MAGNESIUMHYDROKSIDIN KÄYTTÖ JÄTEVEDENPUHDISTAMOLLA pH:N SÄÄTÖÖN

HAMK
HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU
HÄME UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Bio- ja elintarviketekniikka

Hämeenlinnan korkeakoulukeskus

Kevät, 2023

Marianna Aikala

HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU
HÄME UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Bio- ja elintarviketekniikka Tiivistelmä
Tekijä Marianna Aikala Vuosi 2023
Työn nimi Magnesiumhydroksidin käyttö jätevedenpuhdistamolla pH:n säätöön
Ohjaaja Juha Isokangas

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, soveltuuko magnesiumhydroksidi jätevedenpuhdistamoille alkalointikemikaaliksi. Opinnäytetyön tilaajana toimi magnesiumkemikaaleja valmistava yritys. Opinnäytetyön kokeellinen osuus suoritettiin Kokemäen jätevedenpuhdistamolla, missä alkalointikemikaalina oli käytössä natriumkarbonaatti eli sooda. Työn kokeellisen osuuden kesto oli noin kolme kuukautta, jonka aikana prosessia seurattiin useilla analyyseillä.

Opinnäytetyön teoriaosuuden tavoitteena oli koota yhteen kirjallisuudessa esiintyviä tietoja kemiallisesta ja biologisesta jätevedenpuhdistuksesta. Teoriaosuudessa käsitellään jätevedenpuhdistamon perusmittauksia, jotka ovat puhdistamon toiminnan kannalta tärkeitä sekä olivat saatavilla jätevedenpuhdistamolla.

Koeajon aikana analyysejä tehtiin Kokemäen jätevedenpuhdistamon prosessin eri vaiheista. Analyysien avulla pystyttiin seuraamaan prosessin tasapainoa ja havaitsemaan muutoksia. Analyysit olivat ammoniumtyppi, alkaliteetti, pH ja liukoinen fosfori. Koeajon tavoitteena oli pitää prosessi tasapainossa ja selvittää miten magnesiumhydroksidi käyttäytyy jätevedenpuhdistamon prosessissa. Natriumkarbonaatin korvaamisella magnesiumhydroksidilla pyrittiin tuomaan prosessiin tasaisempi alkaliteetti ja pH-arvo.

Saatujen tulosten perusteella magnesiumhydroksidi on hyvä vaihtoehto jätevedenpuhdistamoille korvaamaan alkalointikemikaali. Magnesiumhydroksidilla ei ollut tuloksien perusteella suurta vaikutusta ferrosulfaatin toimintaan liukoisen fosforin saostamisessa. Magnesiumhydroksidi toi tasaisemman pH:n lähtevään jäteveteen ja tasoitti prosessissa alkaliteettia.

Alkaliteetin tasoittumisella saavutettiin tasaisempi prosessi ja riittävät alkaliteetti määrät prosessin jokaiseen vaiheeseen. Jätevedenpuhdistamon prosessiin ei tarvinnut tehdä muutoksia, koska magnesiumhydroksidille tarjottiin riittävästi aikaa liueta prosessissa. Kuitenkin tutkimusta tarvitaan vielä lisää eri vuodenaikoina ja erilaisille prosesseille, koska tulokset ovat suuntaa antavia.

Avainsanat Alkaliteetti, magnesiumhydroksidi, pH, jäteveden käsittely
Sivut 37 sivua ja liitteitä 8 sivua

HÄMEEN AMMATTIKORKEAKOULU
HÄME UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme in Biotechnology and Food Engineering
Author Marianna Aikala
Subject Use of magnesium hydroxide at a wastewater treatment plant for pH adjustment
Supervisor Juha Isokangas

Abstract
Year 2023

The purpose of this thesis was to find out whether if magnesium hydroxide is suitable for wastewater treatment plants as alkaline chemical. The commissioner of the thesis was certain magnesium chemical manufacturing company. The experimental part of the study was carried out at Kokemäki wastewater treatment plant, where sodium carbonate (soda) was used as alkalizing chemical. The duration of the experimental part was about three months, during which the process was followed by several analyses.

The purpose of the theoretical part was to bring together information on chemical and biological wastewater treatment based on literature review. The thesis discussed also the basic measurements of the wastewater treatment plant, which are important for the operation of wastewater treatment plant, and they were available.

During the test run, analyses were carried out on different phases of the plant process in Kokemäki. The analyses were ammonium nitrogen, alkalinity, pH and soluble phosphorus. The goal of the experimental part was to monitor the balance of the process, to detect changes and to find out how magnesium hydroxide behaves in the wastewater treatment plant process. By replacing sodium carbonate with magnesium hydroxide, the aim was to bring a more even alkality and pH to the process.

Based on the results, magnesium hydroxide is a good alternative to wastewater treatment plants to replace the alkaline chemical. Magnesium hydroxide did not have a major influence on the activity of iron sulfate, but it brought a more even pH to the outgoing wastewater and smoothed the alkality in the process, and there was no need to make any changes to the wastewater treatment plant process as magnesium hydroxide was given enough time to dissolve in the process. However, more research is needed in different seasons and for different processes, because the results are indicative.

Keywords Alkalinity, magnesium hydroxide, pH, wastewater treatment
Pages 37 pages and appendices 8 pages

Käsitteiden määrittely

Alkaliteetti	Kuvaa veden kykyä vastustaa happoja. (Opetushallitus, n.d.)
BOD	Biologinen hapenkulutus, joka ilmaisee happimäärän, jonka mikrobit kuluttavat hapellisissa oloissa hajottaessaan orgaanista ainetta. (Oravainen, 1999, s. 16)
CaO	Kalsiumoksidi eli kalkki.
COD	Kemiallisessa reaktiossa tapahtuva orgaanisen aineen hapenkulutus. (Oravainen, 1999, s. 15)
CO_{2eq}	Hiilidioksidiekvivalentti on mittari, jolla mitataan erilaisia kasvihuonekaasuja niiden ilmaston lämpenemispotentiaalin perusteella. (Eurostat, 2017)
Denitrifikaatio	Anaerobinen prosessin osa, jonka lopputuloksena syntyy vapaata typpikaasua. (Rantanen ym., 1999, s. 12)
HCl	Vetykloridi eli suolahappo.
Jätevesi	Vesi, joka voi aiheuttaa ympäristön pilaantumista. (Ympäristönsuojelulaki 527/2014 § 5)
Liete	Nesteen ja kiinteän, hienojakoisen aineksen seos. (Tilastokeskus, n.d.-a)
Lieteikä	Bakteerien keskimääräinen ikä käsittelyaltaassa. (Pelto-Huikko & Vieno, 2009, s. 2)

$Mg(OH)_2$	Magnesiumhydroksidi.
MgO	Magnesiumoksidi.
Na_2CO_3	Natriumkarbonaatti eli sooda.
NaOH	Natriumhydroksidi eli lipeä.
Nitrifikaatio	Aerobinen prosessin osa, jossa typpiyhdisteet hapettuvat nitriitin kautta nitraatiksi. (Rantanen ym., 1999, s. 11)
pH	Kuvaa veden happamuutta tai emäksisyyttä. (Opetushallitus, n.d.)

Sisällys

1 Johdanto 1

2 Jäteveden käsittely 2

2.1 Kemiallinen jätevedenpuhdistus 3

2.2 Biologinen jätevedenpuhdistus 6

3 Magnesiumhydroksidikoeajo Kokemäen jätevedenpuhdistamolla 9

3.1 Jätevedenpuhdistamon luparajat 9

3.2 Jätevedenpuhdistamon prosessi 11

4 Jätevedenpuhdistamon kemikaalit koeajossa 12

4.1 Magnesiumhydroksidi 12

4.2 Natriumkarbonaatti 13

4.3 Rautasulfaatti 14

4.4 Polymeeri 15

5 Vihreä kemia ja kestävä kehitys 16

6 Koeajo 19

6.1 Ennakkotestien tulokset 20

6.2 Liukoisen fosforin ennakkotestit 20

7 Tulokset ja tulosten tarkastelu 23

7.1 *Nocardia* jätevedenpuhdistamon prosessissa 24

7.2 Alkaliteetti 25

7.3 pH-arvo 26

7.4 Ammoniumtyppi 27

7.5 Ferrosulfaatin syöttö 27

7.6 Liukoinen fosfori 28

8 Yhteenveto ja johtopäätökset 30

Lähteet 34

Liitteet

Liite 1: Koeajo- ja näytteenottosuunnitelma, Kokemäki

Liite 2: Alkaliteetin ja liukoisen fosforin mittauksien tuloksia ennen ja jälkeen koeajon

1 Johdanto

Jäteveden puhdistuksen tarkoituksena on saattaa käyttämämme vesi puhdistettuna takaisin jokeen tai mereen ympäristöä kuormittamatta. Suomen herkät vesistöt ovat hyvin alttiita ihmisten aiheuttamille muutoksille, joten jäteveden käsittely on välttämätöntä luonnonvesien olosuhteiden ylläpitämiseen. Jätevesi aiheuttaa luonnon vesistöissä pilaantumista, rehevöitymistä, ravinteiden muutosta ja hapettomuutta. Jäteveden puhdistus on yksi tärkeimmistä prosesseista ympäristö- ja vesiensuojelussa estettäessä vesien saastuminen ihmisten toiminnan vuoksi. (Suomen Vesiensuojeluyhdistysten Liitto ry, n.d.)

Opinnäytetyön tilaajana toimi magnesiumkemikaaleja valmistava yritys. Opinnäytetyön kokeellinen osuus suoritettiin Kokemäen jätevedenpuhdistamolla. Kokemäen jätevedenpuhdistamon yksi kemikaaleista on alkalointikemikaali, jonka tarkoituksena on pitää jäteveden pH halutulla tasolla. Alkalointikemikaalina Kokemäen jätevedenpuhdistamolla käytettiin natriumkarbonaattia eli soodaa. Jätevedenpuhdistamoilla käytettävät kemikaalit ovat pääsääntöisesti vahvasti emäksisiä tai happamia, joita käsiteltäessä on huolehdittava henkilökunnan riittävästä koulutuksesta sekä syöttölaitteiden kemikaalin kestosta. (Vilpanen ym., 2022, ss. 6–7)

Jätevedenpuhdistamoilla käytössä olevia kemikaaleja ovat natriumhydroksidi (NaOH), natriumkarbonaatti (Na_2CO_3) ja kalsiumoksidi (CaO) (Karttunen, 2004, s. 150). Yhtenä korvaavana vaihtoehtona edellä mainituille kemikaaleille saattaa olla magnesiumhydroksidi ($Mg(OH)_2$), jota ei vielä Suomen jätevedenpuhdistamoilla käytetä alkalointikemikaalina.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää magnesiumhydroksidin toimivuus jätevedenpuhdistamolla pH:n säätöön ja sen toimintaan jätevedenpuhdistamon muiden kemikaalien kanssa. Magnesiumhydroksidi olisi oiva vaihtoehto pH:n säätöön, koska sitä saisi kotimaisena kemikaalina. Magnesiumhydroksidin etuina on sen vaaraton käsittely, sillä se ei ole syövyttävä kemikaali. Magnesium on kasveille luontainen alkuaine, jota kasvit tarvitsevat lehtien muodostamiseen, joten pienet vuodot magnesiumhydroksidia ei ole vaaraksi luonnolle. (Shand, 2006, s. 164)

Tutkimuskysymyksiä laadittaessa keskityttiin jätevedenpuhdistamon toiminnan kannalta puhdistustulosta edesauttaviin asioihin. Tutkimuskysymyksiä laadittaessa otettiin huomioon rajalliset analyysimahdollisuudet.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset olivat:

1. Onko magnesiumhydroksidilla vaikutusta rautasulfaatin toimintaan liukoisen fosforin saostamisessa?
2. Onko magnesiumhydroksidilla vaikutusta jätevedenpuhdistamon prosessin alkaliteettiin?
3. Edellyttääkö magnesiumhydroksidin käyttöönotto muutoksia prosessiin?
4. Mikä on magnesiumhydroksidin vaikutus nitrifikaatioon?

Opinnäytetyön kokeellisessa osuudessa selvitettiin jätevedenpuhdistamolla magnesiumhydroksidin vaikutus prosessin alkaliteettiin ja rautasulfaatin toimintaan. Opinnäytetyössä seurattiin myös magnesiumhydroksidin vaikutusta prosessin nitrifikaation toimintaan sekä pohdittiin, tarvitseeko prosessiin tehdä muutoksia kemikaalin vaihdon seurauksena.

2 Jäteveden käsittely

Jäteveden käsittely on välttämätöntä ennen kuin se päästetään ympäristöön, koska jätevesi aiheuttaa merkittäviä tuhoja ympäristössä. Jätevesien käsittelyn päätavoitteena on mahdollistaa ihmisten ja teollisuuden jätevesien loppusijoittamine vaarantamatta ihmisten terveyttä tai vahingoittamatta luonnonympäristöä. (Sonune & Ghate, 2004, s. 62)

Kokemäen jätevedenpuhdistamo on biologis-kemiallinen puhdistamo. Kokemäen jätevedenpuhdistamolla käsitellään pääsääntöisesti yhdyskuntajätevesiä. (Kokemäen Vesihuolto, n.d.) Yhdyskuntajätevesi koostuu kotitalous- ja saniteettivesistä, teollisuuden jätevesistä ja hulevesistä. Jäteveden laatu voidaan määritellä sen fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten ominaisuuksien perusteella. Fysikaalisia parametrejä ovat väri, haju, lämpötila, kiintoaine, sameus, rasvat ja öljyt. (Liu & Lipták, 2000, ss. 1, 5)

Biologis-kemikaalisessa puhdistuksessa poistetaan mekaanisesti hiekka ja kiintoaine. Biologisen prosessin tarkoituksena on poistaa orgaaninen aines, saattaa ammoniakki elementaarisen typen muotoon tai muuksi kaasumaiseksi lopputuotteeksi nitrifikaation ja denitrifikaation avulla, fosforin biologinen poisto ja lietteen stabilointi. Orgaanisen aineksen poiston tehokkuutta mitataan biologisena hapenkulutuksena (Biochemical Oxygen Demand, BOD), kemiallisena hapenkulutuksena (Chemical Oxygen Demand, COD) tai orgaanisen hiilen kokonaismääränä (Total Organic Carbon). (Karttunen, 2004, ss. 182–183)

2.1 Kemiallinen jätevedenpuhdistus

Kemiallisen jätevedenpuhdistuksen tarkoituksena on muuttaa kemiallisella reaktiolla tai kemikaalin lisäyksellä jäteveden ominaisuuksia, jolloin jätevedestä muuntuisi tai poistuisi epätoivottuja aineita ja yhdisteitä, kuten ammoniakki ja typpi yhdisteet. Kemiallisessa jätevedenkäsittelyssä lisättävät saostuskemikaalit laskevat veden pH:ta ja kuluttavat jäteveden alkaliteettia, jonka seurauksena tulee jäteveteen lisätä alkalikemikaalia, kuten soodaa tai kalkkia. (Vilpanen ym., 2022, s. 15; ks. myös Karttunen, 2004, s. 133)

Alkaliteetti kuvaa veden puskurikapasiteettia eli kykyä vastustaa pH:n laskua. Alkaliteettia aiheuttavat veteen karbonaatit (CO_3^{2-}), bikarbonaatit (HCO_3^-) ja hydroksidit (OH^-). Alkaliteetti määritetään titraamalla vahvalla yksiarvoisella hapolla esimerkiksi suolahapolla eli vetykloridilla (HCL) pH-arvoon 4,5. Alkaliteetti määräytyy sen mukaan, kuinka paljon happoa tarvitaan tiettyyn pH-arvoon. (Karttunen, 2009, s. 215)

Jätevedenpuhdistamolla alkaliteettia kuluttaa nitrifikaatio, joka on yksi suurimmista yksittäisistä prosessin osista. Nitrifikaatio kuluttaa prosessista noin 4,6 g happea (O_2) ja 0,14 mol alkaliteettia hapettunutta ammoniumtyppigrammaa kohden (Rantanen ym., 1999, s. 11). Denitrifikaatiossa alkaliteetti vastaavasti lisääntyy noin 0,07 mol jokaista pelkistynyttä nitraattityppigrammaa kohden. (Rantanen ym., 1999, s. 11)

Nitrifikaatio vaiheessa jätevedessä on oltava riittävästi alkaliteettia, sillä typen poistossa jäteveden alkaliteetti kuluu. Alkaliteetti ylläpitää jäteveden pH-arvoa, joten puhdistustuloksen takaamiseksi riittävä alkaliteetti on tärkeää prosessin tasapainon

ylläpitämiseksi. Alkalikemikaalin lisäyksen tarve määräytyy monista toisiinsa liittyvistä tekijöistä, kuten saapuvien epäpuhtauksien määrästä, luonnollisen emäksisyyden määrästä tulevassa jätevedessä, puhdistamon puhdistustekniikasta, sisään virtaavan jäteveden pH:sta, lähtevän veden pH:n raja-arvosta ja epäpuhtauksien käsittelytavasta (Gibson & Maniocha, 2015, ss. 2–3). Prosessiin lisättävän alkalointikemikaalin määrä voidaan laskea kaavan 1 mukaisesti.

$$Alk_{tarve} = Alk_{tavoite} - Alk_{bio} + Alk_{kulutus,\mathrm{nit}} - Alk_{tuotto} + Alk_{kulutus,Fe}\ , \qquad (1.)$$

missä

Alk_{tarve} = lisättävän alkaliteetin määrä (mmol/l)

$Alk_{tavoite}$ = tavoite halutusta alkaliteetin määrästä käsittelyn jälkeen (mmol/l)

Alk_{bio} = biologiseen prosessiin tulevan alkaliteetin määrä (mmol/l)

$Alk_{kulutus,nit}$ = alkaliteetin kulutus nitrifikaatiossa (mmol/l)

Alk_{tuotto} = alkaliteetin tuotto denitrifikaatiossa (mmol/l)

$Alk_{kulutus,Fe}$ = raudan aiheuttama alkaliteetin kulutus (mmol/l)

Saostuskemikaalin lisääminen kuluttaa jätevedestä alkaliteettia. Alkaliteettia kuluu eri tavalla riippuen käytettävästä kemikaalista. Alumiini- ja rautapohjaisten saostuskemikaalien alkaliteetin kulutus on noin 1,2–0,5 mmol/l. Alkaliteetin kulutus ferrosulfaatilla on pienempi, kuin ferri- tai alumiinisuoloilla. (Vilpanen ym., 2022, s. 31)

Jätevedenpuhdistamoilla laajimmin käytetty mittausanalyysi on pH-mittaus, joka kuvastaa jätevedenpuhdistamon prosessin tasapainoa. pH-arvoa säädetään muun muassa soodalla ja kalkilla jätevedenpuhdistamoilla. pH:n lukuarvot ovat 0–14, jossa 0 kuvaa happaminta lukuarvoa ja 14 suurinta emäksisyyslukuarvoa. pH:ta mittaamalla saadaan selville veden happamuus tai emäksisyys. pH-arvo muuttuu herkemmin, jos veden puskurikapasiteetti eli

alkaliteetti on alhainen. Jätevedenpuhdistamoilla pyritään pitämään poistuva vesi neutraalina (pH 7) Suomen herkkien vesistöjen vuoksi. pH:lla tarkoitetaan vetyionikonsentraation negatiivista logaritmia. (Karttunen, 2004, s. 50; ks. myös Opetushallitus, n.d.)

Vetyionikonsentraation negatiivinen logaritmi tarkoittaa sitä, että pH:n muuttuessa yhden yksikön, esimerkiksi seitsemästä kuuteen, vetyionikonsentraatio kymmenkertaistuu. pH-arvossa seitsemän on vetyionien ja hydroksyyli-ionien määrä sama eli 10^{-7} (Oravainen, 1999, s. 12; Vilpanen ym., 2022, s. 15). pH-mittari koostuu kolmesta elektrodista, joita ovat lämpötilan vaikutusta kompensoiva elektrodi, mittauselektrodi sekä vertailuelektrodi. Nykyaikaisien pH-mittarien mittaustarkkuus on noin 0,2 pH-yksikköä, jos mittareita käytetään valmistajan ohjeiden mukaisesti. (Karttunen, 2004, s. 50)

Kemiallisen jätevedenpuhdistuksen avulla jätevedessä esiintyvä fosfori on kemiallisesti saostettavissa. Kemiallisen saostamisen tarkoitus on saostaa fosfori vaikeasti liukenevaan muotoon. Fosfori on yksi vesistöjä kuormittava tekijä, joka aiheuttaa rehevöitymistä vesistössä sekä leväkasvustojen lisääntymistä. Fosfori aiheuttaa vesistöissä sinileväkukintoja, jolloin vesistöjen käyttöä ei suositella. (Karttunen, 2004, s. 211)

Jätevedessä on keskimäärin 5–9 mg/l fosforia, josta on suurin osa liukoisessa muodossa. Fosforia on asumisjätevesissä orgaaniseen aineeseen sitoutuneena, ortofosfaattina (PO_4^-) ja polyfosfaattina (P_2O_7). Orgaaninen fosfori on yhdisteisiin sitoutuneena oleva fosforinmuoto, jonka osuus on 10–15 % kokonaisfosforista. Orgaanista fosforia ei pystytä saostamaan kemiallisella saostusreaktiolla. Polyfosfaattia on yleensä pesuaineissa, joka muuntuu ortofosfaatiksi, mikä pystytään saostamaan jätevedestä rautasulfaatilla. Ortofosfaatti on epäorgaaninen fosforihapon suola, joka edistää vesistöjen rehevöitymistä. Fosforin poistaminen jätevedestä perustuu epäorgaanisen ortofosfaatin saostamiseen esimerkiksi rautasuoloina ja sakan poistamiseen prosessista. (Karttunen, 2004, ss. 215, 540)

Fosforia pystytään poistamaan jätevedestä myös biologisella prosessilla, mutta sen operoiminen on hyvin vaativaa ja se tarvitsee myös enemmän osaamista henkilökunnalta. Vaikka fosforia voidaan biologisesti poistaa prosessista, pitää saostuskemikaalia lisätä jossain

vaiheessa prosessia, koska biologisella fosforin poistolla ei saavuteta vaadittavia puhdistustehoja. Tavallisessa aerobisessa biologisessa puhdistusprosessissa lietteeseen sitoutuu noin 10–30 % jäteveden fosforista. (Karttunen, 2004, ss. 215, 540; ks. myös Laitinen ym., 2014, s. 60)

Fosforin poistaminen biologisesti vaatii prosessilta aerobisia ja anaerobisia olosuhteita. Fosforin biologinen poisto perustuu mikrobien kykyyn varastoida soluihinsa suuria määriä fosforia polyfosfaatteina. Eräät tietyt mikrobit, kuten *acinetobakter* suvun bakteerit pystyvät varastoimaan aerobisissa olosuhteissa polyfosfaattia yli solumateriaalin synteesissä tarvittavan määrän, jonka jälkeen mikrobi kuljettaa solun ulkopuolella fosforin yli aerobisen prosessin vaiheen. Saavuttuaan anaerobisen prosessin vaiheeseen vapauttaa mikrobi polyfosfaatin ortofosfaattina. (Karttunen, 2004, s. 215) Anaerobisissa olosuhteissa bakteerit käyttävät energianlähteenään aerobisessa vaiheessa sitoutuneita polyfosfaatteja, jotka vapautuvat jäteveteen ortofosfaattina. Varsinainen fosforinpoisto saavutetaan kuitenkin vasta, kun fosforipitoinen liete poistetaan tai fosfori vapautetaan anaerobisissa olosuhteissa ja saostetaan kemikaalilla. (Laitinen ym., 2014, s. 45; ks. myös Karttunen, 2004, s. 216)

2.2 Biologinen jätevedenpuhdistus

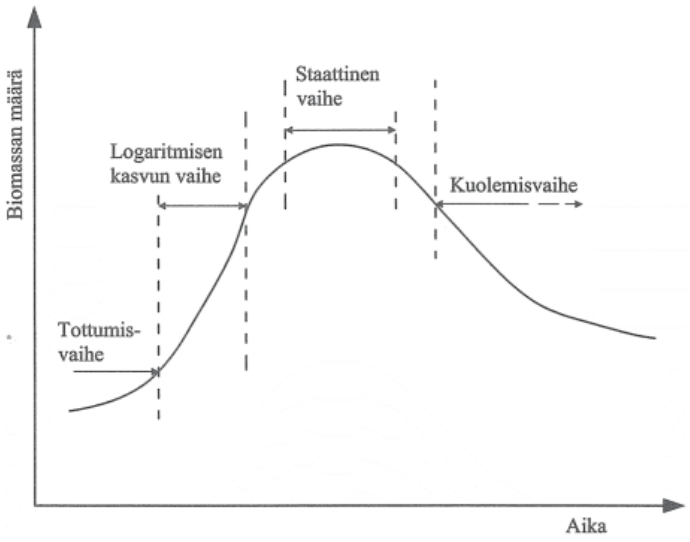
Jätevedenpuhdistamoilla tapahtuva biologinen puhdistus tarkoittaa sitä, että jätevesi puhdistetaan biologisesti mikrobeilla, pääasiassa bakteereilla. Yhdyskuntien jätevesien käsittelyn päätarkoituksena on vähentää vesistöihin päästettävän orgaanisen aineen, fosforin ja typen määrää, jotta vesistöjen tilat eivät heikkene. Jätevedenpuhdistamon biologisen prosessin mikrobien kasvua sekä puhdistustulosta rajoittavat mikrobien taistelu elintilasta, solukuolemat sekä mikrobien osallistumattomuus prosessiin. Kaikki mikrobit eivät edistä jätevedenpuhdistusta. (Lema & Suarez, 2017, ss. 3–5; Shand, 2006, s. 164)

Mikrobit käyttävät ravinnokseen jäteveden orgaanista ainetta ja epäorgaanisia suoloja. Osa orgaanisesta aineesta hapettuu ja mikrobi käyttää sitä tyydyttämään energiatarpeensa, joka kuluu elintoimintojen ylläpitämiseen ja solumateriaalin synteesiin. Mikrobien tarkoitus jätevedessä on siis muuttaa kolloidit ja liukoiset orgaaniset aineet solumassaksi eli lietteeksi. (Karttunen, 2004, ss. 165, 169, 177)

Jätevedenpuhdistamon biologinen puhdistus perustuu nitrifikaatioon ja denitrifikaatioon, joissa ylläpidetään bakteereille sopivia olosuhteita. Nitrifikaatio on usein jätevedenpuhdistuksen hitain ja herkin prosessin vaihe, jossa vaikuttavina tekijöinä on muun muassa viipymä, ilmastustilavuus, happipitoisuus, pH, alkaliteetti ja lämpötila (Laitinen ym., 2014, ss. 43–44). Nitrifikaation optimaalisin pH-alue on 7–8,5 välillä, jos pH laskee nitrifikaatioalueilla alle 6,5 alkaa reaktiot hidastua huomattavan paljon. (Karttunen, 2004, s. 546)

Kuvassa 1 on esitettynä mikro-organismien kasvun käyrä. Puhdistamoilla, joissa viipymä on lyhyt ja kuormitus suhteessa lietteen määrään on suuri, toimii kyseinen puhdistamo logaritmisen kasvun vaiheessa ja lietettä syntyy runsaasti. Matalakuormitteisilla ja pitkillä viipymillä varustetut jätevedenpuhdistamot tuottavat vähän biomassaa, koska puhdistusprosessissa syntynyt liete hajoaa osittain vapauttaen ravinteita jäteveteen. Kuvassa 1 eri vaiheet on kuvattu niin, että pystyakselilla on biomassan kasvu kuvattuna ajan suhteen. Kasvukäyrä on jaettu neljään päävaiheeseen, jolloin kasvua on helpompi mallintaa matemaattisesti. Mikro-organismien kasvukäyrä koostuu useista erilaisista organismeista, jolloin kasvunopeudetkin ovat erilaisia. (Karttunen, 2004, ss. 174–175)

Kuva 1. Mikro-organismien kasvukäyrän eri vaiheet (Karttunen, 2004, s. 174).

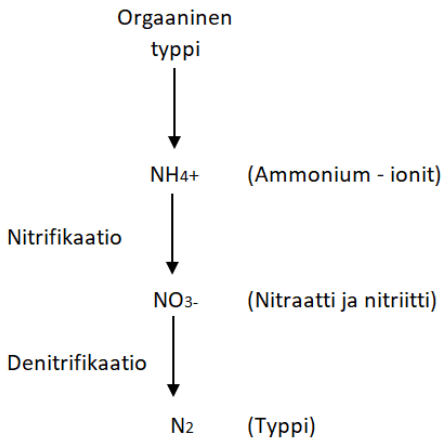


Biologisessa puhdistuksessa suoritetaan typpiyhdisteiden poisto, sillä ne eivät muodosta kemiallisessa puhdistuksessa saostuvia suoloja (Karttunen, 2004, ss. 210–212). Ammoniumtyppi analyysi on yksi jätevedenpuhdistamon prosessin toimivuuden mittari, joka

kuvaa nitrifikaation tehokkuutta. Liika typpi aiheuttaa vesistöille rehevöitymistä ja hapettomia olosuhteita, jonka seurauksena vesistöt voivat muuttua haiseviksi. (Suomen Vesiensuojeluyhdistysten Liitto ry, n.d.) Typpeä esiintyy monessa muodossa jätevedessä, sekä typpiyhdisteet saattavat muuttua prosessin aikana useasti. Tärkeimpänä muutoksena on saada ammoniumtyppi muuttumaan sellaiseen muotoon, että typpi on helposti poistettavissa. Jätevedessä typpi esiintyy pääsääntöisesti ammonium-ioneina, mitkä ovat syntyneet orgaanisen typen hajotessa. (Pelto-Huikko & Vieno, 2009, s. 11)

Kuvassa 2 on esitetty biologisen prosessin typenpoisto. Aerobisessa vaiheessa jäteveden typpiyhdisteistä noin 10–15 % sitoutuu lietteeseen, joten ammoniumtypen poiston tehostamiseksi tulee jätevesi hapettaa ensin nitraatiksi ja nitriitiksi autotrofisten nitrifikaatiobakteerien toimesta. (Karttunen, 2004, ss. 210–212) Nitraateiksi ja nitriiteiksi hapetetut typpiyhdisteet eivät enää tarvitse happea vesistöissä, jolloin se ei kuormita enää vesistön happitasetta. Varsinaisesta typen poistosta voidaan vasta puhua, kun jätevesi on kulkenut denitrifikaatio vaiheen läpi. Denitrifikaatiossa eli anaerobisessa vaiheessa heterotrofiset bakteerit pelkistävät nitraatin typeksi, joka muuttuu elementaariseksi typeksi tai muuksi kaasuksi ilmakehään. (Karttunen, 2004, ss. 210–212)

Kuva 2. Typen biologinen poistuminen jätevedenpuhdistamolla (mukaillen Pelto-Huikko & Vieno, 2009).



Denitrifikaatio vaatii prosessiin hapettomat olosuhteet, koska denitrifikaatio bakteerit käyttävät hapen lähteenään nitraatin sisältämää happea. Denitrifikaatiobakteerit eivät toimi

oikealla tavalla hapellisissa olosuhteissa, sillä siellä ne kasvavat. Denitrifikaatiobakteerit eivät pelkistä hapellisissa olosuhteissa nitraattia, mikä vaaditaan typenpoistossa. Denitrifikaatio vaiheessa yksinkertaiset aineet, kuten hiilihydraatit, proteiinit, alkoholit ja hapot hajoavat metaaniksi ja hiilidioksidiksi ilman happea. (Laitinen ym., 2014, ss. 43–44; ks. myös Gibson & Maniocha, 2015, s. 2)

Olosuhteiden vaikutuksesta lämpötilan laskiessa alle 12 °C:seen nitrifikaationopeus hidastuu ja typenpoistuvuus vaikeutuu (Laitinen ym., 2014, ss. 43–44). Denitrifikaatio ei ole yhtä vaativa lämpötilasta, koska siellä toimii hyvin erilainen ja suuri joukko bakteereja, joilla on erilaiset lämpötilavaatimukset. (Henze ym., 2002, s. 430)

3 Magnesiumhydroksidikoeajo Kokemäen jätevedenpuhdistamolla

Kokemäen jätevedenpuhdistamo on valmistunut vuonna 1983 ja puhdistamossa on suoritettu saneeraus vuosina 2009–2010, jolloin jätevedenpuhdistamo sai käyttöönsä kolmannen ilmastuslinjansa. Saneerauksen aikana on uudistettu myös välpät sakokaivolietteille ja puhdistamon puolelle. Kolmas ilmastuslinja nostaa jätevedenpuhdistamon kapasiteettia käsitellä puhdistamolle saapuvat jätevedet. (Virtanen, 2022)

Kokemäen jätevesiviemäriverkostoon liittyneitä kiinteistöjä oli vuoden 2020 lopussa 1 539 kpl. Viemäriverkostoon liittyneiden kiinteistöjen asukasluku Kokemäellä on arvioinnin mukaan 3 110 asukasta. (Kokemäen Vesihuolto, 2020, s. 12) Kokemäen kaupungissa on vuoden 2019 tilastojen mukaan asunut 7 103 asukasta eli kaupungin viemäriverkostoon on liittynyt noin 44 % kaupungin asukkaista. (Tilastokeskus, n.d.-b; ks. myös Kokemäen Vesihuolto, 2020, s. 12)

3.1 Jätevedenpuhdistamon luparajat

Jätevedenpuhdistamon ympäristöluvassa nro 14/2013/2 (Dnro ESAVI/213/04.08/2011) on määritetty Kokemäen jätevedenpuhdistamolle käsittelyvaatimukset jätevedelle (Virtanen, 2022). Kokemäen jätevedenpuhdistamoa koskee ympäristöluvan lisäksi Valtioneuvoston

asetus jätevesistä (888/2006), joka määrittelee vesistöön johdettavan jäteveden pitoisuudet ja käsittelytehon raja-arvot asetuksen edellyttämällä tavalla tarkkailtuna. Valtioneuvoston asetus jätevesistä on annettu Ympäristönsuojelulain (86/2000) ja Vesihuoltolain (119/2001) nojalla, jotka määrittelevät puhdistamon toimintaa. (Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä 888/2006, 2022)

Taulukon 1 mukaisesti jätevedenpuhdistamon luparaja-arvoja tulee seurata jätevedenpuhdistamolla aktiivisesti, jotta ympäristölupaehdot täyttyvät. Ympäristölupaehtojen mukaisesti on määritetty sallittu pitoisuus (mg/l) ja prosentuaalinen poiston tehokkuus.

Taulukko 1. Kokemäen jätevedenpuhdistamon raja-arvot ympäristöluvan (Dnro ESAVI/213/04.08/2011) mukaisesti (Virtanen, 2022).

	Pitoisuus enintään (mg/l) ja käsittelyteho vähintään (%)
Kokonaisfosfori	0,4 mg/l tai 93 %
Kokonaistyppi	50 %
BOD	10 mg/l tai 93 %
COD	60 mg/l tai 97 %
Kiintoaine	20 mg/l tai 90 %

Biologisen jätevedenpuhdistuksen toimintahäiriöt, kuten kemikaalipäästöt ja öljy voivat laskea väliaikaisesti käsittelytehoa. Käsittelytehot saadaan kuitenkin pidettyä vähintään

tyydyttävänä kemiallisella käsittelyllä ja vesistökuormitus jää yleensä vähäiseksi, koska biologinen prosessi toipuu nopeasti. (Etelä-Suomen Aluehallintovirasto, 2011, s. 24)

3.2 Jätevedenpuhdistamon prosessi

Kokemäen jätevedenpuhdistamolla on käytössä kolme ilmastusallasta sekä selkeytysallas. Kokemäen jätevedenpuhdistamon prosessin kuvaus on esitetty karkeasti liitteessä 1. Jätevedenpuhdistamolla vesi kulkee tulopumppaamosta puhdistamon välpälle mekaaniseen puhdistukseen. Mekaanisen puhdistuksen tarkoituksena on poistaa jätevedestä suurimmat partikkelit, kuten ruoantähteet, pumpulipuikot ja terveyssiteet, jotka kuormittavat jätevedenpuhdistamon prosessia. Mekaanisen puhdistuksen jälkeen puhdistusprosessia tehostetaan kemikaaleilla, joita ovat ferrosulfaatti, sooda ja polymeeri.

Jäteveden kulkeminen prosessissa välppäyksen jälkeen jatkuu kemikaalin syöttö- ja hiekan erotus altaaseen, jossa syötetään puhdistustulosta edesauttavia kemikaaleja. Kemikaalin syöttö- ja hiekan erotus altaassa jätevesi esi-ilmastetaan, jonka avulla saadaan rasva ja hiekka eroteltua jätevedestä, jolloin se ei päädy prosessiin aiheuttamaan ylimääräistä kuormitusta. Hiekan erotus on tärkeää jätevedenpuhdistuksessa, sillä prosessissa hiekka vajoaa altaiden pohjalle sekä rikkoo ja kuluttaa pumppuja.

Kemikaalin syöttö- ja hiekan erotus altaan jälkeen vesi kulkeutuu ensimmäiseen ilmastusaltaaseen, josta alkaa denitrifikaatiovaihe eli hapeton prosessin vaihe. Denitrifikaatiovaiheen jälkeen jätevesi etenee nitrifikaatiovaiheen läpi, jossa jätevettä hapetetaan. Kokemäellä ensimmäinen ilmastusallas on noin kaksi kolmasosaa denitrifikaatiovaihetta ja yksi kolmasosa nitrifikaatiovaihetta. Jäteveden matka puhdistamolla jatkuu toiseen ilmastusaltaaseen, jossa nitrifikaatiovaihe jatkuu koko altaan mitan verran. Toisen ilmastusaltaan jälkeen vesi jatkaa matkaansa kolmanteen ilmastusaltaaseen, johon soodan syöttö muutettiin kesäkuussa 2022.

Kolmannessa ilmastusaltaassa on noin kolme neljäsosaa nitrifikaatiovaihetta ja viimeinen yksi neljäsosa hapetonta denitrifikaatiovaihetta. Viimeisestä denitrifikaatiolohkosta osa

prosessin jätevedestä pumpataan takaisin ensimmäisen ilmastusaltaan alkuun kierrätyslietteenä, jolloin typenpoistuvuus tehostuu.

Kokemäen jätevedenpuhdistamolla automaatioon sidotussa soodan syötössä ongelmana oli suuri määrä holvauksia, jolloin automaatiojärjestelmä ei näyttänyt syötettyjä määriä (g/h) oikein. Ferrosulfaatin syötössä jätevedenpuhdistamon henkilökunta mittasi viikoittain ferrosulfaatin ominaispainon eli tiheyden ja asetti syötettävän (kg/vrk) määrän sen mukaisesti. Pyrkimyksenä oli pitää liukoinen fosfori alle 0,1 mg/l ferrosulfaatin syötön säätämisellä.

4 Jätevedenpuhdistamon kemikaalit koeajossa

Kokemäen jätevedenpuhdistamolla koeajon alkaessa päätettiin, että natriumkarbonaatin automaatiota ei pysäytetä. Päätöksellä varmistettiin, että koeajossa tapahtuvien mahdollisten magnesiumhydroksidin syötön häiriöiden sattuessa jäteveden pH-arvo ei pääse laskemaan alle kuuden. Polymeeriä syötettiin jälkiselkeytykseen menevään veteen automaatiotoimisella polymeeriliuoksen valmistuslaitteistolla, jonka säätöihin ei tehty muutoksia.

4.1 Magnesiumhydroksidi

Magnesiumhydroksidi ($Mg(OH)_2$) on hyvin heikosti tunnettu vihreä kemikaali. Magnesiumhydroksidi on luokittelematon kemikaali, jonka ulkonäköä voisi kuvailla maitomaiseksi. Magnesiumhydroksidi ei ole vaarallinen kemikaali, koska se ei ole syövytä putkilinjastoja eikä aiheuta käyttäjälle hengenvaaraa. Magnesiumia esiintyy pääsääntöisesti Australiassa, Kiinassa, Pohjois-Koreassa, Ukrainassa ja Venäjällä. (Shand, 2006, s. 157)

Magnesiumhydroksidia on käytetty laajalti raskasmetallien saostuksessa ja teollisuuden happamien vesien neutraloimisessa. Magnesiumhydroksidissa magnesium on helposti saatavassa muodossa mikrobeille, jolloin se edistää mikro-organismien kasvua ja edesauttaa biologista puhdistusta anaerobisessa ja aerobisessa jätevedenkäsittelyssä. (Gibson & Maniocha, 2015, ss. 1–2)

Magnesiumhydroksidin etuna jätevedenpuhdistuksessa on sen erittäin alhainen liukoisuus veteen, mikä johtaa rajalliseen määrään hydroksyyli-ioneja neutraloinnissa. Neutralointi tapahtuu, kun happo kuluttaa liukoisen hydroksyyli-ionin magnesiumhydroksidista. Lisää hydroksyyli-ioneja vapautuu, kun magnesiumhydroksidihiukkanen liukenee happamuuden lisääntyessä. Magnesiumhydroksidi tarjoaa jätevedenpuhdistukseen pitkäkestoisemman alkaliteetin ja vakaamman pH-säädön. (Gibson & Maniocha, 2015, s. 3)

Jäteveden biologinen puhdistus on todella herkkä pH ja lämpötila muutoksille. Tämän vuoksi olosuhteiden muutokset jätevedenpuhdistuksen prosessissa tulee tehdä pienissä osissa vähän kerrallaan. Magnesiumhydroksidin liukeneminen vaatii aikaa, jotta kaikki syötetty kemikaali ehtii liueta prosessissa. Magnesiumhydroksidi liukenee happamissa olosuhteissa nopeammin, kuin emäksisissä. Magnesiumhydroksidi vähentää jätevedessä niin sanottuja pH-piikkejä, koska sen liukeneminen on hitaampaa mitä soodan, lipeän tai kalkin. Hitaammalla liukenevuudella ja magnesiumin saatavuudella mikrobit aktivoituvat ja pH ei nouse jätevedessä yli yhdeksään. Magnesium on välttämätön ravinne mikrobeille ja se aktivoi monia entsyymejä, kuten niitä, jotka osallistuvat fosfaatin siirtoon ja entsyymien sitoutumiseen substraattiin. (Shand, 2006, s. 164; ks. myös Berner Chemicals, n.d.)

4.2 Natriumkarbonaatti

Euroopassa kalsinoidun soodan valmistus tapahtuu Solvayn menetelmällä tronakerrostumien eli luonnollisen soodan puutteen vuoksi. Solvayn menetelmä on kehitetty 1800-luvulla, jolloin myös perustettiin ensimmäisiä tehtaita kalsinoidun soodan valmistamiseen. (Euroopan komissio, 2006, s. 6) Kalsinoidun soodan valmistus Solvay menetelmällä on monimutkaista ja energiaintensiivinen prosessi, jossa käytetään korkeita lämpötiloja. (Hanein ym., 2021)

Kokemäen jätevedenpuhdistamolla soodaa käytetään sen hyvän liukenevuuden vuoksi. Soodan annostelussa soodaruuvi aloittaa annostelun, kun pH-arvo laskee alle asetetun 6,2 arvon. Jätevedenpuhdistamolla sooda tuo prosessiin pH-piikkejä, sillä automaatio annostelee soodaa niin kauan, että pH nousee mittarilla yli asetetun arvon, sanoi Kokemäen jätevedenpuhdistamon puhdistamonhoitaja Harry Hakala. (Kokemäen jätevedenpuhdistamo,

henkilökohtainen tiedonanto, 21.4.2022) Soodan käyttö tuo haasteita, sillä yliannosteltaessa pH voi nousta 11 jopa 12 pH-arvoon, joka tuhoaa mikrobikannat sekä hidastaa tai jopa estää muiden kemikaalien toiminnan. (Shand, 2006, s. 157)

Soodan annostuksessa ongelmana on soodan syötön epätasaisuus, koska kemikaalia ei annostella jatkuvatoimisesti prosessiin. Jatkuvatoimisen syötön etuna on vakaampi prosessi, josta seuraa parempi puhdistustulos. Sooda tuo prosessiin heittelehtiviä pH-arvoja ja alkaliteetin riittämättömyyttä eri prosessin vaiheisiin. Soodan syötön ongelmina ovat viipymä ja matalat virtaukset. Soodan syöttö Kokemäen jätevedenpuhdistamolla perustuu selkeytysaltaassa olevaan pH-mittariin ja pH:n laskiessa alle asetetun arvon alkaa soodaruuvi syöttää soodaliuosta prosessiin. Soodan syötön ja pH-mittarin välinen jätevesi määrittää sen, kuinka kauan soodaruuvi käy ja saavuttaako soodaruuvi täyden syöttökapasiteetin.

4.3 Rautasulfaatti

Jätevedenpuhdistamoilla käytettävä ferrosulfaatti ($FeSO_4 \times 7H_2O$) on kahdenarvoista rautaa, joka hapetetaan ilman ja veden avulla puhdistusprosessissa kolmenarvoiseksi. Ferrosulfaatti on halpa ja varmatoiminen saostuskemikaali, jonka etuina jätevedenpuhdistamoilla on fosforin saostamisen lisäksi lietteen laskeutuvuuden ja kuivattavuuden paraneminen. Ferrosulfaatti toimitetaan jätevedenpuhdistamoille yleensä suoraan ferrosulfaatille tarkoitettuun liuotussäiliöön. Ferrosulfaatti on helposti veteen liukeneva kemikaali, jota ei ole tarkoitus säilöä jätevedenpuhdistamoilla kiinteässä olomuodossa. Liuotussäiliö toimii joissakin jätevedenpuhdistamoilla annostelusäiliönä, josta se pumpataan erilliseen päiväsäiliöön. Päiväsäiliössä kylläinen liuos laimennetaan ja syötetään prosessiin. (Vilpanen ym., 2022, s. 9; Huoltovarmuusorganisaatio, 2020, ss. 44–45)

Ferrosulfaatin tärkein tehtävä jätevedenpuhdistamoilla on muuntua kolmenarvoiseksi raudaksi, joka saostaa fosforia. Ferrosulfaatin muuntuessa kolmenarvoiseksi raudaksi, alkaa fosfori saostua lietteeseen. Fosforipitoisuuksia mittaamalla saadaan selville, miten paljon rautasulfaatti sitoo fosforia lietteeseen. Ferrosulfaatti on hapanta kemikaalia, jonka pH on noin 2,1 (10 g/l vesiliuoksella), joten ferrosulfaatin lisääminen jäteveteen laskee pH tasoa jossain määrin. (Työterveyslaitos, 2021) Ferrosulfaatin liukoisuus on riippuvaista

lämpötilasta. Kylläisenä liuoksena ferrosulfaatista osa kiteytyy takaisin lämpötilan laskiessa, joka aiheuttaa ferrosulfaattipitoisuuden alenemista. (Alavakeri, Latvanen & Pääkkönen, 2002)

Kokemäen jätevedenpuhdistamolla käytössä oleva ferrosulfaatti syötettiin kylläisenä liuoksena prosessiin. Ferrosulfaattia tarkkailtiin viikoittaisilla tiheysmittauksilla, sillä ferrosulfaatti laimenee jatkuvasti varastoaltaassa. Ferrosulfaatin syöttöä ei säädellä Kokemäen jätevedenpuhdistamolla virtauksien mukaisesti. Tyypillinen syöttömäärä on Kokemäen jätevedenpuhdistamon puhdistamonhoitajan mukaan 200–250 kg/vrk. (Harry Hakala, henkilökohtainen tiedonanto 11.5.2022) Ferrosulfaatin toimintaperiaate on esitetty kaavassa 2.

$$FeSO_4 \rightarrow Fe^{2+} + SO_4^{2-} \qquad (2.)$$

$$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \rightarrow Fe^{3+} + 2\,H_2O$$

$$Fe^{3+} + PO_4^{3-} \rightarrow FePO_2$$

(Pelto-Huikko & Vieno, 2009, s. 8)

Ferrosulfaatin toimintaperiaate jätevedenpuhdistuksessa perustuu rautasulfaatin hajoamiseen raudaksi ja sulfaatiksi. Raudan ja sulfaatin hajotessa tarvitaan raudan muodon muuttamiseen happea (O_2). Hapetuksen seurauksena saadaan rauta kolmenarvoiseksi, jolloin fosfaatti saadaan saostettua. Fosfaatin saostuksella saadaan niukkaliukoista rautafosfaattia, joka on poistettavissa laskeuttamalla tai ilmastamalla pintaan. (Pelto-Huikko & Vieno, 2009, s. 8)

4.4 Polymeeri

Polymeerinä laitoksella on käytössä FlocStar 2243P, jonka vuoksi laitoksella ei vaihdeta polymeerejä vuodenaikojen mukaisesti, koska polymeeri pystyy toimimaan kylmissä ja lämpimissä vesissä. Laitoksella oleva polymeeri on siis hyvin laaja-alainen toimivuudeltaan,

mikä helpottaa käyttäjää, kertoo Kokemäen jätevedenpuhdistamon puhdistamonhoitaja. (Harry Hakala, henkilökohtainen tiedonanto, 17.6.2022)

Jäteveden käsittelyssä polymeerin tehtävä on nopeuttaa kiintoaineen poistamista prosessista flokkulaatiolla. Polymeerien toiminta on riippuvaista muun muassa varauksen voimakkuudesta, varaustiheydestä, molekyylimassasta sekä hydrolyysin asteesta. Polymeeri tulee liuottaa veteen ennen annostelua siten, että polymeeri ja vesi on sekoittuneet tasaisesti toisiinsa. Polymeerin liuottamisessa tulee sekoituksen olla lyhytaikaista ja voimakasta. Polymeerin avulla kiintoaine saadaan poistettua tehokkaasti ja nopeammin, muodostamalla suurempia flokkulantteja. Flokkulanttien muodostumista jätevedessä edistää hidas sekoitus, joka saattaa flokkihiutaleet hellästi yhteen. Liian voimakas sekoitus repii flokkihiutaleet erilleen. Kiintoaineen ja nesteen erottelun jälkeen pystytään kiintoaine poistamaan prosessista ja hyödyntämään energiantuotannossa. (Kemmer, 1988, s. 208)

Jäteveden käsittelyssä yleisimpiä polymeerejä ovat polyamidit, polyeteeniamiinit, polyakryyliamidit ja disyaanidiamidi polymeerit. Polymeeri voi sisältää eri vahvuisia varauksia, jolloin se määritellään polyelektrolyytiksi. Positiivisia varauksia omaavaa polymeeriä kutsutaan kationiksi ja negatiivisia polymeerejä anioniksi. Polymeerejä voi olla myös amfolyyttisiä tai varauksettomia. Amfolyyttinen polymeeri voi toimia positiivisella tai negatiivisella varauksella. (Kemmer, 1988, ss. 204, 205)

Kationipolymeerit on suunniteltu toimimaan alhaisemmassa pH-arvossa ja anionit korkeammassa pH-arvossa. Alhaisemmassa pH-arvossa anionit eivät ole enää ionisia, mutta ne pystyvät flokkuloimaan kiinteitä aineita alhaisessa pH:ssa yksinkertaisten ionittomien sidostensa vuoksi. Korkeassa pH-arvossa kationit menettävät varauksensa, mutta pystyvät silti toimimaan kolgulanttina. (Kemmer, 1988, ss. 208–214)

5 Vihreä kemia ja kestävä kehitys

Tässä opinnäytetyössä vihreä kemia on osana, koska sooda alkalointikemikaalina aiheuttaa terveys- ja ympäristöriskejä. Jätevedenpuhdistamoilla alkaloivina kemikaaleina ovat käytössä emäksiset kemikaalit, jotka vuotojen sattuessa aiheuttaa vaaraa ympäristölle ja ihmisille.

(Carl Roth, 2015, ss. 4–6) Opinnäytetyön pyrkimyksenä on tutkia vaihtoehtoa jätevedenpuhdistamoille, joka ei aiheuta riskejä puhdistamon henkilökunnalle tai ympäristölle.

Vihreän kemian periaatteisiin kuuluvat muun muassa jätteen synnyn ehkäisy, turvallisten kemikaalien suunnittelu, uudistuvien lähtöaineiden käyttö, tuotteiden hajoaminen elinkaaren lopussa ja onnettomuuksien välttäminen oikeilla kemikaalivalinnoilla. Kestävällä kemialla, johon vihreä kemia sisältyy, pyritään tehostamaan ja kehittämään kemikaalituotteiden ja -palveluiden luonnonvaroja kestävään käyttöön. Kestävä kemia hyödyntää luonnonaineita, joilla on kasvava merkitys erilaisilla teollisuudenaloilla, kuten elintarvike-, kemia- ja kosmetiikka-aloilla. (Ympäristötiedon foorumi, 2016, ss. 1–2)

Jätevedenpuhdistamon kemikaalien korvaamista turvallisempaan suuntaan on syytä pohtia kestävän kehityksen kannalta, koska kestävän kehityksen tarkoitus on vaikuttaa päätöksissä ja toiminnoissa ympäristön kannalta tärkeissä asioissa. Kestävän kehityksen tarkoituksena on turvata nykyisille ja tuleville sukupolville hyvät elämisen mahdollisuudet. (Ympäristöministeriö, n.d.)

Ympäristöministeriö, Kuntaliitto ja Vesilaitosyhdistys ovat allekirjoittaneet yhdyskuntajäteveden puhdistamisen Green deal -sopimuksen, jonka tavoitteena on vähentää jätevesistä aiheutuvaa kuormitusta ympäristölle. Sopimuksen tarkoituksena on kehittää joustavasti puhdistamoiden toimintaa ympäristölupavaatimuksia korkeammalle sekä edistää vesiensuojelua. Jätevedenpuhdistuksen perustana on poistaa jäteveden aiheuttamat turhat kuormitukset ympäristölle, joita ovat orgaanisen aineen aiheuttama hapenkulutus, kiintoaine, typpi ja fosfori. Jätevedenpuhdistuksen jatkuva kehittäminen turvaa luonnon monimuotoisuutta ja hillitsee ilmastonmuutosta. (Ympäristöministeriö, 2021)

Soodan valmistus tapahtuu lähes kokonaan Solvayn menetelmällä, jonka merkittävimmät ympäristövaikutukset valmistuksessa syntyvät hiilidioksidipäästöistä ja tislausvaiheen jätevesistä. Kalsinoidun soodan prosessin hiilijalanjäljeksi on laskettu noin 200–400 kg Co_2/tonni soodaa. Luonnollisesti valmistetun kalsinoidun soodan hiilijalanjälki on pitkälti

sama, kuin synteettisen kalsinoidun soodan valmistuksesta aiheutuvat päästöt. (Hanein ym., 2021; ks. myös Euroopan komissio, 2006, s. 6)

Magnesiumhydroksidin tuotantoon tarvittavaa magnesiumia esiintyy erityisesti serpentiniitissa. Suomessa esiintyy jonkin verran serpentiini ja serpentiniittia sisältäviä teollisen tuotannon sivumateriaaleja. Sivumateriaalien ominaisuuksista ei ole kuitenkaan kattavaa tietoa teollista tai muuta käyttöä varten. (Aatos ym., 2006, s. 1) Kotimaisia magnesiumesiintymiä kartoitetaan parhaillaan ja tavoitteena on löytää ratkaisu kotimaisista magnesiumesiintymistä. Tässä opinnäytetyössä ei keskitytty laskemaan kemikaalien hiilijalanjälkeä vaan kerättiin tietoa olemassa olevista lähteistä.

Saatavilla olevien lähteiden mukaan serpentiniitti, jonka käsittelymenetelmällä magnesiumia tuotetaan, syntyy arvioiduksi hiilijalanjäljeksi noin 3,8–7,5 kg CO_{2eq}/tonni MgO ja 2,6–5,2 CO_{2eq}/tonni $Mg(OH)_2$. Magnesiumia saadaan myös suolavedestä, jolloin raaka-aineelle syntyy käsittelymenetelmällä arvioiduksi hiilijalanjäljeksi noin 2,7–5,6 kg CO_{2eq}/tonni MgO ja 1,6–3,3 kg CO_{2eq}/tonni $Mg(OH)_2$. Kiinalaiset CCM tuottajat ovat valmistaneet myös 92 %:sesti puhtaan magnesiumoksidin, jonka arvioitu hiilijalanjälki on 3,1–4,5 kg CO_{2eq}/tonni MgO. Arvioiduista hiilijalanjäljistä voidaan päätellä, että magnesiumhydroksidin tuotannossa pystytään vaikuttamaan kasvihuonekaasujen vähentymiseen valitsemalla ”oikeasta” lähteestä valmistettu raaka-aine. (Luong ym., 2018, s. 1044)

Kemikaalien turvallisuutta ja tietoisuutta pyritään lisäämään Euroopan unionin kemikaaliasetuksen eli REACH:n (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) avulla, mikä velvoittaa kemikaalivalmistajat selvittämään kemikaaleista aiheutuvat riskit, rekisteröimään kemikaalit ja opastamaan turvalliseen käyttöön. REACH-asetuksella pyritään tehostamaan tiedon lisäksi EU:n kemikaaliteollisuuden kilpailukykyä. REACH:n avulla pystytään kehittämään myös turvallisempia kemikaaleja, sillä kemikaalien terveys- ja ympäristövaikutukset ovat saatavilla. (ECHA, n.d.)

6 Koeajo

Ennen koeajoa suunniteltiin jätevedenpuhdistamolle koeajo- ja näytteenottosuunnitelma (Liite 1), jolloin koeajon aikana tapahtuvia muutoksia ja tuloksia seurattaisiin jatkuvasti. Ennen koeajoa ja koeajon aikana mitattiin alkaliteettiarvoja ja liukoista fosforia prosessin eri vaiheista (Liite 2), jotta nähtäisiin vaikutukset kemikaalin vaihdossa. Ammoniumtyppi ja liukoinen fosfori analyysit suoritettiin Colorimetri DR 890 HACH-laitteella ohjeiden mukaisesti. pH:ta seurattiin käsimittarilla prosessin eri vaiheista ja lähtevästä jätevedestä seurattiin pH-arvoa reaaliaikaisella mittarilla. Tulokset analyyseistä ja muutoksista kerättiin muistiinpanovihkoon, josta ne siirrettiin Excel-tiedostoon.

Koeajo aloitettiin 29.6.2022, jolloin jätevedenpuhdistamon kolmanteen ilmastusaltaaseen aloitettiin syöttämään magnesiumhydroksidia alkaloivana kemikaalina. Näytteenottosuunnitelmasta (Liite 1/1) poiketen ammoniumtyppitestejä tehtiin suunniteltua vähemmän, sillä muutokset olivat hyvin vähäisiä.

Magnesiumhydroksidin koeajolaitteistoon Kokemäen jätevedenpuhdistamolla kuului letkupumppu, IBC-kontti ja syöttöletkua. Koeajolaitteiston paikka jätevedenpuhdistamolla oli hyvin kaukana virallisesta syöttöpaikasta, mikä aiheutti haasteita koeajolaitteiston säätämisessä.

Koeajon edetessä analyyseistä todettiin, että magnesiumhydroksidi kasaantui ensimmäisen ilmastusaltaan denitrifikaation ja nitrifikaation välissä olevaan seinämään. Magnesiumhydroksidin hitaan liukenemisen vuoksi saattaa prosessiin pakkautua alkalointikemikaalia, jos prosessissa ei ole riittävästi liukenemiselle aikaa, happoja tai virtaukset eivät ole korkeat. Syöttöpaikka muutettiin kolmannen ilmastusaltaan alusta ensimmäisen ilmastusaltaan loppuun, jolloin magnesiumhydroksidilla olisi enemmän aikaa liueta prosessissa. Syöttöpaikan muutoksella alkalointikemikaali ei kasaantuisi ensimmäisen ilmastusaltaan hapettomaan osaan, sillä tavoitteena oli saada magnesiumhydroksidi tasoittamaan koko prosessia. Denitrifikaatiossa vapautuu alkaliteettia prosessiin hapettomissa olosuhteissa, mikä osittain näkyi analyyseissä suurina alkaliteetti piikkeinä hapettomissa prosessin osissa.

Koeajon aikaiset analyysit valikoituivat sen mukaisesti, mitä mittauksia oli jätevedenpuhdistamolla käytettävissä ja mitkä mittaukset ovat puhdistamon toiminnan kannalta tärkeimmät. Koeajon aikana näytteenotto tapahtui kertanäytteenotoilla. Alkaliteettinäytteet analysoitiin työntilaajan laboratoriossa ja muut näytteet Kokemäen jätevedenpuhdistamolla. Kokoomanäytteitä ei ollut mahdollista kerätä useiden näytepisteiden vuoksi. Kertanäytteenotot pyrittiin toistamaan samoista näytepisteistä ja syvyydestä kolmen kuukauden aikana useasti, jolloin tuloksille saatiin hajontaa ja varmuutta.

6.1 Ennakkotestien tulokset

Koeajoa edeltävät testit tehtiin liukoiselle fosforille, jolloin varmistettiin magnesiumhydroksidin toimivuus ferrosulfaatin kanssa. Ennen koeajon alkamista jätevedenpuhdistamolta kerättiin tietoa, miten puhdistamo toimi ennen alkalikemikaalin vaihtoa.

Tieto mitä jätevedenpuhdistamolta kerättiin prosessin eri vaiheista, oli pH-arvo, alkaliteetti, liukoisen fosforinpitoisuus ja ammoniumtyppi. Ennen koeajoa oli tarkoituksena kartoittaa lähtötilanne, jolloin koeajon tuloksille saadaan vertailua.

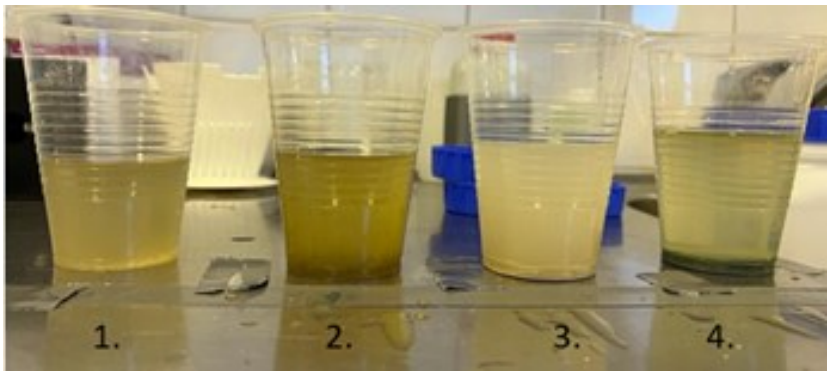
6.2 Liukoisen fosforin ennakkotestit

Liukoisen fosforin saostumisen ennakkotestin (Kuva 3) näytteiden käsittelyssä pyrittiin toistamaan olosuhteet mahdollisimman todenmukaisesti. Näytteenä liukoisen fosforin saostumisen testiin käytettiin saapuvaa jätevettä, joka otettiin muoviseen näytepulloon ja jaettiin neljään kertakäyttöiseen muovimukiin, joiden tilavuus oli noin 2 desilitraa. Jokaiseen muovimukiin mitattiin silmämääräisesti noin 1 dl jätevettä, sillä mittalaseja ei ollut saatavilla.

Liukoisen fosforin saostumisen alkutesteissä (Kuva 3) ensimmäisessä näytemukissa on vain saapunutta jätevettä, toinen näyte sisältää saapuneen jäteveden ja ferrosulfaatin, kolmas näyte sisältää saapuvan jäteveden ja magnesiumhydroksidin ja neljäs näyte saapuvan jäteveden, magnesiumhydroksidin ja ferrosulfaatin. Kuvasta 3 huomattavissa on näytteiden

eroavan ulkonäöllisesti toisistaan, mutta kyseisellä liukoisen fosforin testillä ei saatu varmuutta syyhyn mikä aiheutti ulkonäöllisen eron.

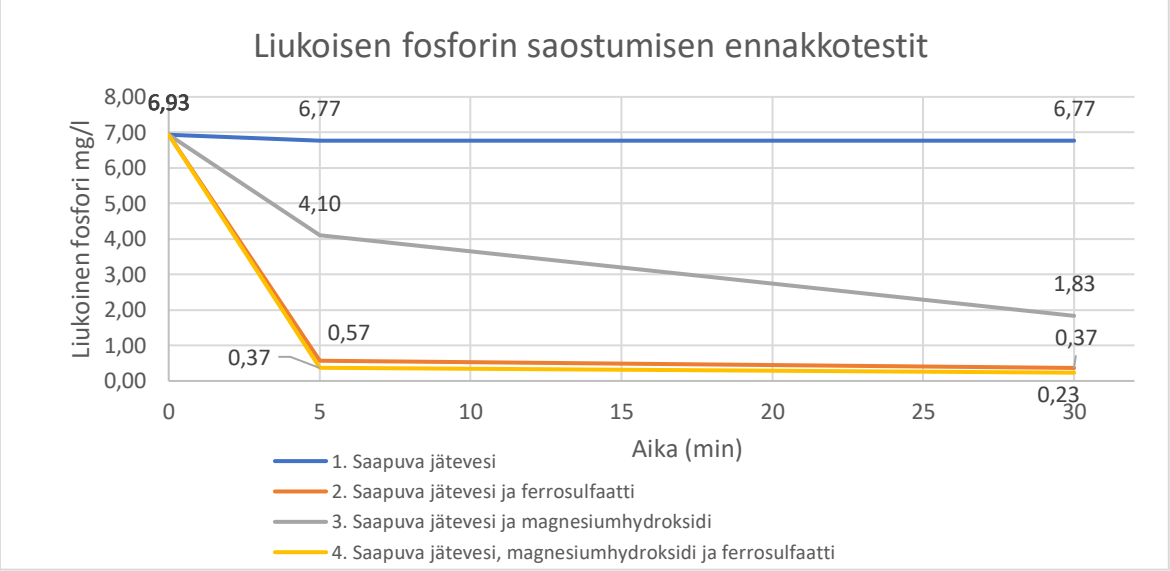
Kuva 3. Liukoisen fosforin ennakkotesti rautasulfaatilla ja magnesiumhydroksidilla.



Kuvan 3 näytteisiin lisätyt kemikaalit on mitattu automaattipipetillä, jolloin kemikaalien osuudet kaikissa olisivat täysin samat. Näytteisiin, joihin lisättiin kemikaalia, oli kemikaalien määrät 1 ml magnesiumhydroksidia ja 2 ml ferrosulfaattia. Kokeissa kemikaalien määrät olivat yliannosteltuja, jotta näytteissä nähtäisiin vaikutus yliannosteltaessa. Magnesiumhydroksidin yliannostus näkyi hyvin näytteessä kolme (Taulukko 2), sillä pH nousi näytteessä noin 9,3 pH-arvoon. Kemikaalien lisäyksen jälkeen jokaista (1–4) näytettä ilmastettiin noin 30 sekunnin ajan.

Näytteiden analyysit suoritettiin tietyssä järjestyksessä sekä käsittely samalla tavalla, jotta mahdollisilta näytteiden sekoittumisen virheiltä säästyttäisiin. Näytteiden ilmastamisen jälkeen analysoitiin näytteistä (Kuva 4) liukoinen fosfori ja pH-arvo. Analyysin jälkeen odotettiin noin 30 minuuttia, jolloin magnesiumhydroksidilla olisi aikaa liueta jäteveteen. Odotuksen jälkeen mitattiin liukoinen fosfori ja pH-arvo näytteistä uudelleen. Kokeen tarkoituksena oli kartoittaa että, aiheuttaako magnesiumhydroksidi positiivisia, negatiivisia vai olemattomia vaikutuksia liukoisen fosforin saostamisessa.

Kuva 4. Liukoisen fosforin saostumisen ennakkotestit.



Taulukossa 2 on esitettynä liukoisen fosforin poistumisen ennakkotestien pH-muutokset. Tuloksista nähdään, että ensimmäisessä näytteessä saapuvan jäteveden pH-arvo ei muutu alkuperäisestä pH-arvosta 7,47 viiden minuutin jälkeen. pH-mittausta ei suoritettu 30 minuutin jälkeen kyseisessä näytteessä uudelleen. Toisessa näytteessä lisättiin saapuvaan jäteveteen ferrosulfaattia, jolloin huomattavissa on pH-arvon laskua. pH:n lasku oli odotettavissa, sillä ferrosulfaatti on hapanta kemikaalia. Kolmannessa näytteessä huomattavissa on magnesiumhydroksidin yliannostus, sillä pH-arvo nousi alkuperäisestä 7,47 noin 9,3 pH-arvoon. pH-mittausta ei suoritettu 30 minuutin jälkeen kyseisessä näytteessä uudelleen.

Neljännessä näytteessä pH-muutos oli hyvin erilainen, kuin aikaisemmissa näytteissä, koska lisättäessä ferrosulfaattia ja magnesiumhydroksidia, ei pH-arvo muuttunut radikaalisti. pH-arvo ei noussut näytteessä samalle tasolle, kuin kolmannessa näytteessä vaikka magnesiumhydroksidin lisäys oli täysin sama.

Taulukko 2. pH-muutokset ennakkotesteissä, mittaukset on suoritettu samoista näytteistä, kuin liukoisen fosforin ennakkotestien mittaukset.

Näyte	pH-arvo alkuperäinen	pH-arvo kemikaalien lisäyksen jälkeen (5 min)	pH-arvo 30 min jälkeen
1. Saapuva jätevesi	7,47	7,47	
2. Saapuva jätevesi ja ferrosulfaatti	7,47	6,81	6,76
3. Saapuva jätevesi ja magnesiumhydroksidi	7,47	9,27	
4. Saapuva jätevesi, magnesiumhydroksidi ja ferrosulfaatti	7,47	7,54	7,63

Liukoisen fosforin saostumisen testit ovat suuntaa antavia, sillä laajoille analyyseille ei ollut mahdollisuutta ja koe suoritettiin vain kerran. Tuloksia olisi pitänyt olla enemmän, jolloin mahdolliset virheet voitaisiin sulkea pois sekä saada tuloksille hajontaa.

7 Tulokset ja tulosten tarkastelu

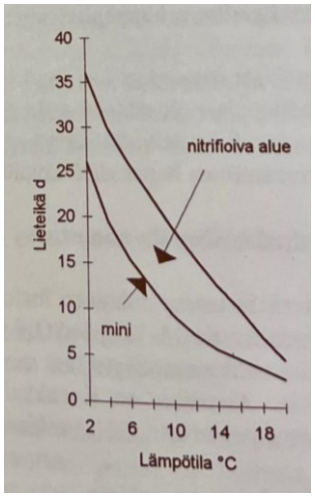
Koeajon aikana havaittiin jätevedenpuhdistamolla lietteen muuttuvan paksummaksi ja vaahtomaisemmaksi. Koeajon aikana KVVY (Kokemäenjoen vesistön vesiensuojeluyhdistys ry) analysoi näytteen pintavaahdosta. Pintavaahdon jätevedenpuhdistamolle aiheutti *Nocardia* -suvun rihmastobakteeri. *Nocardian* vaikutusta koeajoon ei pystytä tulkitsemaan koeajon tuloksista. Tiedossa ei ole, että onko *Nocardia* ollut jätevedenpuhdistamolla ennen koeajon aloittamista ja onko magnesiumhydroksidilla ollut vaikutusta *Nocardian* kasvuun edesauttavasti.

7.1 *Nocardia* jätevedenpuhdistamon prosessissa

Nocardia eli rihmamaiset mikro-organismit ovat organismeja, joilla ei esiinny kuorta. *Nocardian* optimaaliset kasvuolosuhteet ovat pH:n ollessa 6,5 ja lämpötilan kohotessa 15–37 ^{o}C:seen jätevedessä. *Nocardia* aiheuttaa jätevedenpuhdistamoille ruskean vaahdon pintaan, joka on vaikeasti poistettavissa, sillä vaahto on hyvin paksua. *Nocardiat* aiheuttavat vaahtoamisongelmia, sillä mikro-organismeilla on hydrofobiset eli vettä hylkivät soluseinät, jonka vuoksi ne pyrkivät pois vesifaasista. (Hakala ym., n.d., s. 20; Jenkins ym., 2003, ss. 5–7)

Optimaalinen lieteikä *Nocardialla* on 2–20 vuorokautta. Lieteiän merkitys jätevedenpuhdistamon prosessin nitrifikaation toimintaan on esitetty kuvassa 5. *Nocardialla* on hyvin suuret kasvumahdollisuudet jätevedenpuhdistamon prosessissa, koska lieteikä on optimaalinen lähes aina. Lieteikä on yksi biologisen prosessin parametreistä, joka merkitsee bakteerien keskimääräistä ikää käsittelyaltaassa. Lieteikä on yleensä jätevedenpuhdistamoilla 5–15 vuorokautta, joka lasketaan jakamalla altaan lietteen määrä päivittäisen poistetun lietteen määrällä. (Jenkins ym., 2003, ss. 5–7; Pelto-Huikko & Vieno, 2009, s. 10)

Kuva 5. Lieteiän ja lämpötilan merkitys nitrifikaation toimintaan (Balmér ym., 1979/1982).



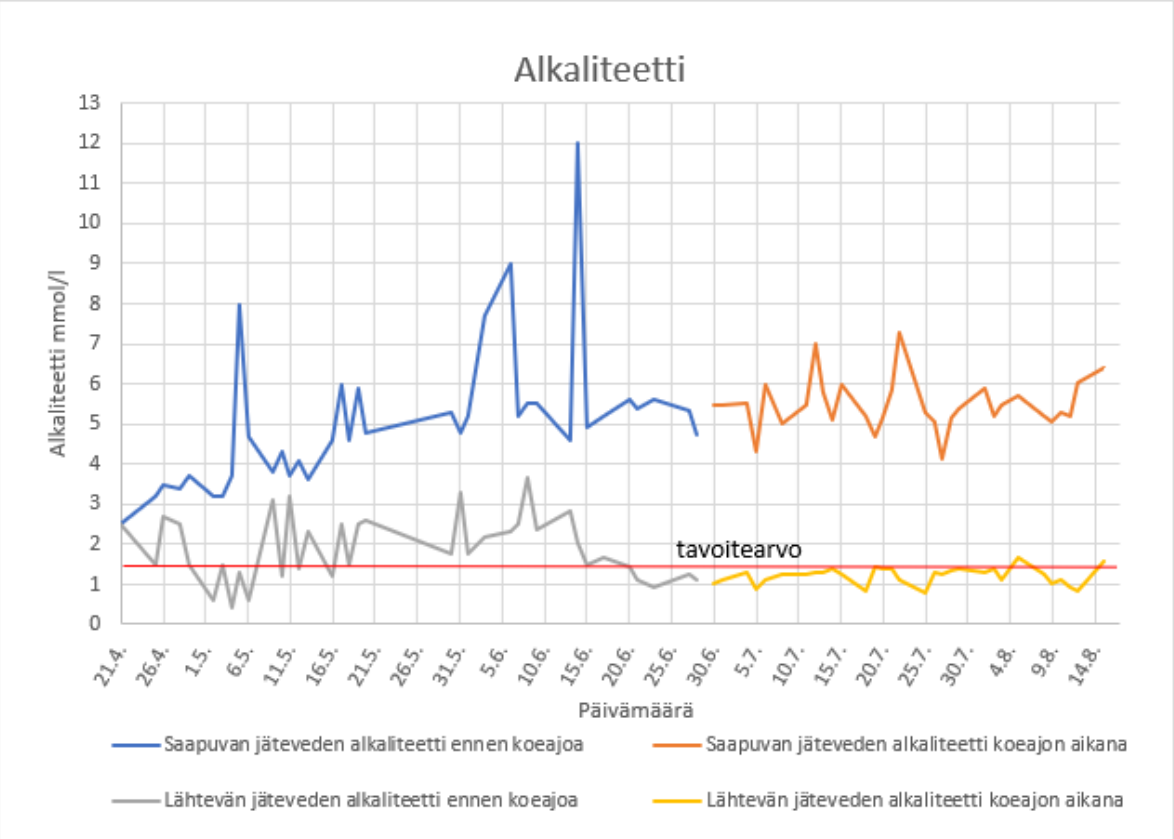
Nocardia kasvaa yleensä flokkien sisällä, kunnes rihmastoa on niin paljon, että kasvu tapahtuu vapaana lietteessä flokkien välissä. *Nocardiaa* ollessa paljon hydrofobiset rihmastot pyrkivät pois vesifaasista kiinnittymällä ilmastuksen kupliin pyrkien pinnalle. *Nocardian* kasvun mahdollisia syitä on alhainen lietekuorma, tulevan jäteveden pinta-

aktiiviset aineet eli tensidit ja/tai hydrofobiset substraatit, pumppujen mekaaninen rasitus (pinta-aktiiviset proteiinit vapautuvat) tai huonosti toimiva selkeytin, jossa rasvoille tapahtuu anaerobinen hydrolyysi. (Hakala ym., n.d., s. 20; Jenkins ym., 2003, ss. 5–7)

7.2 Alkaliteetti

Alkaliteetin määritykseen käytettiin vetykloridihappoa eli suolahappoa, jonka pitoisuus oli 0,1 M (mol/dm^3). Alkaliteettiin asetettiin ennen koeajoa tavoitearvoksi lähtevälle vedellä 1,5 mmol/l, sillä useissa kirjallisuuden lähteissä on annettu riittäväksi alkaliteetin määräksi 1–1,5 mmol/l. Alkaliteetti koeajon aikana tasoittui, mutta syöttöhäiriöiden vuoksi alkaliteetti heittelehti 0,78–1,65 mmol/l välillä. Kuvasta 6 on nähtävissä, että alkaliteetti magnesiumhydroksidin koeajon aikana on tasaisempi, kuin soodalla. Magnesiumhydroksidin syötöllä alkaliteetin ja pH:n tasaisuus on suurena etuna biologis-kemiallisessa prosessissa, biologisen toiminnan kannalta.

Kuva 6. Alkaliteetin muutos ennen koeajoa ja koeajon jälkeen, tavoitearvo 1,5 mmol/l asetettiin lähtevälle vedelle kirjallisuuden perusteella.

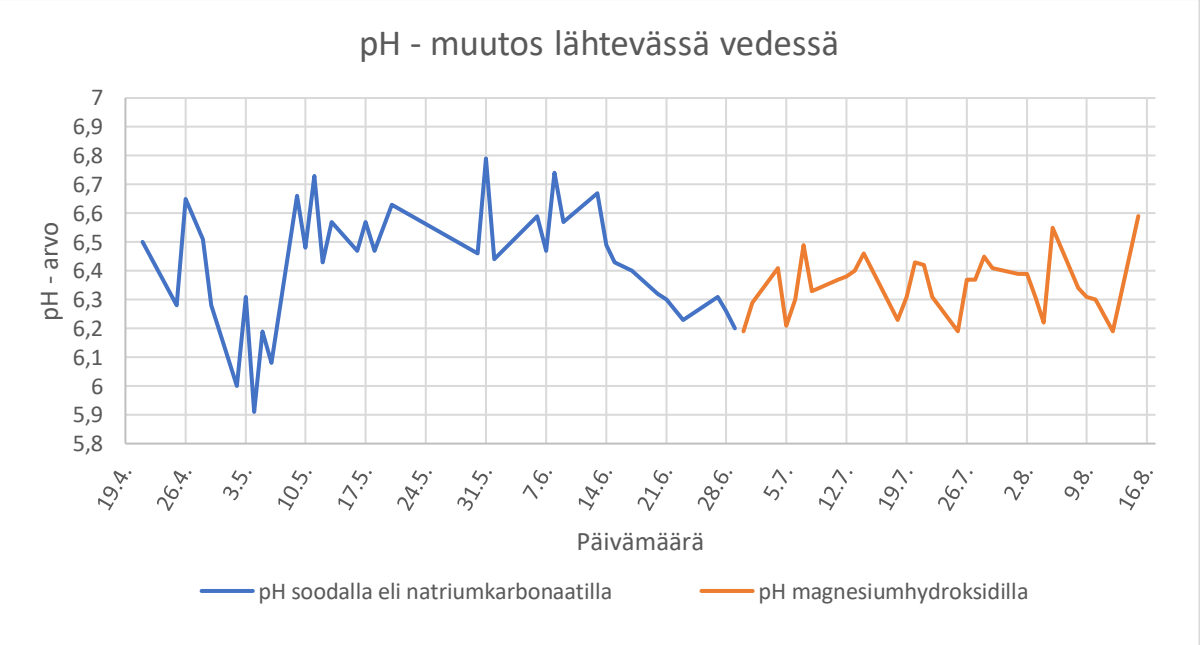


7.3 pH-arvo

pH:ta seurattiin jätevedenpuhdistamolla päivittäin koeajon aikana, jolloin tulokset olisivat mahdollisimman laajat. pH-vaikutukset näkyivät mittauksissa jo seuraavan vuorokauden aikana siten, että prosessissa ei ollut enää havaittavissa suuria pH-piikkejä, jotka eivät ole hyväksi puhdistamon toiminnalle. pH:lle asetettiin tavoitteeksi 6,2–7 ennen koeajoa, jotta magnesiumhydroksidin syöttöä pystyttäisiin hallitsemaan paremmin, häiritsemättä prosessin biologista toimintaa pH-arvon muuttumisella.

Magnesiumhydroksidin yksi suurimmista eduista on prosessin pH:n tasaisuuden saavuttaminen kemikaalin hitaalla liukenemisella. Kuvassa 7 pH-muutos on huomattavissa lähtevässä vedessä pH-arvon tasoittumisella magnesiumhydroksidin koeajon aikana. pH magnesiumhydroksidilla käy alhaisimmillaan 6,19, koska koeajolaitteistossa tapahtui syöttöhäiriöitä ja soodan automaatio aloitti pH:n nostamisen. Soodan automaatiota ei kytketty pois päältä koeajon aikana. Sillä varmistettiin jätevedenpuhdistamon toiminnan varmuus, jos koeajolaitteistossa tapahtuu häiriöitä.

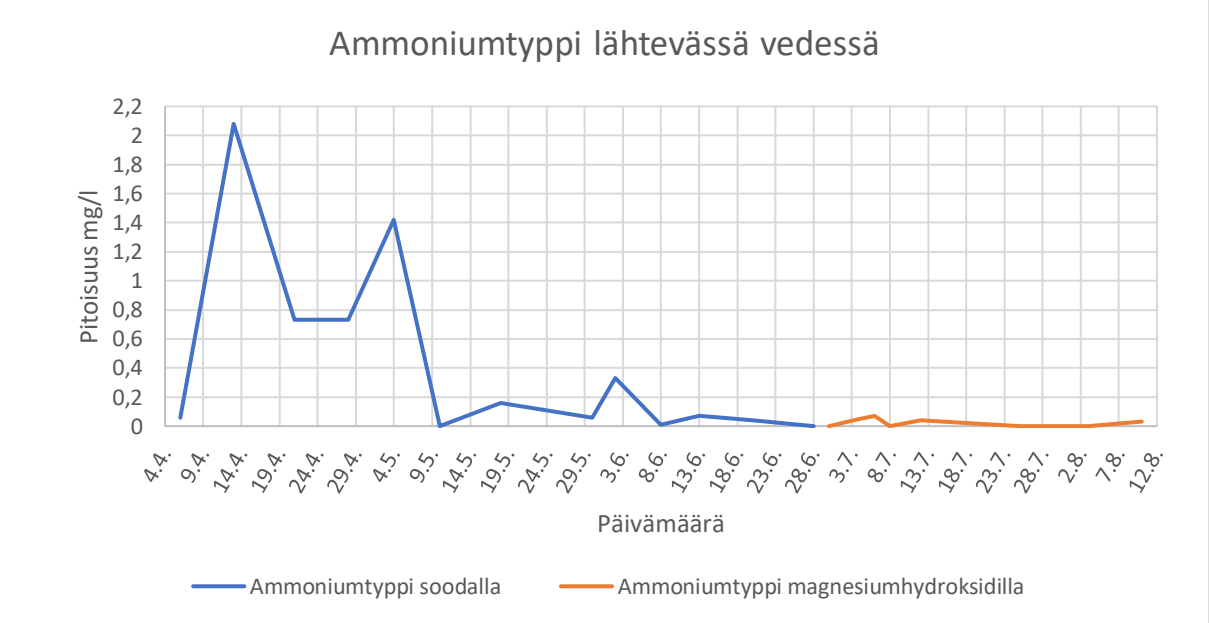
Kuva 7. pH-arvot ennen koeajoa ja koeajon jälkeen lähtevässä vedessä, jäteveden lähtevän pH-tavoite asetettiin 6,2–7 välille.



7.4 Ammoniumtyppi

Ammoniumtyppimittauksessa käytettävät Nitrogen Ammonia AmVer-testit tehtiin ohjeen mukaisesti lähtevästä vedestä. Ammoniumtyppi mitattiin koeajon aikana Colorimetri DR 890 HACH-laitteella. Ammoniumtypen tulokset olivat koeajon aikana toivottuja, sillä tulokset olivat alhaisia. Ammoniumtypen tavoite arvo oli 0 mg/l, koska ammoniumtypenmittauksilla mitataan typen poistumisen tehokkuutta. Koeajon aikana ammoniumtyppimittauksia vähennettiin, koska muutoksia ei tapahtunut tuloksissa. Kuvasta 8 on nähtävissä ennen koeajon alkamista ammoniumtypen huomattava vaihtelu verrattaessa koeajon aikaisiin mittauksiin. Ammoniumtyppi mittaukset ovat suuntaa antavia, sillä pidempiaikaista seurantaa ei tehty rajallisen koeajoajan vuoksi.

Kuva 8. Ammoniumtyppi soodalla ja magnesiumhydroksidilla.

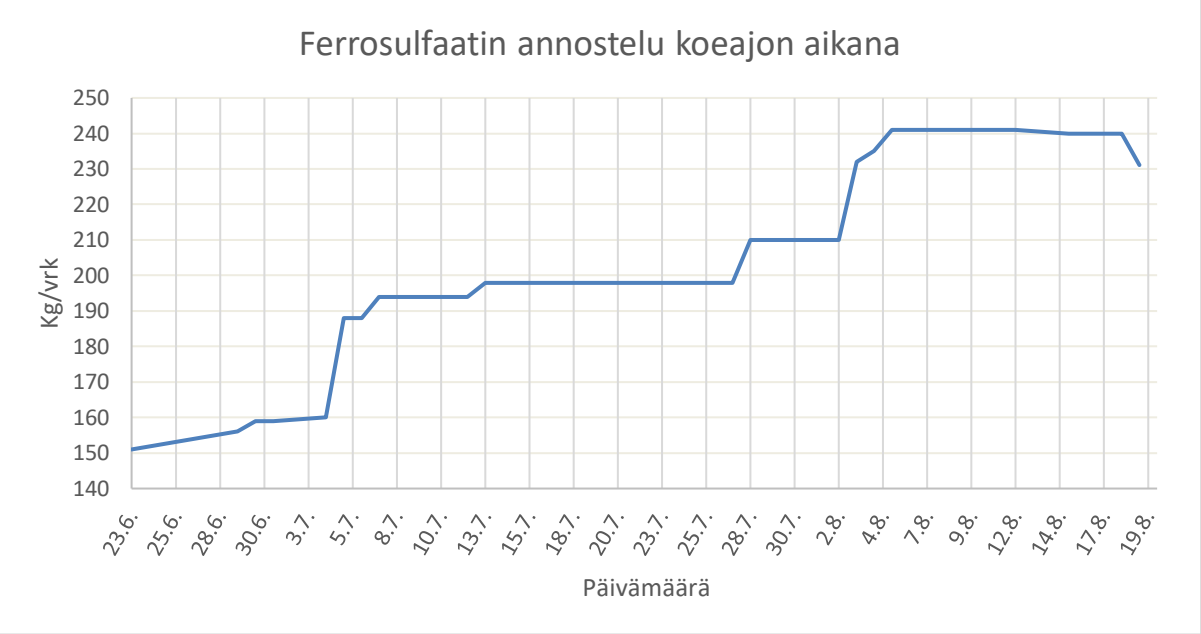


7.5 Ferrosulfaatin syöttö

Ferrosulfaatin annostelu ennen koeajon alkamista oli alhaista, joka nähdään kuvassa 9. Ferrosulfaatin syötön alentamisella oli tarkoitus optimoida ferrosulfaatin syöttö ja pyrkiä vähentämään sen ylisyöttöä. Ferrosulfaatin syöttö on ollut noin 200–250 kg/vrk ennen jätevedenpuhdistamon henkilökunnan aloittamaa optimointia. Saostuskemikaalin optimointi tuo pitkällä aikavälillä säästöjä, sillä ferrosulfaattia syötetään usein varmuuden vuoksi

pienillä jätevedenpuhdistamoilla yli tarpeen (Huoltovarmuusorganisaatio, 2020, s. 44). Ferrosulfaatin syötön alentaminen ei liukoisen fosforin tuloksissa näy heti, sillä lietteeseen on sitoutunut huomattava määrä rautaa, joka sitoo tulevan jäteveden fosforia. (Etelä-Suomen Aluehallintovirasto, 2011, s. 24)

Kuva 9. Ferrosulfaatin annostus koeajon aikana, jolloin liukoinen fosfori nousi, koska ferrosulfaatin annostus oli vähäinen.



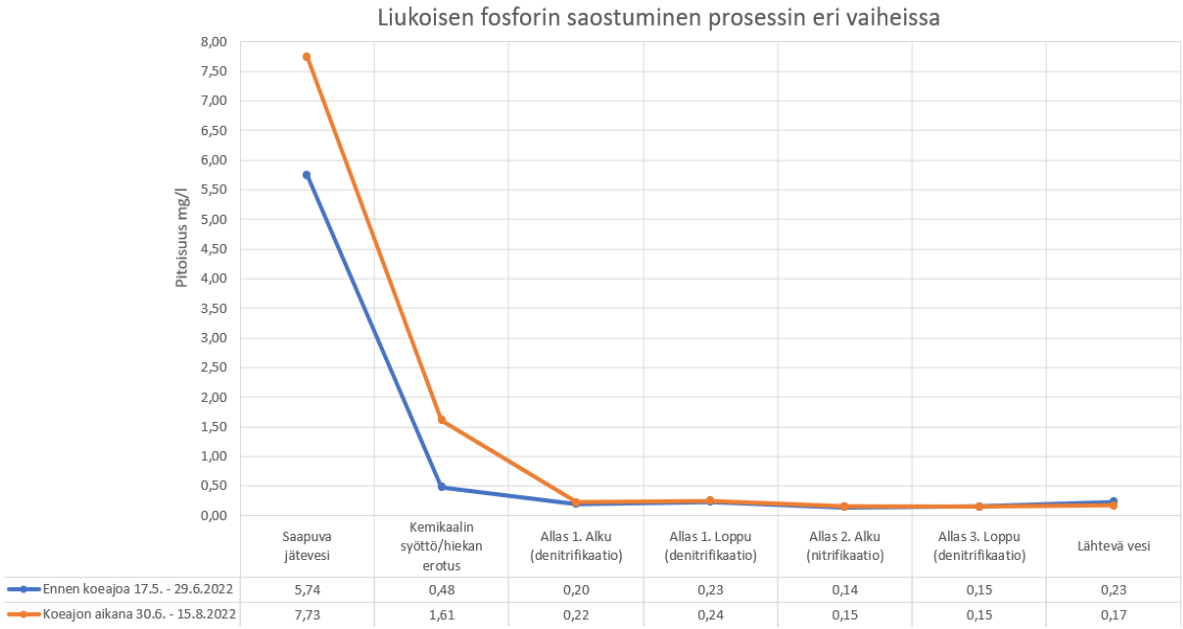
7.6 Liukoinen fosfori

Liukoinen fosfori mitattiin koeajon aikana Colorimetri DR 890 HACH-laitteella. Mittarin mittausalue oli 2,50 mg/l, joten mitattaessa saapuvasta vedestä liukoista fosforia tuli näyte laimentaa 1:10 ionisoidulla vedellä. Näytettä analysoidessa reagenssina käytettiin PhosVer3 Phosphate-reagenssia. Näytteet analysoitiin laitteen ohjeiden mukaisesti. Kuvassa 10 on nähtävissä liukoisen fosforin saostuminen koeajon aikana ja ennen koeajoa ajalta 6.6.–28.8.2022. Koeajon ajankohta on merkitty kuvaan 10 pystypalkeilla. Koeajon aikana liukoisen fosforin pitoisuus heittelehti, sillä ferrosulfaatin syöttö vaihteli 159–240 kg/vrk välillä.

Kuva 10. Liukoisen fosforin saostuminen lähtevässä vedessä, koeajon ajankohta 29.6.–15.8.

Kuvassa 11 liukoisen fosforin saostuminen prosessin eri vaiheissa keskiarvo on laskettu yhteensä kahdestakymmenestä näytepisteestä. Näytteet on otettu samalla tavalla ja samoista näytepisteistä ennen koeajoa ja koeajon aikana. Kuvasta 11 voidaan päätellä, että liukoinen fosfori saostuu jo suurilta osin kemikaalin syötössä/hiekan erotuksessa, mutta tulokset ovat suuntaa antavia vähäisten analyysien ja kertanäytteiden vuoksi. Kuvan 11 keskiarvot ovat suuntaa antavia, koska tuloksien keskihajonta oli suurta. Keskihajonta saapuvassa jätevedessä oli 3,50 mikä oli suurin keskihajonta, sillä tulevan jäteveden pitoisuudet vaihtelevat reilusti. Alhaisin keskihajonta 0,03 altaan 2. alussa.

Kuva 11. Liukoisen fosforin saostuminen prosessissa vaiheittain.



Liukoisen fosforin saostuminen prosessin alussa johtunee kemikaalin syöttö/hiekan erotuksen altaan voimakkaasta esi-ilmastuksesta. Esi-ilmastusta hillittäessä ferrosulfaatin hapettuminen ferrisulfaatiksi tapahtuisi suurelta osin vasta nitrifikaation alkaessa 1. ilmastusaltaan lopussa. Ferrosulfaatin annostelussa osa kemikaalista on voinut jo hapettua ennen annostelua liuotuksen yhteydessä.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Koeajo lopetettiin 15.8.2022, jolloin koeajolaitteisto purettiin jätevedenpuhdistamolta. Koeajon loppuessa muutoksia jätevedenpuhdistamolla ei tarvinnut palauttaa, sillä niitä ei tehty koeajon aikana prosessiin. Jätevedenpuhdistamolla viiveajat olivat altaissa pitkiä, jolloin magnesiumhydroksidilla oli aikaa liueta ja prosessiin ei tarvinnut tehdä muutoksia. Koeajon aikana jätevedenpuhdistamolla tehtiin huoltoja sekä korjauksia, minkä seurauksena tulokset ovat suuntaa antavia.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten magnesiumhydroksidi toimii jätevedenpuhdistamon prosessissa alkaloivana kemikaalina. Magnesiumhydroksidi jätevedenpuhdistuksessa edesauttaa mikrobiologista toimintaa sekä tasoittaa prosessia hitaammalla liukenevuudella. Koeajon tarkoitus oli varmistaa, että magnesiumhydroksidi on yksi vaihtoehto jätevedenpuhdistukseen alkaloivaksi kemikaaliksi. Tuloksien perusteella

magnesiumhydroksidi tarjoaa jätevedenpuhdistamolle tasaisemman ja riittävämmän alkaliteetin verrattuna soodaan. Magnesiumhydroksidia on turvallista käsitellä, mikä vähentää jätevedenpuhdistamolla kemikaalien tuomaa turvallisuusriskiä.

Koeajon loppuessa jätevedenpuhdistamolla seurattiin vielä muutama päivä, että prosessi palaa normaaliksi. Tarkoituksena oli tarkkailla, miten magnesiumhydroksidin syöttö voisi vielä näkyä tuloksissa ja miten prosessi palautuu takaisin soodan käyttöön. Koeajon suurimpana ongelmana oli pitkä syöttölinja. Koeajolaitteistoa ei saatu lähemmäs syöttöpistettä, minkä seurauksena magnesiumhydroksidin kuiva-aine aiheutti tukkeutumia koeajolaitteistoon.

Magnesiumhydroksidin satunnainen ongelma on putkien tukkeutuminen. Koeajon tuotteessa oli kuiva-ainetta noin 53 %, joka kerääntyy ajan kuluessa syöttöputken mutkiin, taitoksiin ja pitkiin syöttölinjoihin. Putkien tukkeutumista voidaan estää pitämällä virtaukset korkeina sekä huuhtelemalla putket säännöllisesti ja sijoittaa koeajolaitteisto mahdollisimman lähelle syöttöpaikkaa. Koeajolaitteiston kaukaisen sijainnin vuoksi koeajo ei mennyt suunnitellusti ja koeajolaitteisto ei toiminut suunnitellusti.

Tuloksista on huomattavissa, että magnesiumhydroksidi toimi erinomaisesti korvaavana alkalointikemikaalina, vaikka syöttöhäiriöitä oli reilusti. Magnesiumhydroksidi toi prosessiin tasaisuutta ja varmuutta. Ennen koeajoa satunnaisissa pH-mittauksissa havaittiin, että pH-arvo laski joissakin prosessin vaiheissa alle 6:n. Magnesiumhydroksidin avulla saatiin alhaiset pH-arvot nostettua hillitysti korkeammalle ja nitrifikaatioon riitti alkaliteettia enemmän. Alkaliteetti magnesiumhydroksidilla oli tasaisempi ja prosessin toimivuus varmempaa.

Prosessin toimivuuden kannalta kuitenkin tulee magnesiumhydroksidi syöttää jätevedenpuhdistamon prosessiin jatkuvana syöttönä. Jatkuvan syötön etuna on se, että kemikaali pääsee mukaan prosessin jokaiseen vaiheeseen, jolloin pH-arvon heittelyt eivät aiheuta biologiselle prosessille haasteita tai heikennä puhdistustuloksia. Magnesiumhydroksidin syötön aloittamisessa tulee huomioida kemikaalin hidas liukeneminen ja syöttömäärä, jotta kemikaalia ei annostella liikaa. Liiallinen annostelu nostaa pH-arvon 9:ään, vaikka hetkellinen ylisyöttö ei aiheuta prosessiin suuria ongelmia,

tulee kemikaalin syöttö optimoida prosessin tasapainon ja kemikaalin riittävyyden vuoksi. Magnesiumhydroksidin syötön aloittamisessa tulee tarkkailla kemikaalin riittävyyttä prosessissa, jolloin tarvittaessa voidaan säätää annostusta.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykseen: edellyttääkö magnesiumhydroksidin käyttöönotto muutoksia prosessiin? Voitiin todeta koeajon jälkeen, että jätevedenpuhdistamon prosessiin ei tarvitse tehdä muutoksia. Jätevedenpuhdistamon toiminnan tulee kuitenkin perustua biologis-kemialliseen puhdistukseen ja kemikaalin syöttö tulee aloittaa vähäisin määrin – yhteistyössä kemikaalin toimittajan kanssa.

Ennen alkalointikemikaalin vaihtoa tulee varmistaa, että saostuskemikaali toimii magnesiumhydroksidista huolimatta. Tämän opinnäytetyön analyysien perusteella voidaan todeta, että magnesiumhydroksidi ei aiheuta ferrosulfaatin toiminnalle haasteita liukoisen fosforin saostamisessa kyseisellä Kokemäen jätevedenpuhdistamolla. Opinnäytetyön tuloksien perusteella ei voida sanoa, että magnesiumhydroksidi toimisi muiden saostuskemikaalien kanssa.

Analyysejä tulisi myös laajentaa, jolloin varmuutta saataisiin siihen, että auttaako magnesiumhydroksidi nitrifikaation toimintaan merkittävästi. pH-mittauksista huomattiin koeajon aikana, että pH-arvo pysyi prosessin nitrifikaatioalueilla tasaisempana, sillä pH-arvo ei enää laskenut alle 6:n. Nitrifikaatio kuluttaa prosessista alkaliteettia, jonka seurauksena pH-arvo laskee (Rantanen ym., 1999, s. 11). Koeajon aikana todettiin, että magnesiumhydroksidi tarjoaa prosessille pitkäkestoisemman alkaliteetin, jolloin nitrifikaation toiminta ei häiriinny pH-muutoksista. Tuloksista ei voida kuitenkaan sanoa, että kuinka paljon nitrifikaatio parantui, koska prosessin laajempaa tarkastelua ei ollut mahdollista tehdä. Nitrifikaation toiminta tehostui koeajon aikana, mutta siihen vaikuttavia tekijöitä oli myös vesien lämpeneminen ja virtauksien vähäisyys. Lämpimät vedet edesauttavat bakteerien toimintaa, jolloin typenpoisto tehostuu. Nitrifikaatiotehot ovat parhaimmillaan kesäisin, joten lisää tutkimusta tulisi tehdä erilaisissa vesien lämpötiloissa ja suurille virtauksille.

Opinnäytetyön kokeellinen osuus suoritettiin kesällä, joten talviaikana annostelua kemikaalilla ei ole ollut. Tutkimusta tulisi jatkaa talviolosuhteissa, jolloin saataisiin varmistus magnesiumhydroksidin toimivuudesta ympärivuotisessa käytössä. Opinnäytetyö oli kokonaisuudessaan hyvin opettavainen ja haasteellinen. Koeajoon vaikutti opinnäytetyön tekijän lähtötason tietämys jätevedenpuhdistuksesta. Koeajon edetessä tieto, taito ja kokemus lisääntyivät prosessin kulusta sekä hallinnasta. Tulevaisuudessa koeajoja tehdessä tulisi ensin selvittää jätevedenpuhdistamon prosessi kokonaisuudessaan ja varmistaa, että koeajolaitteistot ovat riittävän lähellä kemikaalin syöttöpistettä. Koeajon aikana tehdyt prosessinmuutokset heijastuivat tuloksiin tuottaen erilaisia virhelähteitä. Muutoksia tulisikin tehdä prosessiin vähän kerrallaan, jolloin saataisiin tietää syy-seuraussuhde. Koeajoa olisi pitänyt jatkaa vielä vuoden verran, jolloin tuloksille olisi saatu varmistusta ja osa virhelähteistä olisi voitu sulkea pois.

Lähteet

Aatos, S., Sorjonen-Ward, P., Kontinen, A. & Kuivasaari, T. (2006*). Serpentiinin ja serpentiniitin hyötykäyttönäkymä.* Geologian tutkimuskeskus. Kuopio. [Arkistoraportti]. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/m10_1_2006_3.pdf

Alavakeri, M., Latvanen, H. & Pääkkönen, J. (2002). *Ferrosulfaatin käyttöopas.* Kemira.

Carl Roth. (2015). *Käyttöturvallisuustiedote*. Natriumkarbonaatti. https://urly.fi/2ZbF

Etelä-Suomen aluehallintovirasto. (2011). *Ympäristölupapäätös (ESAVI/213/04.08/2011)*. Kokemäen kaupunki/Kokemäen vesihuolto Oy. https://docplayer.fi/56977434-Kokemaen-kaupunki-kokemaen-vesihuolto-oy-tulkkilantie-kokemaki.html

Balmér, P., Nordstrøm, B., Rantala, P. & Thorsen, E. (1982). *Jätevedenpuhdistamon käytön ohjaus ja valvonta.* (J. Puolanne, P. Rantala & M. Valve, käänt.). Norsforsk. (Alkuperäisteos julkaistu 1979)

Berner Chemicals. (n.d.). *Magnesiumhydroksidin etuja.* Haettu 19.12.2022 osoitteesta https://bernerchemicals.fi/magnesiumhydroksidin-etuja/

ECHA. (n.d.). *REACH - asetus tutuksi.* https://echa.europa.eu/fi/regulations/reach/understanding-reach

Euroopan komissio. (2006). *Epäorgaanisten peruskemikaalien valmistus - kiinteät ja muut.* [Vertailuasiakirja]. https://urly.fi/2Zlt

Eurostat. (2017). *Glossary:Carbon dioxide equivalent*. Statistics Explained. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent

Gibson, A. & Maniocha, M. (2015). *The use of magnesium hydroxide slurry for biological treatment of municipal and industrial wastewater.* Martin Marietta Magnesia Specialties. https://monsonco.com/wp-content/uploads/2019/06/Flo-Mag-Slurry-for-Treatment-of-Wastewater-010215.pdf

Hakala, I., Myllymäki, J. & Saarinen, R. (n.d.). *Rihmaopas*. Käsikirja rihmamaisten bakteerien tunnistamiseksi ja niiden aiheuttamien ongelmien torjumiseksi. https://www.vvy.fi/site/assets/files/1396/rihmaopas_muokattu.pdf

Hanein, T., Simoni, M., Woo, C. L., Provis, J.L., & Kinoshita, H. (2021). Decarbonisation of calcium carbonate at atmospheric temperatures and pressures, with simultaneous

CO 2 capture, through production of sodium carbonate. *Energy & Environmental Science.* https://doi.org/10.1039/D1EE02637B

Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J.L. & Arvin, E. (2002). *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes.* Berlin: Springer.

Huoltovarmuusorganisaatio. (2020). *Kemiallisen saostuksen huoltovarmuuden parantaminen Suomen vesihuollossa*. https://www.vvy.fi/site/assets/files/3226/kemiallisen_saostuksen_huoltovarmuuden_parantaminen.pdf

Jenkins, D., Richard, M.G., & Daigger, G.T. (2003). *Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking, Foaming, and Other Solids Separation Problems* (3rd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780203503157

Karttunen, E. (2004). *RIL 124 - 2 Vesihuolto II.* Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Karttunen, E. (2009). *RIL 124 - 2 Vesihuolto I.* Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Kemmer, N.F. (1988). *The NALCO Water Handbook* (2 p.). R. R. Donnelley & Sons Company.

Kokemäen Vesihuolto. (2020). *Toimintakertomus vuodelta 2020.* https://www.kokemaenvesihuolto.fi/site/assets/files/1742/toimintakertomus_2020.pdf

Kokemäen Vesihuolto. (n.d.). *Jätevedenpuhdistus*. Haettu 27.10.2022 osoitteesta https://www.kokemaenvesihuolto.fi/viemari/jatevedenpuhdistus/

Lema, J.M. & Suarez, S. (2017). *Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies.* Impacts of Energy, Economy and Environment. IWA Publishing (toim.). (ss. 3–5) https://urly.fi/2Xa3

Laitinen, J., Nieminen, J., Saarinen, R. & Toivikko, S. (2014). *Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT), Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamot.* Suomen Ympäristökeskus. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/43199/SY_3_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Liu, D. H. F. & Lipták, B. G. (2000). *Wastewater treatment.* CRC Taylor & Francis Group. Bouis, P. A. Special Consultant. (ss. 1, 5). https://urly.fi/2Xa7

Luong, V. T., Amal, R., Scott, J. A., Ehrenberger, S. & Tran, T. (2018). A comparison of carbon footprints of magnesium oxide and magnesium hydroxide produced from conventional processes. *Journal of Cleaner Production, 202, s. 1044*. https://urly.fi/2Xab

Opetushallitus, (n.d.). *Veden alkaliteetin ja asiditeetin määritys potentiometrisesti.* Laboratorioanalyysit. http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/ymparistoanalyysit_veden_alkaliteetti_ja_asiditeetti.html

Oravainen, R. (1999). *Opasvihko vesistötulosten tulkitsemiseksi havaintoesimerkein varustettuna*. Kokemäenjoen vesistönsuojeluyhdistys ry, KVVY. https://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf

Pelto-Huikko, A. & Vieno, N. (2009). *Tietopaketti jätevedestä, sen puhdistuksesta ja ympäristövaikutuksista Suomessa.* Vesikoulu. Vesi-Instituutti WANDER/Prizztech Oy. https://www.vesikoulu.fi/assets/docs/vesikoulu_tietopaketti_jatevedesta.pdf

Rantanen, P., Aurola, A-M., Hakkila, K., Hernesmaa, A., Jørgensen, K., Laukkanen, R., Melasniemi, H., Meriluoto, J., Nikander, S., Pelkonen, M., Renko, E., Valve, M. & Pauli, A. (1999). *Biologisen fosforin - ja typenpoiston tehokkuus, prosessinohjaus ja mikrobiologia.* Suomen ympäristökeskus. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40575/SY_318.pdf?sequence=1

Shand, M. A. (2006). *The Chemistry and Technology og Magnesia.* Wiley.

Sonune, A. & Ghate, R. (2004). *Developments in wastewater treatment methods.* Desalination, 167, s 62. https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.113

Suomen Vesiensuojeluyhdistys Liitto ry. (n.d.). *Jäteveden ympäristövaikutukset*. https://vesiensuojelu.fi/jatevesi/etusivu/jateveden-ymparisto-vaikutukset/#Jatevedetuhka

Tilastokeskus. (n.d.-a). *Käsitteet*. https://www.stat.fi/meta/kas/index.html

Tilastokeskus. (n.d.-b). *Kuntien avainluvut*. https://www.stat.fi/tup/alue/kuntienavainluvut.html#?active1=271&active2=SSS&year=2020

Työterveyslaitos. (2021). *Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet: Ferrosulfaatti*. https://www.ttl.fi/ova/ferrosulfaatti.html

Valtioneuvoston asetus yhdyskuntajätevesistä (888/2006). https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2006/20060888

Vilpanen, M., Herttuainen, J., Sahlstedt, K., Nieminen, S., Nurmesniemi, E-T., Arvas, J., Seppälä, P. & Aurola, A-M. (2022). *Suunnitteluohjeet kemiallisen saostuksen toimintavarmuuden parantamiseksi vesihuollossa.* Vesilaitosyhdistyksen monistesarja

nro 74, Helsinki. https://www.vvy.fi/site/assets/files/6395/saostuksen_suunnitteluohjeet_28012022.pdf

Virtanen, L. (2022). *Kokemäen kaupungin jätevedenpuhdistamon käyttö- ja päästötarkkailun vuosiyhteenveto 2021.* KVVY.

Ympäristöministeriö. (2021). *Vapaaehtoisella sopimuksella kohti yhä tehokkaampaa jätevedenpuhdistusta*. Haettu 7.11.2022 osoitteesta https://ym.fi/-/vapaaehtoisella-sopimuksella-kohti-yha-tehokkaampaa-jatevedenpuhdistusta

Ympäristöministeriö. (n.d.). *Mitä on kestävä kehitys?* Haettu 7.11.2022 osoitteesta https://ym.fi/mita-on-kestava-kehitys

Ympäristösuojelulaki 527/2014. https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2014/20140527

Ympäristötiedon foorumi. (2016). Kestävä kemia - mahdollisuudet vihreään kasvuun. http://www.ymparistotiedonfoorumi.fi/wpcontent/uploads/2015/02/YTF_4_2016.pdf

Liite 1: Koeajo- ja näytteenottosuunnitelma, Kokemäki

Analyysi:	Missä?	Miten?	Tavoite:	Viikko 1.	Viikko 2.	Viikko 3.	Viikko 4.	Mistä?
Alkaliteetti	Laboratoriossa	Titraus (0,1M suolahappo)	Tavoitteena lähtevässä vedessä 1–2 mmol/l	1 krt/vrk	1 krt/vrk	1 krt/vrk	1 krt/vrk	Saapuva, lähtevä, allas 1. alku, allas 1. loppu, allas 3. loppu (näytepisteet Y)
Liukoinen Fosfori (PO4-P)	Jätevedenpuhdistamolla	Colorimetri DR 890 HACH	Alle 0,1 mg/l (lähtevä vesi)	2 krt/vrk	2 krt/vrk	2 krt/vrk	2 krt/vrk	Näytepisteet X
(NH4-N) Ammoniumtyppi	Jätevedenpuhdistamolla	Colorimetri DR 890 HACH	0 mg/l (lähtevä vesi)	1 krt/vrk	1 krt/vrk	1 krt/vrk	1 krt/vrk	Lähtevä vesi
pH-mittaus	Jätevedenpuhdistamolla/ laboratoriossa	Reaaliaikaisen pH-mittarin seuranta, käsimittareilla seurantaa prosessin eri vaiheista	Tavoitteena lähtevässä vedessä 6–7	1–4 krt/vrk	1–4 krt/vrk	1–2 krt/vrk	1–2 krt/vrk	Lähtevä vesi, prosessin eri vaiheet sekä alkaliteetti näytteet

***Näytteenottoja voidaan vähentää, jos muutoksia ei näy jätevedessä esim. 1krt/vrk.**

Muuta seurattavaa:

Lähtevä vesi: sameus ja väri (visuaalinen tarkastelu)

Virtausmäärät vuorokaudessa ja lietteen muutokset (visuaalinen tarkastelu)

Kemikaalinsyöttömäärä vuorokaudessa: soodan ja magnesiumhydroksidin kulutus vuorokaudessa

Jätevedenpuhdistamolla käytettävät kemikaalit:

Ferrosulfaatti

Polymeeri FlocStar 2243P

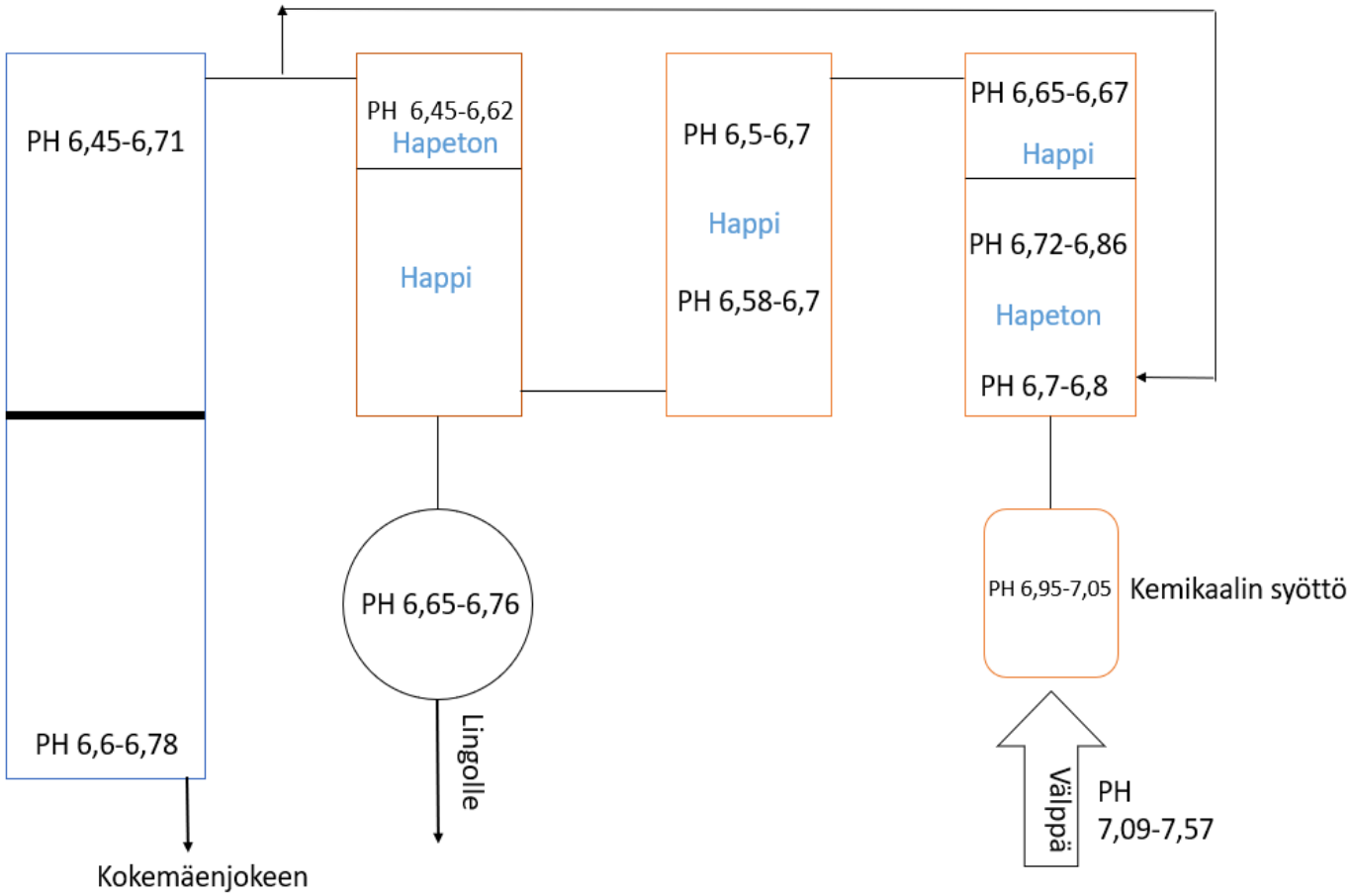
Sooda ja/tai magnesiumhydroksidi

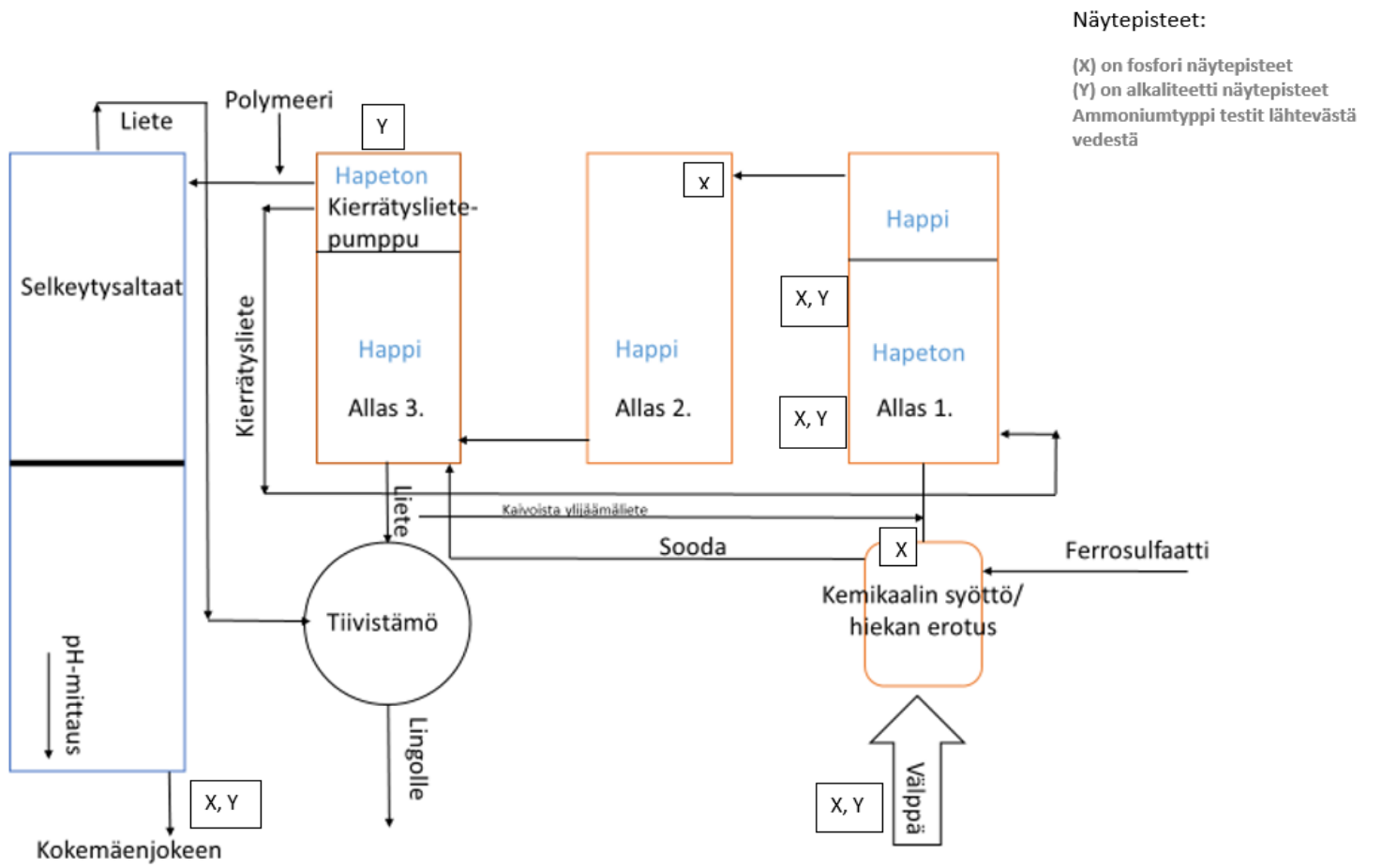
Koeajon aloitus ja huomioita

Aloitettaessa koeajo, soodan syötön lisäksi aletaan altaisiin syöttämään magnesiumhydroksidia alkaloivana kemikaalina pH:n säätöön. Koeajon kesto on 3–4 viikkoa. Soodan syöttö pidetään päällä magnesiumhydroksidi koeajon aikana, jolloin järjestelmä saa soodalla korjata pH:ta, jos koeajolaitteistossa ilmenee ongelmia. Magnesiumhydroksidin käyttö aloitetaan laitoksella vähäisellä määrällä, jotta muutokset ovat paremmin hallittavissa. Magnesiumhydroksidin tuomia muutoksia seurataan prosessissa päivittäisillä testeillä (ks. liite 1/1). Näytteenottoja tulee lisätä, jos prosessi häiriintyy tai prosessissa tapahtuu äkillisiä muutoksia.

Äkillisten häiriöiden tai ongelmien ilmaantuessa, lopetetaan magnesiumhydroksidin syöttö, kunnes häiriön tai ongelman syy löytyy ja koeajo on jatkettavissa. Laitoksella tehtävistä muutoksista informoidaan koeajoon osallistuvia henkilöitä. Koeajon aikana suoritetut mittaukset, muutokset ja niiden tulokset kirjataan yhteiseen vihkoon, jolloin tulokset ovat samassa paikassa ja muutoksien ennakoiminen vaivattomampaa.

pH-arvot ja prosessin kuvaus on suuntaa antava.





Näytepisteitä lisättiin, jos prosessissa tapahtui yllättäviä muutoksia. Prosessin kuvaus on tehty suurin piirteisesti, jonka tarkoituksena oli hahmottaa näytepisteet ja jätevedenkulkua puhdistamolla.

Analyysien ohjeita sekä arvoja koeajoa edeltävistä mittauksista

Saapuva vesi/välppä	Fosforimittauksissa näyte laimennetaan 1:10, koska fosforipitoisuudet ovat hyvin korkeita ja mittaus alue on 2,50 mg/l. Fosfori pitoisuudet ovat olleet ennen magnesiumhydroksidia keskiarvolta ± 4,95 mg/l. Näyte tulee suodattaa 2µm paperilla, jonka jälkeen 1,2 µm filtterisuodattimella ennen laimennosta.
Kemikaalin syöttö allas/hiekan erotus	Näytteenotto tapahtuu kemikaalin syöttö altaan lopusta. Näyte tulee suodattaa 2µm paperilla, jonka jälkeen 1,2 µm filtterisuodattimella. Näyte tulee laimentaa 1:10, jos tulos ei osu mittausalueelle. Fosforimäärät ovat olleet keskiarvolta ± 0,48 mg/l.
Allas 1. alku (denitrifikaatio)	Näyte tulee suodattaa 2 µm paperilla. Fosforimäärät ovat olleet keskiarvolta ± 0,19 mg/l.
Allas 1. loppu (denitrifikaatio)	Näyte tulee suodattaa 2 µm paperilla. Fosforimäärät ovat olleet keskiarvolta ± 0,22 mg/l.
Allas 2. alku (nitrifikaatio)	Näyte tulee suodattaa 2 µm paperilla. Fosforimäärät ovat olleet keskiarvolta ± 0,13 mg/l.
Lähtevä vesi	Liukoinen fosfori pyritään pitämään alle 0,1 mg/l ja ammoniumtyppi 0 mg/l

Liite 2: Alkaliteetin ja liukoisen fosforin mittauksien tuloksia ennen ja jälkeen koeajon

Alkaliteetti Min - Max ajalta (29.6.2022 – 19.8.2022)

Mistä	Alkaliteetti (mmol/l)
Saapuva vesi	4,3–7,3
Allas 1. alku	3,5–11,2
Allas 1. loppu	2,5–16
Allas 3. loppu	2,5–4,9
Lähtevä vesi	0,8–1,45

Liukoinen fosfori ajalta (29.6.2022 – 19.8.2022)

Mistä	Keskiarvo (mg/l)
Saapuva	7,80
Kemikaalin syöttö/hiekan erotus	1,57
Allas 1. alku	0,21
Allas 1. loppu	0,25
Allas 2. alku	0,16
Allas 3. loppu	0,15
Lähtevä vesi	0,14

Koeajon jälkeen:

Alkaliteetti Min - Max ajalta (29.6.2022 – 19.8.2022)

Mistä	Alkaliteetti (mmol/l)
Saapuva vesi	4,3–7,3
Allas 1. alku	3,5–11,2
Allas 1. loppu	2,5–16
Allas 3. loppu	2,5–4,9
Lähtevä vesi	0,8–1,45

Liukoinen fosfori ajalta (29.6.2022 – 19.8.2022)

Mistä	Keskiarvo (mg/l)
Saapuva	7,80
Kemikaalin syöttö/hiekan erotus	1,57
Allas 1. alku	0,21
Allas 1. loppu	0,25
Allas 2. alku	0,16
Allas 3. loppu	0,15
Lähtevä vesi	0,14