

Kierto-hanke, TP5 koe 1

MBBR-EC -koeajo Jätekukon tasausaltaan jätevedellä

Raportti: Olli Torvinen, Savonia-ammattikorkeakoulu Oy

Koeajon toteutus: Olli Torvinen, Juha Hämäläinen, Jari Sonninen, Tero Kuhmonen ja Ashraf Yousefi



**Euroopan unionin
rahoittama**
NextGenerationEU

Sisällys

1. Koeajon toteuttajat ja tavoitteet	3
1.1. Koeajon toteuttajat	3
1.2. Koeajon tavoitteet ja toimenpiteet	3
2. MBBR lyhyesti	4
3. Tutkimuslaitteisto, tutkittava jätevesi ja analyysit	5
3.1. Tutkimuslaitteisto	5
3.2. Tutkittava jätevesi	6
3.3. Analyysit	6
4. Koeajojen toteutus ja tulokset	8
4.1. Toteutus	8
4.1.1. 1. vaihe: Koeajon valmistelu ja nitrifikaation käynnistys	8
4.1.2. 2. vaihe: Nitrifikaatio + EC-prosessi	9
4.1.3. 3. vaihe: Nitrifikaatio + denitrifikaatio	9
4.2. Tulokset	10
4.2.1. Lämpötila	10
4.2.2. Ammoniumtyppi	11
4.2.3. Nitraattityppi	12
4.2.4. Kokonaistyyppi	13
4.2.5. Muita prosessin toimintaan vaikuttavia tekijöitä	14
4.2.5.1. Kuormitus	14
4.2.5.2. pH	15
4.2.5.3. Liukoinen happi	15
4.2.5.4. Käytetty laitteisto	15
4.2.6. Tulosten skaalaus Jätekuonon jätevesien virtaamaan	16
5. Yhteenveto ja johtopäätökset	17
Lähdeluettelo	18

1. Koeajon toteuttajat ja tavoitteet

1.1. Koeajon toteuttajat

MBBR-EC -koeajo (Moving Bed Bio Reactor-Electro Coagulation) toteutettiin osana Kierto-hanketta (Jätekeskuksen vesien ravinteiden talteenoton paikallinen symbioosi). Työpakettin 5 (TP5 koe 1) koeajon suunnittelu MBBR:n osalta tehtiin yhteistyössä Jätekukko Oy:n (Jätekukko) ja Savonia-ammattikorkeakoulu Oy:n (Savonia) välillä. Varsinaisen MBBR-koeajon toteutuksesta ja raportoinnista vastasi Savonia.

Sähkösaostus (EC) -koeajon suunnittelu toteutettiin yhteistyössä edellä mainittujen toimijoiden sekä EC-toimittajan BioBros Oy:n kanssa. EC-koeajon toteutuksen ja raportoinnin hoiti BioBros Oy. EC-koeajoista on olemassa erillinen EC-toimittajan tekemä raportti, joten tässä raportissa käsitellään TP5 koe 1 pääasiassa MBBR-näkökulmasta.

1.2. Koeajon tavoitteet ja toimenpiteet

MBBR-koeajon päätavoitteina oli todentaa, että saatiin nitrifikaatioprosessi toimimaan ja ylläpidettyä sitä vaihtelevilla jäteveden pitoisuuskuormilla sekä mahdollisuuksien mukaan myös matalissa jäteveden lämpötiloissa. Tarkoituksena oli nitrifikaation avulla muuttaa jäteveden sisältämä ammoniumtyppi nitraattityppi muotoon, jotta sitä voitaisiin jatkokäsitellä sähkösaostuslaitteistolla ja nähdä onko kyseisellä teknologialla potentiaalia ravinteiden talteenottamisessa.

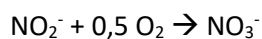
Kierto-hankkeen ideana on ravinteiden talteenoton symbioosin luominen Jätekukon alueelle ja näin ollen koetoiminnoilla pyrittiin tätä ideaa todentamaan omalta osaltaan. Todettiin kuitenkin, että kokeillaan myös koko MBBR-prosessin toimivuutta tasausaltaan jäteveden käsittelyssä saman koeajon lopussa, MBBR-EC -koeajon jälkeen, vaikka toimivassa MBBR-prosessissa jäteveden sisältämä typpi poistuu typpikaasuna taivaalle. Tähän päädyttiin siksi, että tämän todentaminen ei aiheuttanut juurikaan lisäkuluja, koska tarvittava ylösajettu prosessilaitteisto oli jo valmiina käyttökunnossa kohteessa.

2. MBBR lyhyesti

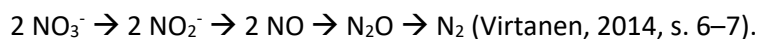
MBBR-teknologian etuina pidetään pienempää prosessitilavuuden tarvetta, mahdollisuutta jälkiasennukseen olemassa oleviin laitokseen, pienempää liete-/kiintoainepitoisuutta (ainakin vs. aktiivilieteprosessi) ja lähtökohtaisesti tehokkaampaa typenpoistoa. Teknologia perustuu reaktoreissa vapaasti liikkuviin kantoainekappaleisiin, jotka tarjoavat typen poistoon osallistuville mikrobeille suojattua kasvupinta-alaa. Suojattu ala pitää mikrobit paremmin reaktoreissa ja näin ollen parantaa puhdistusprosessin toimivuutta ja tehokkuutta. MBBR-teknologialla saavutetaan yleisesti ottaen tehokkaampi nitrifikaatio-denitrifikaatio -prosessi kylmemmissäkin jätevesissä kuin esimerkiksi perinteisellä aktiivilieteprosessilla (Hyxo, ei pvm.).

MBBR-prosessi voi olla joko kokonaisuudessaan yhdessä reaktorissa tai vaihtoehtoisesti jaettuna eri reaktoreihin nitrifikaatio- ja denitrifikaatioprosessien osalta. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa prosessin hallinta on helpompaa, kun hapellinen ja anoksinen vaihe ovat eri reaktoreissa. MBBR-prosessissa jäteveden sisältämä pääsääntöisesti ammonium muodossa oleva typpi saadaan muutettua nitrifikaatiovaiheessa mikrobitoiminnan ja reaktorin ilmastuksen tuoman hapen vaikutuksesta vaiheittain nitraattitypeksi. Denitrifikaatiovaiheessa nitraattityppi muuttuu puolestaan vaiheittain typpikaasuksi, poistuen prosessista taivaalle. Denitrifikaation toiminta edellyttää vähähappisia olosuhteita sekä yleensä tarvitaan ulkopuolista hiilen lähdettä. Typen mikrobiologinen poisto tapahtuu siis tyypillisesti nitrifikaatio-denitrifikaatio -prosessin avulla alla esitettyjen reaktioiden mukaisesti:

Nitrifikaatio:



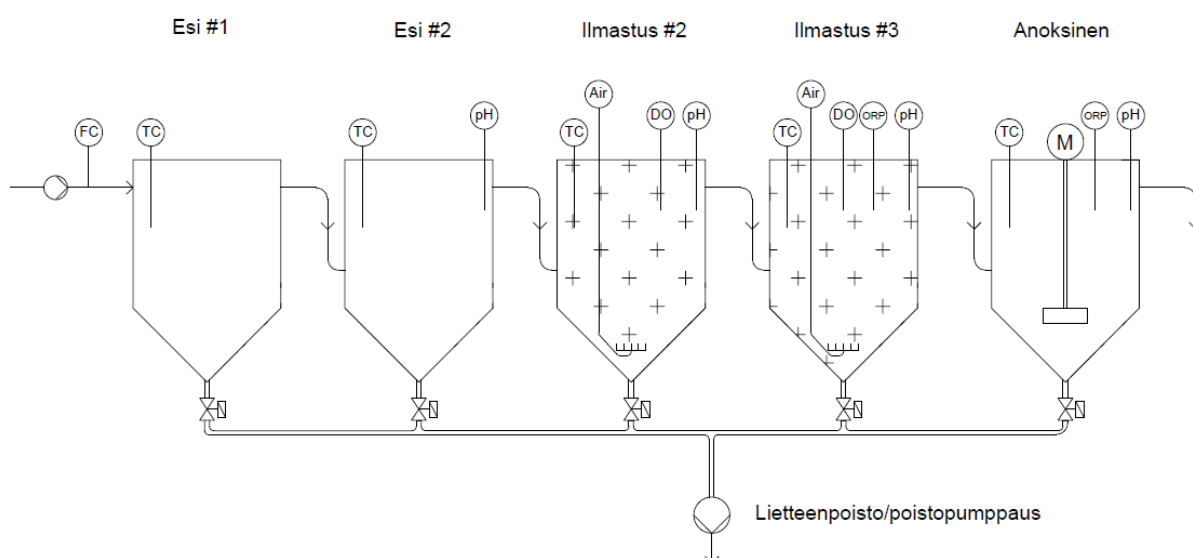
Denitrifikaatio:



3. Tutkimuslaitteisto, tutkittava jätevesi ja analyysit

3.1. Tutkimuslaitteisto

Savonian MBBR-laitteisto oheislaitteineen ja automaatioineen on asennettu 12 metrin siirrettävään merikonttiin. Kontti on jaettu väliseinällä kahteen osaan, eli operointi- ja reaktoritiloihin. Operointitilassa on esimerkiksi tilat kenttäanalyysien tekemiseen, kemikaalien annostelupumput ja automaation ohjauspaneeli. Reaktoritilassa on viisi tilavuudeltaan noin 1 m³ reaktoria, jotka ovat muokattavissa halutun prosessin mukaan. Osa reaktoreista on varustettu ilmastimilla, osa sekoittimilla ja kaikissa on valikoituja online-mittauksia. Osa online-mittauksista tallentuu halutulla intervallilla muistitikulle. Koeajossa käytetty kokoonpano oli kuvan 1 mukainen. Kaksi ensimmäistä reaktoria vasemmalta toimivat virtaaman tasauksessa ja jäteveden esilämmittämisessä. Ilmastusreaktorit toimivat prosessin nitrifikaatioreaktoreina, joista ensimmäisessä tapahtui enemmän orgaanisen aineen ja vähemmän ammoniumtyyppien hapettumista sekä jälkimmäisessä enemmän ammoniumtyyppien hapettumista. Molemmat reaktorit täytettiin koeajon alussa noin 400 litralla kantoainekappaleita, joka vastasi noin 40 % täyttöastetta. Näiden kantoainekappaleiden tuoma aktiivinen pinta-ala oli noin 320 m²/reaktori. Ilmastusreaktoreihin lisättyjä kantoainekappaleita oli kyllästetty jo etukäteen Jätekuon tasausaltaan jätevedellä, laittamalla niitä IBC-kontteihin altaan reunalle (6.1.2024) ja ajamalla niiden lävitse tasausaltaan jätevettä. Anoksinen reaktori otettiin käyttöön vasta myöhemmässä vaiheessa, kun sähkösaostuskokeet oli suoritettu loppuun. Anoksinen reaktoriin lisättiin noin 250 litraa kantoainekappaleita ja metanolin annostelu lisähiilen lähteeksi, jotta saatiin denitrifikaatiovaihe toimimaan.



Kuva 1. MBBR-prosessikaavio.

3.2. Tutkittava jätevesi

Koeajossa käytettiin Jätekuon tasausaltaan jätevettä, joka voidaan jakaa kahteen ryhmään: jätetäytöltä tuleviin suotovesiin ja jätekeskustoiminnoista tuleviin hulevesiin. Talviaikaan muodostava jätevesi on pääasiassa suotovettä, koska hulevesiä ei talvella muodostu. Jätevesi sisältää tyyppeä pääasiassa ammonium muodossa. MBBR-laitteistolle tulevan jäteveden ammoniumpitoisuudet vaihtelivat koeajon aikana noin 40–172,5 mg/l välillä. Fosforipitoisuudet vaihtelivat noin 0,7–3,5 mg/l välillä. Orgaanisen aineen määrä vaihteli kemiallisena hapenkulutuksena (COD) mitattuna noin 145–610 mg/l välillä sekä orgaanisena kokonaishiilenä (TOC) mitattuna noin 55–200 mg/l välillä. Laitteistolle tulevan jäteveden lämpötila vaihteli koeajon aikana välillä 6,4–20,8 °C.

3.3. Analyysit

Prosessin toimivuutta arvioitiin koeajon aikana tehtyjen analyysien avulla. Analyysit tehtiin käsimittauksilla pilottilaitteistolla sekä Savonian ympäristötekniikan laboratoriossa Hachin spektrofotometrisillä LCK-testeillä, hiili-typpi-analysointilaitteilla (TOC/TN) sekä atomiabsorptiospektrometrillä (AAS). Koeajon aikana analyysia tehtiin yhdestä kahteen kertaa viikossa kolmesta näytestä. Mittaustuloksia on tulevasta jätevedestä ja molemmista ilmastusreaktoreista aina 17.3.2024 asti, jonka jälkeen ensimmäinen ilmastusreaktori jätettiin pois analyysista ja sen tilalle otettiin anoksinen reaktori. Näin tehtiin, koska ei haluttu kasvattaa näytestä määrää koeajon edetessä. Tehdyt analyysit on lueteltu alla:

- pH
- lämpötila (°C)
- liukoinen happi (mg/l)
- sähkönjohtavuus (µS/cm)
- ORP (mV)
- ammoniumtyppi (NH₄-N, mg/l)
- nitraattityppi (NO₃-N, mg/l)
- nitriittityppi (NO₂-N, mg/l)
- kokonaisfosfori (PO₄-P, mg/l)
- kemiallinen hapenkulutus (COD, mg/l)
- orgaaninen kokonaishiili (TOC, mg/l)
- kokonaistyyppi (TN, mg/l)
- kokonaismetallit:
 - o kupari (mg/l)
 - o kadmium (mg/l)
 - o sinkki (mg/l)
 - o lyijy (mg/l)
 - o rauta (mg/l)
 - o kromi (mg/l)
- liukoiset metallit:

- kupari (mg/l)
- kadmium (mg/l)
- sinkki (mg/l)
- lyijy (mg/l)
- rauta (mg/l)
- kromi (mg/l).

Sama analyysipaletti teetettiin pariin kertaan koeajon aikana ulkopuolisessa laboratoriossa, jotta voitiin vertailla saatujen mittaustulosten paikkansa pitävyyttä.



4. Koeajojen toteutus ja tulokset

4.1. Toteutus

Koeajo toteutettiin välillä 23.10.2023-3.6.2024 (yhteensä noin 31 koeajoviikkoa), sisältäen kaikki toiminnot aloituksesta lopetukseen. Koeajo voidaan jakaa karkeasti kolmeen vaiheeseen, joista ensimmäisessä vaiheessa pyrittiin saamaan nitrifikaatio toimimaan mahdollisimman hyvin, mutta kuitenkin sellaisella tasolla, että laitteistolta EC-laitteistolle lähtevä jätevesi sisältäisi riittävästi nitraattityppeä sähkösaostuksen toimivuuden osoittamiseksi. Toisessa koeajon vaiheessa ajettiin nitrifikaatiota yhdessä EC-laitteiston kanssa ja viimeisessä vaiheessa MBBR-EC -koeajon jälkeen nitrifikaatioon yhdistettiin denitrifikaatio, jolla pyrittiin osoittamaan koko MBBR-prosessin toimivuus tasausaltaan jätevedellä Jäteukon tulevaisuudessa mahdollisesti käyttöönottamia ravinteiden talteenotto-/puhdistusratkaisuja varten. Jäteukolla on hyvä olla näkemystä myös jäteveden puhdistuksen näkökulmasta, että miten he voivat lupahehtonsa toteuttaa, mikäli talteenoton ratkaisut eivät niitä vielä nykyisellään täytä.

4.1.1. 1. vaihe: Koeajon valmistelu ja nitrifikaation käynnistys

Koelaitteisto siirrettiin Jäteukon tasausaltaalle 23.10.2023, jolloin laitteiston reaktoreista neljä ensimmäistä (kuva 1) täytettiin altaan jätevedellä. Molempiin ilmastusreaktoreihin täytettiin kantoainekappaleita 40 % täyttöastetta vastaavat määrät. Käytetyillä kantoainekappaleilla tämä vastasi 320 m² pinta-alaa reaktoria kohden. Ilmastusreaktoreiden ilmastimet asetettiin toimintaan ja reaktorien lämmittimet säädettiin asetusarvoon 20 °C. Tasausaltaan jäteveden virtaama laitteiston läpi asetettiin 100 l/h, joka vastasi kaksivaiheisen ilmastuksen (yhteistilavuus 2 000 litraa) viipymäaikana 20 tuntia.

25.10.2023 haettiin Lehtoniemestä, eli Kuopion veden jätevedenpuhdistamolta, noin 150 litraa aktiivilietettä molempiin ilmastusreaktoreihin. Tämän niin sanotun ymppäyksen tarkoituksena on tuoda mikrobiologiseen typenpoistoon tarvittavia mikrobeita koelaitteiston reaktoreihin. Ensimmäiseen ilmastusreaktoriin lisättiin pH-mittauksella ohjattu kalkinsyöttö, jotta saadaan pidettyä riittävä alkaliteetti ja sitä kautta pH-taso nitrifikaatiossa. Nitrifikaatio kuluttaa toimiessaan veden alkaliteettia, jolloin pH voi laskea. Mikäli pH laskee liian alas, voi mikrobitoiminta hidastua tai lakata jopa kokonaan. Melko pian pH:n säätö vaihdettiin kalkki natriumhydroksidiksi käytännön paremman riittävyys vuoksi. Koeajon aikana kylläistä kalkkiliuosta kului noin 110 litraa ja natriumhydroksidia noin 1,5 litraa, eli prosessi puskuroi pääsääntöisesti itseään hyvällä tasolla.

Prosessin toimivuutta seurattiin läpi koeajon kappaleessa 3.3 listatuilla analyysillä. Toisin sanoen haluttiin nähdä, että ammoniumtypen pitoisuudet laskivat mahdollisimman lähelle 0 mg/l ja vastaavasti, että nitraattityypen pitoisuudet nousivat mahdollisimman korkealle. Koeajoviikolla 3 (10.11.2023) todettiin, että nitrifikaation ammoniumreduktiot olivat yli 90 %, jolloin päätettiin nostaa prosessiin tulevan jäteveden virtaamaa 250 l/h kuormituksen kasvattamiseksi ja viipymääjan lyhentämiseksi 8 tuntiin kaksivaiheisessa ilmastuksessa.

Kuormituksen kasvattaminen osoitti hyvin nopeasti, että prosessin mikrobit eivät pystyneet enää muuttamaan ammoniumtyyppiä aiemmalla virtaamalla saavutetulla tasolla. Kuormituksen nosto oli siis liian suuri, kun huomioi, että talvea kohden mennessä tasausaltaan jäteveden pitoisuudet konsentroituivat. Tämä johtui siitä, että talvella ei juuri virtaa tasausaltaan jätevettä laimentavia hulevesiä, vaan käytännössä jätevesi muodostuu pääasiassa jätetäytön suotovesistä. Virtaamaa ei kuitenkaan vielä laskettu tässä vaiheessa koeajoa, koska aikataulupaineiden vuoksi EC-koeajo haluttiin saada toimintaan ja kyseistä prosessia oli helpompi ajaa isommalla virtaamalla. Vaikkakin ammoniumreduktiot laskivat virtaaman noston myötä noin 30 %, muodostui nitraattityyppiä riittävästi EC:n toimivuuden osoittamiseksi.

4.1.2. 2. vaihe: Nitrifikaatio + EC-prosessi

EC-koeajot toteutettiin yhdessä Savonian MBBR-laitteiston kanssa siten, että EC:n syötevesi oli nitrifikaation läpikäynyttä jätevettä. EC-koeajoja ajettiin yhteensä 15 kappaletta keräämällä yhtä ajoa varten MBBR:n jälkeistä jätevettä isompi määrä välisäiliöön ja ajamalla kyseisestä välisäiliöstä jätevettä EC:lle MBBR-prosessia isommalla virtaamalla. Koeajon 2. vaihe alkoi 6. koeajoviikolla. MBBR-EC -koeajot toteutettiin aikavälillä 30.11.2023-14.2.2024.

Nitrifikaation toimivuus oli 2. vaiheen aikana vaihtelevaa. Koeajoviikolla 10 (5.1.2024) päätettiin laskea syöttövirtaamaa 125 l/h, koska virtaaman noston jälkeen ammoniumreduktiot eivät nousseet kuuden koeajoviikon aikana kuin noin 10 % (ammoniumreduktio oli keskiarvoisesti noin 40 %). Virtaamaa laskemalla ja sitä kautta viipymäaikaa lisäämällä (kaksivaiheinen ilmastus: 16 tuntia), pyrittiin mikrobeille antamaan enemmän aikaa jäteveden ammoniumtyypen käsittelyyn. Virtaaman laskulla kompensoitiin myös tasausaltaan edelleen kohoavia pitoisuuksia, jotka saattoivat häiritä prosessin toimintaa. Virtaaman pienentämisellä havaittiin melko pian ammoniumreduktioiden selvä parantuminen.

Jäteveden tulovirtaama pidettiin samana loppu 2. vaiheen ajan, mutta samalla havaittiin mittauksissa, että jäteveden ammoniumpitoisuudet (ja oletettavasti myös muut mahdolliset prosessia haittaavat pitoisuudet) nousivat edelleen. Tämä johtui siitä, että tasausaltaan jätevesi vaihtui kylmimmän ajan aikana pikkuhiljaa enemmän suotovedeksi. 2. vaiheen aikana keskimääräinen ammoniumreduktio oli noin 65 %, mutta reduktiot laskivat koko ajan alemmaksi vaiheen alusta loppua kohden. Koska ammoniumreduktiot olivat 2. vaiheen aikana, varsinkin alkupuolella, kohtuullisella tasolla, päätettiin tulevan jäteveden lämmityksen asetusarvo laskea vaiheen loppupuolella (1.2.2024) 15 °C, jotta ehdittäisiin koeajaa viileämpiä jätevesiä ennen kevään tuloa. Vaikka ammoniumreduktiot laskivat lämpötilojen pudotuksen myötä, pudotettiin lämpötiloja aikataulu syistä vielä 16.2.2024 10 °C ja lämmitykset poistettiin kokonaan 1.3.2024. Lämpöjen laskemisen aikana ammoniumreduktiot laskivat noin 30 %, eli tasolle noin 40 %.

4.1.3. 3. vaihe: Nitrifikaatio + denitrifikaatio

Koeajon 3. vaihe kesti noin 10 viikkoa. Denitrifikaatioreaktori (kuva 1, Anoksinen reaktori) otettiin mukaan 18.3.2024, ajamalla reaktori koko prosessin läpikäynyttä jätevettä ja lisäämällä siihen noin

250 litraa uusia (ympäämättömiä) kantoainekappaleita. Virtaama pidettiin 2. vaiheen lukemassa, eli 125 l/h. Koska denitrifikaatio on anoksinen prosessi, ei siihen tarvitse tuoda erikseen liukoista happea. Ilmastusta ei voitu siis käyttää varmistamaan kantoainekappaleisiin kiinnittyvien mikrobien ja käsiteltävän jäteveden välistä, mahdollisimman hyvää kontaktia, vaan tähän käytettiin reaktorissa olevaa sekoitinta. Denitrifikaation mikrobit tarvitsevat usein ulkoisen hiilen lähteen, jotta ne toimivat optimaalisesti. Tämän vuoksi reaktorille tulevaan linjaan syötettiin metanolia 27.3.2024 alkaen ja syötön määrä tuplattiin vielä 5.4.2024, jotta varmistuttiin riittävästä hiilen määrästä anoksisessa vaiheessa. Koeajon aikana ei metanolin määrä pyritty optimoimaan, vaan sitä syötettiin pienellä ylivirtaamalla sen riittävyyden varmistamiseksi.

Reaktoreiden lämmitykset kytkettiin päälle kolmannella viikolla 3. vaiheen alusta laskien. Tällä pyrittiin nopeuttamaan denitrifikaation käynnistymistä, koska lämmön nousu tunnetusti aktivoi mikrobeja. Asetusarvoksi laitettiin 20 °C 2.4.2024. Nitraatin reduktioissa havaittiin selvää nousua 3. vaiheen viikolla 4, jolloin nitraattireduktion todettiin olleen reilu 60 %. Eli tehdyillä toimenpiteillä saatiin denitrifikaatio käynnistymään nolasta kohtuulliselle tasolle noin neljässä koeajoviikossa. Parin seuraavan viikon aikana reduktiot nousivat yli 95 %, jonka jälkeen päätettiin laskea prosessilämpötilaa kahdessa osassa ensin 15 °C ja sitten 10 °C (30.4.2024 ja 8.5.2024). Lämpötilojen laskemisesta huolimatta nitraattireduktiot pysyivät pääsääntöisesti yli 90 %.

Ammoniumreduktiot olivat 3. vaiheen aikana keskimääräisesti noin 82 %, ollen kuitenkin useamman koeajoviikon ajan lähes 100 %. Tulevan jäteveden ammoniumpitoisuudet laskivat reilusti mittausten mukaan 18.3.2024 alkaen, johtuen sulamisvesien tuomasta laimeampien jätevesien lisääntymisestä. Kyseisestä päivästä alkaen jäteveden ammoniumpitoisuus oli keskimäärin noin 70 mg/l. Poikkeuksena oli 3. vaiheen viikko 9, jolloin jätetäytöstä reilun vuorokauden aikana isolla virtaamalla purkautunut jätevesi toi tasausaltaaseen isompaa kuormitusta. Purkaus johtui todennäköisesti kiintoaine- ja/tai jääpadon murtumisesta jätekasan sisällä. Tasausaltaaseen lyhyessä ajassa purkautunut suotovesi nosti ammoniumpitoisuudet joksikin aikaa yli 140 mg/l, mikä näkyi myös hetkellisesti puoliintuneissa ammoniumreduktioissa. Tasausaltaan jäteveden pitoisuudet palasivat noin viikossa takaisin purkausta edeltävälle tasolle, ja havaittiin, että myös nitrifikaatiotehokkuus oli palautunut yli 90 % tasolle.

4.2. Tulokset

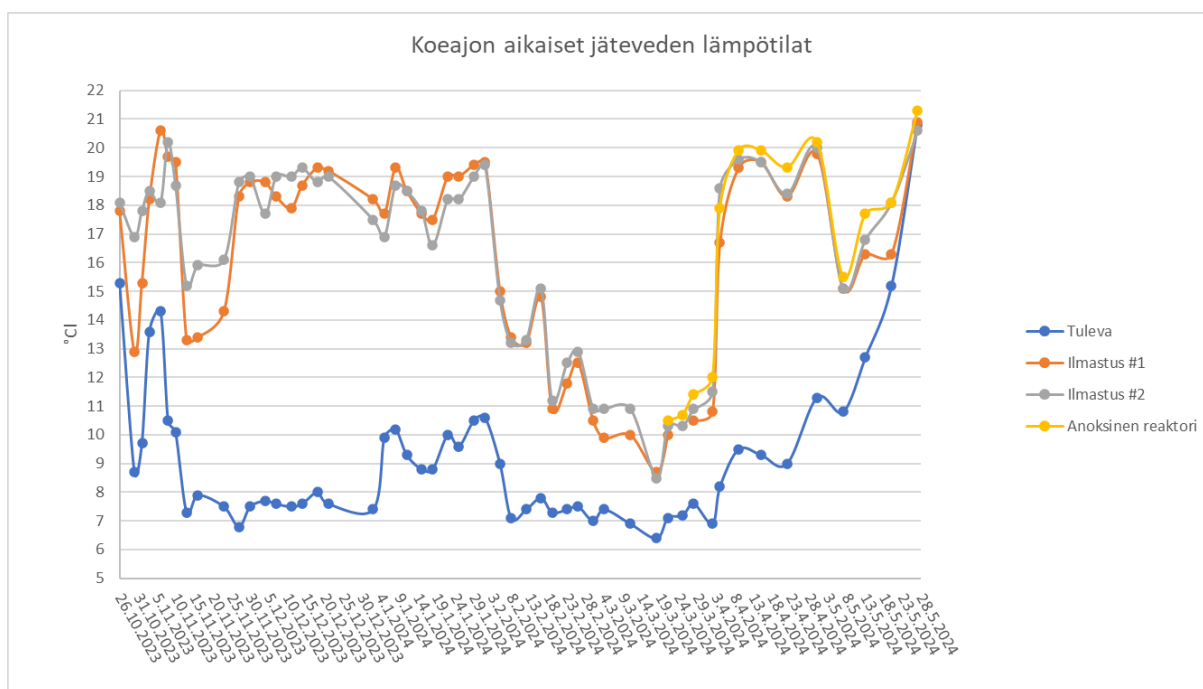
Alla on esitetty MBBR-koeajon oleelliset tulokset, eli lämpötilan, ammoniumin, nitraatin, kokonaistypen osalta. Lisäksi tuloksissa on käsitelty joitakin muita koeajoon vaikuttavia tekijöitä.

4.2.1. Lämpötila

Lämpötilalla on paljon vaikutusta, kun puhutaan mikrobiologisten prosessien toiminnasta. Koeajossa tavoitteena oli mahdollisuuksien mukaan tarkastella myös lämpötilan vaikutusta prosessin toimivuuteen, koska jätevedet ovat kylmiä suurimman osan vuodesta Suomessa. Kuvassa 2 on esitetty koeajon aikaiset eri vaiheiden lämpötilat. Tulevan jäteveden lämpötila oli alimmillaan 6,4 °C. Tätä alemmaksi se ei mennyt talvella, koska jätetäytöstä tuleva suotovesi toi oletettavasti

hieman lämpöä mukanaan tasausaltaaseen. Tuloksista nähdään, että reaktoreita lämmitettiin suurimman osan koeajosta, koska jäteveden vaihtelevat pitoisuudet tuottivat riittävästi haasteita prosessin toimintaan ilman matalamman lämpötilan mikrobitoiminnan heikentävää vaikutusta. 2. vaiheen lopussa ja 3. vaiheen alussa kävivät lämpötilat tarkoituksella lämmitysten pois kytkemisen johdosta reaktoreissa alimmillaan noin 8,5 °C, mutta pääasiassa ne olivat koeajon aikana yli 15 °C. Lämpötilalla ei olisi siis pitänyt olla koeajon aikana prosessia heikentävää vaikutusta, koska nitrifikaatiotehokkuuden pitäisi olla 15 °C vielä noin 50 % siitä mitä se on optimaalisella 28–32 °C alueella (Gerardi, 2002, s. 115).

Kylmempien jätevesien vaikutusta ei siis päästy/ehditty tässä koeajossa todentamaan riittävän pitkiä aikoja, jotta MBBR-prosessin toimivuutta voitaisiin siitä näkökulmasta luotettavasti arvioida.



Kuva 2. Koeajon aikaiset jätevesien lämpötilat.

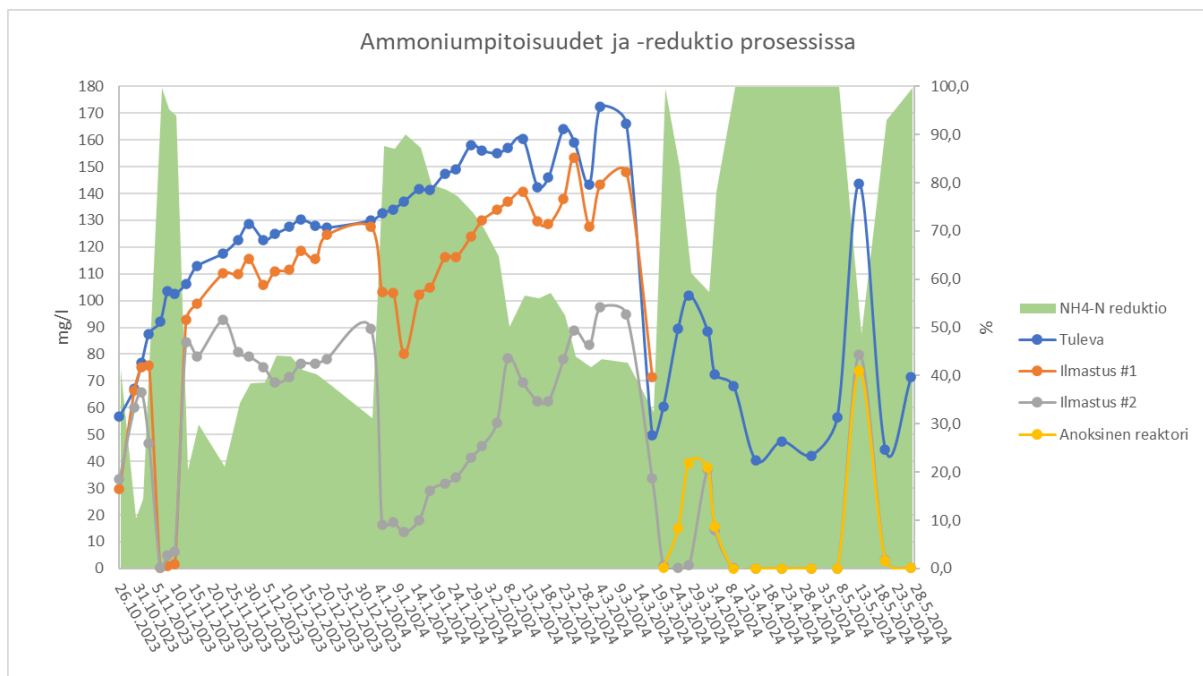
4.2.2. Ammoniumtyppi

Kuten aiemmin todettiin, oli tasausaltaan jäteveden sisältämä tyyppi pääasiassa ammonium muodossa ja sitä pyrittiin muuttamaan mikrobiologisella prosessilla mahdollisimman hyvin nitraatiksi jatkokäsittelyä varten. Tässä onnistuttiin kohtuullisesti, koska koko koeajon keskiarvoinen ammoniumreduktio oli 61,9 %. Kuvan 3 tuloksista nähdään, että tulevan jäteveden ammoniumpitoisuudet kasvoivat koko talvikauden ajan yli 170 mg/l, laskien taas keväällä alemmalle < 100 mg/l tasolle sulamisvesien myötä. Tuloksista nähdään myös, että koeajon 1. vaiheen aikana pienemmällä tulovirtaamalla päästiin jo erinomaisiin reduktioihin, jotka puolestaan putosivat reilusti tulovirtaaman nousun myötä, joten 1. vaiheen keskimääräiseksi ammoniumreduktioksi muodostui noin 46 %. Voidaankin todeta, että nitrifikaatio käynnistyi käytetyillä prosessiasetuksilla ja valmiiksi jätevedellä kyllästetyillä kantoainekappaleilla varsin nopeasti, eli kolmessa koeajoviikossa.



Koeajon 2. vaiheen aikana ammoniumpitoisuudet nousivat tasaisesti ylemmäksi (kuva 3). Reduktiot vaihtelivat puolestaan tulovirtaaman ja jäteveden pitoisuuksien muutosten myötä hyvältä tasolta välttävälle tasolle. Keskimäärin ammoniumreduktio oli 2. vaiheen aikana noin 61 %. Nitrifikaatio saatiin näistä huolimatta toimimaan 1. ja 2. vaiheen aikana sellaisella tasolla, että prosessissa muodostui riittävästi nitraattia EC-laitteiston potentiaalin osoittamiseksi typen poistossa. Kuten erillinen EC-raportti kertoo, ei EC-prosessia saatu toimimaan typen poistossa, vaikkakin sen potentiaali oli erinomainen esimerkiksi orgaanisen aineen poistamiseen.

Kuvasta 3 nähdään, että 3. vaiheen aikaiset ammoniumreduktiot olivat pääasiassa erinomaisella tasolla, eli yli 90 %. Reduktiot kasvoivat reilusti heti 3. vaiheen alusta pääasiassa siksi, että tulevan jäteveden ammoniumpitoisuus putosi reilusti sulamisvesien myötä. 3. vaiheen tuloksista nähdään myös selkeästi kahteen kertaan nopeasti kohoavien pitoisuuksien vaikutus reduktioihin, koska mikrobit eivät kykene sopeutumaan pitoisuuksien nousuihin riittävän nopeasti, vaan tarvitsevat siihen yleensä ottaen enemmän aikaa. 3. vaiheen keskimääräinen ammoniumreduktio oli parista pudotuksesta huolimatta varsin hyvä eli noin 82 %.



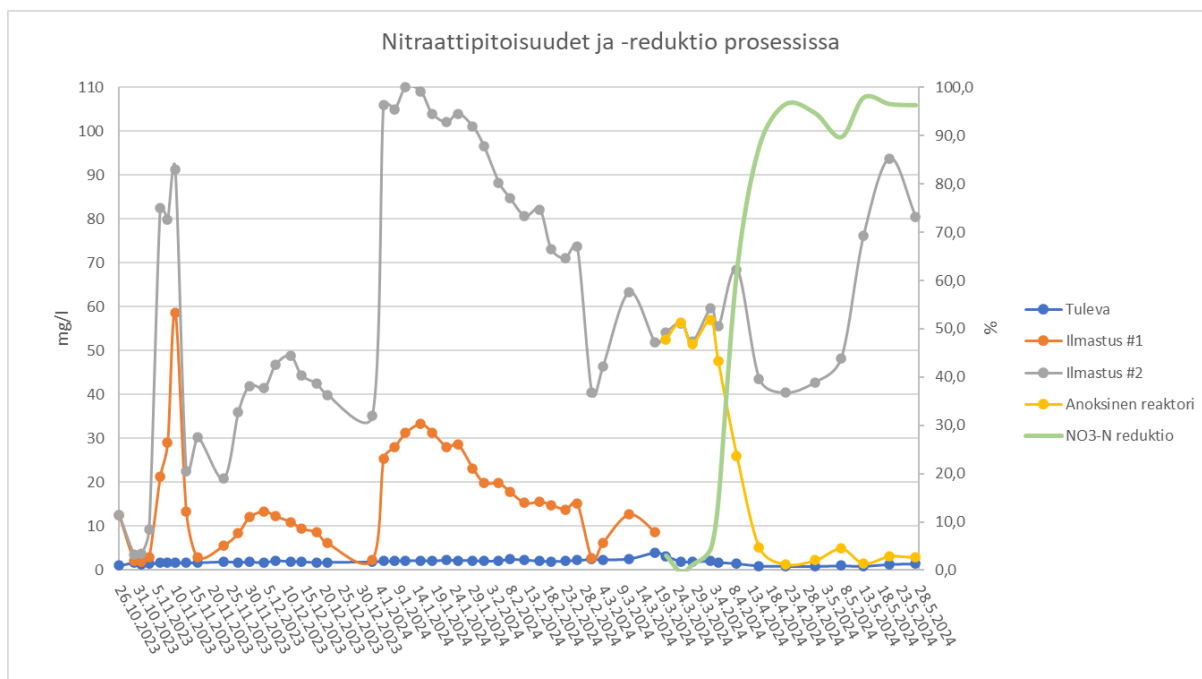
Kuva 3. Ammoniumtypen pitoisuudet ja -reduktiot koeajon aikana.

4.2.3. Nitraattityppi

Jätekukon tasausaltaan jätevesi sisältää lähtökohtaisesti hyvin vähän nitraattityppeä (keskiarvoisesti < 2 mg/l). Koeajossa nitraattityppeä muodostui nitrifikaation mikrobien toiminnan myötä, joka on nähtävissä kuvasta 4, kun vertaa tulevan ja ilmastus #2 nitraattityypen pitoisuuksia. Nitrifikaatio toimi kohtuullisesti läpi koeajon, mutta käytännössä ammoniumtyppi muuttui lähes kokonaan nitraattitypeksi vasta koeajon 3. vaiheen aikana. Koeajon alussa mikrobikanta oli vasta kehittymässä

ja talvikaudella tasaisesti kasvava kuormitus aiheuttivat sen, että nitrifikaation mikrobitoiminta oli noina aikoina vajaata, mikä näkyi luonnollisesti mittauksissa nitraattitypen pitoisuuksissa.

Kuten kuvasta 4 nähdään, on nitraattitypelle reduktiotuloksia vasta 3. vaiheen ajalta, kun denitrifikaatio lisättiin prosessiin mukaan. Tuloksista nähdään, että denitrifikaation käynnistyminen vei noin 4 koeajoviikkoa, mutta tämän jälkeen ovat nitraattitypen reduktiot olleet erinomaisella tasolla loppu koeajon ajan. Käynnistyminen tapahtui siis varsin nopeasti ottaen huomioon, että lisätyt kantoainekappaleet olivat uusia. Olisi ollut mielenkiintoista, mutta koeajon aikataulusta johtuen ei ollut erikseen aikaa kokeilla ensin, että olisiko denitrifikaatio saatu käyntiin ja millaisia nitraattireduktioita olisi saatu, jos ei olisi heti alettu lisäämään anoksiseen reaktoriin metanolia.



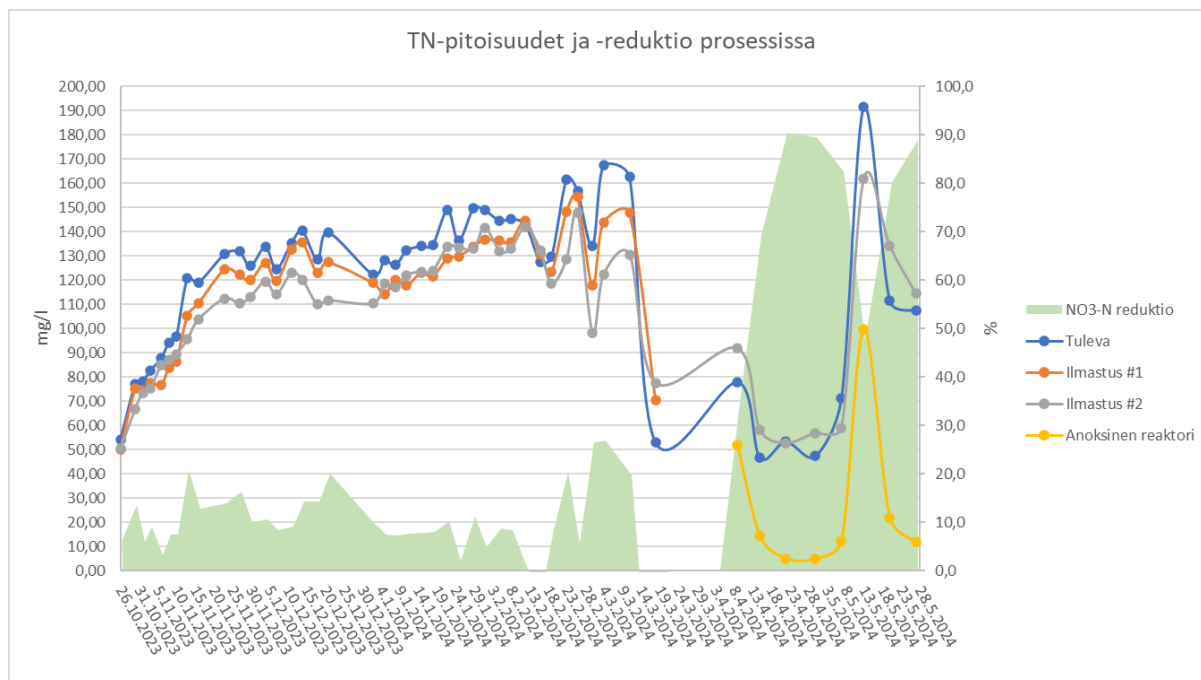
Kuva 4. Nitraattitypen pitoisuudet ja -reduktiot koeajon aikana.

4.2.4. Kokonaistyyppi

Koeajon aikaiset kokonaistypen pitoisuudet (kuva 5) ovat hyvin saman suuntaisia kuin ammoniumtypen pitoisuudet (kuva 3), mikä on luonnollista, koska jäteveden tyyppi oli pääasiassa ammonium muodossa. Koeajon 1. ja 2. vaiheen aikana kokonaistypen reduktiot olivat olemattomia (< 20 %), koska denitrifikaatio ei ollut vielä toiminnassa. Eli tyyppi vaihtoi prosessissa käytännössä vain olomuotoaan. Denitrifikaation mukaan oton jälkeen olivat kokonaistypen reduktiot pääsääntöisesti hyvällä tasolla.

Jätekkon nykyisessä ympäristöluvassa on kokonaistypen rajana < 25 mg/l, jos jätevesi paikalliskäsitellään heillä ja johdetaan Heinälamminojaan (Kumpulainen 2024). Kuvasta 5 nähdään, että MBBR-ratkaisulla tässä koeajossa olisi kyseisen rajan alle päästy kokonaistypen osalta kuuden

mittauskerran tulosten perusteella. Tämän perusteella voidaan todeta, että MBBR-prosessilla on potentiaali Jätekukon tasausaltaan jäteveden käsittelyssä.



Kuva 5. Kokonaistypen pitoisuudet ja -reduktiot koeajon aikana.

4.2.5. Muita prosessin toimintaan vaikuttavia tekijöitä

4.2.5.1. Kuormitus

Edellisissä kappaleissa käsiteltiin jo osittain asiaa, mutta mikrobiologiseen prosessiin on vaikutusta kuormituksen tasaisuudella. Tällä tarkoitetaan sitä, että kuormituksen ei ole hyvä muuttua jatkuvasti ja varsinkaan kovin paljoa kerrallaan. Jos kuormitus vaihtuu nopeasti suuntaan tai toiseen, varsinkin ylöspäin, tarvitsevat mikrobit aina aikaa mukautuakseen suuremmalle kuormitustasolle. Aikaan vaikuttaa se, että kuinka nopeasti kuormitus nousee ja kuinka usein se muuttuu. Koeajon aikana ammoniumpitoisuudet (kuva 3) muuttuivat rajusti pari kertaa lopussa, mutta niissä vaiheissa koeajoa pitoisuudet olivat muutenkin jo alempia, joten niillä ei niin suurta vaikutusta ollut prosessin toimintaan. Paremmiin kuormituksen nousun vaikutus prosessin toimintaan näkyy aikavälillä 11.1.-18.3.2024 (kuva 3), jolloin tulevan jäteveden ammoniumpitoisuus jatkoi alun jälkeistä tasaista kasvua. Tuolla aikavälillä nähdään, että ammoniumreduktiot heikkenivät pitoisuuden kasvaessa. Eli tästä voidaan päätellä, että kuormituksen kasvulla on ollut prosessin toimintaa heikentävä vaikutus. Täytyy kuitenkin muistaa, että kuormituksen kasvu ei välttämättä yksinään ole aiheuttanut vaikutusta vaan on ollut osatekijänä tässä esimerkiksi lämpötilan laskemisen kanssa. Prosessilämpötiloja laskettiin ajoittuen osittain samaan aikaan, aikavälillä 1.2.-18.3.2024, jolloin ne laskivat vaihteittain 20 °C aina 8,5 °C.

4.2.5.2. pH

Monessa jäteveden puhdistusprosessissa on pH-tasolla merkitystä toimivuuteen ja näin on myös mikrobiologisen typenpoiston kohdalla. Nitrifikaatiossa optimaalinen pH-alue on 7,5–8,5 ja kun pH alkaa olla 5 tai vähemmän nitrifikaatiotehokkuus on jo lähes olematonta (Gerardi, 2002, s. 113). Vastaavasti denitrifikaation kohdalla optimaalinen pH-alue on 7,0–7,5 (Gerardi, 2002, s. 148).

Tasausaltaan jäteveden pH oli koeajon aikana mittausten perusteella välillä 7,0–7,5 ja nitrifikaatio- sekä denitrifikaatioreaktoreissa vaihteluväli oli 6,7–8,5. Prosessissa oli varalta pH:n säätö emäksellä, joten tästä syystä pH-lukemat olivat ajoittain tulevaa jätevettä korkeammalla, kun automaatio oli annostellut pH säätökemikaalia. Denitrifikaatioprosessi puskuroi myös toimiessaan itseään, joka sekin nostaa pH-lukemia. Tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että pH-arvot ovat olleet sellaisella alueella koeajon aikana, jotta niillä ei pitäisi olla inhiboivaa vaikutusta.

4.2.5.3. Liukoinen happi

Nitrifikaation osallistuvat mikrobit käyttävät nitrifiointiin liukoista happea, jotta ne kykenevät muuttamaan ammoniumia ja nitriittiä nitraatiksi. Liukoisen hapen pitoisuus on hyvä olla vähintään 1,5 mg/l, jotta varmistutaan hapen riittävyydestä, koska nitrifioivat mikrobit kilpailevat huonosti organotrofisten mikrobien kanssa hapesta. Kirjallisuuden mukaan aktiivilieteprosessissa täydellinen nitrifikaatio pitäisi tapahtua 3,0 mg/l liukoisen hapen pitoisuudella (Gerardi, 2002, s. 103–106). Kantoainekappaleprosessissa yleensä käytetään hieman suurempia pitoisuuksia ja niissä nitrifikaatioreaktoreiden kantoainekappaleiden liikkeellä pitäminen tapahtuu myös ilmastusilman avulla, joten silläkin on vaikutusta siihen kuinka paljon reaktoria tulee ilmastaa. Denitrifikaatio puolestaan tapahtuu anoksisissa eli vähähappisissa olosuhteissa, joten siinä liukoisen hapen määrä tulee olla mahdollisimman alhaalla.

Koeajon aikana tulevan jäteveden liukoisen hapen määrä oli keskimäärin 1,5 mg/l luokkaa ja ilmastusreaktoreissa 4,0–10,0 mg/l välillä. Voidaan siis todeta, että nitrifikaatioreaktoreissa on ollut riittävästi liukoista happea mikrobien saatavilla, eikä tämä ole näin ollen todennäköisesti vaikuttanut prosessin toimintaan inhiboivasti. Denitrifikaatiossa liukoisen hapen pitoisuudet olivat puolestaan 2,2–5,5 mg/l välillä, mikä on korkeampi kuin suositusten mukaan tulisi olla. Denitrifikaatio toimi kuitenkin näissä happiolosuhteissakin, joten voidaan päätellä, että mitatut korkeahkot happipitoisuudet eivät häirinneet toimintaa tai että näyte, josta pitoisuudet mitattiin, pääsi mahdollisesti ilmastumaan näytteenottovaiheessa.

4.2.5.4. Käytetty laitteisto

Koeajossa käytetty MBBR-laitteisto toimi pääsääntöisesti hyvin koeajon aikana. Joitakin laiterikkoja ja automaation kaatumisia oli, mutta nämä eivät olleet siinä mittakaavassa, että niillä olisi havaittu olleen vaikutusta prosessin toimivuuteen. Tulopumppaus pysähtyi kerran tuntemattomaksi

jääneestä syystä noin puoleksi vuorokaudeksi koeajon loppupuolella, mutta myöskään tällä ei ollut havaittavaa vaikutusta.

Laitteiston kaksi ensimmäistä reaktoria (kuva 1) toimivat virtamaan tasauksessa ja lämpötilan säätämisen puskureina varsinaisille ilmastus ja anoksinen reaktoreille. Näistä kahdesta reaktorista ei tehty mittauksia koeajon aikana, vaan ensimmäinen analysoitu oli ensimmäinen ilmastusreaktori. Voi siis olla mahdollista, että käsiteltävässä jätevedessä tapahtui jotain pieniä muutoksia jo näissä kahdessa ensimmäisessäkin reaktorissa, mutta saatujen tulosten perusteella vaikutusta ei voi pitää ainakaan negatiivisena.

Ensimmäisessä reaktorissa (kuva 1) oli myös käytetyn lisälämmityksen jätevedenkierrätykseen tarkoitettu uppopumppu, joka oli päällä käytännössä koko koeajon. Kyseinen uppopumppu on voinut lämmittää jätevettä hieman, joten voi spekuloida, että olisiko kylmimmän ajatun jäteveden (8,5 °C) lämpötila voinut olla vielä hieman alempana, jos pumppu ei olisi ollut päällä. Mutta tällä ei ollut varsinaisen pilotoinnin lämpötilan säätöön vaikutusta.

4.2.6. Tulosten skaalaus Jätekukon jätevesien virtaamaan

Yleistasolla voidaan arvioida koeajossa saatujen tulosten perusteella Jätekukolle tarvittavien MBBR-reaktoreiden kokoa, jos skaalataan ne Jätekukon jätevesien todellisiin virtaamiin. Koeajon lopulla päästiin nitrifikaatio + denitrifikaatio -yhdistelmällä luparajaa ajatellen riittäviin tuloksiin. Käytetyn laitteiston reaktorit olivat 1 m³ kokoisia ja tuloksiin päästiin 125 l/h virtaamalla. Tämä muunnettuna päiväarvoksi, on 3 m³/d. Jos ajatellaan, että Jätekukolla virtaisi päivässä 350 m³ jätevettä, olisi todellisuuden ja koelaitteiston virtaaman välinen suhde noin 1:120. Jos tällä suhdeluvulla skaalattaisiin koelaitteiston reaktorit isommiksi, olisivat ne isommassa mitassa silloin 120 m³ kokoisia reaktoreita. Tämä tarkoittaisi minimissään esimerkiksi lieriön muotoisia reaktoreita, joiden pohjan halkaisija olisi 5 m ja korkeus 6 m.

5. Yhteenveto ja johtopäätökset

MBBR-EC -koeajon tavoitteena oli todentaa, että Jätekukon jäteveden sisältämä typpi saadaan muunnettua MBBR-prosessissa ammonium muodosta nitraatti muotoon, jonka jälkeen se voisi olla sidottavissa sähkösaostuksella nesteestä lietteeseen. Tässä onnistuttiin osittain, eli ammoniumtyppeä saatiin muunnettua MBBR-prosessilla nitraattitypeksi, mutta EC ei osoittautunut potentiaalisesti käsittelymenetelmäksi typen suhteen (erillinen EC-raportti).

MBBR-prosessin toimivuus oli koeajossa vaihtelevaa, mutta varsinkin koeajon loppua kohden pystyttiin osoittamaan, että menetelmässä on potentiaalia Jätekukon jätevesien käsittelyssä. Toki kyseisellä prosessilla ei itsenäisesti saada typpeä ravinteena talteen, vaan se vaatii jonkin toisen menetelmän sen osalta lisäksi. On myös muistettava, että koeajossa prosessia lämmitettiin pitkiäkin aikoja ja tämä ei isossa mittakaavassa ole taloudellisesti kovin järkevää. Suositeltavaa on, että etsitään myös muita vaihtoehtoisia ratkaisuja, joilla voisi esimerkiksi itsenään saada typpeä talteen ravinteena, ennen kuin lähdetään tekemään isompia investointeja.

Lähdeluettelo

Gerardi, M. (2002). Wastewater microbiology: Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Hyxo. (ei pvm.). MBBR – kantoaineilmastus.

<https://www.hyx.fi/fi/tuote/vedenkasittelylaitteet/mbbr-kantoaineilmastus/>

Kumpulainen, Leena 2024: Teollisuusjäteveden pitoisuusrajat. Yksityinen sähköpostiviesti 22.2.2024. Viestin saaja: Olli Torvinen.

Virtanen, S. (2014). Typenpoiston nitrifikaatio- ja denitrifikaationopeudet jätevedenpuhdistusprosessissa [opinnäytetyö, Lahden ammattikorkeakoulu].

<https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201401231656>