,2	< 3	< 3	< 3	< 3	16	< 3	< 3	< 3	< 3
Keemiline hapnikutarve KHTCr	mg/l	19	< 15	< 15	21	45	< 15	< 15	< 15	< 15	20	100	< 15	15	< 15	< 15
Heljum											< 2				< 2	< 2
Hägusus											< 0,5				0,7	0,52
Fosfaat (PO ₄ ³⁻ -P)	mgP/l	0,02	0,051	0,037	0,042	0,57	< 0,002	0,022	0,02	0,03	0,41	0,008	0,034	0,038	0,033	0,21
Ca	mg/l	13	8,4	5,7	4,7	5,6	23	11	10	8,4	5,9	25	14	15	8,5	13
Kaalium (K)	mg/l	0,29	1,2	0,92	0,51	1	0,36	1,3	1,3	0,53	0,85	1,4	1,3	1,3	0,54	0,64
Kloriid (Cl ⁻) (IC)	mg/l	0,85	2,4	2	1,8	0,97	0,92	2,4	2,1	1,8	0,9	9,3	2,9	2,4	1,8	1
Magneesium (Mg)	mg/l	0,52	0,63	0,58	0,71	0,56	0,64	0,71	0,6	0,71	0,52	5	0,85	0,78	0,68	0,61
Naatrium (Na)	mg/l	0,42	0,69	0,71	1,4	0,55	0,47	0,76	0,75	1,3	0,53	4,4	0,93	0,83	1,1	0,6
Nitraat (NO ₃ ⁻ -N) (IC)	mgN/l		0,66	0,51	1	0,088		0,59	0,35	0,88	5,1		0,61	0,59	0,8	3,7
Nitraat (NO ₃ ⁻ -N) (autom)	mgN/l															
Niitrit (NO ₂ ⁻ -N)	mgN/l	< 0,003	< 0,003	0,0031	0,006	0,025	< 0,003				0,056	0,066	0,0075	< 0,003	< 0,003	0,023
Sulfaat (SO ₄ ²⁻) (IC)	mg/l	1,4	2,2	1,9	2,1	2,1	1,8	2,7	2,1	2,5	2,3	6,7	2,6	2,6	2,2	2,3
Sulfiidid (S ₂ ⁻)	mg/l	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,9	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,9	< 0,9	< 0,8	< 0,8	< 0,8	2,4	< 0,9
Väävel (S)	mg/l	0,46	0,78	0,72	1,1	1,3	0,6	2	1,3	0,96	1,1	2,2	0,89	0,97	0,94	1
Clostridium perfringens (koos eostega)	arv/100 ml		0	0	0	11		0	0	0	0		0	0	0	0
Coli-laadsed bakterid //100ml//Colilert	arv/100 ml	238	1553	820	805	4350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Enterokokid	arv/100 ml	2	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Escherichia coli //100ml//Colilert	arv/100 ml	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Legionella	arv/1000 ml		0	0	5549	<1		0	<1	<1			0	0	84	<1
Arseen (As)	Äµg/l	0,067	0,07		0,14	0,39	0,15	0,09		0,18	0,31	0,14	0,089		0,12	0,24
Elavhõbe (Hg)	Äµg/l	< 0,015	< 0,015	< 0,015			< 0,015	< 0,015	< 0,015			< 0,015	< 0,015	< 0,015		
Kroom (Cr)	Äµg/l	0,071	0,15		0,17	0,13	< 0,05	0,17		0,13	0,13	0,19	0,12		0,11	0,89
Kuuevalentne kroom (Cr ₆₊)	Äµg/l		< 2	< 2				< 2	< 2				< 2	< 2		
Kaadmium (Cd)	Äµg/l	0,021	0,015		0,014	0,046	0,04	0,053		0,041	0,061	0,038	0,032		0,05	0,041
Molübdeen (Mo)	Äµg/l	< 0,1	< 0,1		0,13	0,18	< 0,1	< 0,1		0,23	0,16	0,17	< 0,1		0,11	0,12
Nikkel (Ni)	Äµg/l	0,45	0,78		1,1	6,4	0,4	0,86		4,4	10	1,2	0,91		2,8	7,8
Plii (Pb)	Äµg/l	1,1	3,1		0,94	3,5	17	10		17	8,5	11	7,3		10	2,8
Tsink (Zn)	Äµg/l	33	48		55	24	93	540		220	71	74	91		140	180
Vask (Cu)	Äµg/l	3	5,7		8,2	7	3,6	6,9		17	7,5	5,8	10		7,6	6,7
Alumiinium (Al)	Äµg/l				< 50	< 50				< 50	< 50				< 50	< 50

Tabel 3. Heitvee töötlemine taaskasutusveeks.

		RVP heitvesi töötlemata	Eelsoonitud vesi (SP1)	Mikrofilter+ ultrafilter (SP2)	UV (1x) seadme akvapoonikasse (SP3)
Elektrijuhtivus	µS/cm	1664	1652	1654	1602
pH		7	7,8	7,9	7,9
Üldfosfor (Püld)	mg/l	0,43	0,33	0,32	0,33
Üldlämmastik (Nüld)	mg/l	52	52	52	47
Ammoonium (NH ₄ ⁺ -N)	mgN/l	0,068	0,051	0,052	0,075
Biokeemiline hapnikutarve (BHT7)	mgO ₂ /l	8,7	< 3	< 3	< 3
Keemiline hapnikutarve KHCr	mg/l	41	37	46	34
Heljum	mg/l		< 2		< 2
Häigusus	NHÜ		0,81		0,9
Fosfaat (PO ₄ ³⁻ -P)	mgP/l	0,35	0,3	0,31	0,32
Ca	mg/l	94	96	93	92
Kaalium (K)	mg/l	30	32	31	31
Kloriid (Cl ⁻) (IC)	mg/l	240	250	260	240
Magneesium (Mg)	mg/l	36	37	36	35
Naatrium (Na)	mg/l	150	150	150	140
Nitraat (NO ₃ ⁻ -N) (IC)	mgN/l	45	49	50	45
Nitraat (NO ₃ ⁻ -N) (autom)	mgN/l				
Nitrit (NO ₂ ⁻ -N)	mgN/l	0,29	0,56	0,54	0,45
Sulfaat (SO ₄ ²⁻ -) (IC)	mg/l	150	160	160	150
Sulfidid (S ₂ ⁻)	mg/l	< 0,9	< 0,9	< 0,9	< 0,9
Väävel (S)	mg/l	53	59	56	60
Clostridium perfringens (eostega)	arv/100 ml	7500	270	0	0
Coli-laadsed bakterid //100ml//Colilert	arv/100 ml	55100	435	0	0
Enterokokid	arv/100 ml	7400	2	0	0
Escherichia coli //100ml//Colilert	arv/100 ml	18369	25	0	0
Legionella	arv/1000 ml	1842	1068	<1	<1
Arseen (As)	µg/l	0,19	0,28	0,21	0,21
Elavhõbe (Hg)	µg/l	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Kroom (Cr)	µg/l	0,15	0,12	0,1	0,12
Kuuevalentne kroom (Cr ₆ ⁺)	µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2
Kaadmium (Cd)	µg/l	0,012	0,039	0,039	0,042
Molübdeen (Mo)	µg/l	0,42	0,44	0,46	0,44
Nikkel (Ni)	µg/l	2,7	5	5	5,2
Plii (Pb)	µg/l	0,58	3,2	1,4	0,88
Tsink (Zn)	µg/l	20	170	150	220
Vask (Cu)	µg/l	3,9	81	71	66

Kalakasvatus

Eksperiment

Projekti käigus sooritati kaks eksperimenti kala kasvatamises:

- 28.01.2025-11.06.2025
- 01.09.2025-31.03.2026

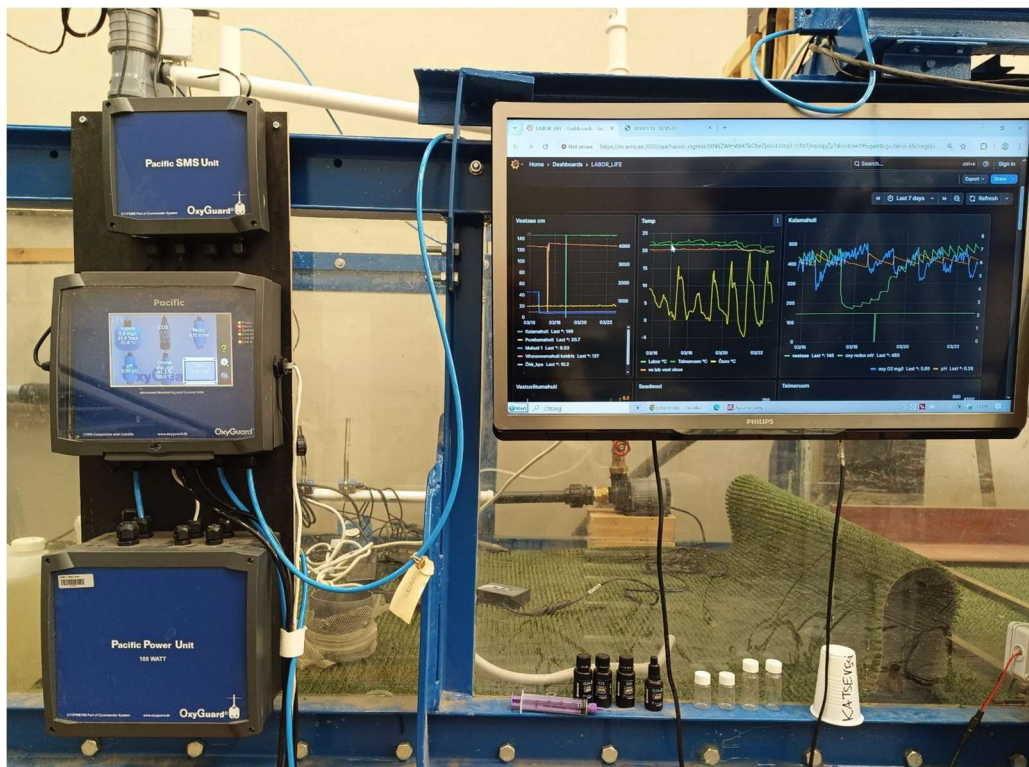
Esimesed kalad toodi LIFE AdaptEst kalamahutisse 28. jaanuaril 2025. Süsteemi asustati 30 vikerforelli (*Oncorhynchus mykiss*), kogumassiga 15 061 grammi, mis tegi keskmiseks massiks 537,9 grammi.

Enne teist kontrollkaalumist lisati süsteemi ka kolm siberi tuura (*Acipenser baerii*). Tuurade asustamise eesmärk oli saavutada, et tuurad aitaks ära süüa vikerforellidest alles jäänud söödajäägid ja läbi selle süsteemi puhtamana hoida. See tasakaalustas ka seda, et kahe kontrollkaalumise vahelisel ajal oli õhustus-segamistorustikku kinni jäämise tõttu hukkunud samuti kolm vikerforelli. Õhustus-segamistorustiku väljavool kaeti võrega.

Kontrollkaalumiseks (04.03.2025) oli süsteemis 27 vikerforelli ja 3 tuura, ehk kokku 30 kala. Biomass oli 20 kg ja keskmine mass 738,8 grammi. Kolmas kontrollkaalumine toimus 07.04.2025. Selleks ajaks oli kalade keskmine mass 923 grammi ja kogumass 28 kg.

Enne viimast kontrollkaalumist 11. juunil viidi kolm kala laborisse kvaliteedikontrolliks. Seega oli viimasel kontrollkaalumise alles 24 vikerforelli ja 3 tuura. Katse lõpetati viimase kaalumisega samal päeval. Kalade kogu-biomass oli 31 kg, keskmine kaal 1043 g.

Kokkuvõttes oli kasv kesine ning kalad olid ka visuaalselt “kehva tervisega”. See oli tingitud liiga kõrgest vee temperatuurist, mis omakorda oli tingitud liiga kõrgest temperatuurist laboris, mida seadistada ei saanud. Katse toimus vihmaveest saadud taaskasutusveega. Vee omadusi seirati reaalajas automaatse mõõteseadmega OxiGuard (joonis 15).

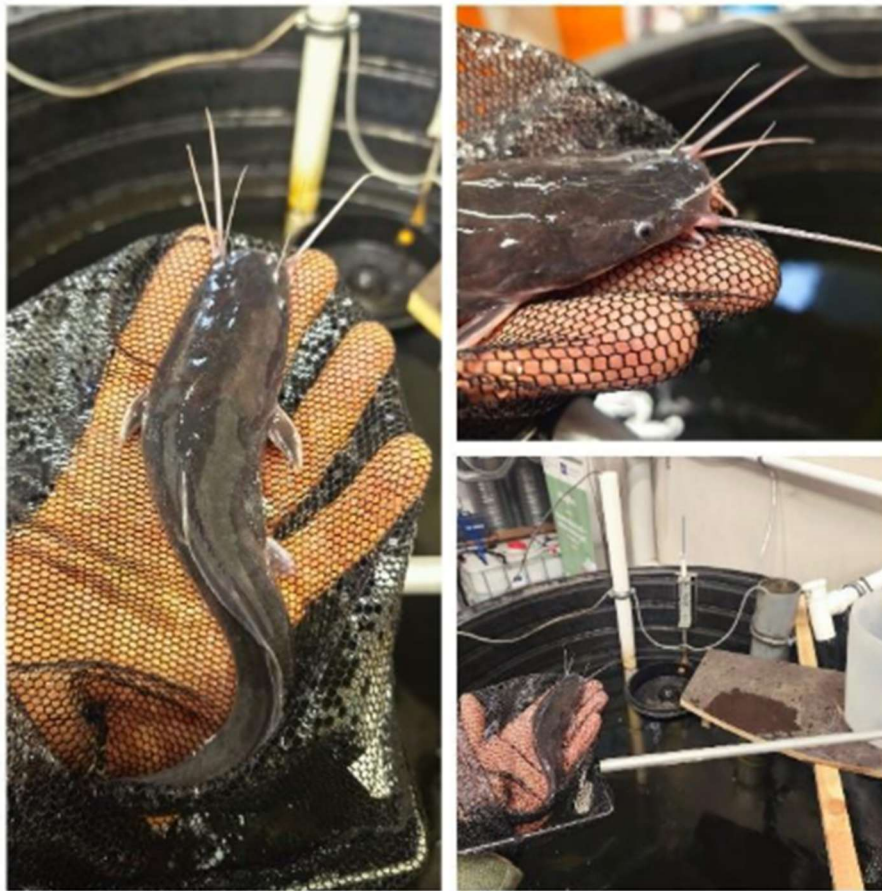


Joonis 15. Oxyguard seirekeskus (vasakul) ning isetehtud jälgimisseadmete kuva monitoril (paremal)

Eluliselt vajalikud parameetrid kuvati monitorile kohapeal ning olid jälgitavad ka nutiseadmetes. Seiratavad parameetrid olid hapniku ja süsihappegaasi sisaldus, pH, redox ja temperatuur kalamahuti vees (mg/l ja %). Lisaks võeti iga päev veeproovid ning spektrofotomeetriga "Exaqua photometer" (<https://exaqua.com/>) mõõdeti NH_3/NH_4 , NO_2 ja NO_3 . Vees lahustunud hapnikku mõõdeti seadmega Aqualabo Neon ja pH-d mõõdeti seadmega Ecosense.

Teisel katseaastal toodi süsteemi Aafrika angersäga (*Clarias gariepinus*), kes taluvad paremini kõrgemat temperatuuri. Kalad toodi 30.09.2025 (joonis 16). Asustati 50 kala, kogumassiga 3112 grammi, keskmine mass 104,4 grammi. Valim sattus juhuslikult ühe põlvkonna samade vanemate järelkasvust. 50 asustatud kalast hukkus katse algperioodil kalamahutist välja hüppamise tulemusel kaks kala. Selle vältimiseks kaeti mahuti võrguga.

Esimene kontrollkaalumine toimus 04.11.2025 (joonis 17). Kalade kogumass oli tõusnud 12085 grammini, keskmine mass 246,6 grammi.

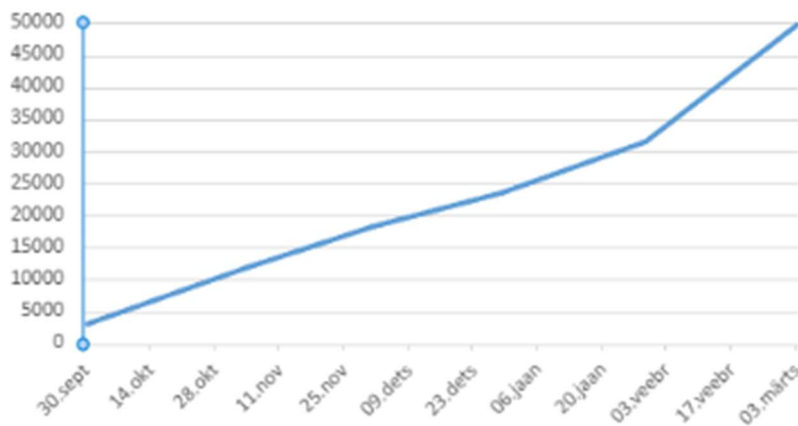


Joonis 16. Aafrika angersäga (*Clarias gariepinus*) asustamise hetkel 30.09.2025.



Joonis 17. Kala kaalumine

Söödakulu perioodil 30.09.2025-04.11.2025 oli 4669,94 grammi, mis teeb söödaväärindus-koefitsendiks 0,5. Järjekorras teine kontrollkaalumine leidis aset 01.12.2025. Selleks ajaks oli kalade kogumass jõudnud 18 401 grammini, keskmiseks massiks 383,4 grammi. Söödakulu vahemikus 04.11.2025-01.12.2025 oli 8931 grammi, söödaväärinduskoefitsent 1,4. Kolmas kontrollkaalumine leidis aset 29.12.2025, kala kogumass oli jõudnud 23 564 grammini, keskmine mass 490,9 grammi. Vahemikus 01.12.2025-29.12.2025 oli söödakulu 5784 grammi, mis teeb söödaväärinduskoefitsendiks 1.1. Kuu aega hiljem, 29.01.2026 tehtud kontrollkaalumisel oli biomass kasvanud 31 kiloni, keskmiseks mass 671 grammi. Kahe kaalumise vahelisel ajal eemaldati süsteemist kaks kala Mõlemad viidi laborisse, et teha neile laboris bakteriaalne analüüs. Süsteemis jäi 46 kala. Viimane kontrollkaalumine tehti 03.03.2026. Kalad on teinud kasvamises hea edasimineku ja hetkel on kalade kogumass 49 778 grammi, ehk peaaegu 50 kg. Keskmiseks mass oli 1082 grammi. Summaarne biomassi juurdekasv on joonisel 18.



Joonis 18. Kala biomass, g

Kalade kasv ja söödaväärinduskoeffitsient on olnud enamuse katse ajast kesised, põhjus seisnes madalas vee temperatuuris, mis oli teise katsesükli puhul tingitud Aafrika angersäga jaoks madalast temperatuurist laboris. Erinevalt eelmisest katsest, kus labor oli kevade lähenemise tõttu liiga soe, oli seekord labor külma talve tõttu liiga külm. Seadmestik vee kütmist ei võimaldanud. Sellega kaasnes palju päevi, kus kala polnud söödast huvitatud ja ka päevi, kus antud sööt ulpis kalamahutis veepinnal. Alates 05.01.2026 saadi labori temperatuuri seadistamine katse korraldajate haldusalasse ja sealt edasi on olnud võimalik veetemperatuuri tõsta 19,7 kraadi pealt 23,2 kraadini. Sealt tuleb ka hea kasvukiirendus viimastel kuudel. Akvapoonikasüsteem oli kasutusel ka õppe- ja praktikabaasina. 25.11.2025-28.11.2025 teostas EMÜ bakalaureusetudeng (joonis 19) talle ettenähtud praktika akvapoonikasüsteemi hooldamisel. Praktika sisu oli täita igapäevaseid akvapoonikasüsteemi kala kasvatamisega seotud ülesandeid, mis hõlmasid endas vee parameetrite mõõtmist, kaladele sööda doseerimist ja süsteemi üleüldist haldamist.



Joonis 19. Üliõpilane praktikal 25.11.2025.

Sisetingimustes toimunud kasvukatse käigus täheldati, et suurim mõjufaktor kala kasvamisel oli vee temperatuur. Esimesel katseperioodil kasvatati vikerforelli (*O. mykiss*), kes tundis end jahedamate temperatuuridega vihmaveel põhinevas süsteemis seni üsna hästi. Kui veetemperatuur ületas 20 kraadi, tõi see kaasa lahustunud hapniku sisalduse vähenemise vees piirini, mis hakkas mõjutama kalu. Ebasoodne temperatuur kasvukeskkonnas tõi kaasa kalade tõrkumise toitumisel ning söödajäägid jäid basseini põhja. Jääk rikkus vett, mille parendamiseks asustati süsteemi 3 põhjast-toituvat tuura. See omakorda vähendas eutrofeerumise ohtu ja vältis hapnikutarbetut vähenemist biokeemilise hapnikutarbe tõttu. Kalaka liigi, angersäga, valiku põhjus tugineb nende heale vastupanul kehvadele vee tingimustele ja võimel toime tulla vähese hapnikusisaldusega vees, sest kala suudab ka atmosfääriõhku hingata. Sellegipoolest oli tarvis veetemperatuuri hoida üle 20 kraadi. Temperatuuri alampiiri juures majandamine tõi kaasa kehvema kasvu ja kesisema sööda väärindamise – kontrollkaalumisel ilmnas kehvemapoolne kasvu indikeeriv söödakoeffitsient 1.4, mis sobivatel temperatuuridel paranes 0,8 ja 0,9 juurde (FCR, *feed conversion ratio*), mis näitab, et ühe kg kala kasvatamiseks on kulunud 0,9 kg sööta). Agressiivse mõjuga veekeskond mõjub ka akvapoonikas kasutatud ehitusmaterjalidele ja viitab vajadusele kindlasti kasutada plastist või korrosioonikindlaid materjale. Vähem kvaliteetsed või mittekorrosioonikindlad materjalid kipuvad

järgi andma ja purunema, mis põhjustab kasvatatavate kultuuride kahjusid. Joonisel 20 tõenäoliselt purunenud klambri osade tõttu tekkinud vigastus kala küljel). Vigastustega kalad paranesid 2-3 nädala möödudes, kui soodsa veetemperatuuri korral paranes nende isu.



Joonis 20. Ennast kalamahutis vigastanud kala

Ringlusvesi akvapoonikas

Akvapoonikasüsteemi vee omadusi muudab kõige rohkem kalakasvatus. Ehkki sellest lähtuvad taimetoitained on meile vajalikud, tuleb süsteemi ülekoormuse eest kaitsta. On oluline, et ammoonium ja nitritid oleks redutseeritud nitraatideks ning et kalade poolt mikrobioloogiliselt reostatud vesi saaks desinfitseeritud. Heitvee töötlemise tulemused on tabelis 4. UV-seadmestik suutis mikrobioloogilise reostuse edukalt maha suruda.

Tabel 4. Heitvee töötlemine taaskasutusveeks.

Proovipunkt	Proovivõtu aeg	Kalamahuti väljavool SP4					Kalamahuti sissevool SP5					
		15.01.25	11.02.25	04.03.25	14.04.25	14.04.25	02.06.25	15.01.25	11.02.25	04.03.25	14.04.25	02.06.25
Elektrijuhtivus	ÅµS/cm	1063	618	950	1217		1250	1071	617	948	1213	1241
pH		6,4	5,9	6,2	6,7		6,7	6,5	5,9	6,5	6,8	6,7
Üldfosfor (Püld)	mg/l	2,1	3,3	6,9	9,4		12	2	3,3	6,6	9,4	11
Üldlämmastik (Nüld)	mg/l		33	76	190		140		32	73	160	140
Ammoonium (NH4+-N)	mgN/l	0,39	1,9	0,6	0,25		0,2	0,29	3	0,6	0,17	0,12
Biokeemiline hapnikutarve (BHT7)	mgO2/l	6,2	6	5,3	32		< 3	6,8	5,9	4,9	17	< 3
Keemiline hapnikutarve KHTCr	mg/l	27	36	59	160		55	42	35	41	140	57
Heljum												
Hägusus												
Fosfaat (PO43-P)	mgP/l	2,1	2,8	6,1	8,2		11	2	2,9	6,1	7,9	9,9
Ca	mg/l	110	62	66	56		38	110	62	66	55	39
Kaalium (K)	mg/l	6,1	4	4,4	2,2		0,96	6,1	3,9	4,4	2,1	1
Kloriid (Cl-) (IC)	mg/l	210	73	68	46		33	200	73	67	44	31
Magneesium (Mg)	mg/l	29	13	13	12		8,1	30	13	14	12	8,3
Naatrium (Na)	mg/l	32	18	91	180		190	32	18	90	180	190
Nitraat (NO3-N) (IC)	mgN/l	30										
Nitraat (NO3-N) (autom)	mgN/l		28	69	110		130		28	66	120	130
Nitrit (NO2-N)	mgN/l	0,33	0,082	0,072	1,3		0,099	0,3	0,055	0,073	0,38	0,094
Sulfaat (SO42-) (IC)	mg/l	45	25	35	45		53	42	25	35	44	51
Sulfidid (S2-)	mg/l	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8		< 0,9	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,9
Väävel (S)	mg/l	15	8,4	13	18		19	14	8,5	13	18	18
Clostridium perfringens (koos eostega)	arv/100 ml		0	0	0	0	0		0	0	0	0
Coli-laadsed bakterid //100ml//Colilert	arv/100 ml	86640	87040	196080	1986300	3640	30760	85320	55100	209240	770100	866
Enterokokid	arv/100 ml	16	7	0	30	26	0	18	14	0	10	0
Escherichia coli //100ml//Colilert	arv/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Legionella	arv/1000 ml		0	2133	>22726	178	9772		0	1644	>22726	<1
Arseen (As)	Åµg/l	0,76	0,51		0,79		0,64	0,76	0,5		0,77	0,65
Elavhõbe (Hg)	Åµg/l	< 0,015	< 0,015	< 0,015				< 0,015	< 0,015	< 0,015		
Kroom (Cr)	Åµg/l	0,36	0,33		0,36		0,18	0,35	0,3		0,36	0,14
Kuuvalentne kroom (Cr6+)	Åµg/l		< 2	< 2					< 2	< 2		
Kaadmium (Cd)	Åµg/l	0,018	0,097		0,021		0,026	0,017	0,094		0,018	0,025
Molübdeen (Mo)	Åµg/l	0,85	0,48		0,82		1,4	0,85	0,49		0,84	1,3
Nikkel (Ni)	Åµg/l	9,6	12		13		8	9,5	12		13	8
Plii (Pb)	Åµg/l	0,15	0,34		0,27		0,34	0,16	0,2		0,33	0,24
Tsink (Zn)	Åµg/l	630	540		92		92	640	540		270	90
Vask (Cu)	Åµg/l	39	37		80		45	39	36		79	45
Alumiinium (Al)	Åµg/l				< 50		< 50				< 50	< 50

Kalatoodangu kvaliteedikontroll

Laborianalüüsid näitavad, et kala seisund on üllatavalt puhas. Enamik ohtlikke aineid (pestitsiidid, PFAS-id, rasketallid) jäävad alla määramispiiri. Analüüsitulemused ja tõlgendus on järgmised:

Rasketallid kalas: võrreldes Euroopa Liidu toiduohutuse piinormidega on rasketallide sisaldus kalades väga madal (tabel 5). Orgaanilistest saasteainetest ja pestitsiididest lähtuvaid riske on kirjeldatud peatükis Riskihinnangud.

Tabel 5. Rasketallid kalades.

Element	ühik	Proov 1 / Proov 2	Tõlgendus
Tsink (Zn)	mg/kg	5,9 / 5,6	Selles testis numbriliselt kõige kõrgem näit, kuid tsiingi puhul on see kala bioloogiat arvestades normaalne tase.
Vask (Cu)	mg/kg	0,41 / 0,38	Madal tase. Vask on ühtlasi ka organismile vajalik mikroelement.
Elavhõbe (Hg)	µg/kg	8,5 / 10	Väga madal. Piinorm on 500 µg/kg (0,5 mg/kg). Need kalad on puhtamad kui paljud ookeanikalad.
Arseen (As)	mg/kg	0,092 / 0,06	Madal tase.
Baarium (Ba)	mg/kg	<0,05 / 0,058	Teises proovis tuvastatav, kuid mitte ohtlikus koguses.

Katse käigus saadud kala valmistati peale kvaliteedikontrolli tarbimiseks (joonis 21). Degusteerimisel said maitseomadused kõrgeima hinde.



Joonis 21. Degusteerimiseks ette valmistatud kalad

Taimekasvatus

Taimeliigid

Akvapoonilises kasvatussüsteemis katsetati erinevaid taimeliike, et hinnata nende kohanemisvõimet ja kasvupotentsiaali puhastatud reovee katsetamise tingimustes. Taimevaliku aluseks oli vajadus:

- Saada turustamiskõlblikku saaki
- Saada suurima kasumimarginaaliga saaki
- Tuvastada taimi, mis tarbivad vee liiaga esinevaid taimetoitained

Katsetesse võeti järgmised liigid: võõrasema (*Viola × wittrockiana*), saialill (*Calendula officinalis*), salvei (*Salvia officinalis*), basiilik erinevate sortidena (*Ocimum basilicum*), hapuoblikas (*Rumex acetosa*), pakchoi (*Brassica rapa subsp. chinensis*), peiulill (*Tagetes patula*), tomat (*Solanum lycopersicum*), piparmünt (*Mentha × piperita*), rukola (*Eruca vesicaria subsp. sativa*), kivikilbik (*Lobularia maritima*) ja sidrunhein (*Cymbopogon citratus*). Lisaks kasvatati lühiajaliselt ka kressi (*Lepidium sativum*). Eksootilisematest taimedest kasvavad süsteemil kohvipuud ja vanill.

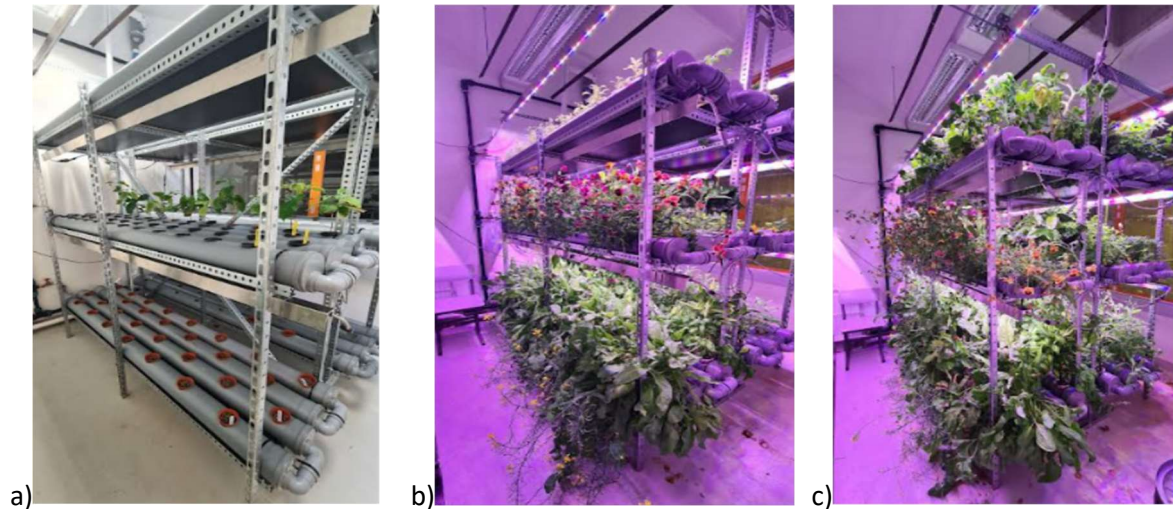
Liikide kasvutulemused varieerusid märkimisväärselt. Rukola kasvas algfaasis hästi, kuid taimed hakkasid teatud kasvujärgus kolletuma või heledaks muutuma ning kuivasid seejärel, mis viitab toitainete tasakaalutusele või liigsele valguskoormusele, mida on täheldatud ka varasemates uuringutes (Roosta & Hamidpour, 2011). Sidrunheina puhul tärkasid vaid üksikud taimed, mis võib viidata selle liigi spetsiifilistele kasvunõuetele, mida akvapooniline süsteem täielikult ei rahuldanud. Liiki on võimalik kasvatada akvapoonilisel süsteemil kuid selleks tuleks proovida taimi kasvatada ette. Hetkel oleme süsteemil teinud külvid otse keramisiidile, millega on täidetud plastpotid. Plastpotid koos täidisega on asetatud süsteemil asuvasse rõhttorudesse, milles jookseb vesi.

Mitmed liigid näitasid seevastu väga head kasvupotentsiaali. Salvei, paksoi, hapuoblikas, saialill, võõrasema ja basiilik kasvasid jõudsalt ja ühtlaselt. Basiilik on rahvusvahelise teaduskirjanduse andmetel üks enim uuritud akvapoonilistel süsteemidel kasvatatavaid liike ning selle hea kasv on kooskõlas varasemate leidudega (Rakocy et al., 2006; Somerville et al., 2014). Peiulill eristus eriti tugeva kasvuga, taimed olid lopsakad ning moodustasid ulatusliku juurestiku. Tomat ja piparmünt kasvasid stabiilselt ja vastasid ootuspärasele kasvudünaamikale, mis on samuti kooskõlas varasemate akvapoonika-alaste uuringutega (Delaide et al., 2016).

Kivikilbik idanes hästi, kuid taimed hukkusid varases kasvufaasis, mis võib viidata liigi tundlikkusele akvapoonilise süsteemi niiskuse- ja toitainerežiimi suhtes. Kress kasvas lühiajaliselt, kuid selle tulemused jäid esialgseks.

Varasemad uuringud kinnitavad, et enamik käesolevas katses kasutatud liike on akvapoonilistes süsteemides laialdaselt kasvatatavad ning üldiselt hästi kohanevad. Eriti maitsetaimed, nagu basiilik, piparmünt ja salvei, on osutunud akvapoonika jaoks sobivateks tänu nende mõõdukale toitainete vajadusele ja heale juurestiku arengule (Somerville et al., 2014). Lehtkõõgiljad, sealhulgas pakchoi ja rukola, on samuti sagedased mudelliigid, kuigi rukola puhul on mitmel pool täheldatud sarnaseid probleeme nagu käesolevas katses (Roosta & Hamidpour, 2011). Lilleliikidest on peiulille ja saialille kasvatamist akvapoonikas kirjeldatud harvem, kuid nende tugev kasv ja juurestiku areng on kooskõlas üldiste hüdroponiliste kasvatustulemustega (Resh, 2013). Mõned liigid, nagu sidrunhein ja kivikilbik, on rahvusvahelises praktikas harvemini kasutusel, mis võib viidata nende spetsiifilisematele kasvunõuetele või piiratud sobivusele akvapoonilisse keskkonda.

Taimekasvuruum oli pidevas muutumises ning nägi katseeria alguses, keskel ja lõpus välja väga erinev (joonis 22). veevarustus, valgustus, õhuniiskus ja temperatuur olid katseks sobilikud. Kõige rohkem muutus temperatuur, mis tingis aeg-ajalt vajadust sellele sobivate taimeliikide valimist.

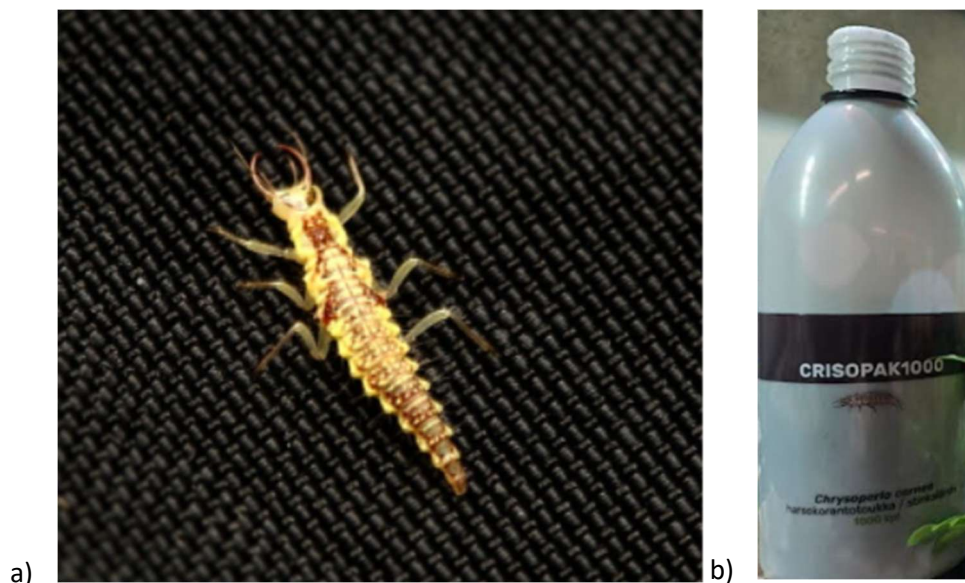


Joonis 22. Akvapoonilise süsteemi taimede kasvatamine katseseeria jooksul: a) katseseeria alguses, b) katseseeria keskel ja c) enne saagi osalist koristamist

Biotõrje

Kõiki taimi ei kasvatatud seemnest vaid toodi noortaimedena koostööpartnerilt AS GrüneFee. Kuna noortaimedega võivad edasi kanduda taimekahjurid, alustati kohe ka ennetava biotõrjega. Biotõrjet tuleb teha ennetavalt, et vältida taimekahjurite plahvatuslikku kasvu. Kuna meie süsteemil on kahjurputukate jaoks soodne temperatuuri vahemik +20- +22 °C ja ruumis on kõrge õhuniiskus siis soetasime putukate lähima kättesaamise ja usaldusväärse partneri käest kiilassilma vastseid. Süsteemil oli märgata üksikuid putukaid. Kiilassilma vastseid tõime süsteemile alates novembri kuust kahe nädalaste vahedega, mis oli piisav, et tagada kahjurputukate vaba keskkond.

C. carnea on laialdaselt kasutatav üldkiskja (joonis 23), kelle vastsed on efektiivsed lehetäide ja teiste pehmekestaliste kahjurite tõrjel ning sobivad hästi integreeritud taimekaitse strateegiatesse ka kontrollitud keskkondades, nagu akvapoonilised süsteemid (McEwen et al., 2001). Varasemad uuringud on näidanud, et *C. carnea* kasutamine vähendab oluliselt sünteetiliste keemiliste taimekaitsevahendite vajadust ning aitab säilitada süsteemi ökoloogilist tasakaalu (Pappas et al., 2011; Obrycki et al., 2009).



Joonis 23. Biotõrje: a) kiilassilma vastne, b) biotõrje toode (<https://www.flickr.com/photos/aik/37882382365>)

Akvapoonilises süsteemis rakendati kahjurite ennetavaks seireks ja tõrjeks kollaseid kahepoolseid liimpüüniseid (20 × 25 cm), mida paigutati taimede vahele kogu kasvuala ulatuses. Sellised püünised on tootmiskasvuhoonetes laialdaselt kasutatav meetod kahjuripopulatsioonide varajaseks avastamiseks ja vähendamiseks, kuna nende värvus meelitab ligi mitmeid olulisi kahjurirühmi. Püünistesse jäävad tavapäraselt leinasääsklased, soo- ja kaevandikärblased, karilased, ripslased ning tiivulised lehetäid. Liimpüüniste kasutamine annab infot ja võimaldab hinnata kahjurisurvet ning vajadusel muuta biotõrje suunda.

Käesolevas katses aitas vastsete lisamine hoida kahjuripopulatsioonid madalal tasemel ning tagas taimede stabiilse kasvu ilma sünteetiliste pestitsiidideta. Kollaseid liimpüüniseid kasutame edasi, et tuvastada kahjureid ennetavalt. Käesolevas katses aitas vastsete kasutamine meie süsteemil ennetada lehetäide populatsiooni kasvu, mille abil saime kasvatada taimi ilma sünteetiliste pestitsiidideta.

Taimede lämmastiktoitumise jälgimine

SPAD-tüüpi klorofüllimõõduri töö põhineb lehe valguse neeldumise mõõtmisel kahes lainepikkuses – punases (~650 nm), mida klorofüll tugevalt neelab, ja lähiinfrapunases (~940 nm), mida klorofüll peaaegu ei neela. Seade arvutab nende signaalide suhte ning teisendab selle SPAD-väärtuseks, mis on lehe suhtelise klorofüllisisalduse indeks. Kuna klorofüll hulk on otseselt seotud taime toitumusliku seisundi ja eriti lämmastikuvarega, võimaldab SPAD-mõõtur hinnata taime tervist ja väetamisvajadust kiiresti ja mittekahjustavalt.

Kokku 11 erineval päeval mõõdeti süsteemis kasvanud taimede lehtedest SPADväärtused, kasutades SPADtüüpi klorofüllimõõduri. Mõõtmisi alustati hetkel, mil taimed olid jõudnud pärislehtede kasvufaasi ning lehed olid piisavalt suured, et seadet korrektselt kasutada. Kõigil mõõtmiskordadel hinnati klorofüllisisaldust võrreldes esimesest täielikult väljaarenenud lehest, tagamaks andmete võrreldavust ja meetodiline ühtsus.

SPADväärtuste ajas muutumise võrdlus näitas selgeid erinevusi liikide vahel (tabel 6). Kannikese puhul ilmnes pidev ja tugev tõusutrend, kui novembri keskpaigas registreeriti väärtused vahemikus 26–29, siis detsembri keskpaigaks olid need tõusnud 43–56 juurde ning püsisid ka jaanuaris kõrgel tasemel. Kohvitaim eristus kogu perioodi vältel kõige kõrgemate näitajatega, mida tingis kindlasti taime eristuv lehe ehitus (oluliselt tugevam, nahkjam leht). Kuigi väärtustes esines kõikumisi, sealhulgas 23. detsembril mõõdetud tippnäitaja 72,7 jäid need valdavalt vahemikku 40–65. Saialille SPADväärtused olid seevastu stabiilselt madalad: alates detsembri algusest püsisid need järjekindlalt vahemikus 17–25, jäädes teiste liikide tulemustest märgatavalt madalamaks. Paktsoi ja basiiliku puhul ilmnes suurem varieeruvus. Paktsoi väärtused tõusid detsembri lõpuks kohati kuni 49ni, kuid langesid jaanuari keskpaigaks tagasi 20–30 vahele. Basiiliku näitajad olid seevastu mõõdukalt stabiilsed, püsid enamiku mõõtmiste jooksul vahemikus 25–35. Kokkuvõttes peegeldasid SPADväärtused liikide erinevat kasvudünaamikat ja klorofüllisisalduse muutumist ajas.

Tabel 6. Taimede SPAD väärtuste dünaamika (november–jaanuar)

Kuupäev	Paktsoi	Oblikas	Salvei	Basiilik	Kannike	Kohv	Saialill	Saialill 2	Müüdi-oregaano segu
12.11.25	23,5–34,2	19,3–27,8	20,3–28,8	24,6–30,8	26,0–35,9	50,5–65,5	-	-	-
19.11.25	22,9–31,5	19,3–28,2	20,9–30,4	23,4–34,2	29,8–42,5	48,0–62,9	-	-	-
25.11.25	22,0–41,5	22,9–27,0	21,0–24,4	28,0–31,9	34,4–48,6	40,2–64,6	-	-	-
02.12.25	32,4–40,7	18,8–32,2	23,6–32,4	28,5–34,5	33,9–48,0	37,6–53,3	17,5–19,9	-	-
10.12.25	29,4–40,3	23,9–30,1	22,8–29,1	30,9–46,9	43,2–56,3	36,7–60,7	19,8–24,7	-	-
17.12.25	28,7–42,9	20,2–30,2	22,8–30,4	27,2–35,5	36,0–55,3	40,2–71,4	13,8–22,2	-	-
23.12.25	31,8–37,9	20,5–30,4	27,2–31,3	16,6–37,8	41,2–51,1	56,8–72,7	19,5–22,8	17,0–20,6	-
30.12.25	37,2–49,0	19,3–32,1	25,3–33,1	31,2–37,8	38,6–57,6	38,8–53,2	16,5–23,8	18,4–28,2	18,2–23,5
07.01.26	22,6–44,7	20,5–31,4	20,5–31,2	22,9–35,8	37,6–64,0	38,9–58,3	20,3–25,6	21,9–28,0	23,4–32,7
16.01.26	19,7–41,7	21,8–37,7	17,7–30,3	22,9–42,2	37,4–55,4	31,1–49,5	15,4–25,0	21,5–28,2	23,5–26,0
22.01.26	26,6–38,6	22,5–32,8	24,5–36,0	21,5–33,4	38,2–48,6	33,4–59,7	18,5–24,0	20,9–28,9	20,8–31,0

Andmetest nähtub, et klorofüllisisaldus ei muutu kõikidel taimedel samas rütmis. Kui kannikese lehed muutusid aja jooksul märgatavalt "rohelisemaks" (kõrgem SPAD väärtused), siis näiteks oblikas ja salvei säilitasid võrdlemisi stabiilse lehevõime kogu vaatlusperioodi vältel.

Süsteemis kasvanud taimse biomassi jagasime lehe- ja juuremassiks, kusjuures lehtede kogumass ulatus ligikaudu 5632,26 grammi. Sellest moodustas valdava osa oblikas, lehemassiga 4656,68 g. Võrdlusena andis paktsoi 934,5 g ja

kress 41,08 g. Lehe ja juurte mass korjati ja dokumenteeriti liikidelt, mis olid kasvu lõpetanud. Juurte kogumass oli kokku 3144 g ning kõige rohkem moodustus juurte massi basiilikul (1384,57 g) ja oblikal (1266,5 g). Peiulille juuremassi mõõdeti 240,5 g, paktsoid 130,9 g, kohvipuul 66,61 g ja kressil 54,92 g. Süsteemiülese näitajana registreeriti ka 167 g varist, mis tähistab kogu perioodi jooksul kogunenud varisenud biomassi, mida ei seostatud ühegi konkreetse liigiga. Kokku kujunes süsteemis saagikoristuseks valmis taimset biomassi 8943,26 grammi. Kuna süsteem toimib pidevalt ja selles kasvab samaaegselt märkimisväärne hulk erinevaid liike, on tegelik biomassi toodang arvestuslikult suurem, kui üksnes mõõdetud koristuskõlbulik osa näitab (tabel 7).

Süsteemi kogutoodangust moodustas domineeriva osa lehtede biomass, ulatudes 5632,26 grammini ehk ligikaudu 63 %-ni kogu toodangust (tabel 8). Enamike liikide puhul, nagu basiilik, peiulill ja kohvipuu on tabelis esitatud ainult juurte biomassi andmed, sest taimed kasvavad veel süsteemil ning nende biomassi tootlikkus on seetõttu kõrgem kui tabelis esitatud. Oblikas eristus liikidest kõige stabiilsema ja kõrge tootlikkusega, näidates märkimisväärseid väärtusi nii lehemassi (318,18 g ja 4338,5 g) kui ka juuremassi (625 g ja 641,5 g) osas, mis viitab selle liigi järjekindlale kasvupotentsiaalile kogu mõõteperioodi vältel.

Tabel 7. Liikide biomass, mis on aruandluse ajaks koristatud.

Liik	Lehed (g)	Juured (g)
Oblikas	4656,68	1266,50
Basiilik	-	1384,57
Paktsoid	934,50	130,90
Peiulill	-	240,50
Kohvi	-	66,61
Kress	41,08	54,92
Süsteemi varis	167,00	-

Tabel 8. Süsteemiülene kokkuvõte

Kategooria	Mass (g)	Selgitus
Kogu lehtede biomass	5632,26	Oblikas + Paktsoid + Kress
Kogu juurte biomass	3144,00	Kõik liigid kokku
Süsteemi varis	167,00	Kogu süsteemi keskmine/summaarne varis

Kokkuvõtlikult näitasid katsed, et akvapooniline süsteem sobib hästi mitmete maitsetaimede ja köögiviljade kasvatamiseks, kuid teatud liikide kasvatamine, nagu rukola ja sidrunhein, vajavad täiendavat optimeerimist või alternatiivseid kasvutingimusi.

Akvapoonilises süsteemis kujunes taimede toiteelementide kasutus otseselt kalasööda lagundamise ja mineraliseerumise tulemusena. Kalade ainevahetus ning mikroobide tegevus muutsid söödas sisalduva lämmastiku ja fosfori taimedele omastatavasse vormi, mistõttu sõltus taimede toitumine eelkõige söödakoormusest ja mineraliseerumise efektiivsusest. Uuringud näitavad, et taimedeni jõuab tavaliselt vaid osa söödas sisalduvatest toitainetest, kuna ülejäänu kasutatakse kalade kasvuks või ladestub settena. Taimede tegelik toiteelementide kasutus süsteemis on sõltuv nii kalade kui ka mikroobse keskkonna toimimisest.

Taimse biomassi kvaliteet

LIFE SIP AdaptEst projekti raames Eesti Maaülikoolis läbi viidud taaskasutusvee baasil töötavate akvaponikasüsteemide taimse biomassi keemiline analüüs, piparmündi (*Mentha × piperita*) näitel kinnitab, et uuritud elementide sisaldus jäi kõikides proovides kontrollitud ja ohutusse piiridesse (Tabel 12). Analüüsides põhjal olid mõõdetud mikroelementidest domineerivas koguses tsink (Zn) ja vask (Cu), mille maksimaalsed kontsentratsioonid ulatusid vastavalt kuni 210 mg/kg kuivaines (KA) ja 16 mg/kg KA.

Toksiliste raskmetallide nagu kaadmium (Cd) ja plii (Pb) sisaldused jäi mõlemas biomassi proovis alla laboratoorset määramispiiri (<0,01 mg/kg ja <0,05 mg/kg). See viitab nii süsteemis kasutatava vee kvaliteedile kui ka biomassi üldisele puhtusele. Teiste elementide, nagu kroomi (Cr), nikli (Ni) ja arseeni (As), sisaldused olid, kas väga madalad või samuti alla määramispiiri, toetades järeldust, et akvaponikasüsteemid tagavad ohutu ja keskkonnanõuetele vastava taimse biomassi tootmise.

Riskihinnangud

Keemiliste ohuteguritega seotud terviseriskid

Töötajate terviseriskide hindamine viidi läbi kahe erineva taaskasutusvett kasutava akvapoonika süsteemi suhtes. Esimese süsteemi puhul kasutati akvapoonika sisendveena Äksi reoveepuhasti heitvett, mis oli läbinud täiendava puhastusprotsessi (osoneerimine, membraanfiltratsioon ja UV-töötlus). Teise süsteemi puhul kasutati tavasüsteemis kasutatavat hallvett, mis on läbinud kompakt-hallveepuhasti Hydraloop 600 (Interreg TransFarm projekt).

Esimese süsteemiga (reoveepuhasti heitvesi) seotud terviseriskide hindamise aluseks on võetud ohtlike ainete kontsentratsioonid, mis määrati pärast taaskasutusvee (Äksi reoveepuhasti heitvesi) täiendavat puhastamist võetud veeproovidest enne suunamist akvapoonikasüsteemi.

Teise süsteemiga (hallvesi) seotud terviseriskide hindamise aluseks on võetud ohtlike ainete kontsentratsioonid, mis määrati akvapoonikasüsteemi jäävast veetornist võetud proovides.

Akvapoonika süsteemis taaskasutusse võetud ja puhastusprotsessi läbinud heitvees võib esineda ohtlikke saasteaineid ning sellise veega kokkupuutel võivad töötajatel kaasneda keemiliste ohuteguritest põhjustatud tervisekahjud. Taaskasutusvees võivad püsida raskmetallid, püsivad orgaanilised saasteained, pestitsiidid ning ravimijäägid, mis pikaajalisel kokkupuutel võivad põhjustada kroonilisi tervisekahjustusi. Lisaks võivad otsene nahakontakt või juhuslik alla neelamine põhjustada akuutsemat laadi tervisekahju, eriti kui vees leidub kõrgemas kontsentratsioonis toksilisi ühendeid, mis võivad avaldada ärritavat toimet nahale ja limaskestadele ning põhjustada seedetrakti häireid.

Keemilised ohutegurid

Keemilistest ohuteguritest analüüsiti akvapoonikasüsteemi suunatavas ja ringlevas vees erinevaid ohtlikke aineid, mis jagunesid järgmistesse ainegruppidesse:

- Polüaromaatsed süsivesinikud (PAH);
- Naftasaadused (süsivesinikud C10–C40);
- Fenoolid, sh alküül- ja klorofenoolid;
- Lenduvad orgaanilised ühendid;
- Ftalaadid;
- Tinaorganika;
- Perfluoroühendid;

Ohtlike ainete analüüsitulemused on esitatud tabelis 9.

Terviseriskide hindamine

Terviseriskide hindamine viidi läbi lihtsustatult eelhindamise vormis, kus ei teostata eraldi töötajate eksponeerituse analüüsi akvapoonika veeringlussüsteemis ringleva vee suhtes, kuid mille käigus siiski soovitakse välja selgitada need ohutegurid, millega võivad kaasneda terviseriskid.

Sellisel viisil riskide hindamiseks kasutatakse riski olulisussuhte meetodit. Riski olulisussuhe (RO) leitakse mõõdetud keemilise ohuteguri kontsentratsiooni (C) ja tervisele ohutu referents-kontsentratsiooni (RfC) suhte kaudu: $RO = C / RfC$

Tervisele ohututeks referentskontsentratsioonideks on võetud Sotsiaalministri 24.09.2019 määruses nr 61 sätestatud joogivee keemiliste kvaliteedinäitajate piirsaldused. Kui keemilise kvaliteedinäitaja piirnormi ei olnud määruses sätestatud võeti aluseks mõni muu joogivee kvaliteedi võrdlusväärtus, mis on Tabel 9 lõpus viitena ära märgitud. Lisaks

lähtuti eeldusest, et kui mõõdetud keemilise ohuteguri sisaldus jäi allapoole analüütilist määramispiiri loetakse risk madalaks.

Kui riski olulisussuhe on < 1.0 loetakse risk madalaks ja ohtu tervisele ei eeldata. Kui riski olulisussuhe on > 1.0 loetakse risk kõrgeks. Kui eelhindamise kaudu osutub risk kõrgeks, siis vajaks see täiendavat eksponeerituse analüüsi, mille kaudu hinnatakse võimalikku täpsemalt töötaja taaskasutusveega kokkupuute määra. Praeguse eelhindangu vormis teostatav riskide hindamine võib anda tulemuse kus kõrge risk on oluliselt üle hinnatud, sest tegelikkuses ei tarbi töötajad akvapoonikasüsteemis ringlevat vett joogiveena. Kokkupuuted veega ja selles sisalduvate ohuteguritega võivad olla juhuslikku laadi otsekontaktid või lenduva fraktsiooni sisse hingamise kaudu, mille juures võime eeldada väga väikest eksponeerituse määra ning seega ka ebaolulist tervisemõju.

Tabel 9 Ohtlike ainete analüüsitulemused ja riski olulisussuhted

Ainegrupp	Näitaja (ohutegur)	Heitvesi Sisaldus, µg/l	RO	Hallvesi Sisaldus, µg/l	RO	
PAHid	Naftaleen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Atsenaften	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Atsenaftüleen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Antratseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Fluoreen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Fenantreen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Benso(a)antratseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Benso(b)fluoranteen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Benso(k)fluoranteen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Krüseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Fluoranteen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Püreen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Benso(a)püreen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	Indeno(1.2.3-cd)püreen	< 0.002	< 1.0	< 0.002	< 1.0	
	Benso(g,h,i)perüleen	< 0.002	< 1.0	< 0.002	< 1.0	
	Dibenso(a,h)antratseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0	
	PAH summa	-	-	-	< 1.0	
	Naftasaadused	Naftasaadused (C10 - C40)	< 20	< 1.0	< 20	< 1.0
	Fenoolid	1-aluselised fenoolid	-	< 1.0	-	< 1.0
		Fenool	<1.5	< 1.0	<1.5	< 1.0
p/m-Kresool		<1.5	< 1.0	<1.5	< 1.0	
o-Kresool		<1.5	< 1.0	<1.5	< 1.0	
2.3-Dimetüülfenool		<1.5	< 1.0	<1.5	< 1.0	
2.6-Dimetüülfenool		<1.5	< 1.0	<1.5	< 1.0	
3.4-Dimetüülfenool		<1.5	< 1.0	<1.5	< 1.0	
3.5-Dimetüülfenool		<1.5	< 1.0	<1.5	< 1.0	
2-aluselised fenoolid		-	-	10 ¹	< 1.0	
2.5-Dimetüülresortsinool		<5	< 1.0	<5	< 1.0	
5-Metüülresortsiin		<5	< 1.0	<5	< 1.0	
Resortsiin		<5	< 1.0	10 ¹	< 1.0	
Akrüülfenoolid		4-tert-Oktüülfenool	0.09 ¹	< 1.0	< 0.03	< 1.0
	4-Nonüülfenool (hargnenud)	0.11 ²	< 1.0	0.19 ²	< 1.0	
	4-n-Nonüülfenool	0.53 ²	1.8	0.051 ²	< 1.0	

Ainegrupp	Näitaja (ohutegur)	Heitvesi Sisaldus, µg/l	RO	Hallvesi Sisaldus, µg/l	RO	
Klorofenoolid	2-Klorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	3-Klorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	4-Klorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.3-Diklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.4-Diklorofenool/2.5-Diklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.6-Diklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	3.4-Diklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	3.5-Diklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.3.4-Triklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.3.5-Triklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.3.6-Triklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.4.5-Triklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	3.4.5-Triklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.4.6-Triklorofenool	0.18 ³	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.3.4.5-Tetraklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.3.4.6-Tetraklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	2.3.5.6-Tetraklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	Pentaklorofenool	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
	LOÜ (VOC)	Triklorometaan (kloroform)	< 0.03	< 1.0	< 0.03	< 1.0
		Tribromometaan (Bromoform)	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0
Dibromoklorometaan		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
Bromodiklorometaan		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
Benseen		< 0.06	< 1.0	< 0.06	< 1.0	
1.2-Dikloroetaan		< 0.06	< 1.0	< 0.06	< 1.0	
Etüülbenseen		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
Diklorometaan		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
m/p-Ksüleen		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
o-Ksüleen		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
Stüreen		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
Tetrakloroeten (perkloroeten PER)		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
Tetraklorometaan		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
1.1.1-trikloroetaan		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
Trikloroeten		< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0	
Ftalaadid		Dietüülftaal (DET)	< 0.3	< 1.0	< 0.3	< 1.0
		Dimetüülftaal (DMP)	< 0.4	< 1.0	< 0.4	< 1.0
	Dibutüülftaal (DBP)	2 ⁴	< 1.0	3.5 ⁴	< 1.0	
	Di-2-etüülheksüülftaal (DEHP)	< 0.3	< 1.0	< 0.3	< 1.0	
	Bensüülbutüülftaal (BBP)	< 0.3	< 1.0	< 0.3	< 1.0	
	Diisobutüülftaal (DIBP)	< 0.3	< 1.0	0.82 ⁵	< 1.0	
	Di-n-oktüülftaal (DNOP)	< 0.3	< 1.0	< 0.3	< 1.0	
	Ditsükloheksüülftaal (DCP)	< 0.3	< 1.0	< 0.3	< 1.0	
	Di-n-propüülftaal (DPP)	< 0.3	< 1.0	< 0.3	< 1.0	

Ainegrupp	Näitaja (ohutegur)	Heitvesi Sisaldus, µg/l	RO	Hallvesi Sisaldus, µg/l	RO
	Diundetsüülfalaat (DUP)	< 0.3	< 1.0	< 0.3	< 1.0
Tinaorgaanika	Monobutüültina-katsoon (MBT)	< 0.005	< 1.0	0.007 ⁶	< 1.0
	Dibutüültina-katsoon (DBT)	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Tributüültina-katsoon (TBT)	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Tetrabutüültina-katsoon (TTBT)	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Monooktüültina-katsoon (MOT)	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Dioktüültina-katsoon (DOT)	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Trifenüültina-katsoon (TPhT)	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Tritsükloheksüültina-katsoon (TCyT)	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
Perfluorühendid	1H.1H.2H.2H-perfluoro-1-dekaansulfoonhape (8:2FTS)	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	1H.1H.2H.2H-perfluoro-1-heksaansulfoonhape (4:2FTS)	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	1H.1H.2H.2H-perfluoro-1-oktaansulfoonhape (6:2FTS)	< 0.04	< 1.0	< 0.04	< 1.0
	N-etüülperfluoro-1-oktaansulfoonamiid äädikhape (N-EtFOSAA)	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0
	Perfluoroheksaanhape (PFHxA)	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Perfluoroheptaanhape (PFHpA)	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Perfluoropentaanhape (PFPeA)	< 0.05	< 1.0	< 0.05	< 1.0
	Perfluorotradekaanhape (PFTeDA)	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0
	Perfluorotridekaanhape (PFTrDA)	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0
	Perfluorobutaanhape (PFBA)	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Perfluorobutaansulfoonhape (PFBS)	< 0.01	< 1.0	0.024 ⁷	< 1.0
	Perfluorodekaanhape (PFDA)	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Perfluorodekaansulfoonhape (PFDS)	< 0.05	< 1.0	< 0.05	< 1.0
	Perfluorododekaanhape (PFDoDA)	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Perfluoroheksaansulfoonhape (PFHxS)	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Perfluoroheptaansulfoonhape (PFHpS)	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Perfluorononaanhape (PFNA)	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Perfluorononaansulfoonhape (PFNS)	< 0.06	< 1.0	< 0.06	< 1.0
	Perfluorooktaanhape (PFOA)	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Perfluorooktaansulfoonamiid (PFOSA)	< 0.04	< 1.0	< 0.04	< 1.0
	Perfluorooktaansulfoonhape (PFOS)	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Perfluoropentaansulfoonhape (PFPeS)	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Perfluoroundekaanhape (PFUnDA)	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
Pestitsiidijääd	1.2.3-Triklorobenseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	1.2.4-Triklorobenseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	1.3.5-Triklorobenseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	1.2.3.4-Tetraklorobenseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	1.2.3.5-/1.2.4.5-Tetraklorobenseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Pentaklorobenseen	< 0.0001	< 1.0	< 0.0001	< 1.0
	Heksaklorobenseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0

Ainegrupp	Näitaja (ohutegur)	Heitvesi Sisaldus, µg/l	RO	Hallvesi Sisaldus, µg/l	RO
	2.4-D	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	2.4-D 2-EHE	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Aklonifeen	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Alakloor	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Aldriin	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	alfa-Endosulfaan_	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	alfa-Heksaklorotsükloheksaan	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	alfa-Klordan	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Ametrüün	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Amidosulfuroon	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	AMPA	< 0.3	< 1.0	< 0.2	< 1.0
	Atrasiin	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Atsetamipriid	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	beeta-Endosulfaan_	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	beeta-Heksaklorotsükloheksaan	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Bifenoks	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Bifentriin	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Boskaliid	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	delta-Heksaklorotsükloheksaan	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Deltametriin	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Diasinon	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Dieldriin	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Diflufenikaan	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Diklobeniil	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Diklorofoss	< 0.007	< 1.0	< 0.007	< 1.0
	Dikloroprop-P	< 0.03	< 1.0	< 0.03	< 1.0
	Dikofool	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Dimetakloor	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Dimeteenamiid-P	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Dimetoot	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Diuroon	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Endosulfaansulfaat_	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Endriin	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Epoksikonasool	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	epsilon-Heksaklorotsükloheksaan	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Esfenvaleraat	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Ethopropos	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Fenitrotioon	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Fenpropatriin	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Fenpropidiin	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Fenpropimorf	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Fenvaleraat	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0

Ainegrupp	Näitaja (ohutegur)	Heitvesi Sisaldus, µg/l	RO	Hallvesi Sisaldus, µg/l	RO
	Fluroksüüpür	< 0.2	< 1.0	< 0.2	< 1.0
	Flutsütrinaat	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Fosfamidoon	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	gamma-Heksaklorotsükloheksaan	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	gamma-Klordaan	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Glüfosaat	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0
	Heksaklorobutadien	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Heptakloor	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Heptakloor-eksoepoksiid	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Heptakloor-endoepoksiid	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Isobensaan	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Isodriin	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Isoprokarb	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Isoproturoon	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Kinoksüfeen	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Kloormekvaat kloriid	< 0.2	< 1.0	0.37 ¹	< 1.0
	Klopüraliid	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0
	Klorofenvinifoss	< 0.03	< 1.0	< 0.03	< 1.0
	Kloroksuroon	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Kloropüriifoss	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	Klorotoluroon	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Klotianidiin	< 0.2	< 1.0	< 0.2	< 1.0
	Kvintoseen	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	lambda-Tsühalotriin	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Linuroon	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0
	Malatioon	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	MCPA	< 0.03	< 1.0	< 0.03	< 1.0
	Metabenstiasuroon	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Metakrifoss	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Metasakloor	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Mepikvaat kloriid	< 0.08	< 1.0	< 0.08	< 1.0
	Metiokarb	< 0.3	< 1.0	< 0.3	< 1.0
	Metobromuroon	< 0.05	< 1.0	< 0.05	< 1.0
	Metoksükloor	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Metoksuroon	< 0.05	< 1.0	< 0.05	< 1.0
	Metolakloor	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	metüül-Kloropüriifoss	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	metüül-Pirimifoss	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Mireks	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Monolinuroon	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Napropamiid	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Nikosulfuroon	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0

Ainegrupp	Näitaja (ohutegur)	Heitvesi Sisaldus, µg/l	RO	Hallvesi Sisaldus, µg/l	RO
	o.p'-DDD	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	o.p'-DDE	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	o.p'-DDT	< 0.0025	< 1.0	< 0.0025	< 1.0
	Oksükloridaan	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	p.p'-DDD	< 0.0025	< 1.0	< 0.0025	< 1.0
	p.p'-DDE	< 0.001	< 1.0	< 0.001	< 1.0
	p.p'-DDT	< 0.0025	< 1.0	< 0.0025	< 1.0
	Permetriin	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Pinoksadeen	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Prometriin	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Propaam	< 0.03	< 1.0	< 0.03	< 1.0
	Propakvisafop	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Propasiin	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Propikonasool	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Protiokonasool-destio	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Sebutüülasiin	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Simasiin	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Spiroksamiin	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Tebukonasool	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Terbutriin	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Terbutüülasiin	< 0.01	< 1.0	< 0.01	< 1.0
	Tiaklopriid	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Tolueen	< 0.1	< 1.0	< 0.1	< 1.0
	Triadimenool	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Triallaat	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Trifluralin	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Tritosulfuroon	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Tsüaanasiin	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Tsübutriin	< 0.005	< 1.0	< 0.005	< 1.0
	Tsüflutriin	< 0.02	< 1.0	< 0.02	< 1.0
	Tsüpermetriin (isomeeride segu)	< 0.0004	< 1.0	< 0.0004	< 1.0

¹ Referentskontsentratsioon puudub

² EL Joogivee Direktiivi 2020/2184 jälgimnimekirjas on joogivees 4-n-Nonüülfenooli suumiväärtus 0.3 µg/l

³ WHO Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth Edition 2011: soovituslik 2.4.6-Triklorofenool referentskontsentratsioon joogivees on 0.2 mg/l (https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/water-safety-and-quality/chemical-fact-sheets-2022/chloropicrin-fact-sheet-2022.pdf?sfvrsn=8beae1fd_2&download=true)

⁴ Minnesota Department of Health Dibutüülfalaat (DBP): ohutu referentsväärtus joogiveele on 20 µg/l (<https://www.health.state.mn.us/communities/environment/risk/docs/guidance/gw/dibutylphtsumm.pdf>)

⁵ WHO Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth Edition 2011: soovituslik indikaatorfalaadi Di-2-etiülheksüülfalaat (DEHP) joogivee piirkontsentratsioon on 8 µg/l (<https://www.who.int/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/di-2-ethylhexylphthalate-background-document.pdf>)

⁶ Background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality: tuletab tinaorgaanika summaarseks ohutuks kontsentratsiooniks joogivees 1.5 µg/l (<https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/63bbf923-88a6-4783-8fc6-f61020f83768/content>)

⁷ SoM määrus nr 61 „Joogivee kvaliteedi- ja kontrollinõuded ja analüüsimeetodid ning tarbijale teabe esitamise nõuded“ on sätestatud piirsisaldus PFASid kokku 0.5 µg/l

Keemiliste ohutegurite riski olulisussuhete tulemuste põhjal võib järeldada, et akvapoonikasüsteemis töötamisega ei kaasne töötajatele kroonilisi ega akuutseid tervisekahjustuste riske. Riski olulisussuhe ületas kriitilise väärtuse ($RO > 1$) ainult ühe keemilise ohuteguri – 4-n-nonüülfenooli – puhul.

Kuna ohutud referentskontsentratsioonid on tuletatud konservatiivsete eelduste alusel (70 kg täiskasvanu tarbib 2 liitrit joogivett päevas 70 aasta jooksul) ning nende leidmisel on toksikoloogiliste andmete põhjal arvesse võetud ka täiendav ohutusvaru määr, siis arvestades akvapoonika töötaja oluliselt väiksemat ja juhuslikumat kokkupuudet süsteemis ringlevate ohuteguritega, on põhjendatud järeldada, et nendes töötingimustes ei kaasne töötajatele tervisekahju ning töötamine selles keskkonnas on ohutu.

Mikrobioloogiliste ohuteguritega seotud terviseriskid

Lisaks keemilistest ohuteguritest lähtuda võivatele terviseriskidele hinnatakse akvapoonikasüsteemis ka mikrobioloogilistest ohuteguritest lähtuda võivaid terviseriske akvapoonikasüsteemis töötajatele.

Mikrobioloogilised ohutegurid võivad põhjustada kiiresti arenevaid haigusseisundeid nagu ägedat kõhulahtisust, kopsupõletikku või nahainfektsioone.

Akvapoonika süsteemis ringlevas vees leidub mikrobioloogilisi ohutegureid. Sellise veega kokkupuutel või viibides töökeskkonnas kus seda vett kasutatakse ja ringluses hoitakse võivad töötajatel kaasneda nendest ohuteguritest põhjustatud tervisekahjud. Mikrobioloogiliste ohuteguritega seotud tervisemõjud võivad olla akuutset laadi ja tervisele väga ohtlikud.

Ohtlikumad on juhud, kus patogeenid satuvad vereringesse või põhjustavad organite kahjustusi ning vajada haiglaravi.

Peamised kokkupuuteviisid mikrobioloogiliste ohuteguritega on aerosoolosakeste kaudu sisse hingamise teel, otsese nahakontakti või allaneelamise kaudu ning saastunud pindadega kokku puutumisel. *Legionella* kasvab veesüsteemides (ka biokilena torudes) ning võib aerosooliks muutuda ja sisse hingamise kaudu organismi jõuda.

Mikrobioloogilised ohutegurid akvapoonikasüsteemis

Mikrobioloogilisi kvaliteedinäitajaid analüüsiti akvapoonikasüsteemi erinevates etappides, alates süsteemi ringlusse võetavast taaskasutusveest (Äksi reoveepuhasti heitvesi) ja lõpetades kalamahutite väljavooluga. Mikrobioloogia näitajate analüüsitulemuste põhjal leidis suuremas koguses mikrobioloogilisi ohutegureid ringlusse võetavas heitvees enne puhastamisprotsessi ja akvapoonilises süsteemis kus toimub taime- ja kalakasvatuse. Mikrobioloogilistes kvaliteedinäitajatest analüüsiti süsteemis ringlevas vees *Clostridium perfringens* (koos eostega), Coli-laadsed baktereid, enterokokke, E. Coli ja *Legionellat*. Enim leidis Akvapoonilises taime- ja kalakasvatuse osas mikrobioloogilistest ohuteguritest *Legionellat* ja Coli-laadseid baktereid (tabel 10).

Tabel 10 Mikrobioloogilised ohutegurid süsteemi akvapoonilises osas (kala- ja taimekasvatus)

Proovivõtu-kuupäev	Clostridium perfringens (koos ostega)	Coli-laadsed bakterid //100ml//Colilert	Entero-kokid	Escherichia coli // 100ml//Colilert	Legionella
	arv/100 ml	arv/100 ml	arv/100 ml	arv/100 ml	arv/1000 ml
27.01.2026	0	0	0	0	310
15.01.2026	0	0	0	0	8710
08.12.2025	0	8	0	0	>22726
24.11.2025	-	-	-	-	446
03.11.2025	0	9590	7	0	>22726
02.06.2025	0	866	0	0	<1
14.04.2025	0	770100	10	0	>22726
27.01.2026	0	2950	4	0	55490
15.01.2026	0	1870000	7	0	45452
08.12.2025	0	22380	110	0	>22726
03.11.2025	0	65	0	0	>22726
02.06.2025	0	30760	0	0	9772
14.05.2025	0	3640	26	0	178
14.04.2025	0	1986300	30	0	>22726

Terviseriskide hindamine

Akvapoonika süsteemis on kõige olulisemaks aerosooligeneraatoriks aereerimissüsteem, mis on vajalik kalade hapnikuvarustuseks. Õhumulli liikumine vees ja nende lõhkemine vee pinnal tekitab pidevalt mikroskoopilisi veepiiskasid, mida saab sisse hingata. Need aerosooli osakesed sisaldavad kõiki süsteemis ringlevaid mikroorganisme, sealhulgas patogeenseid baktereid nagu *Legionella*, *E.coli*, enterokokke ja *Clostridium* liike.

Lisaks aereerimissüsteemile võib mikroorganisme eralduda süsteemi pindadelt (torud, pumpla osad, filtrid) kuhu moodustub aja jooksul biokile - mikroorganismide kiht, mis toimib patogeenide reservuaarina. Vee voolamise, vibratsioonide või hooldusprotseduuride käigus võivad biokilest eralduda suured kogused baktereid, mis seejärel aerosoolide kaudu õhku sattuvad.

Akvapoonika süsteemi soodsad temperatuuritingimused soodustavad patogeenide kasvu ning samas tekitavad aerosooliga koos kõrge õhuniiskuse, mis aitab kaasa mikroorganismide õhus püsimisele. Soe niiske õhk loob töötajatele ebamugavad tingimused, kus hingamissagedus võib suureneeda, mis suurendab patogeenide sisse hingamise võimalust.

Seega moodustab akvapoonika süsteem pidevalt töötava aerosooligeneraatori, mis võib sisaldada mitmesuguseid terve jaoks ohtlikke mikroorganisme.

Kuna mikrobioloogiliste ohutegurite leidumist ei ole hinnatud ruumide siseõhust kus akvapoonikasüsteem reaalselt toimib ja töötajad viibivad ning eeldame, et sisse hingamine võiks olla peamine kokkupuute viis mikrobioloogiliste ohuteguritega, siis ei ole meil olemasolevate andmete põhjal võimalik kvantitatiivselt hinnata riske töötajate tervisele. Olemasolevatele andmetele tuginedes saame riske hinnata kvalitatiivselt kaudsete hinnangute põhjal võttes kaudselt arvesse soovituslikke bioaerosoolide piirnorme õhus ja vees ning uuringute kaudu saadud infot *Legionella* leviku ja haigestumist põhjustavate annuste kohta.

Mikrobioloogilistest ohuteguritest esineb akvapoonikasüsteemi vees Coli-laadsed baktereid ja legionellat, vähesel määral ka enterokokke. Suurima ohupotentsiaaliga on *Legionella* spp bakterid. Coli-laadsed bakterid viitavad mikrobioloogilisele koormustele ja soodustavad süsteemi pindadel biokile tekkimist, mis omakorda toimib mikroorganismide paljunemiskohana.

SoM määruses nr 61 „Joogivee kvaliteedi- ja kontrollinõuded ja analüüsimeetodid ning tarbijale teabe esitamise nõuded“ on sätestatud joogivee tarbimiskoha jaotussüsteemide riskihindamisel kasutatava ühe näitajana *Legionellat* ning selle näitaja piirsisalduseks on kehtestatud <1000 CFU/l. Akvapoonikasüsteemis ringlevas vees on analüüsitulemuste põhjal *Legionella* sisalduseks määratud kuni 55 490 CFU/l.

Ruumide siseõhus levivate bioaerosoolide osakeste kohta on NIOSH (*United States National Institute of Occupational Safety and Health*) ja ACGHI (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*) andnud soovituslikuks maksimumkontsentratsiooniks 1000 CFU/m^3 (Kalogerakis, jt. 2005). WHO (*World Health Organisation*) on ruumide siseõhu kohta andnud samuti soovituslikuks bioaerosoolide ohutuks piirnormiks kuni 1000 CFU/m^3 (Biglari, jt. 2021).

Prussin, jt. 2017 on oma töös varasemate uuringute põhjal andnud ülevaate sellest, kui suured Legionella annused võivad tingida haigestumist ning mida teatakse Legionella bakterite ülekandumisest veekeskonnast õhku. Eksponeerituse uuringuga hinnati, et Legionella kontsentratsioonid $3,5 \times 10^6$ – $3,5 \times 10^8 \text{ CFU/l}$ vees, $3,5 \times 10^1$ – $3,5 \times 10^3 \text{ CFU/m}^3$ õhus ja $7,8 \times 10^5$ – $7,8 \times 10^8 \text{ CFU/cm}^2$ biokilel tekitavad tõenäoliselt legionelloosi haigestumist.

Uuringus, milles seostati Legionella esinemist haigla vannide vees ja ruumi siseõhu aerosoolides, leiti et Legionella kandus saastunud veest aerosoolidena küll õhku, kuid see lahjenes õhus sedavõrd, et seda ei olnud võimalik tuvastada 1 meetri või enamal kaugusel allikast. Bakterite kontsentratsioon vees jäi vahemikku 0 kuni $3,2 \times 10^4 \text{ CFU/l}$. Legionella kontsentratsioonid õhuproovides, mis võeti 5 cm, 50 cm, 100 cm ja 200 cm kaugusel veekraanist, olid vastavalt 0–55, 0–51, 0–5 ja 0 CFU/m^3 (Prussin, jt. 2017). Samuti viidati ülevaate töös uuringule milles hinnati Legionella kontsentratsioonide seost jahutustornide vees ja selle ümber jäävas välisõhus. Legionella kontsentratsioon jahutustorni vees oli $1,2 \times 10^6 \text{ CFU/l}$, samas kui Legionella bakterite kontsentratsioon välisõhus jahutustorni ümbruses oli 90 CFU/m^3 (Prussin, jt. 2017). Samas ülevaateuuringus viidati ka andmetele kus kõrgeimad Legionella õhukontsentratsioonid, kuni $3,3 \times 10^3 \text{ CFU/m}^3$, mõõdeti otse roovepuhastite aeratsioonibasseinide kohal (Prussin, jt. 2017).

Mikrobioloogiliste ohutegurite eraldumine veest õhku on protsess, mida mõjutavad nii füüsilised kui bioloogilised tegurid. Akvapoonika süsteemis on kõige olulisemateks mõjuriteks aereerimise intensiivsus, vee temperatuur ja süsteemi tehnilised lahendused. Aereerimissüsteemid on peamine aerosooligeneraatorid, kusjuures erinevad aereerimistüübid võivad tekitada erinevates kogustes bioaerosooli. Optimaalsed kasvutingimused (20 – 28°C) soodustavad patogeene paljunemist süsteemi vees, samas kui soe niiske õhk aitab kaasa nende püsimisele aerosooli olekus. Biokile moodustumine süsteemi pindadel toimib mikroorganismide reservuaarina, millest nad perioodiliselt massiliselt eralduvad. Tekkivate aerosooli osakeste suurus (tavaliselt 1 – $10 \mu\text{m}$) on optimaalne hingamisteede sügavusse jõudmiseks ning need osakesed võivad õhus püsida tunde ning levida kaugele algallikast ning suurendada terviseriski ka kaudse kokkupuute korral (Prussin, jt. 2017). Veesüsteemide hooldus- või häiringu ajal võib aerosoolikontsentratsioon järsult tõusta, eriti biokilekandjate puhastusel liigest biokilest või veetaseme reguleerimisel, mistõttu on töötajate suurim risk hooldus- ja manipulatsioonitööde ajal.

Lähtudes ettevaatusprintsipiist ja töötajate ohutuse tagamisest võime antud tingimuste põhjal (väga kõrge Legionella sisaldused akvapoonika vees ja teadmine mikroorganismide eraldumise kohta aerosoolina) eeldada, et Legionella't võib sattuda aerosoolidena akvapoonikasüsteemi ümbritsevasse siseõhku ja selle sisse hingamise kaudu võib Legionella jõuda ka inimese organismi põhjustades tervisekahju ning seega ei saa akvapoonikasüsteemiga seotud personali võimalikke terviseriske eirata ja hinnata töötajate terviseriski madal – keskmine – kõrge skaalal keskmiseks.

Kui sellist akvapoonilist süsteemi soovitakse rakendada suuremas tööstuslikus mastaabis, siis järgnevalt on vajalik välja selgitada, mis tingib süsteemis Legionella vohamist ja leida lahendusi selle leviku piiramiseks. Samuti on vajalik täpsemalt uurida akvapoonilise süsteemiga seonduvalt bioaerosoolide teket ja levikut ning võimalusel mõõta bioaerosoolide kontsentratsioone siseõhus. Töötajate ohutuse seisukohalt on oluline rakendada meetmeid, mis maandaksid mikrobioloogiliste ohuteguritega seotud terviseriske.

Mikrobioloogiliste ohuteguritega seotud riskide maandamismeetmed

Mikrobioloogiliste ohuteguritega seotud terviseriskide maandamiseks ja potentsiaalsete töötajate aerosoolidega kokkupuute vähendamiseks tuleks rakendada maandamismeetmeid. Leevendamismeetmeteks võivad olla insenertehnilised lahendused (katete kasutus avatud mahutitel, pritsmekaitsmed, ruumide ventilatsioon ja õhuvahetus), halduslikud meetmed (tööprotseduuride väljatöötamine, ohtudest teavitamine, tööohutusjuhendid), hügieenivahendite kasutamine (tööriiete kasutamine, haavade kaitse, kätepesu), isikukaitsevahendite kasutamine (kindad, kaitseprillid, veekindlad riided, respiraatorid).

Taaskasutusveel põhineva akvapoonika riskid

Akvapoonika süsteemis, kus kasutatakse heit- või hallvett, on vee kvaliteedil otsene ja määrav mõju nii kasvatatava kala kui ka taimede toiduohutusele. Selline süsteem ühendab kalakasvatuse ja taimede kasvatamise suletud ringluses, kus vesi toimib ühtaegu nii kasvukeskkonna kui ka toitainete kandjana. Kui taaskasutatav vesi sisaldab saasteaineid, võivad need süsteemis ringelda, akumulereuda ning lõpuks jõuda toiduahelasse – kaladesse ja taimsetesse toodetesse.

Akvapoonikas kasvatatava kala ja taimede toiduohutus sõltub otseselt kasutatava vee kvaliteedist. Heit- või hallvee kasutamine suurendab riski, et süsteemi satub nii keemilisi kui mikrobioloogilisi saasteaineid, mis võivad bioakumuleeruda ning muutuda ohuks lõpptarbijale, kes akvapooniliselt kasvatatud taimede või kala söögiks tarbib. Seetõttu on sellistes süsteemides kriitilise tähtsusega vee eeltöötlus, regulaarne seire ning riskide hindamine, et tagada toodangu vastavus toiduohutuse nõuetele ja kaitsta tarbija tervist.

Kõige olulisem riskirühm on keemilised saasteained. Heit- ja hallvesi võivad sisaldada raskmetalle (nt plii, kaadmium, elavhõbe), orgaanilisi mikroasaasteaineid (ravimijäägid, hormoonid, kosmeetikatoodete komponendid) ning püsivaid orgaanilisi ühendeid. Kalad omastavad vees lahustunud aineid nii lõpuste kaudu kui ka toidu kaudu ning paljud neist ainetest võivad bioakumuleeruda kalalihas. Eriti probleemsed on rasvlahustuvad ja püsivad ühendid, mis kogunevad organismi pikema aja jooksul. Taimed omakorda võtavad saasteaineid üles juurte kaudu, eriti kui need on vees lahustunud või seotud peenosakestega. Mõned metallid ja orgaanilised ühendid võivad akumulereuda lehtedes või viljades, sõltuvalt taimeliigist ja aine omadustest.

Lisaks keemilistele ohtudele on oluline ka mikrobioloogiline risk. Heit- ja hallvesi võivad sisaldada patogeenseid mikroorganisme, nagu bakterid (nt, E. coli), viirused ja parasiidid. Akvapoonika süsteemis võivad need mikroorganismid püsida vees, settes või biokiles ning kanduda nii kaladele kui taimedele. Taimede puhul on risk eriti suur, kui söödav osa (nt lehtkõrgviljad) puutub otseselt kokku veega. Kalade puhul võivad patogeenid mõjutada nii loomade tervist kui ka põhjustada riske inimesele, kui kala tarbitakse kuumtöötlemata.

Akvapoonika veekvaliteedi hindamiseks koguti perioodiliselt proove taaskasutusveest (Äksi reoveepuhasti heitvesi) nii enne kui ka peale täiendavat puhastamist osoneerimise, membraanfiltratsiooni (UF) kui ka UV-töötuse järgselt. Samuti jälgiti veekvaliteedi muutusi vee ringlemisel taime- ning kalakasvatuse vahel.

Proove koguti punktproovidena proovidena vastavalt standardile EVS-ISO 5667-10 ning keskkonnaministri 03.10.2019 määrusele nr 49 võttes arvesse EVS-ISO 5667-3 kriteeriume proovide säilitamise osas. Analüüsimeetodid valiti kooskõlas standardiga EVS EN ISO/IEC 17025. Kuna mitme uuritud aine jaoks referentsmeetod puudub, siis kasutati meetodeid, mis on valideeritud, dokumenteeritud kooskõlas standardiga EVS EN ISO/IEC-17025. Meetodite valikul arvestati võimalikult palju ka analüüsimeetodite kehtestatud miinimumkriteeriumitega, mille kohaselt mõõtemääramatus on kuni 50% (k = 2), ning määramispiir on kuni 30% asjaomastest normidest. Mõningate analüüsivate puhul, mis ei ole Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ-s akrediteeritud (nt, antibiootikumiresistentsuse määramine, Legionella sp), kasutati rahvusvaheliselt tunnustatud meetodeid.

Analüüsiti mitmeid väga toksilisi aineid, millel seetõttu on ülimadalad keskkonnakvaliteedi piirväärtused ning mille määramine keskkonnamaatriksitest on raskendatud erinevate segavate faktorite tõttu. Kõigi analüüsitud näitajate puhul nimetatud 30% nõue ei ole täidetud, sest Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ analüüsimeetodid on valitud lähtuvalt keskkonnakvaliteedi piirnormidest, mitte toiduohutuse piirnormidest.

Käesoleva töö kontekstis keskenduti riskihindamisel eelkõige toodetud saaduste ohutusega seotud riskidele kui ka taaskasutusveel põhineva süsteemi ohutusega seotud riskidele töötaja kontekstis. Riskide hindamisel on lähtutud vee taaskasutuse valdkonnast (põllumajanduslik kasutus) kui ka erinevatest eelduslikest kokkupuuteviisidest. Tegemist on riskide eelhindamisega (screening level risk assessment), mille eesmärgiks on sõeluda välja need ohutegurid, millega kaasneks praeguses olukorras vee taaskasutamisel kõrge risk ning on vajadus võtta kasutusele täiendavaid meetmeid riskide

maandamiseks. Riskide eelhindamisega määratleti madala ja kõrge riskiga seotud ohutegurid ning anti hinnang täpsema riskihindamise vajaduse ja riskide maandamisemeetmete osas.

Töö käigus analüüsiti **veest 266 näitajat**:

- Toitaineid: elektrijuhtivus, pH, Püld, Nüld, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, BHT_7 , Ca, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, HA, hägusus, K, KHT, Cl⁻, Mg, Na, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, SO_4^{2-} , S_2^- , S;
- Mikrobioloogilisi kvaliteedinäitajaid: Clostridium perfringens (koos eostega), Coli-laadsed bakterid, Enterokokid, Escherichia coli, Legionella sp;
- Metalle: Al, As, Hg, Cr, Cr⁶⁺, Cd, Mo, Ni, Pb, Zn, Cu;
- Polüaromaatseid süsivesinikke (PAH);
- Naftasaaduseid (süsivesinikud C10–C40);
- Fenoolid, sh alküül- ja klorofenoolid;
- Lenduvaid orgaanilisi ühendeid;
- Ftalaate;
- Tinaorgaanikat;
- Perfluorühendeid;
- Pestitsiidijääke.

Akvapoonikas kasvatatud kaladest määrati raskemetalle (As, Hg, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Cu), PAH-e, alküül- ja klorofenoolid, ftalaate, tinaorgaanikat, perfluorühendeid ning pestitsiidijääke. Taimedest analüüsiti ainult raskemetalle (As, Mo, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Cu), sest Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ laboris ei ole käesoleval ajal juurutatud muid meetodeid teiste ohtlike ainete analüüsiks taimsest materjalist.

Ohtlike ainete sisaldused akvapoonilistes saadustes

Toiduks tarbitava kala ja taimede ohtlike ainete sisaldus Euroopa Liidus on reguleeritud ühtse, kuid samas mitmetasandilise õigusraamistiku kaudu, mille eesmärk on tagada toidu ohutus kogu tarneahela ulatuses. Nii loomset kui taimset päritolu toidu puhul on keskne roll Komisjoni määrusel (EL) 2023/915, mis kehtestab maksimaalsed lubatud sisaldused erinevatele saasteainetele. See määrus hõlmab nii kalu kui ka taimseid tooteid (nt teraviljad, köögiviljad, puuviljad) ning sätestab piirnormid sellistele ainetele nagu raskmetallid (elavhõbe, kaadmium, plii), dioksiinid ja polüklooritud bifenüülid (PCB), polütsükliilised aromaatsed süsivesinikud (PAH) ning teatud juhtudel ka per- ja polüfluoritud ühendid (PFAS). Nende ainete piirnormid põhinevad teaduslikul riskihindamisel ning arvestavad nii kokkupuute taset kui ka ainete toksilisust ja bioakumulatsiooni võimet.

Kala puhul on eriti oluline elavhõbe, mis koguneb toiduahelas ning võib saavutada kõrgeid tasemeid suurtes röövkalades. Taimede puhul on suurema tähtsusega kaadmium ja plii, mis võivad pärineda mullast või atmosfääri saastest ning koguneda näiteks teraviljadesse, lehtköögiviljadesse ja juurviljadesse. Lisaks raskmetallidele on nii kalas kui taimedes olulised püsivad orgaanilised saasteained, nagu dioksiinid ja PCB-d, mis satuvad keskkonda peamiselt tööstuslike protsesside kaudu ning kogunevad toiduahelas. PAH-id tekivad elavhõbe toidu töötlemisel (nt suitsutamise, kuivatamise), mistõttu nende kontroll on oluline nii kalatoodete kui ka teatud taimsete toodete (nt suitsutatud või kuivatatud toidud) puhul.

Lisaks otsestele toidualastele õigusaktidele mõjutavad nii kala kui taimede ohutust oluliselt ka keskkonnanõuded. Veepoliitika raamdirektiiv ja Keskkonnakvaliteedi normide direktiiv reguleerivad ohtlike ainete sisaldust veekeskkonnas, mis mõjutab otseselt kalade saastumist. Taimede puhul on oluline ka mullakvaliteet ning õhusaaste, mida reguleeritakse teiste keskkonnanõuete õigusaktidega. Saasteained võivad taimedes akumulereuda mullast, kastmisveest või atmosfäärist, mistõttu keskkonna seisund on otseselt seotud taimse toidu ohutusega.

Kuigi kaladest analüüsiti kokku **196 keemilise näitaja sisaldust**, ületas neis määramispiiri vaid üksikud näitajad (tabel 11). Tabelis 11 on eristatud kalade proovid vastavalt sellele, kas taaskasutati Äksi reoveepuhasti heitvett või halli vett (EMÜ spordihoone pesuvett).

Tabelist 11 on näha, et peaaegu kõigi ainete määramispiiri ületanud näitajate sisaldused on väiksemad nii keskkonnakvaliteedi piirväärtustest (keskkonnaministri 24.07.2019 määrus nr 28 kehtestab kalades piirväärtused pliile, elavhõbedele, niklile) kui ka Euroopa Komisjoni määruses (EL) 2023/915 toodud saasteainete piirnormidest toidus.

Muudest ohtlikest ainetest ületas määramis-piiri ainult dibutüülfalaadi (DBP) sisaldus (76 µg/kg) taaskasutatud heitveega kasvatatud kalas. Kuna ohtlike ainete mõju sõltub reeglina nende manustamise kogustest, siis peaks 70 kg kaaluv inimene sööma 1,8 tonni kala päevas, et omastada DBP koguseid, mille juures ilmnevad negatiivsed mõjud tervisele (LOAEL on 2 mg/kg kehakaalu kohta) (EFSA CEP Panel, 2019). Kuna sellise kalakoguse söömine on äärmiselt ebatõenäoline, hinnati ftalaatidest tulenev terviserisk madalaks.

 Tabel 11. Ohtlike ainete sisaldused akvapoonika kalades (*Clarias gariepinus*)

Näitaja	Ühik	Kala (hallvesi)	Kala (heitvesi)
Arseen (As)	mg/kg	0,092	0,06
Baarium (Ba)	mg/kg	< 0,05	0,058
Kaadmium (Cd)	mg/kg	< 0,01	< 0,01
Kroom (Cr)	mg/kg	< 0,05	< 0,05
Nikkel (Ni)	mg/kg	< 0,05	< 0,05
Plii (Pb)	mg/kg	< 0,05	< 0,05
Tsink (Zn)	mg/kg	5,9	5,6
Vask (Cu)	mg/kg	0,41	0,38
Elavhõbe (Hg)	µg/kg	8,5	10
4-tert-Oktüülfenool	µg/kg	< 6	< 6
4-Nonüülfenoolid	µg/kg	< 10	< 10
4-n-Nonüülfenool	µg/kg	< 10	< 10
2,6-Diklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,4-/2,5-Diklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
3,5-Diklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,3-Diklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
3,4-Diklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,4,6-Triklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,3,6-Triklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,3,5-Triklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,4,5-Triklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,3,4-Triklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
3,4,5-Triklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,3,5,6-Tetraklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,3,4,6-Tetraklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
2,3,4,5-Tetraklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
Pentaklorofenool	µg/kg	< 2	< 2
Di-2-etüülheksüülfalaat (DEHP)	µg/kg	< 30	< 30
Bensüülbutüülfalaat (BBP)	µg/kg	< 30	< 30
Di-n-propüülfalaat (DPP)	µg/kg	< 30	< 30
Diundetsüülfalaat (DUP)	µg/kg	< 30	< 30
Diisobutüülfalaat (DIBP)	µg/kg	< 30	< 30
Ditsükloheksüülfalaat (DCP)	µg/kg	< 30	< 30
Dietüülfalaat (DEP)	µg/kg	< 30	< 30
Dibutüülfalaat (DBP)	µg/kg	< 30	76
Di-n-oktüülfalaat (DOP)	µg/kg	< 30	< 30
Dimetüülfalaat	µg/kg	< 30	< 30
1H,1H,2H,2H-perfluoro-1-dekaansulfoonhape (8:2FTS)	µg/kg	< 0,05	< 0,05
1H,1H,2H,2H-perfluoro-1-heksaansulfoonhap (4:2FTS)	µg/kg	< 0,2	< 0,2
1H,1H,2H,2H-perfluoro-1-oktaansulfoonhape (6:2FTS)	µg/kg	< 0,5	< 0,5

Näitaja	Ühik	Kala (hallvesi)	Kala (heitvesi)
N-etOOIperfluuro-1-oktaansulfoonamiid aadikhape (N-EtFOSAA)	µg/kg	< 0,5	< 0,5
Perfluoroheksaanhape (PFHxA)	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Perfluoroheptaanhape (PFHpA)	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Perfluoropentaanhape (PFPeA)	µg/kg	< 0,5	< 0,5
Perfluorotetradekaanhape (PFTeDA)	µg/kg	< 0,5	< 0,5
Perfluorotridekaanhape (PFTrDA)	µg/kg	< 1	< 1
Perfluorobutaanhape (PFBA)	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Perfluorobutaansulfoonhape (PFBS)	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Perfluorodekaanhape (PFDA)	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Perfluorodekaansulfoonhape (PFDS)	µg/kg	< 0,5	< 0,5
Perfluorododekaanhape (PFDoDA)	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Perfluoroheksaansulfoonhape (PFHxS)	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Perfluoroheptaansulfoonhape (PFHpS)	µg/kg	< 0,5	< 0,5
Perfluorononaanhape (PFNA)	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Perfluorononaansulfoonhape (PFNS)	µg/kg	< 1	< 1
Perfluorooktaanhape (PFOA)	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Perfluorooktaansulfoonamiid (PFOSA)	µg/kg	< 0,05	< 0,05
Perfluorooktaansulfoonhape (PFOS)	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Perfluoropentaansulfoonhape (PFPeS)	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Perfluoroundekaanhape (PFUnDA)	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Antratseen	µg/kg	< 5	< 5
Atsenaften	µg/kg	< 5	< 5
Atsenaftüleen	µg/kg	< 5	< 5
Benso(a)antratseen	µg/kg	< 5	< 5
Benso(a)püreen	µg/kg	< 1	< 1
Benso(b)fluoranteen	µg/kg	< 5	< 5
Benso(k)fluoranteen	µg/kg	< 5	< 5
Benso(g,h,i)perüleen	µg/kg	< 5	< 5
Dibenso(a,h)antratseen	µg/kg	< 5	< 5
Fenantreen	µg/kg	< 5	< 5
Fluoranteen	µg/kg	< 5	< 5
Fluoreen	µg/kg	< 5	< 5
Indeno(1,2,3-cd)püreen	µg/kg	< 5	< 5
KrOseen	µg/kg	< 5	< 5
Naftaleen	µg/kg	< 5	< 5
Püreen	µg/kg	< 5	< 5
1,2,3-Triklorobenseen	µg/kg	< 1	< 1
1,2,4-Triklorobenseen	µg/kg	< 1	< 1
1,3,5-Triklorobenseen	µg/kg	< 1	< 1
1,2,3,5-/1,2,4,5-Tetraklorobenseen	µg/kg	< 1	< 1
1,2,3,4-Tetraklorobenseen	µg/kg	< 1	< 1
Pentaklorobenseen	µg/kg	< 1	< 1
Heksaklorobenseen	µg/kg	< 1	< 1
Endriin	µg/kg	< 1	< 1
2,4-D	µg/kg	< 2	< 2
2,4-D 2-EHE	µg/kg	< 1	< 1
Aklonifeen	µg/kg	< 5	< 5
Alakloor	µg/kg	< 1	< 1
Aldriin	µg/kg	< 1	< 1

Näitaja	Ühik	Kala (hallvesi)	Kala (heitvesi)
alfa-Endosulfaan	µg/kg	< 1	< 1
alfa-Heksaklorotsükloheksaan	µg/kg	< 1	< 1
alfa-Klordaan	µg/kg	< 1	< 1
Ametrüün	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Amidosulfuroon	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Atrasiin	µg/kg	< 5	< 5
Atsetamipriid	µg/kg	< 0,1	< 0,1
beeta-Endosulfaan	µg/kg	< 1	< 1
beeta-Heksaklorotsükloheksaan	µg/kg	< 1	< 1
Bifenoks	µg/kg	< 5	< 5
Bifentriin	µg/kg	< 1	< 1
delta-Heksaklorotsükloheksaan	µg/kg	< 1	< 1
Desetüül-atrasiin	µg/kg	< 0,5	< 0,5
Diasinoon	µg/kg	< 5	< 5
Dieldriin	µg/kg	< 1	< 1
Diklobeniil	µg/kg	< 1	< 1
Diklorofoss	µg/kg	< 2	< 2
Diklorofoss	µg/kg	< 5	< 5
Dikloroprop-P	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Dikofool	µg/kg	< 1	< 1
Dimeteenamiid-P	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Dimeteenamiid-P	µg/kg	< 1	< 1
Dimetooat	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Diuroon	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Endosulfaansulfaat	µg/kg	< 1	< 1
epsilon-Heksaklorotsükloheksaan	µg/kg	< 1	< 1
Ethopropos	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Fenitrotioon	µg/kg	< 1	< 1
Fenpropatriin	µg/kg	< 1	< 1
Fenpropidiin	µg/kg	< 0,6	< 0,6
Fenpropimorf	µg/kg	< 1	< 1
Fenvaleraat	µg/kg	< 5	< 5
Fluoksüüpüür	µg/kg	< 3	< 3
gamma-Heksaklorotsükloheksaan	µg/kg	< 1	< 1
gamma-Klordaan	µg/kg	< 1	< 1
Heksaklorobutadien	µg/kg	< 1	< 1
Heptakloor	µg/kg	< 1	< 1
Heptakloor-eksoepoksiid	µg/kg	< 1	< 1
Heptakloor-endoepoksiid	µg/kg	< 1	< 1
Imidaklopriid	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Isobensaan	µg/kg	< 1	< 1
Isodriin	µg/kg	< 1	< 1
Isoprokarb	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Isoproturoon	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Kinoksüfeen	µg/kg	< 5	< 5
Kloormekvaat kloriid	µg/kg	< 5	< 5
Klopüraliid	µg/kg	< 4	< 4
Kloridasoon	µg/kg	< 0,5	< 0,5
Klorofenvinfoss	µg/kg	< 1	< 1
Kloroksuron	µg/kg	< 0,4	< 0,4

Näitaja	Ühik	Kala (hallvesi)	Kala (heitvesi)
Kloropüriifoss	µg/kg	< 1	< 1
Klorotoluroon	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Klotianidiin	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Kvintoseen	µg/kg	< 1	< 1
Linuroon	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Malatioon	µg/kg	< 0,6	< 0,6
Malatioon	µg/kg	< 1	< 1
MCPA	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Mepikvaat kloriid	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Metabenstiasuroon	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Metakrifoss	µg/kg	< 5	< 5
Metasakloor	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Metiokarb	µg/kg	< 3	< 3
Metobromuroon	µg/kg	< 0,2	< 0,2
MetoksOkloor	µg/kg	< 1	< 1
Metoksuroon	µg/kg	< 0,1	< 0,1
metüül-Kloropüriifoss	µg/kg	< 5	< 5
metüül-Pirimifoss	µg/kg	< 1	< 1
Mireks	µg/kg	< 1	< 1
Monolinuroon	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Napropamiid	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Nikosulfuroon	µg/kg	< 0,6	< 0,6
o,p'-DDD	µg/kg	< 1	< 1
o,p'-DDE	µg/kg	< 1	< 1
o,p'-DDT	µg/kg	< 1	< 1
Oksüklordaan	µg/kg	< 1	< 1
Ometoaat	µg/kg	< 0,3	< 0,3
p,p'-DDD	µg/kg	< 1	< 1
p,p'-DDE	µg/kg	< 1	< 1
p,p'-DDT	µg/kg	< 1	< 1
Permetriin	µg/kg	< 5	< 5
Propamokarb-hüdrokloriid	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Simasiin	µg/kg	< 0,6	< 0,6
Simasiin	µg/kg	< 5	< 5
Spiroksamiin	µg/kg	< 0,4	< 0,4
tau-Fluvalinaat	µg/kg	< 5	< 5
Tebukonasool	µg/kg	< 0,2	< 0,2
Terbutriin	µg/kg	< 0,3	< 0,3
Terbutriin	µg/kg	< 1	< 1
Tiaklopriid	µg/kg	< 0,1	< 0,1
Tiametoksaam	µg/kg	< 0,05	< 0,05
Triadimenool	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Triallaat	µg/kg	< 1	< 1
Trifluraliin	µg/kg	< 1	< 1
Tritosulfuroon	µg/kg	< 0,4	< 0,4
Tsübutriin	µg/kg	< 4	< 4
Tsübutriin	µg/kg	< 1	< 1
Tsüflutriin	µg/kg	< 5	< 5
Tsüpermetriin (isomeeride summa)	µg/kg	< 5	< 5
Monobutüültina-katioon (MBT)	µg/kg	< 5	< 5

Näitaja	Ühik	Kala (hallvesi)	Kala (heitvesi)
Dibutüültina-katioon (DBT)	µg/kg	< 5	< 5
Tributüültina-katioon (TBT)	µg/kg	< 1	< 1
Tetrabutüültina-katioon (TTBT)	µg/kg	< 5	< 5
Monooktüültina-katioon (MOT)	µg/kg	< 5	< 5
Dioktüültina-katioon (DOT)	µg/kg	< 5	< 5
Trifenüültina-katioon (TPhT)	µg/kg	< 10	< 10
Tritsükloheksüültina-katioon (TCyT)	µg/kg	< 5	< 5

Tabelis 12 on toodud raskemetallide sisaldused akvapoonikas kasvatatud taimses materjalis.

Tabel 12. Raskemetallide sisaldused akvapoonikas kasvatatud taimedes

Näitaja	Ühik	Taimed (hallvesi)	Taimed (heitvesi)
Arseen (As)	mg/kgKA	0,075	< 0,05
Molübdeen (Mo)	mg/kgKA	0,34	0,58
Kaadmium (Cd)	mg/kgKA	< 0,01	< 0,01
Kroom (Cr)	mg/kgKA	0,13	< 0,05
Nikkel (Ni)	mg/kgKA	0,062	0,52
Plii (Pb)	mg/kgKA	< 0,05	< 0,05
Tsink (Zn)	mg/kgKA	140	210
Vask (Cu)	mg/kgKA	10	16

Võttes aluseks ohtlike ainete analüüsitulemused, saab hinnata akvapooniliselt kasvatatud taimede ning kalade ohutust toiduohutusest lähtuvalt. Tabelis 13 on toodud kokkuvõtte riskihinnangutest, mis baseeruvad kala ning taimse materjali analüüsitulemustel ja võtavad arvesse saastumisohtu, mis tuleneb taaskasutussüsteemi vees olevatest mikrobioloogilistest kvaliteedinäitajatest. Mikrobioloogilise saastumise puhul on arvesse võetud, et süsteemis on mikrobioloogiliste näitajate sisaldused suured ning sellest johtuvalt on saastuse levik väga tõenäoline. Kõnealust riski on võimalik maandada toiduks tarbitavate kalade kuumtöötamise abil. Taimede puhul sõltub mikrobioloogilise saastumise võimalus eelkõige kastmismeetodist ja sellest, kas söödavad taimeosad on otseses kontaktis kastmisveega.

Tabel 13. Riskide koondhinnangud toiduohutusest johtuvalt

	Kala (hallvesi)	Kala (heitvesi)	Taimed (hallvesi)	Taimed (heitvesi)
Raskemetallid	Madal	Madal	Madal	Madal
PAH-id	Madal	Madal	Hindamata	Hindamata
Alküülfenoolid	Madal	Madal	Hindamata	Hindamata
Klorofenoolid	Madal	Madal	Hindamata	Hindamata
Ftalaadid	Madal	Madal	Hindamata	Hindamata
Tinaorgaanilised ühendid	Madal	Madal	Hindamata	Hindamata
Perfluoroühendid	Madal	Madal	Hindamata	Hindamata
Pestitsiidijäägid	Madal	Madal	Hindamata	Hindamata
Mikrobioloogilised ohutegurid*	Kõrge	Kõrge	Kõrge	Kõrge
Kogurisk	Kõrge	Kõrge	Kõrge	Kõrge

* riskihinnangul on arvesse võetud *Clostridium perfringensi*, Coli-laadsete bakterite, Enterokokkide, *Escherichia coli* ja *Legionella* sp sisaldusi vees.

Kalatoodangu riskide hindamine

Orgaanilised saasteained ja pestitsiidid: kõik testitud pestitsiidid (nt DDT, glüfosaadi jäägid jm), PFAS-ained ja PAH-id (põlemisjäägid) olid alla määramispiiri. See tähendab, et laboriseadmed ei suutnud neid tuvastada, kuna nende sisaldus oli sedavõrd madal.

Märkimisväärne leid: ftalaadid. Üks väheseid orgaanilisi ühendeid, mis kaladest leiti, oli ftalaat teises proovis: dibutüülftalaat (DBP): 76 µg/kg (Proov K017657685). Esimeses proovis oli see <30 µg/kg.

Tähendus: ftalaadid pärinevad plastist- Leid viitab, et kala on kokku puutunud plastijäätmete või plasttorustikuga. Kuigi näit on tuvastatav, ei peeta seda antud kontsentratsioonis kohe mürgiseks, kuid see on kõrgeim positiivne leid selles nimekirjas.

Kas see kala on tarbimiseks ohutu? Analüüside põhjal on pilt järgmine:

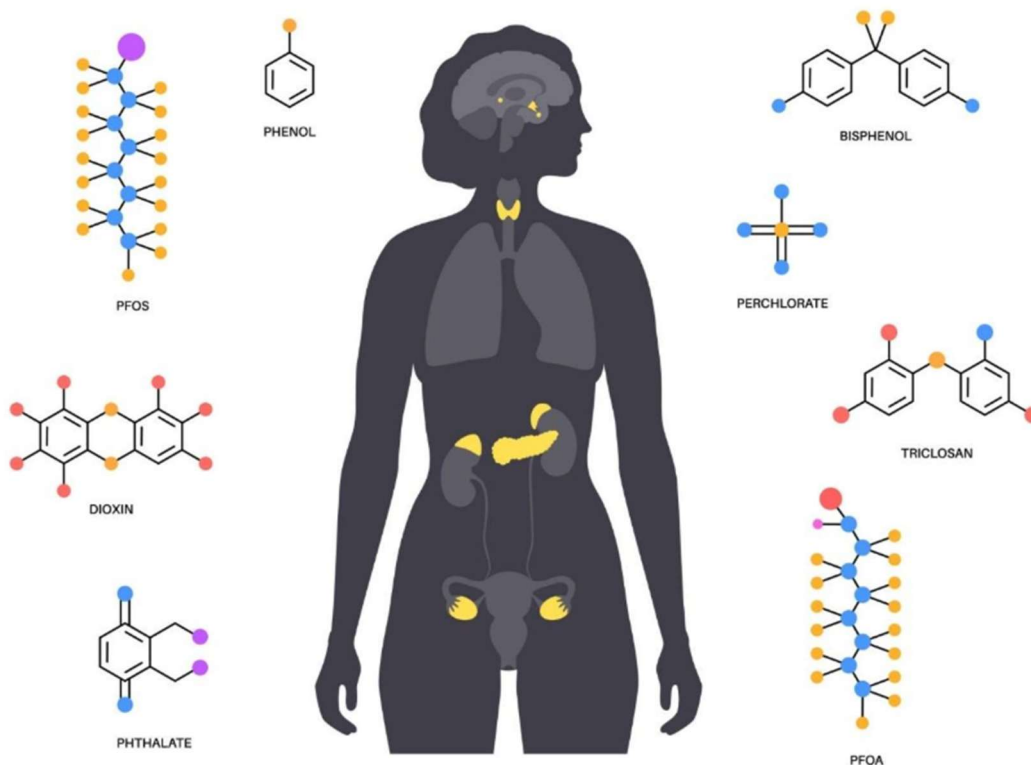
Puhtus: Kala on rasketallide ja pestitsiidide sisalduse poolest märkimisväärselt puhas. Paljud polettidel olevad looduslikud kalad (nt Läänemere räim või suur haug) võivad sisaldada rohkem elavhõbeda või PCB-d.

Reoveest toodetud "heitvee" efekt: Kuigi kala kasvab korduva veekasutusega suletud süsteemis ning selle täiteks ja veekadude kompenseerimiseks on kasutatud reoveepuhasti heitveest toodetud taaskasutusvett, on kala enda organism suutnud vältida toksiliste ainete akumulereerumist lihastesse (vähemalt testitud ainete puhul).

Kõrgeimad näidud: numbriliselt on suurimad tsink ja dibutüülftalaat. Viimane on ainus märk plastist pärinevast keskkonnanasaastest.

Oluline märkus: need testid ei kajasta mikrobioloogilist saastet (bakterid nagu E. coli, salmonella) ega ravimijääke (antibiootikumid, hormoonid), mis on reovee puhul sageli suurim riskikoht. Ftalaadid, nagu proovist leitud dibutüülftalaat (DBP), on keemilised ühendid, mida kasutatakse plastide pehmendamiseks. Neid nimetatakse "igapäevasteks mürkideks", sest need ei ole tugevalt seotud plasti struktuuriga ja lekivad kergesti keskkonda – antud juhul siis vette ja sealt edasi kala kudedesse.

Ftalaadid on tuntud kui endokriinsüsteemi häirijad (joonis 24). Meie hormoonsüsteem töötab "luku ja võtme" põhimõttel: hormoon (võti) sobitub retseptorisse (lukk), et käivitada mingi protsess (nt kasv või ainevahetus). Ftalaat on justnagu vale võti, mis sobib lukku ja keerab selle "vales suunas" lahti, saates kehale valesignaale. See võib lukuaugu lihtsalt kinni toppida, nii et päris hormoonid ei pääse tegema tööd, milleks nad loodud on.



Joonis 24. Endokriinsüsteemi häirimine <https://pureh2o.co.uk/recycled-plastic-toxic-problem/>

DBP (proovis leitud) on eriti tuntud oma anti-androgeense mõju poolest. See tähendab, et see pärsib meessuguhormooni ehk testosterooni toimet. Kõige tundlikumad on rasedad naised, kuna ftalaadid võivad mõjutada meessoost loote reproduktiivorganite arengut. Pikaajaline kokkupuude suurte kogustega võib vähendada sperma kvaliteeti ja langetada viljakust.

Uuemad uuringud seostavad ftalaate ka metaboolsete häiretega. Kuna need mõjutavad kilpnäärme hormoone ja insuliinitundlikkust, võivad need soodustada nii kehamassi tõusu ja rasvumist (neid nimetatakse vahel "obesogeenideks") kui ka suurendada II tüüpi diabeedi riski.

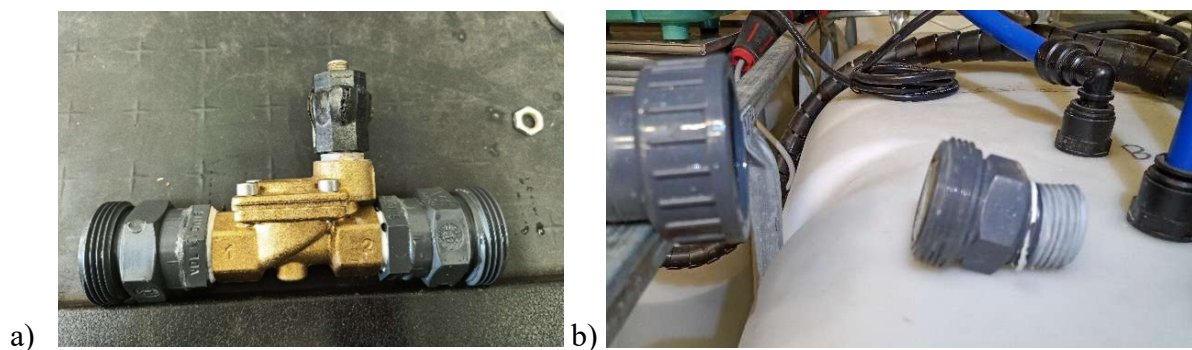
Kuigi ftalaat on ohtlik aine, määrab riski alati kogus ja sagedus. Võrdlus: Euroopa Toiduohutusamet (EFSA) on kehtestanud DBP grupiviisilise ohutu päevanormi (TDI), mis on 0,05 mg kehakaalu kg kohta päevas.

Kokkuvõtteks, kuigi see leid on vihje sellest, et kala on elanud saastunud keskkonnas (plast reovees), ei ole üks söögikord sellist kala tõenäoliselt tervisele ohtlik. Probleem tekib siis, kui selline saaste pärineb mitmest allikast korraga (toit, kosmeetika, plastpakendid, õhk).

Õppetunnid

Vihmaveest või heitveest valmistatud taaskasutusveel põhineva akvapoonikasüsteemi käitamiseks peab olema kaasatud nii taime-, kala- kui ka veespetsialist. Spetsialistid peavad töötama meeskonnana, sest iga spetsialisti tegevus mõjutab kogu süsteemi toimimist.

Katses kasutatud veepuhustusseade on kemikaalivaba (kui kasutada desinfitseerimisel UV-kiiritamist või osoonimist) filtreerimisel puhustusseade, mis vajab hooldust ja vahel siiski ka tagavaraosasid nagu iga teine puhustusseade. Seetõttu on oluline, et seadme valmistaja oleks usaldusväärne ja varuosad saadaval. Ka piasiasjadena tunduv avariiolekord võib seisata kogu seadmestiku töö (joonis 25). Hooldus- ja remonditöödeks peab olema usaldusväärne hoolduspartner.



Joonis 25. Deformeerunud seadmed: a) purunenud elektromagnetiga solenoidklapp ja b) automaatika rikke tõttu deformeerunud pumba ühendusliitmik

Tarbijana kasutab akvapooniline süsteem vett ebaühtlaselt, mistõttu on möödapääsmatult vajalik alternatiivne veevarustus. Aurumiskaod on ligilähedaselt arvatavad, kuid vett kulub ka süsteemi hooldamiseks. Akvapoonilise süsteemi aurumiskaod olid katseperioodil vahemikus 25 kuni 35 l/d. Päevadel, kus tehti süsteemi hooldustöid ja koos kalade kontrollkaalumise ja ulatus veekasutus (sh aurumiskaod) 280 liitri ööpäevas. Tuleb arvestada tarbija tippveevajadusega ning leida lahendused selle tagamiseks.

Nii vihmavee kui ka taaskasutusvee omadused sõltuvad selle hoiutingimustest, mahuti materjalist ja asukohast: maa-alused valguse eest varjatud mahutid tagavad stabiilsema temperatuuri ja hoiavad kauem ära veomaduste halvenemist. Taaskasutusvee puhul peab olema tagatud vee kvaliteedi säilimine. Tööde käigus kasutati hoiustamisel meetodina korduvat desinfitseerimist.

Akvapoonika katseseadmes võtab kalade kasvamine aega. Kalade kasvu algfaasis on taimede jaoks toitainete vähe. Ka taimede kasv algab aeglaselt ning sel perioodil ei pruugi olla piisavalt toitainete tarbijaid. Hiljem, kui kalad suuremaks kasvavad, suureneb toitainete hulk märgatavalt. Samas on ka taimedel oma kasvutsükkel, mis mõjutab toitainete tarbimist. Nii ei pruugi taimede ja kalade kasvutsüklid toitainete tarbimine ja kasutamine alati ideaalselt sobida.

Akvapoonilise süsteemi stabiilsemaks tööks on tõenäoliselt mõistlik kasvatada paralleelselt mitmes kasvatusastmes taimi ja kalu. Toitainete tekkimise ja tarbimise tasakaalu saavutamiseks peaks süsteem olema suurem ning kalad võiksid olla eri kasvufaasis (mitu kalamahuti ja mitu taimesüsteemi). Samuti aitaks taimekasvatuse jaotamine mitmesse kasvustaadiumisse luua oluliselt stabiilsema ja ühtlasemalt toimiva akvapoonilise süsteemi.

Akvapoonikasüsteemi toimimise seisukohalt oluliste elementide, nagu ringluspumba ja kalamahuti õhupuhuri, varuseadmed peavad olema kohapeal, et nende asendamine oleks võimalik teha kiiresti – mõne tunni jooksul. Katsete tegemise ajal asendati ringluspump laos olnud asenduspumbaga ning kui seda ei oleks olnud, oleks katse katkenud.

Veepuhustusseadmes toimuvad protsessid ning akvapoonilises süsteemis toimuv vajavad pidevat jälgimist ning seda ka väikese akvapoonikasüsteemi puhul. Kaugjälgimissüsteem (andurid, kaamerad) on möödapääsmatult vajalik, sest need võimaldavad probleemide kiiret avastamist ja kiiret reageerimist, sh ka nädalavahetustel ja väljaspool tööaega.

Elektrivarustus ja võrguühendus peavad olema stabiilsed ja katkematud, sest süsteemi seadmed on/võivad olla tundlikud elektrikatkestuste suhtes. Katsetuste ajal esines lühiajalisi elektrikatkestusi kui ka häireid võrguühenduses. Elektrikatkestuste puhul seiskub kalamahuti õhustus ja akvapoonika veeringlus, mis võib halvimal juhul mõjuda hukutavalt

kaladele. Võrguühenduse puudumisel ei ole akvapoonikasüsteem kaugjälgitav ning võimalikud probleemid võivad jääda õigeaegse sekkumiseta.

Suure (ülemäärase) kalakoormuse korral – aga ka tavapärase töö käigus – tuleb arvestada, et süsteemis tekkiv muda, biokile jne hakkavad mõjutama akvapoonilise süsteemi toimimist. Seetõttu peavad kõik süsteemi elemendid (pumbad, filtrid, torustikud jne) olema hästi hooldatavad. Taimede kasvatamisel rõhtsates torudes (*horizontal pipe aquaponics*) on hea viis toitainete juhtimiseks iga taimeni, kuid suure juurestikuga taimed võivad põhjustada taimetorude ummistusi (joonis 26) ning seeläbi uputusi ja vee voolu katkestusi.



Joonis 26. Suurte juurepallide eemaldamine taimetorudest

Lisaks tuleb arvestada, et soovimatud liigid võivad põhjustada probleeme nii taimedele kui ka kaladele ning häirida süsteemi tööd, näiteks tekitades ummistusi (nt samaaegselt toimunud Interreg TransFarm projekti katses ilmnud ummistumisprobleemi põhjuseks pumba sõela ummistumine tigudega). Akvapoonilises süsteemis kasutatavad materjalid (pumbad, torud, liitmikud, toruarmatuur, kinnitusdetailid jne) peavad sobima nii akvapoonikas ringleva veega kui ka akvapoonilise süsteemi puhastamisel kasutatavate kemikaalidega. Kasutatavad materjalid ei tohi muuta akvapoonilises süsteemis ringleva vee omadusi.

Akvapooniline süsteem kui veepuhastusseadmed peavad paiknema ruumis, kus on võimalik ruumi sisekliimat (temperatuur, õhuhuhetus) seadistada. Nii vihmavee kui ka heitveega tehtud taaskasutusvee katsetuste puhul oli akvapoonilise süsteemi toimimise põhiliseks probleemiks ruumi temperatuuri muutmise võimaluse puudumine. Veepuhastusseadmete puhul tuleb seda samuti arvestada nt kui vee puhastamisel kasutatakse osoonimist.

Regulaarne vee mikrobioloogilise ja keemilise koostise jälgimine veepuhastusseadme ning akvapoonilise süsteemi puhul annab teada vajadusest muuta seadistusi. Katse kestel muudeti veepuhastusseadme taaskasutusveemahuti UV desinfitseerimistüklite arvu ja kestust lähtudes vee mikrobioloogiliste omaduste muutumisest. Sama tehti ka akvapoonikasüsteemi puhul.

Heitvee eelsoonimine enne veepuhastusseadet andis küllaltki häid tulemusi taaskasutusvee ettevalmistamisel. Akvapoonika vee osoonimine enne UV desinfitseerimist võiks olla uurimist ja katsetamist vääriv, et vähendada mikrobioloogilisi ohutegureid töötajatele ja kaladele ning parandada akvapoonikasüsteemis ringleva vee omadusi.

Kokkuvõte

Eesti maaülikooli veelaborisse rajatud akvapoonikasüsteem oli funktsionaalne, piisavalt kompleksne ja sobis väga hästi käesoleva projekti ülesannete lahendamiseks.

Mõlemad taaskasutuseks valitud veed, sademevesi ja heitvesi, olid kättesaadavad ja sobisid projekti eesmärkide täitmiseks. Lisaks sobis samal ajal tehtud ja samalalaadne Interreg TransFarmi projekt võrdlusse, sest seal kasutati kolmandat sorti taaskasutusveet, mis tehti hallist veest. Projekt võimaldab anda soovitusi Eesti tingimustesse sobivaima taaskasutusvee strateegia välja töötamiseks.

Kasutatud tehnoloogiline lahendus pakkus võimalust näha kasvamas erinevaid kala liike - vikerforell, siberi tuur, euroopa säga ja angersäga. Kogesime kalade elukeskkonna heaolu hoiul kaladele sobivate tingimuste hoidmisel mitmeid väljakutseid – kalade elukeskkonda iseloomustavate veeparameetrite sobiva hoidmisel, bioturvalisuse tagamisel kui ka sobivate tehnoloogiliste komponentide valikul. Akvapoonikat plaanides on nutikas teha valik sobiva kalaliigi või liikide valikul. Millist kooslust luua soovitakse, kas jahedaveelist või soojaveelist ning milline kasvatatav kala liik võiks süsteemis elutseda, kas röövtoiduline, kelle söödas on suurem proteiini sisaldus või segatoiduline madalama proteiini sisaldusega – sellest tuleneb vette ladestuv kogus lämmastiku ja fosforit.

LIFE SIP AdaptEst projekti raames läbi viidud taimede kasvatamise katsed näitasid, et puhastatud heitveel põhinev akvapooniline süsteem on sobilik mitmete lehtkõõgiviljade kasvatamiseks. Taimse biomassi analüüs kinnitas, et toksiliste raskmetallide sisaldused jäid kõigis proovides kas alla laboratoorse määramispiiri või väga madalatele tasemetele. See omakorda tõendab nii sisendsüsteemi vee kvaliteeti kui ka saadava biomassi ohutust.

Kasvatustulemustest eristusid eriti hapuoblikas, basiilik ja paktsoi, mis kohanesid süsteemi tingimustega hästi. Kokku toodeti ligikaudu 9 kg värsket biomassi. Taimede füsioloogilist seisundit ja lämmastiku omastamise efektiivsust kinnitasid klorofüllimõõduri stabiilsed näidud kogu kasvuperioodi jooksul. Samas viitasid tundlikumate liikide, nagu rukola ja sidrunhein, tagasihoidlikum kasvupotentsiaal vajadusele optimeerida süsteemi parameetreid, eriti valgusrežiimi ja toiteelementide tasakaalu. Tomatitaimedel jäi viljade küpsemine hilisemasse perioodi, kuid saadud viljade arvukus näitab, et süsteem on potentsiaalselt sobiv ka tomati kasvatamiseks.

Kahjurite tõrjeks rakendati ennetavat biokaitsemeetodit kiilassilma (*Chrysoperla spp.*) vastsetega, mis hoidis kahjuripopulatsioonid stabiilselt madalal ning võimaldas kasvatada taimi täielikult ilma sünteetiliste pestitsiidideta. Biotõrje kasutamine oli hädavajalik, arvestades avatud-pidevooluvee süsteemi kalabasseini ja taimede kasvatus vahel.

Kokkuvõttes näitas katse, et akvapoonikasüsteemis toimuv orgaanilise aine lagundamine ja toitainete mineralisatsioon on efektiivsed ning loovad soodsad tingimused taimede jõudsa ja jätkusuutliku kasvu toetamiseks.

Akvapoonikasüsteemi keemiliste ohutegurite analüüs näitas, et enamik ohtlikke aineid esines alla määramispiiri ning töötajate terviserisk on valdavalt madal. Suurimaks ohuks osutusid mikrobioloogilised tegurid, eriti Legionella, mille kõrged kontsentratsioonid viitavad võimaliku nakkusohu olemasolule aerosoolide sissehingamisel. Mikrobioloogiline risk hinnati seetõttu keskmiseks kuni kõrgeks, eriti hooldus- ja puhastustöödel. Riskide maandamiseks on võimalik rakendada tehnilisi lahendusi mikrobioloogiliste ohutegurite vähendamiseks vees ning kasutades samas tehnilisi kaitsevahendeid, parandada ventilatsiooni ning rakendada tööohutus- ja hügieenimeetmeid.

Tänu sõnad

Täname akvapoonikasüsteemi arendada ja käitada ning kaasa mõelda aidanud partnereid: OÜ Miridon, AS A. Le Coq ja Argo Normak, AS Emajõe Veevärk ja Andres Aruhein, Rainer Spuul, Targo Aabel, GrüneFee Eesti AS ja Eneli Feldmann, Paadi Talu OÜ ja Avo Leok, Keskkonna Uuringute Keskus OÜ, Labris OÜ meeskond, Kalatalu Härjanurmes FIE ja Martin Liiv, Aarne Liiv.

Interreg TransFarm: Transborder Cooperation for Circular Soilless Farming Systems.

Viidatud kirjandus

- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H., Jijakli, M.H. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa L. var. Sucrine*) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water*, 8(10), 467.
- McEwen, P.K., New, T.R., Whittington, A.E. (2001). *Lacewings in the Crop Environment*. Cambridge University Press.
- Obrycki, J.J., Tauber, M.J., Tauber, C.A., Ruberson, J.R. (2009). Predatory insects in agroecosystems. In *Encyclopedia of Insects* (pp. 856–861). Academic Press.
- Pappas, M.L., Broufas, G.D., Koveos, D.S. (2011). Chrysopid predators and their role in biological control. *Journal of Applied Entomology*, 135(7), 481–493.
- Rakocy, J.E., Masser, M.P., Losordo, T.M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics – Integrating fish and plant culture*. Southern Regional Aquaculture Center Publication, 454.
- Resh, H.M. (2013). *Hydroponic Food Production*. CRC Press.
- Roosta, H.R., Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 396–402.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589.
- Kalogerakis, N., Paschali, D., Lekaditis, V., Pantidou, A., Eleftheriadis, K., Lazaridis, M. (2005). Indoor air quality — bioaerosol measurements in domestic and office premises. https://www.academia.edu/14543862/Indoor_air_quality_bioaerosol_measurements_in_domestic_and_office_premises
- Biglari, A., Barzeghar, V., Gholampour, A., Firouzsalar, N.Z. (2021). Assessment of airborne bacterial and fungal communities in different wards of educational hospitals: A case study in Urmia. [www] <https://publish.kne-publishing.com/index.php/JAPH/article/view/6442>
- Prussin, A.J., Schwake, D.O., Marr, L.C. (2017). Ten questions concerning the aerosolization and transmission of *Legionella* in the built environment. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317302597>
- EFSA CEP Panel (EFSA Panel on Food Contact Materials, Enzymes and Processing Aids), Silano V, Barat Baviera JM, Bolognesi C, Chesson A, Coconcelli PS, Crebelli R, Gott DM, Grob K, Lampi E, Mortensen A, Rivière G, Steffensen I-L, Tlustos C, Van Loveren H, Vernis L, Zorn H, Cravedi J-P, Fortes C, Tavares Poças MF, Waalkens-Berendsen I, Wölfle D, Arcella D, Cascio C, Castoldi AF, Volk K and Castle L, (2019). Scientific Opinion on the update of the risk assessment of di-butylphthalate (DBP), butyl-benzylphthalate (BBP), bis(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP), di-isononylphthalate (DINP) and di-isodecylphthalate (DIDP) for use in food contact materials. *EFSA Journal* 2019;17(12):5838, 85 pp. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5838>

