

Vee taaskasutuse võimalused – täiendava puhastuse katsed Kohtla-Järve, Tartu reoveepuhasti ja Aidu karjääri veega

Tallinna Tehnikaülikool
Ehituse- ja arhitektuuri instituut
Vee- ja keskkonnatehnika uurimisrühm



SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	2
TEHNOLOOGILISED KATSED.....	4
3.1. Kohtla-Järve reoveepuhasti.....	4
3.1.1. Tehnoloogiliste katsete tulemused	5
3.1.2. Erinevate filtrite opereerimisandmete analüüs.....	7
3.2. Aidu karjäär.....	8
3.2.1. Tehnoloogiliste katsete tulemused	9
3.2.2. Erinevate filtrite opereerimisandmete analüüs.....	11
3.3. Tartu reoveepuhasti	14
3.3.1. Tehnoloogiliste katsete tulemused	14
3.3.2. Erinevate filtrite opereerimisandmete analüüs	16
KOKKUVÕTE	20
LISA 1. Kohtla-Järve pilootkatsete tulemused	23
LISA 2. Aidu pilootkatsete tulemused	23
LISA 3. Tartu pilootkatsete tulemused.....	24

SISSEJUHATUS

Heitvee taakasutamiseks on üldjuhul vajalik selle täiendav töötlemine. Olenevalt otstarbest kasutatakse membraanfiltratsiooni, desinfitseerimist, süvapuhasust või nende kombinatsiooni. Käesoleva uuringu raames analüüsitakse pilootkatsete abil kolme erineva filtri puhastusefektiivsuseid heitvee ja karjäärivee puhastamiseks. Tulemused on sisendiks edasisteks uuringuteks, kus leitakse erineva puhastusastmega taaskasutusveele kasutus. Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse ja arhitektuuri instituudi vee- ja keskkonnatehnika uurimisrühma teadlased viisid katsed läbi Kohtla-Järve -ja Tartu reoveepuhastis ning Aidu karjääris. Reoveepuhastites seadme sisend reoveepuhastite väljavoolust. Pilootseade võimaldas samal ajal piloteerida mikrofiltrimist (200 µm) ja ühte membraanfiltrit. Membraanidena kasutati ultra -ja nanofiltreid (vastavalt molekulaarse eraldusvõimega 800 Da ja 400 Da). Kuigi parima puhastusefektiivsuse annab pöördosmoos, siis antud uuringus seda ei käsitleta, sest varasemad katsed on näidanud, et sellega kaasnevad suured energiakulud ja retentaat (kontsentraat), mis reoveepuhastisse tagasi juhtimisel inhibeerib pikas perspektiivis selle tööd. Eemaldades suure osa ohtlikest ühenditest ning suunates need tagasi reoveepuhastisse toimub inhibeerivate ühendite akumulatsioon protsessis.

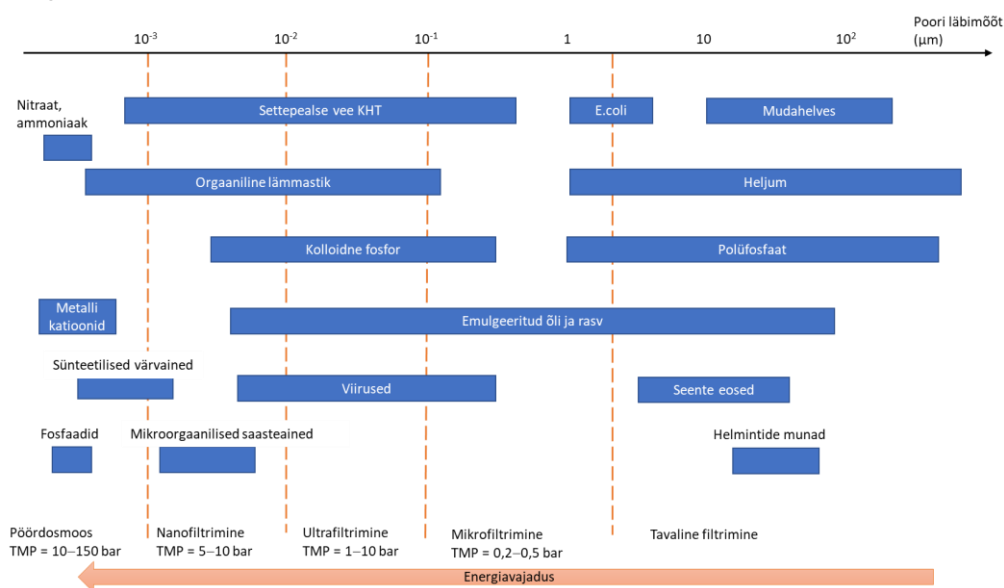
- **mikrofiltrimine** (ingl *microfiltration*) – pooride suurus 0,1–3 µm. Suuremaid poorisuuruseid eelistatakse tööstusreovete käitlemisel ning heitvee tõhusama puhastamise eesmärgil. Mikrofiltrimisega eemaldatakse peamiselt heljum, suured kolloidosakesed, seened ja bakterid;
- **ultrafiltrimine** (ingl *ultrafiltration*) – pooride suurus 0,01–0,1 µm. Reoveest kõrvaldatakse ka väikesed kolloidosakesed, viirused, makromolekulid ja valgud;
- **nanofiltrimine** (ingl *nanofiltration*) – pooride suurus 0,001–0,01 µm, reoveest kõrvaldatakse ka lahustunud orgaaniline aine ning osaliselt ka suuremad divalentsed ioonid (Ca^{2+} , Mg^{2+}).

Joonisel 1 on näha erinevate filtrite eraldusvõime ja energiavajadus. Energiavajadus sõltub põhiliselt sisendrõhust ehk mida väiksemad on membraani poorid, seda suurem peab olema rõhk, et saavutada ühtlane permeaadi (filtreeritud vesi) toodang. Lisaks ummistuvad väiksemate pooridega membraanid kiiremini ehk seadme tagasipesutsükli toimuvad tihedamini, mis vähendab selle toodangut. Jooniselt selgub, et mikrofilter peaks juba tagama paljude mikroorganismide sh patogeenide eraldamise nn E.coli. Ja ultrafiltritud vesi on suures osas viiruste ja erinevate kolloidosakeste vaba.

Käesolevas katsete ülevaates kasutatakse järgmisi mõisteid:

- permeaat: membraanfiltritud vesi;

- membraani rõhkude erinevus (TMP): rõhkude erinevus membraani toite -ja permeaadi poole vahel;
- eritoodang (flux): filtreeritud vesi ruutmeetri membraani pinna kohta ($l/m^2 \cdot h$);
- saastumine (fouling): saasteainete sh biokile akumulatsioon membraani pinnale;
- tagasipesu: membraanfiltrite tagasipesi vastupidiselt filtreerimisele;
- läbilaskevõime (permeability): membraanide jõudluse hindamise meetod, mis leitakse eritoodangu ja TMP kaudu.



Joonis 1. Membraanfiltrite eraldusvõime, sõltuvalt nende poore suuruselt. (Allikas: Heitvee taaskasutuse potentsiaali ning mõjude analüüsimine, Tallinn 2023).



Joonis 2. Katsetes kasutatud pilootseade.

TEHNOLOOGILISED KATSED

3.1. Kohtla-Järve reoveepuhasti

Kohtla-Järve reoveepuhasti tehnoloogia koosneb tavapärasest läbivoolsest aktiivmudaprotsessist. Kus eelnevalt eemaldatakse mehaanilise puhastuse käigus suuremad võõrised, liiv jm ja aktiivmudaprotsess on ette nähtud orgaanilise aine (BHT, KHT) ja toitainete (Nüld, Püld) ärastamiseks. Reoveepuhasti teeb omapäraseks suur tööstusreovee osakaal. Vastavalt 2025 .a. keskkonnaloa aruandele on suurimad kliendid VKG Oil AS, Kiviõli Keemiatööstuse OÜ, Kliimaministeerium, Eastman Specialities OÜ ja Farmi Piimatööstuse AS. Eelnevalt nimetatud kliendid suunavad reoveepuhastisse ligikaudu 20% kogu koormusest. Keskmise vooluhulk oli antud perioodil 18 200 m³/d ehk võttes membraanide permeaadi toodanguks 60%, siis perspektiivselt on võimalik toota ligikaudu 11 000 m³/d taaskasutusvett. Just suure tööstuse osakaalu tõttu on Kohtla-Järve perspektiivne asukoht, kus hinnata võimalikku heitvee taaskasutust eelnevalt nimetatud tööstusettevõtetes. Katsed viidi läbi 23.04.2025–23.05.2025. Seadme opereerimisparameetrid logiti automaatselt SCADAs.

3.1.1. TEHNOLOOGILISTE KATSETE TULEMUSED

Kohtla-Järve reoveepuhastis läbi viidud membraanfiltratsiooni pilootkatsed võimaldasid hinnata tööstusliku koormusega reovee puhastamise võimalusi ning kolme membraantehnoloogia – mikrofiltratsiooni (MF), ultrafiltratsiooni (UF) ja nanofiltratsiooni (NF) – sobivust taaskasutusvee tootmiseks. Pilootkatsed toimusid perioodil 23.04.2025 kuni 23.05.2025.

Kohtla-Järve eripäraks on väga suur tööstusreovee osakaal (keemiatööstus, põlevkivitööstus), mis tähendab kõrgeenenud kontsentratsioone orgaanilistes ühendites, suurt varieeruvust ja sageli märkimisväärset raskmetallide ning mineraalainete sisaldust. Sellistes tingimustes on puhastustehnoloogiate käitumine eriti oluline, kuna membraanide ummistusaste ja koormus võivad kiiresti kasvada.

Kõikide katsepäevade lõikes oli MF tulemuste varieeruvus äärmiselt suur, lisaks sageli negatiivseid eemaldusi (st väljundväärtus oli suurem kui sisend), eriti:

- hägususel (+75% kuni +700%),
- hõljuvainel (mõnel päeval +600% ja rohkem),
- mikrobioloogilistel näitajatel (kuni mitmekordne tõus).

Selline käitumine on iseloomulik pesutsüklite, sette „lahtituleku“ ja voolurežiimi kõikumisega seotud eelfiltrisüsteemidele. MF ei taganud ühelgi katsepäeval stabiilset puhastuse kvaliteeti ning toimis üksnes mehaanilise eelpuhastusena, mis eemaldab suuremad osakesed, kuid ei sobi lõppastme puhastuse tagamiseks.

UF toimis Kohtla-Järvel efektiivselt, kus eemaldused olid:

- hägusus vähenes 85–95%,
- hõljuvaine vähenes 80–92%,
- BHT₇ (orgaanika) langes üldjuhul 70–81%,
- fosfori eemaldus oli väga hea (88–98%),
- mikrobioloogia eemaldus oli 100% kõigil UF-iga kaasnenud proovipäevadel.

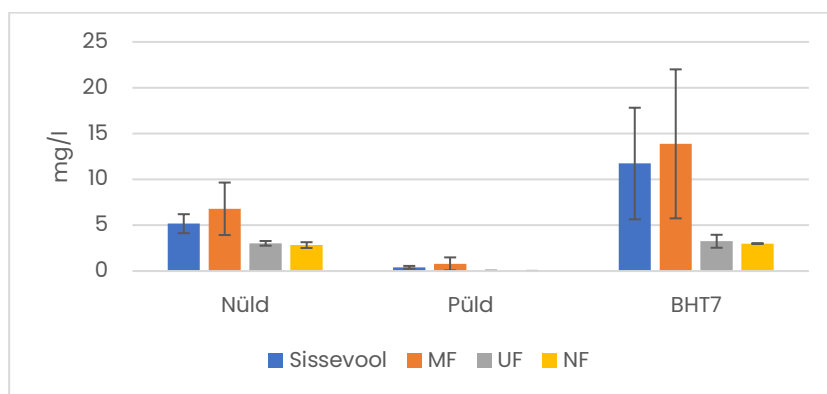
Lahustunud ionide (elektrijuhtivus, Ca/Mg, karedus) osas UF ei näidanud märkimisväärseid muutusi – see on tehnoloogiale omane, sest UF ei eemalda monovalentseid ja väikseid lahustunud ioone.

NF oli katseperioodi jooksul kõige tõhusam ja stabiilsem tehnoloogia, tagades puhastatud vee kvaliteedi, mis sobib juba kõrgema lisandväärtusega taaskasutusviiside jaoks. NF tulemused olid järgmised:

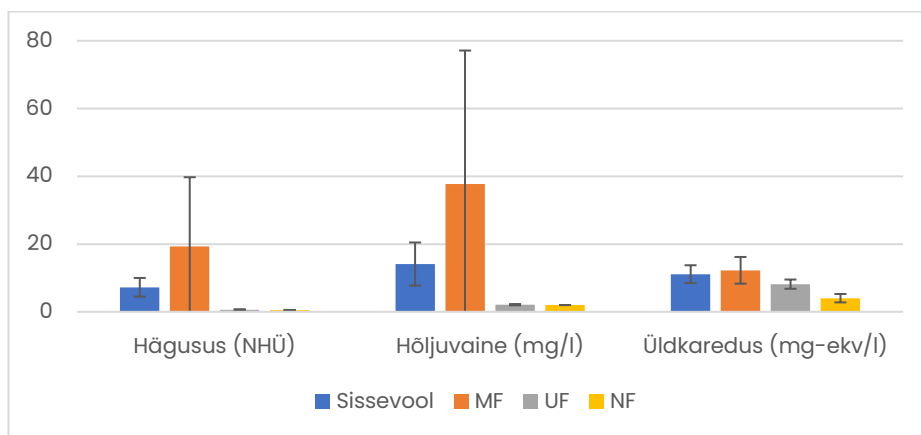
- hägusus langes 89–96%,

- hõljuvaine vähenes 76–93%,
- elektrijuhtivus vähenes 39–46%,
- karedus vähenes 58–81%,
- P_{üld} eemaldus 97–99%,
- N_{üld} eemaldus 26–66%,
- orgaaniline aine (BHT₇) eemaldus 63–82%,
- mikrobioloogia eemaldus 100%, kõikidel katsepäevadel.

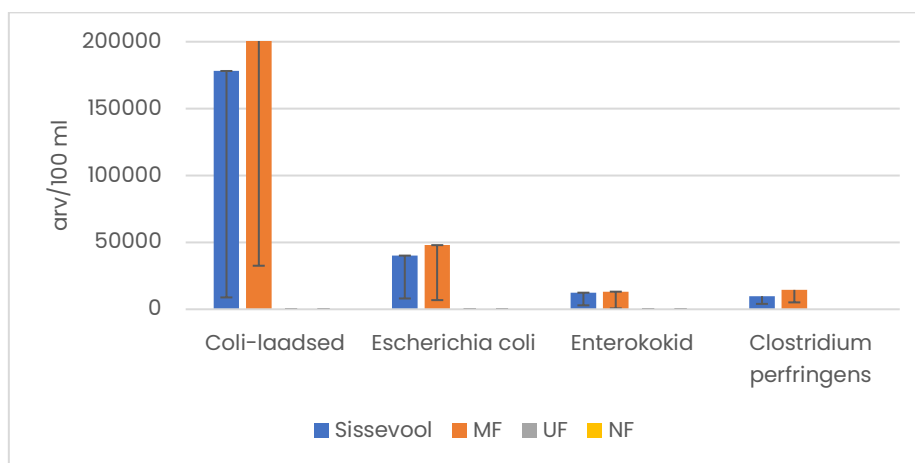
NF näitas eriti head võimet eemaldada lahustunud orgaanikat, sulfaatioone, mineraale ja raskmetalle, mis on Kohtla-Järve reovee puhul kriitilise tähtsusega.



Joonis 3. Kohtla-Järve reoveepuhastis läbi viidud pilootkatsete tulemused, üldparameetrid.



Joonis 4. Kohtla-Järve reoveepuhastis läbi viidud pilootkatsete tulemused, üldparameetrid.

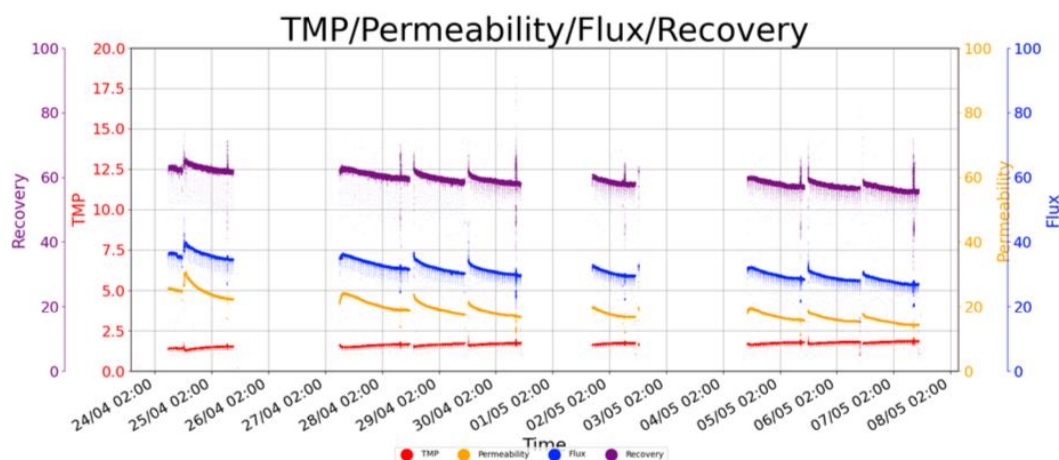


Joonis 5. Kohtla-Järve reoveepuhastis läbi viidud pilootkatsete tulemused, mikrobioloogia.

Täiendavad seiretulemused on esitatud LISA 1. Kohtla-Järve pilootkatsete tulemused.

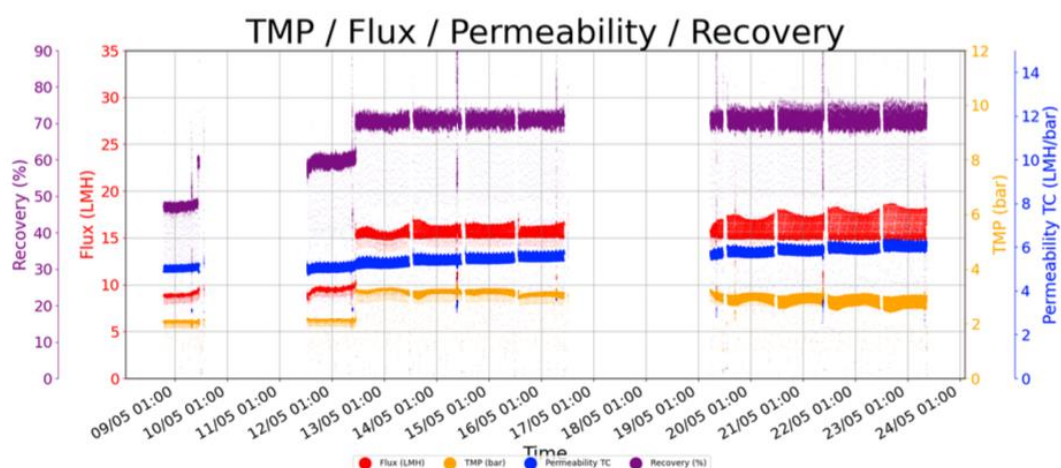
3.1.2. ERINEVATE FILTRITE OPEREERIMISANDMETE ANALÜÜS

Kokkuvõttes näitasid UF membraanid pilootkatse vältel stabiilset töökindlust nii eritoodangu (flux'i) kui ka puhastusefektiivsuse osas. Joonis 6 illustreerib erinevaid opereerimisparameetreid kogu katseperioodi jooksul. Seadet käitati suure eritoodanguga vahemikus 30–40 l/m²*h. Permeaadi toodang oli kogu katseperioodi vältel seatud 65%-le, mille juures täheldati vaid kerget tööparameetrite langust. Rõhkude erinevus (TMP) püsis madal ja stabiilne, viidates käitamisel minimaalsele membraanide pinna saastumisele ning madalale energiavajadusele. Temperatuuriga korrigeeritud läbilaskvus vähenes puhastuste vahel järk-järgult, mis viitab membraani pinna saastumisele või soolade ladestumisele. UF töötas üldpildis töökindlat ja energiatõhusalt, mille tööparameetrid püsisid stabiilsed ka erinevate toodangute juures.



Joonis 6. Pilootseadme opereerimisandmed ultrafiltrimise ajal.

NF membraanid tagasid pilootkatse vältel samuti stabiilse ja ühtlase töö ja kõrge puhastusefektiivsuse. Jooniselt 7 on näha, et seadet käitati mitme permeaadi tootluse tasemega – peamiselt 65% ja 75% juures, kusjuures lühiajaline katse 45% tootlusega viidi läbi vaid ühe päeva jooksul süsteemi funktsionaalsuse kontrollimiseks. Eritoodang püsis 65% tootluse juures vahemikus kuni 10 l/(m²·h), seejärel suurendati see 75% tootluse juures tasemeni 15 l/(m²·h). Temperatuuriga korrigeeritud läbilaskvus püsis kõigis katsefaasides ühtlane, viidates membraanipinna saastumise puudumisele ning stabiilsetele hüdraulilistele ja membraani töötingimustele. Rõhkude erinevus (TMP) püsis vahemikus 3,5–4,5 baari ning suurenes ajas vaid vähesel määral, mis viitab madalale takistusele ja väikesele energiavajadusele. Piloteerimise hilisemates etappides suurenes permeaadi tootlus järk-järgult, säilitades samal ajal seadme tööparameetrite stabiilsuse, mis peegeldab membraani töökindlust muutuvate tootlusnõuete korral. Üldpildis tagavad NF membraanid töökindlat ja energiatõhusat puhastusprotsessi, mida iseloomustasid stabiilne läbilaskvus, stabiilne TMP ning hea skaleeritavus permeaadi tootluse osas.



Joonis 7. Pilootseadme opereerimisandmed nanofiltrimise ajal.

3.2. Aidu karjäär

Aidu karjäär paikneb Ida-Viru maakonnas Lüganeuse vallas. Karjäär suleti lõplikult 2012 .a. Tegemist on endise põlevkivi pealmaakaevandusega. Kogu veepeegli pindala on ligikaudu 131,3 ha, arvestuslik veemaht on ligikaudu 26 milj m³. Varasemalt on uuritud antud vee kasutamist VKG biotoodete tehase tarbeks Entec OÜ poolt. Vastavas uuringus leiti, et kuival perioodil on võimalik kasutada ligikaudu 12 900 m³/d karjääri vett ehk võttes membraanfiltrite toodanguks 60% permeaati, siis ligikaudu 7700 m³/d taaskasutusvett. Kohtla-Järve paikneb ligikaudu 15 km, mistõttu on perspektiivne antud vee kasutamine sinna koondunud tööstuses. Pilootkatsed viidi läbi 04.06–01.07.2025.

3.2.1. TEHNOLOOGILISTE KATSETE TULEMUSED

Aidu karjääri vee membraanfiltratsiooni pilootkatsed (06.06–30.06.2025) viidi läbi eesmärgiga hinnata, kui hästi sobivad ultrafiltratsioon (UF), mikrofiltratsioon (MF) ja nanofiltratsioon (NF) kõrge mineraalsuse, kõrge sulfaadisisalduse ja suhteliselt madala orgaanilise koormusega karjäärivee puhastamiseks. Aidu vee eripära seisneb selles, et tegemist ei ole reoveega, vaid geoloogiliselt ja kaevandustehniliselt mõjutatud mineraalsete soolade rikkaliku mageveega, mis sisaldab küll vähe orgaanikat, kuid väga suures kontsentratsioonis Ca^{2+} , Mg^{2+} ja SO_4^{2-} ioone (nähtav sisendväärtustes kuni 1100–2100 mg/l, sulfaatide ja 380–720 mg/l kaltsiumi tasemel).

Katsed näitasid, et kuigi UF ja MF ei sobi Aidu vee lahustunud fraktsioonide vähendamiseks, suudab NF tagada nii soolsuse, karedusioonide kui ka mikrobioloogia osas selge ja stabiilse kvaliteedi.

Kõigil Aidu katsepäevadel töötas MF ebastabiilselt:

- hägusus sageli tõusis (mitmel päeval kuni +800%),
- hõljuvaine samuti tõusutrendis (kuni +370%),
- mikrobioloogilised näitajad olid juhuslikud, mitmel juhul sisendist kõrgemad,
- lahustunud fraktsioonid (Ca , Mg , SO_4^{2-}) MF-ist ei mõjutanud.

See käitumine on iseloomulik olukorrale, kus MF eemaldab vaid hõljuvosakesed, mitte ei toimi korrektse filtrina.

UF andis Aidu vee puhastamiselt stabiilselt hea osakeste- ja mikrobioloogia eemaldamise:

- hägususe vähenemine 60–75%,
- hõljuvaine vähenemine 0–50%,
- mikrobioloogia eemaldus enamasti 100%,
- üldlämmastiku vähenemine 40–70%,
- orgaanilise aine (KHT_{Mn}) eemaldus väike või olematu (Aidu vesi sisaldab väga vähe orgaanikat).

Aidu vesi on väga mineraalne, mistõttu UF ei mõjuta:

- sulfaati,
- kaltsiumi,
- magneesiumi,
- elektrijuhtivust,
- üldkaredust.

Seetõttu sobib UF Aidu vees enne NF-i, kuid ei paranda sisuliselt vee keemilist profiili.

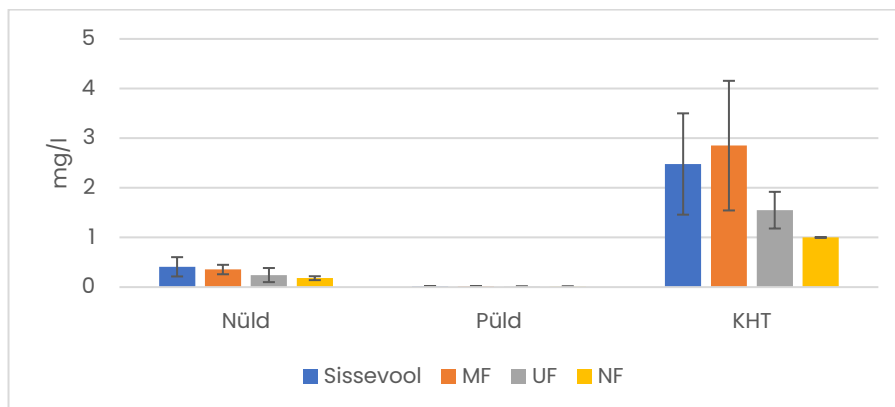
NF tagas Aidu vee puhastamisel väga kõrge puhastuse taseme, täites tegelikult kõiki eeldusi taaskasutusvee tootmiseks.

NF iseloomulikud puhastusefektiivsused:

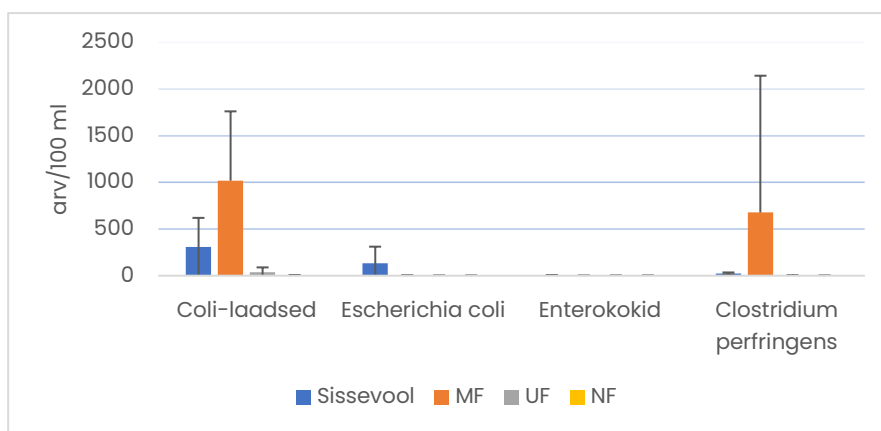
Parameeter	Eemaldustase
Hägusus	89–96%
Hõljuvaine	72–93%
Sulfaat (SO_4^{2-})	86–95%, ühel päeval >90%
Kaltsium (Ca^{2+})	84–90%
Magneesium (Mg^{2+})	73–87%
Üldkaredus	80–88%
KHT _{Mn} (orgaanika)	63–76%
Üldlämmastik	38–66%
Mikrobioloogia	100%, kõikidel katsepäevadel

NF-i puhul on näha, et:

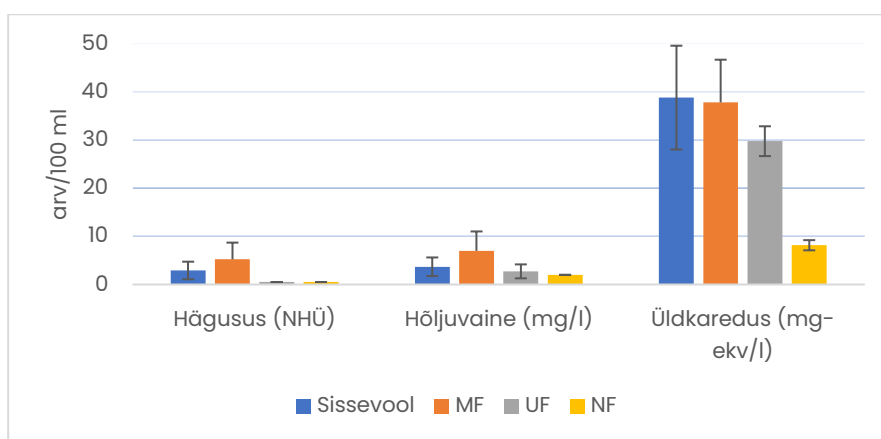
- suur osa Ca^{2+} ja Mg^{2+} eemaldub membraanil laengu- ja suurusmõjude tõttu,
- sulfaatide kõrge eemaldus (kuni 95%) on NF-i peamine tugevus,
- elektrijuhtivus vähenes mitmel päeval 40–80%, mis annab NF-le potentsiaali teha Aidu veest madalama mineraalsusega vett,
- mikrobioloogiline eemaldus tagati täielikult.



Joonis 8. Aidu karjääris läbi viidud pilootkatsete tulemused, üldparameetrid.



Joonis 9. Aidu karjääris läbi viidud pilootkatsete tulemused, mikrobioloogia..



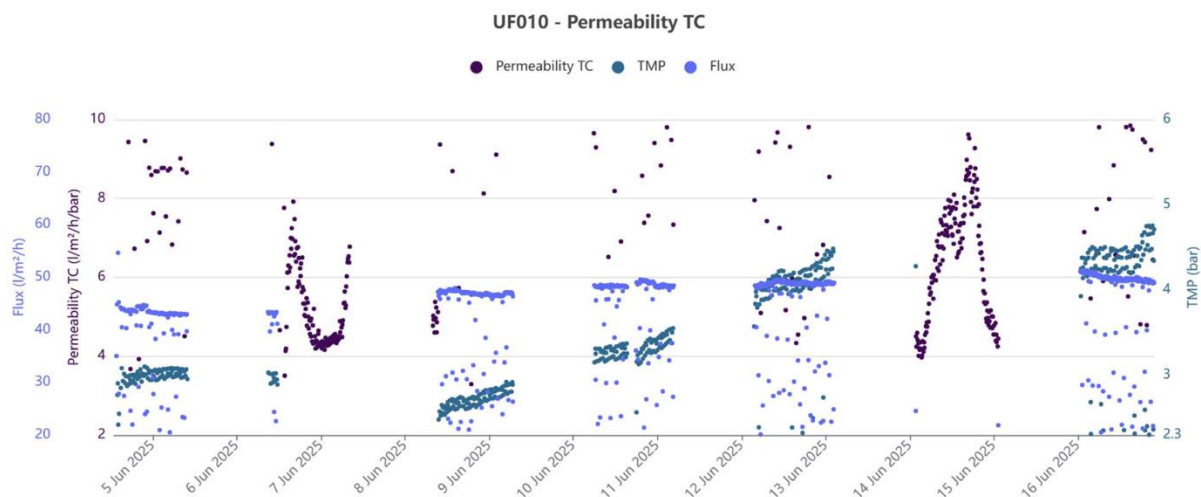
Joonis 10. Aidu karjääris läbi viidud pilootkatsete tulemused, üldparameetrid.

Täiendavad seiretulemused on esitatud LISA 2. Aidu pilootkatsete tulemused.

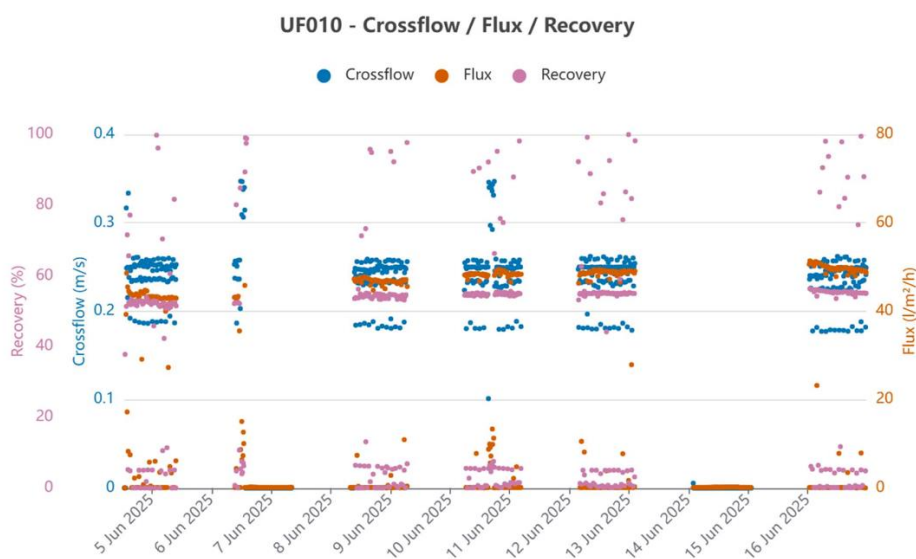
3.2.2. ERINEVATE FILTRITE OPEREERIMISANDMETE ANALÜÜS

SCADA andmetest arvutatud temperatuuriga korrigeeritud läbilaskvuse (permeability TC) väärtused näitavad suuri lühiajalisi kõikumisi, mis ei ole kooskõlas tegeliku filtratsiooni ajal täheldatud stabiilsete eritoodangutega (flux'i) ja rõhuerinevuste (TMP) trendidega. Need ebakorrapäraseks tipud ja langused langevad kokku perioodidega, mil süsteem ei olnud filtratsioonirežiimis, näiteks tagasipesutsükli, käivitamis- ja seiskamisüleminekute või hooldustegevuste ajal. See on eriti selgelt nähtav 7. 14. ja 15. juunil, mil eritoodang langeb nulli. Mistõttu põhineb UF membraanide töövõimekuse tõlgendamine käesolevas aruandes eelkõige stabiilsete filtratsiooniperioodide jooksul registreeritud eritoodangu ja TMP andmetel. Läbilaskvuse

graafik on esitatud üksnes kvalitatiivse illustratsioonina ning seda ei tohiks kasutada membraanipinna saastumise ega puhastusefektiivsuse hindamiseks.



Joonis 11. Pilootseadme opereerimisandmed ultrafiltrimise ajal, kui arvesse võetakse pesutsüklites tingitud andmete häired.



Joonis 12. Pilootseadme opereerimisandmed ultrafiltrimise ajal.

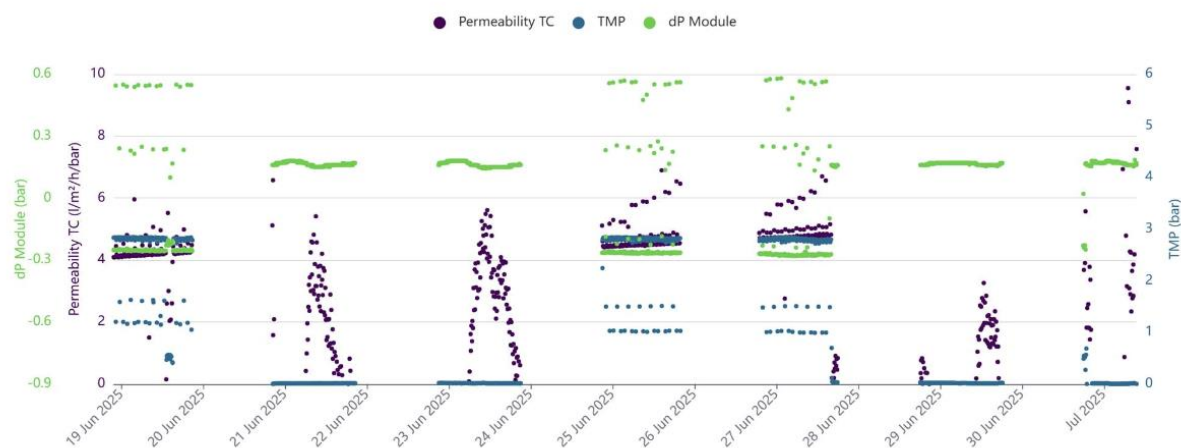
UF membraanide eritoodangu (flux'i) ja permeaadi tootluse joonis näitab filtratsiooniperioodidel stabiilset ja ühtlast käitumist, kus voolukiirus membraanis püsis vahemikus 0,20–0,28 m/s, eritoodang ligikaudu 45–52 l/(m²·h) ning permeaadi tootlus 50–65% piires.

NF membraanide läbilaskvuse, rõhuerinevuste (TMP) rõhukadude trendid näitavad selget eristust stabiilsete filtratsiooniperioodide ja häiretega perioodide vahel. Normaalse töö ajal püsivad

läbilaskvuse väärtused ühtlases vahemikus ning korreleeruvad hästi stabiilse TMP-ga (~1,5–2,5 bar).

Suured läbilaskvuse kõikumised ilmnevad ajavahemikel 22.–24. juuni ja 28.–29. juuni, mil TMP langeb perioodiliselt nulli või nullilähedaste väärtusteni ning läbilaskvus suureneb ebanormaalselt. Need anomaaliad ei ole seotud membraani töövõimekusega, vaid langevad kokku käitusetappidega, mil süsteem ei töötanud filtratsioonirežiimis, näiteks tagasipesu, süsteemi tühjendamise, loputamise või keemilise puhastuse ajal.

Kuna läbilaskvus arvutatakse eritoodangu (flux'i) ja TMP alusel, põhjustab madalrõhurežiim mittefiltratsiooni ajal matemaatiliselt kunstlikult suurenenud või ebastabiilseid läbilaskvuse väärtusi. Samuti muutub nendel perioodidel ebastabiilseks mooduli rõhukao (Δp) signaal, mis kinnitab, et süsteem vahetus erinevate töörežiimide vahel ega kajasta tegelikke hüdraulilisi muutusi membraanides. Pärast igat pesutsükli taastuvad tööparameetrid koheselt varasematele stabiilsetele tasemetele, mis näitab, et membraan säilitas kogu pilootkatse vältel ühtlase töövõimekuse. Nendel põhjustel kasutatakse läbilaskvuse joonist üksnes kvalitatiivseks hinnanguks ning NF membraanide töövõimekuse hindamine põhineb käesolevas aruandes eelkõige stabiilsete filtratsiooniperioodide andmetel (eritoodang, TMP), jättes välja 22.–24. juuni ja 28.–29. juuni käitussündmuste perioodid.



Joonis 13. Pilootseadme opereerimisandmed nanofiltrimise ajal, kui arvesse võetakse pesutsükletes tingitud andmete häired.

NF katsete tulemused näitavad ajavahemikus 19.–30. juuni selgelt eristuvaid filtratsiooniperioode, mida iseloomustavad stabiilsed filtratsiooni kiirused ligikaudu 0,22–0,30 m/s, eritoodangu (flux'i) väärtused vahemikus 10–14 l/(m²·h) ning permeaadi tootlus 45–60% piires. Need tulemused iseloomustavad nanofiltratsiooni normaalset käitamist kontrollitud tingimustes.



Joonis 15. Pilootseadme opereerimisandmed nanofiltrimise ajal.

3.3. Tartu reoveepuhasti

Tartu on suuruselt teine Eesti linn. Reoveepuhastisse jõuab nii olme, kui ka tööstusreovesi. Reoveepuhasti keskmine vooluhulk vastavalt keskkonnaloa 2025 .a. aruandele on 15 450 m³/d, kui võtta membraanfiltrite permeaadi toodanguks ligikaudu 60%, siis on ööpäevas võimalik toota ligikaudu 9200 m³/d taaskasutusvett. Puhastusprotsess on sarnane Kohtla-Järvele, kus mehaanilise puhastuse käigus eemaldatakse võõrised ja liiv ning bioloogiline puhastus viiakse läbi aktiivmudaprotsessis. Pilootkatsed viidi läbi 23.08–22.09.2025.

3.3.1. TEHNOLOOGILISTE KATSETE TULEMUSED

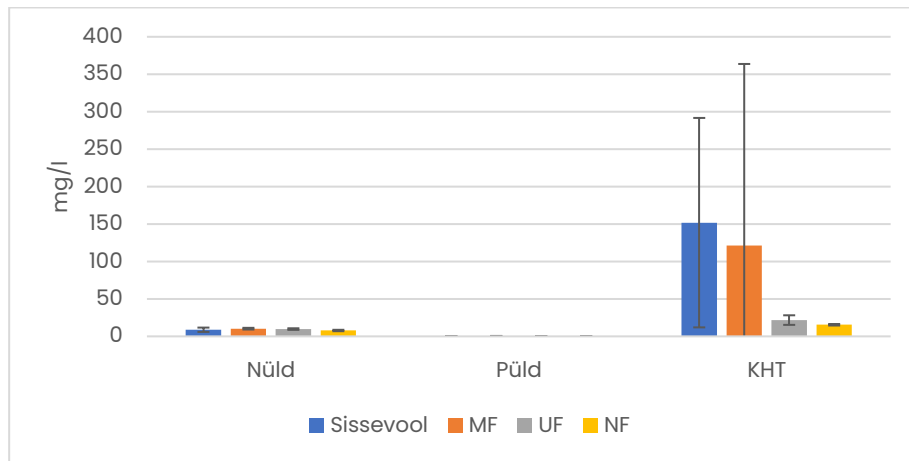
MF osutus pilootkatsetes ebaefektiivseks ja suure varieeruvusega. Mitmes proovipunktis ilmnis “negatiivne eemaldus”, mis tähendab, et väljundis oli teatud ainete kontsentratsioon ajutiselt kõrgem kui sisendis. See tuleneb suure tõenäosusega pesutsüklitest, sette lahti tulekust või proovivõtu ajastuslikest mõjudest. MF sobib seetõttu vaid eelfiltriks, mitte iseseisvaks puhastamistehnoloogiks.

UF töötas Tartus väga stabiilselt ja efektiivselt: Hägusus ja hõljuvaine langesid 75–98%. Mikrobioloogiline eemaldus oli 100%. Lahustunud soolad, toitained ja väiksemad orgaanika komponendid läbisid UF-i. See kinnitab UF sobivust NF-i eelpuhastuse etapiks, kus tahkete osakeste ja bakterite täielik eemaldus on kriitiline mõlema membraani töökindluse säilitamiseks.

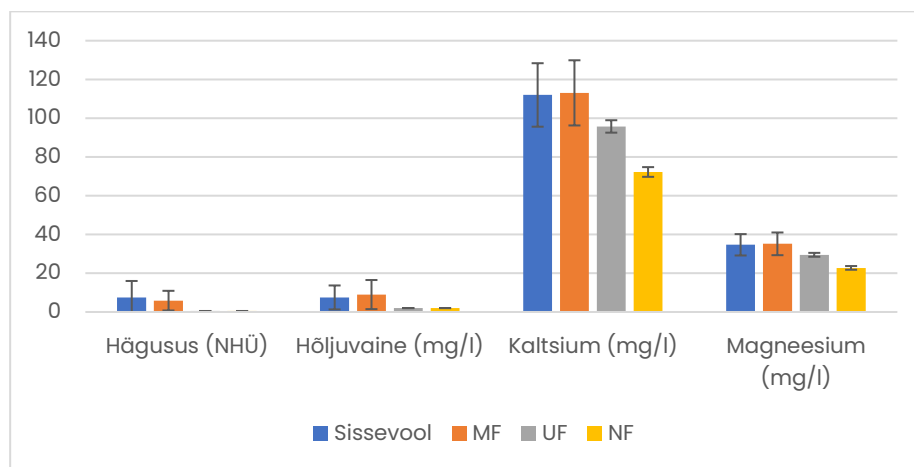
NF andis katsete kõige kvaliteetsemad tulemused. NF suutis eemaldada edukalt nii lahustunud orgaanikat (KHT), raskmetalle, sulfaate, kui ka fosforit. Tüüpilised eemaldustasemed: KHT 63–95%,

Sulfaat (SO_4^{2-}) 90–97%, Raskmetallid (Ni, Zn, Cu, Cr, Fe) 80–99%, (Ca^{2+} , Mg^{2+}): 40–50% ja Fosfor ($\text{P}_{\text{üld}}$): 50–80%. Mikrobioloogia: alati 0 arv/100 ml ehk 100% eemaldus.

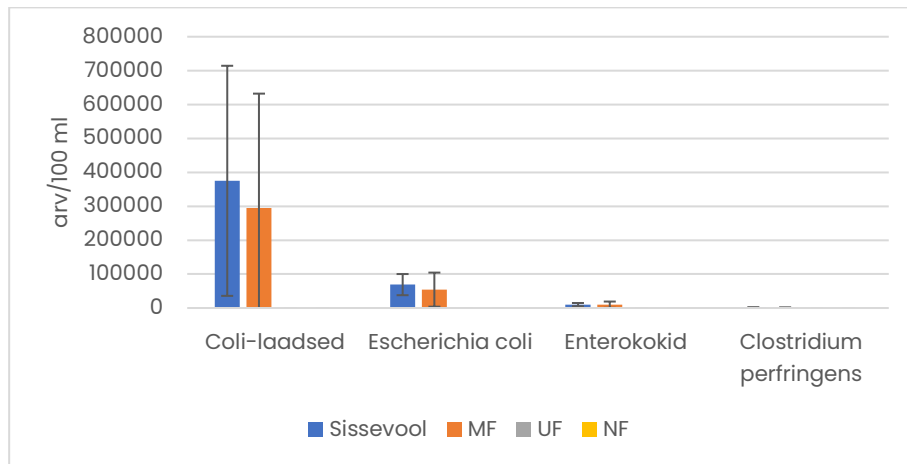
Katsed näitasid selgelt, et reovee süvapuhasdamiseks ja taaskasutusvee tootmiseks ei piisa MF-ist ega UF-ist üksi.



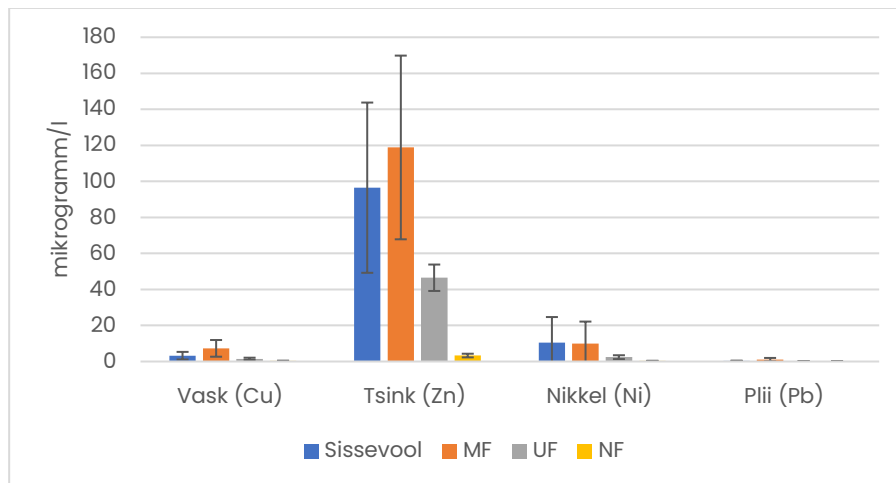
Joonis 16. Tartu reoveepuhastis läbi viidud pilootkatsete tulemused, üldparameetrid.



Joonis 17. Tartu reoveepuhastis läbi viidud pilootkatsete tulemused, üldparameetrid.



Joonis 18. Tartu reoveepuhastis läbi viidud pilootkatsete tulemused, mikrobioloogia.



Joonis 19. Tartu reoveepuhastis läbi viidud pilootkatsete tulemused, raskemetallid.

Täiendavad seiretulemused on esitatud LISA 3. Tartu pilootkatsete tulemused.

3.3.2. ERINEVATE FILTRITE OPEREERIMISANDMETE ANALÜÜS

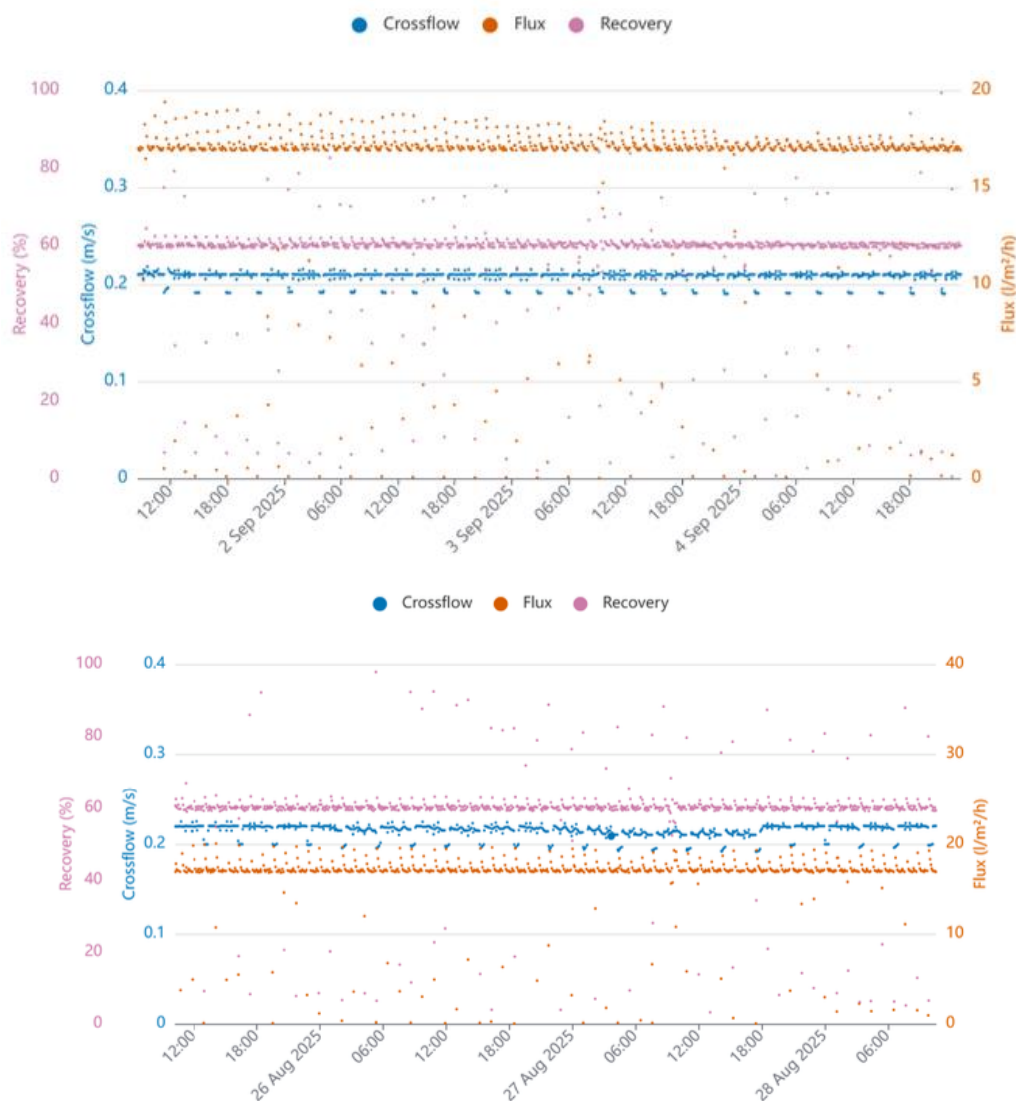
Ristvoolu kiiruse (cross-flow), eritoodang ja permeaadi toodangu andmed UF010 membraani kohta ajavahemikus 26. august kuni 5. september 2025 näitavad kogu filtratsiooniperioodi jooksul stabiilseid töötingimusi. Süsteem hoiab filtreerimise kiirust ligikaudu 0,21–0,23 m/s, mis püsib mõlemas tööfaasis ühtlane, viidates stabiilsele hüdraulilisele ringlusele moodulis.

Esimeses filtratsioonifaasis (26.–28. august 2025) püsib permeaadi toodang suhteliselt stabiilsena umbes 14–16 l/(m²·h) juures, samal ajal kui permeaadi osakaal on ligikaudu 55–60%. Tulemused viitavad sellele, et süsteem töötas stabiilse hüdraulilise koormusega, kus sisseevool ja permeaadi toodang olid tasakaalus.

Pärast lühiajalist töökatkestust umbes 30.–31. augustil jätkub filtratsioon ajavahemikus 2.–5. september 2025 sarnaste tööparameetrite juures. Sellel perioodil püsib ristvoolu kiirus ligikaudu 0,22 m/s, samas kui permeaadi eritoodang jääb umbes 15–16 l/(m²·h) vahemikku. Permeaadi osakaal püsib samuti 55–60% juures, mis näitab membraanide ühtlast toimimist mõlema filtratsiooniperioodi jooksul.

Membraanide toimimise seisukohalt tagab stabiilne ristvoolu kiirus piisava nihkepinge membraani pinnal, mis aitab piirata saasteainete kogunemist ja säilitada stabiilset hüdraulilist töörežiimi. Suhteliselt konstantsed eritoodangu väärtused kogu jälgimisperioodi jooksul viitavad sellele, et membraan suutis hoida ettenähtud tootlikkust ilma märgatava filtratsioonivõime languseta.

Kokkuvõttes kinnitab UF filtrite ristvoolu kiirus, permeaadi eritoodang ja permeaadi osakaalu stabiilsus ajavahemikus 26. august kuni 5. september 2025, et UF010 filtratsioonisüsteem töötas kontrollitud hüdraulilistes tingimustes hästi.



Joonis 20. Pilootseadme opereerimisandmed ultrafiltrimise ajal.

Esimeses piloteerimise perioodis (9.–12. september 2025) püsib TMP stabiilsena ligikaudu 2,8–3,0 baari vahemikus, samal ajal kui mooduli rõhulang (dP module) jääb suhteliselt konstantseks umbes 3,8–4,1 baari. Nendes hüdraulilistes tingimustes püsib permeaadi läbilaskevõime ligikaudu $6 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ juures, mis näitab, et membraan säilitab stabiilse hüdraulilise töö ilma märgatava tootlikkuse languseta.

Teise piloteerimise perioodi jooksul 15.–18. september 2025, toimib seade väga sarnaste hüdrauliliste parameetritega. Sellel perioodil püsib TMP ligikaudu 2,7–2,9 baari vahemikus, samas kui mooduli rõhulang jääb stabiilselt 3,7–4,0 baari. Ka selles etapis püsib läbilaskevõime väärtused ligikaudu $6 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ tasemel, kinnitades membraani stabiilset käitumist.

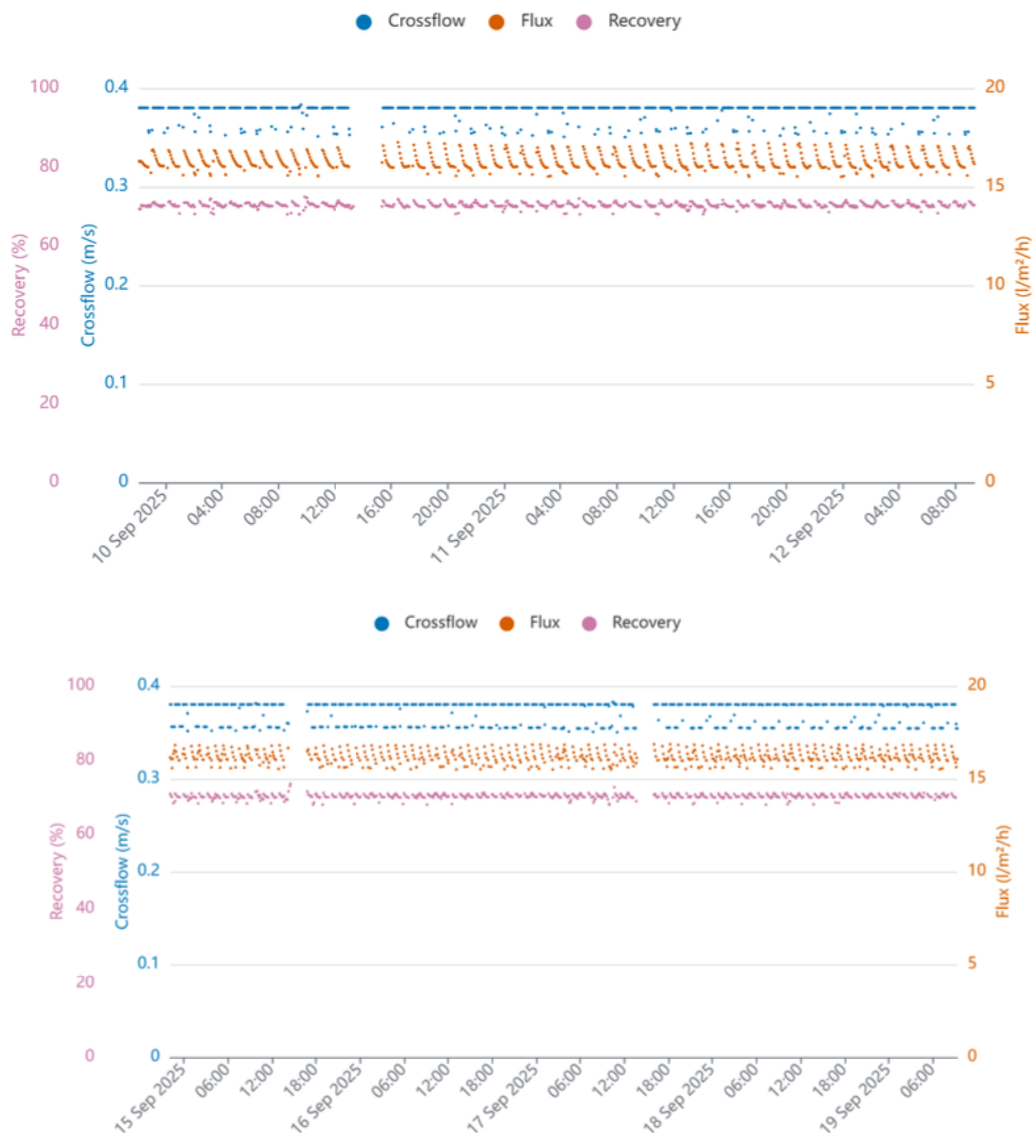
Järgnevalt analüüsitaks dNF40 membraani ristvoolu kiiruse (cross-flow), eritoodangu ja permeaadi osakaalu (permeaadi osakaal) andmeid ajavahemikus 10. september kuni 19. september 2025. Tulemused näitavad kogu uuritud filtratsiooniperioodi jooksul stabiilset tööd. Süsteem hoiab ristvoolu kiirust ligikaudu 0,34–0,37 m/s, mis viitab stabiilsele sissevoolu kvaliteedile.

Esimeses piloteerimise etapis (10.–12. september 2025) püsib permeaadi eritoodang stabiilsena umbes $15\text{--}16 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ juures, samal ajal kui permeaadi osakaal jääb ligikaudu 70–75% vahemikku.

Pärast lühiajalist katkestust filtratsiooniperioodide vahel jätkub süsteemi töö ajavahemikus 15.–19. september 2025 väga sarnaste hüdrauliliste parameetrite juures. Sellel perioodil püsib ristvoolu kiirus ligikaudu 0,35–0,38 m/s, samas kui eritoodang jääb endiselt $15\text{--}16 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ vahemikku. Permeaadi osakaal püsib umbes 70–72% juures, mis näitab töötingimuste head korduvust filtratsioonitsüklite vahel.

Tööprotsessi seisukohalt tagab suhteliselt kõrge ristvoolu kiirus piisava nihkepinge membraani pinnal, mis aitab piirata saasteainete kogunemist ning toetab stabiilset hüdraulilist käitumist. Kogu jälgimisperioodi jooksul täheldatud stabiilne permeaadi eritoodang näitab, et membraan suutis säilitada filtratsiooni tootlikkuse ilma märgatava languseta.

Kokkuvõttes kinnitavad ristvoolu kiiruse, permeaadi eritoodangu ja permeaadi osakaalu stabiilsed väärtused ajavahemikus 10.–19. september 2025, et dNF40 filtratsioonisüsteem töötas hästi kontrollitud hüdraulilistes tingimustes.



Joonis 21. Pilootseadme opereerimisandmed nanofiltrimise ajal.

Tartu linna reoveepuhastis läbiviidud piloteerimine kinnitas membraanfiltritel põhineva tehnoloogia sobivust bioloogiliselt puhastatud olmereovee järelpuhastuseks. Uuringus hinnati puhastusprotsessi, mis koosnes ketasfiltril põhinevast eelpuhastusest, millele järgnesid ultrafiltratsioon (UF010) ja nanofiltratsioon (dNF40), kasutades NX Filtration õoneskiudmembraane.

KOKKUVÕTE

Heitvee taaskasutamiseks on üldjuhul vajalik selle täiendav töötlemine. Olenevalt otstarbest kasutatakse membraanfiltratsiooni, desinfitseerimist, süvapuhasust või nende kombinatsiooni. Käesoleva uuringu raames analüüsitakse pilootkatsete abil kolme erineva filtri puhastusefektiivsuseid heitvee ja karjäärivee puhastamiseks. Tulemused on sisendiks edasisteks uuringuteks, kus leitakse erineva puhastusastmega taaskasutusveele kasutus. Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse ja arhitektuuri instituudi vee- ja keskkonnatehnika uurimisrühma teadlased viisid katsed läbi Kohtla-Järve -ja Tartu reoveepuhastis ning Aidu karjääris. Kokku tehti kolm katset, igal objektil üks katse, igaüks kestusega 1 kuu. Reoveepuhastites seadme sisendiks oli reoveepuhastite väljavool. Pilootseade võimaldas samal ajal piloteerida mikrofiltrimist (200 µm) ja ühte membraanfiltrit. Membraanidena kasutati ultra -ja nanofiltreid (vastavalt molekulaarse eraldusvõimega 800 Da ja 400 Da). Mikrofiltril on pooride suurus 0,1-3 µm, ultrafiltril pooride suurus 0,01-0,1 µm ja nanofiltril on pooride suurus 0,001-0,01 µm.

Kohtla-Järve reoveepuhastis läbi viidud membraanfiltratsiooni pilootkatsed võimaldasid hinnata tööstusliku koormusega reovee puhastamise võimalusi ning kolme membraantehnoloogia – mikrofiltratsiooni (MF), ultrafiltratsiooni (UF) ja nanofiltratsiooni (NF) – sobivust taaskasutusvee tootmiseks. Pilootkatsed toimusid perioodil 23.04.2025 – 23.05.2025.

Kõikide katsepäevade lõikes oli MF tulemuste varieeruvus äärmiselt suur, lisaks sageli negatiivseid eemaldusi (st väljundväärtus oli suurem kui sisend). UF toimis Kohtla-Järvel efektiivselt. NF membraanid tagasid pilootkatse vältel samuti stabiilse ja ühtlase töö ja kõrge puhastusefektiivsuse.

Kokkuvõttes näitasid UF membraanid pilootkatse vältel stabiilset töökindlust nii eritoodangu (flux'i) kui ka puhastusefektiivsuse osas. UF töötas üldpildis töökindlat ja energiatõhusalt, mille tööparameetrid püsisid stabiilsed ka erinevate toodangute juures.

NF oli katseperioodi jooksul kõige tõhusam ja stabiilsem tehnoloogia, tagades puhastatud vee kvaliteedi, mis sobib juba kõrgema lisandväärtusega taaskasutusviiside jaoks.

Aidu karjääri vee membraanfiltratsiooni pilootkatsed ajavahemikul 06.06–30.06.2025 viidi läbi eesmärgiga hinnata, kui hästi sobivad ultrafiltratsioon (UF), mikrofiltratsioon (MF) ja nanofiltratsioon (NF) kõrge mineraalsuse, kõrge sulfaadisisalduse ja suhteliselt madala orgaanilise koormusega karjäärivee puhastamiseks.

Kõigil Aidu katsepäevadel töötas MF ebastabiilselt. UF andis Aidu vee puhastamiselt stabiilselt hea osakeste- ja mikrobioloogia eemaldamise. NF tagas Aidu vee puhastamisel väga kõrge puhastuse taseme, täites tegelikult kõiki eeldusi taaskasutusvee tootmiseks.

Tartu reoveepuhastisse jõuab nii olme, kui ka tööstusreovesi. Puhastusprotsess on sarnane Kohtla-Järvele, kus mehaanilise puhastuse käigus eemaldatakse võõrised ja liiv ning bioloogiline puhastus viiakse läbi aktiivmudaprotsessis. Pilootkatsed viidi läbi 23.08–22.09.2025.

MF osutus pilootkatsetes ebaefektiivseks ja suure varieeruvusega. Mitmes proovipunktis ilmnes “negatiivne eemaldus”, mis tähendab, et väljundis oli teatud ainete kontsentratsioon ajutiselt kõrgem kui sisendis. UF töötas Tartus väga stabiilselt ja efektiivselt. NF andis katsete kõige kvaliteetsemad tulemused.

Kokkuvõttes näitasid piloteerimised, et membraanfiltratsiooni abil on võimalik heit – ja karjääri veest taaskasutusvett toota. Olenevalt vee kasutamise otstarbest, tuleb valida, kas ultra – või nanofiltratsioon. Mikrofiltratsioon erilist puhastusefektiivsust ei taganud, selle põhjused vajavad täiendavat uurimist, sest üldjuhul peaks see tagama >90% heljumi eemalduse. Järgmises projekti etapis kaardistatakse erinevad tootmisettevõtet, kus taaskasutusvett kasutada, mis on selle investeeringu – ja opereerimiskulud.

Summary

To reuse wastewater, it is generally necessary to treat it additionally. Depending on the purpose, membrane filtration, disinfection, tertiary treatment or a combination of these are used. Within the framework of this experimental work, the treatment efficiencies of three different filters for wastewater and quarry water treatment are analysed with the help of pilot tests. The results will serve as an input for further studies, where the use of recycled water with different levels of treatment will be found. Researchers from the Water and Environmental Engineering research group of the Department of Civil Engineering and Architecture of Tallinn University of Technology carried out experiments at the Kohtla-Järve and Tartu wastewater treatment plants and in the Aidu quarry. A total of three experiments were carried out, one experiment on each object, each lasting 1 month. In wastewater treatment plants, the input of the device was the effluent of the wastewater treatment plants. The pilot device made it possible to pilot a microfiltration (200 μm) and a membrane filter at the same time. Ultra- and nanofilters (with a molecular resolution of 800 Da and 400 Da, respectively) were used as membranes. The microfilter has a pore size of 0.1–3 μm , the ultrafilter has a pore size of 0.01–0.1 μm and the nanofilter has a pore size of 0.001–0.01 μm .

The membrane filtration pilot tests carried out at the **Kohtla-Järve** wastewater treatment plant made it possible to assess the possibilities of treating wastewater under industrial loads and the suitability of three membrane technologies – microfiltration (MF), ultrafiltration (UF) and nanofiltration (NF) – to produce reuse water. The pilot tests took place during the period 23.04.2025 – 23.05.2025. Across all test days, the variability in MF results was extremely high, with frequent

negative removals (i.e., the output value was greater than the input). UF operated efficiently in Kohtla-Järve. The NF membranes also ensured stable and uniform operation and high cleaning efficiency during the pilot test. All in all, the UF membranes showed stable reliability during the pilot test, both in terms of special production (*flux*) and cleaning efficiency. In general, UF worked reliably and energy-efficiently, the operating parameters of which remained stable even with different productions.

NF was the most efficient and stable technology during the test period, ensuring the quality of the purified water, which is already suitable for higher value-added recycling methods.

Pilot tests of membrane filtration of water in the **Aidu quarry** between 06.06 and 30.06.2025 were carried out with the aim of assessing how well ultrafiltration (UF), microfiltration (MF) and nanofiltration (NF) are suitable for the treatment of quarry water with high minerality, high sulphate content and relatively low organic load. On all the test days at Aidu, MF worked unstable. UF provided a consistently good removal of particles and microbiology from the treatment of Aidu water. NF ensured a very high level of treatment in the treatment of Aidu water, fulfilling all the prerequisites to produce recycled water.

The **Tartu** wastewater treatment plant receives both domestic and industrial wastewater. The treatment process is like that of Kohtla-Järve, where solids and sand are removed during mechanical treatment and biological treatment is carried out in an activated sludge process. The pilot tests were carried out from 23.08 to 22.09.2025. MF proved to be ineffective in pilot tests and with high variability. At several sampling points, "negative removal" occurred, meaning that the concentration of certain substances in the output was temporarily higher than in the input. UF worked very stably and efficiently in Tartu.

In conclusion, the pilots showed that membrane filtration can be used to produce recycled water from wastewater and quarry water. Depending on the purpose of using the water, you can choose between ultra or nanofiltration. Microfiltration did not ensure much cleaning efficiency, its causes require further investigation, as it should generally ensure >90% of suspended solids removal. In the next stage of the project, various production plants where recycled water can be used will be mapped, and the investment and operating costs will be examined.

LISA 1. Kohtla-Järve pilootkatsete tulemused

Parameeter	ühik	Sissevool	MF	UF	NF	MF eemaldus %	UF eemaldus %	NF eemaldus %
pH (proovivõtul)		7,5	7,4	7,3	7,4	0,9	2,3	1,8
Lahustunud hapnik (proovivõtul)	mg/l	9,2	9,7	9,3	8,6	-5,9	-1,7	6,5
Elektrijuhtivus (proovivõtul)	µS/cm	1700,0	1714,3	1350,0	1056,7	-0,8	20,6	37,8
Hägusus	NH ₄	7,2	19,3	0,6	0,5	-166,3	92,0	92,9
Hõljuvaine	mg/l	14,1	37,7	2,1	2,0	-167,7	85,1	85,8
BHT ₇	mg/l	11,7	13,9	3,3	3,0	-18,3	72,3	74,4
ÜldN	mg/l	5,2	6,8	3,0	2,8	-31,4	41,5	45,2
ÜldP	mg/l	0,4	0,8	0,0	0,0	-90,9	93,9	97,6
Üldkaredus	mg-ekv/l	11,1	12,2	8,2	4,0	-10,2	26,6	63,9
Veetemperatuur (proovivõtul)	°C	13,8	14,2	12,4	15,8	-2,2	10,2	-14,4
Clostridium perfringens (k.a eosed)	arv/100 ml	9826	14500	0,2	0,0	-47,6	100,0	100,0
Escherichia coli	arv/100 ml	40110	47939	0,0	0,0	-19,5	100,0	100,0
Enterokokid	arv/100 ml	12395	13150	0,0	0,0	-6,1	100,0	100,0
Coli-laadsed bakterid	arv/100 ml	178115	202317	0,0	0,0	-13,6	100,0	100,0

LISA 2. Aidu pilootkatsete tulemused

Parameeter	ühik	Sissevool	MF	UF	NF	MF eemaldus %	UF eemaldus %	NF eemaldus %
ÜldN	mg/l	0,4	0,4	0,2	0,2	13,4	40,7	56,0
pH (proovivõtul)		8,1	8,1	8,1	8,1	-0,2	-0,6	-0,6
Veetemperatuur (proovivõtul)	°C	17,3	17,3	17,8	17,2	-0,5	-3,1	0,6
Elektrijuhtivus (proovivõtul)	µS/cm	2730,0	2620,0	2050,0	1380,0	4,0	24,9	49,5
Hägusus	NH ₄	2,9	5,2	0,5	0,5	-79,5	82,8	82,8
Hõljuvaine	mg/l	3,7	7,0	2,7	2,0	-89,7	26,0	45,7
KHT	mg/l	2,5	2,9	1,6	1,0	-14,9	37,5	59,7

ÜldP	mg/l	0,0	0,0	0,0	0,0	-7,7	23,1	23,1
Sulfaat	mg/l	1560,0	1370,0	1125,0	205,0	12,2	27,9	86,9
Kaltsium	mg/l	522,0	497,0	415,0	87,0	4,8	20,5	83,3
Magneesium	mg/l	154,9	148,9	109,3	46,0	3,9	29,5	70,3
Üldkaredus	mg-ekv/l	38,8	37,8	29,8	8,2	2,6	23,3	79,0
Hüdrokarbonaat	mg/l	193,0	192,0	202,5	517,5	0,5	-4,9	-168,1
Coli-laadsed bakterid	arv/100 ml	306,6	1018,0	38,5	2,0	-232,0	87,4	99,3
Escherichia coli	arv/100 ml	133,0	2,8	0,0	0,0	97,9	100,0	100,0
Enterokokid	arv/100 ml	3,0	1,7	0,0	0,0	44,4	100,0	100,0
Clostridium perfringens (k.a eosed)	arv/100 ml	22,4	676,8	1,0	0,0	-2921,4	95,5	100,0

LISA 3. Tartu pilootkatsete tulemused

Parameeter	ühik	Sissevool	MF	UF	NF	MF eemaldus %	UF eemaldus %	NF eemaldus %
Hõljuvaine	mg/l	7,50	8,98	2	2	-19,8	73,3	73,3
Hägusus	NHÜ	7,44	5,84	0,5	0,5	21,5	93,3	93,3
KHT	mg/l	151,83	121,08	21,75	15,5	20,3	85,7	89,8
ÜldN	mg/l	8,82	10,28	9,725	7,825	-16,5	-10,3	11,2
ÜldP	mg/l	0,34	0,40	0,2275	0,1275	-17,8	33,3	62,6
Sulfaat	mg/l	95,92	105,00	52	4,875	-9,5	45,8	94,9
Hüdrokarbonaat	mg/l	500,83	503,33	427,5	387,5	-0,5	14,6	22,6
Baarium (Ba)	µg/l	84,17	85,58	74	50,75	-1,7	12,1	39,7
Arseen (As)	µg/l	1,30	1,33	0,8025	0,2275	-2,4	38,2	82,5
Kaadmium (Cd)	µg/l	0,02	0,02	0,0115	0,01	-24,4	29,9	39,1
Kroom (Cr)	µg/l	1,03	1,54	0,365	0,05	-49,8	64,4	95,1
Nikkel (Ni)	µg/l	10,46	9,97	2,4	0,2725	4,7	77,1	97,4
Plii (Pb)	µg/l	0,30	1,03	0,128	0,0675	-243,1	57,2	77,4
Vask (Cu)	µg/l	3,23	7,30	1,5	0,2825	-125,8	53,6	91,3
Tsink (Zn)	µg/l	96,50	118,83	46,5	3,3	-23,1	51,8	96,6
Kaltsium (Ca)	mg/l	112,00	113,08	95,75	72,25	-1,0	14,5	35,5

Magneesium (Mg)	mg/l	34,67	35,17	29,5	22,75	-1,4	14,9	34,4
Mangaan (Mn)	µg/l	105,58	105,00	79,25	62,75	0,6	24,9	40,6
Raud (Fe)	µg/l	254,17	260,83	93	20	-2,6	63,4	92,1
Elavhõbe (Hg)	µg/l	0,02	0,02	0,015	0,015	0,0	0,0	0,0
Clostridium perfringens (k.a eosed)	arv/100 ml	1172,50	950,83	0	0	18,9	100,0	100,0
Escherichia coli	arv/100 ml	68937,50	54125,83	0	0	21,5	100,0	100,0
Coli-laadsed bakterid	arv/100 ml	375041,25	295219,17	0	0	21,3	100,0	100,0
Enterokokid	arv/100 ml	10000,00	9783,33	0	0	2,2	100,0	100,0